



**Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) KAPASİTÖRÜN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK  
ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ**

**Önder GÜNGÖR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2024**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Önder GÜNGÖR

26/06/2024

# Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) KAPASİTÖRÜN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Önder GÜNGÖR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

## ÖZET

Metal-oksit-yarıiletken (MOS) temelli yapılar, elektronik cihazlarda MOS kapasitör, MOS alan etkili transistör ve MOS sensör gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kondansatörü hazırlanmış ve kapasitans (C) ve iletkenlik (G) içeren giriş ( $Y=G+i\omega C$ ) ölçümleri kullanılarak elektriksel ve dielektrik özellikleri analiz edilmiştir. Bu ölçümler 1 kHz ile 1 MHz arasındaki frekans aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Bu sonuç arayüz durumlarının frekans bağımlılığı ile ilgilidir. Kompleks dielektrik geçirgenliğin ( $\epsilon^*$ ), kompleks elektrik modülüsün ( $M^*$ ) ve kompleks empedansın ( $Z^*$ ) reel ve imajiner kısımlarının yanı sıra ac elektrik iletkenlik ( $\sigma_{ac}$ ) ölçülen C ve  $G/\omega$  verileri kullanılarak hesaplandı. Frekans arttıkça dielektrik sabitinin ( $\epsilon'$ ) ve dielektrik kaybın ( $\epsilon''$ ) azaldığı, ac iletkenliğin arttığı görüldü.  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$ 'nin frekansla değişimi polarizasyon mekanizmalarıyla açıklanabilir. Düşük frekanslarda  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$ 'nin yüksek değeri uzay yükü polarizasyonundan ileri gelmektedir. Daha yüksek frekanslarda yük taşıyıcılarının sıçramasının artması iletkenliğin artmasına katkıda bulunur. Ayrıca, elektriksel modülüs ve empedans frekansın fonksiyonu olarak elde edildi. Sonuç olarak, hazırlanan MOS kapasitörün elektrik yüklerini depolayan bir devre elemanı olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : MOS Kondansatör, kapasitans, iletkenlik, dielektrik geçirgenlik, elektrik modülüs, empedans

Sayfa Adedi : 67

Danışman : Prof. Dr. Adem TATAROĞLU

INVESTIGATION OF FREQUENCY-DEPENDENT ELECTRICAL AND DIELECTRIC  
PROPERTIES OF Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) CAPACITOR

(M. Sc. Thesis)

Önder GÜNGÖR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

The metal-oxide semiconductor (MOS)-based structures are used in applications such as MOS capacitor, MOS field-effect transistor and MOS sensor in electronic devices. In this study, the Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) capacitor was prepared and its electrical and dielectric characteristics were analyzed by using admittance ( $Y=G+i\omega C$ ) measurements, containing capacitance ( $C$ ) and conductance ( $G/\omega$ ). These measurements were performed in the frequency range between 1 kHz and 1 MHz and at room temperature. The value of  $C$  and  $G/\omega$  of the MOS capacitor is decreased with increase in frequency. This result is related to the frequency dependence of interface states. The real and imaginary parts of complex dielectric permittivity ( $\epsilon^*$ ), complex electric modulus ( $M^*$ ) and complex impedance ( $Z^*$ ), and as well as ac electrical conductivity ( $\sigma_{ac}$ ) were calculated using the measured  $C$  and  $G/\omega$  data. It was seen that the dielectric constant ( $\epsilon'$ ) and dielectric loss ( $\epsilon''$ ) decreased with increasing frequency and the ac conductivity increased. Variation of  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  with frequency can be explained on the basis of polarization mechanisms. The high value of  $\epsilon'$  and  $\epsilon''$  at low frequencies comes from space charge polarization. Increased hopping of charge carriers at higher frequencies contributes to increase of conductivity. Besides, electrical modulus and impedance were obtained as functions of frequency. As a result, it has been seen that the prepared MOS capacitor can be used as a circuit element that stores electrical charges.

Science Code : 20227

Key Words : MOS capacitor, capacitance, conductance, dielectric permittivity, electric modulus, impedance.

Page Number : 67

Supervisor : Prof. Dr. Adem TATAROĞLU

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezimin yazım aşamasında beni yönlendiren, kıymetli zamanını ayırıp bana yardımcı olan, bilgi ve birikimiyle bana yol gösteren, akademik çalışmamda bana ilham veren ve samimiyetini benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Adem TATAROĞLU'na tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Ayrıca, bu süreçte maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

|                                                             | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET.....                                                   | iv    |
| ABSTRACT.....                                               | v     |
| TEŞEKKÜR.....                                               | vi    |
| İÇİNDEKİLER .....                                           | vii   |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                     | ix    |
| RESİMLERİN LİSTESİ.....                                     | xi    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                | xii   |
| 1. GİRİŞ.....                                               | 1     |
| 2. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR.....               | 5     |
| 2.1. İdeal MOS yapı.....                                    | 6     |
| 2.2. Gerçek MOS Yapı .....                                  | 11    |
| 2.3. Arayüzey Durum Yoğunluğunu Belirleme Metodları.....    | 15    |
| 2.3.1. Düşük frekans (LF) – yüksek frekans (HF) metodu..... | 15    |
| 3. DİELEKTRİKLER.....                                       | 19    |
| 3.1. Dielektrikli Paralel Plakalı Kapasitör.....            | 20    |
| 3.2. Kutuplanma ve kutuplanma mekanizmaları.....            | 24    |
| 3.2.1. Elektronik kutuplanma.....                           | 25    |
| 3.2.2. İyonik (Atomik) kutuplanma.....                      | 26    |
| 3.2.3. Yönelimli kutuplanma.....                            | 27    |
| 3.2.4. Arayüzeyssel (uzay yük) kutuplanması.....            | 27    |
| 3.3. Dielektrik Malzemeler.....                             | 28    |
| 3.4. Dielektrik Özellikler.....                             | 30    |

**Sayfa**

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. DENEYSEL YÖNTEM.....                                                          | 35 |
| 4.1. Kalay Oksit ( $\text{SnO}_2$ ) Özellikleri.....                             | 35 |
| 4.2. İndiyum Fosfat ( $\text{InP}$ ) Özellikleri.....                            | 36 |
| 4.3. $\text{Au/SnO}_2/\text{p-InP}$ (MOS) Kapasitörün Hazırlanması.....          | 36 |
| 4.3.1. Kristal temizleme.....                                                    | 36 |
| 4.3.2. $\text{InP}$ üzerine $\text{SnO}_2$ tabakasının oluşturulması.....        | 37 |
| 4.3.3. Omik ve doğrultucu kontakın oluşturulması.....                            | 38 |
| 4.4. Deneysel Ölçüm Sistemleri.....                                              | 40 |
| 5. DENEYSEL SONUÇLAR.....                                                        | 41 |
| 5.1. Kapasitans/İletkenlik-Gerilim-Frekans Karakteristikleri.....                | 41 |
| 5.2. Seri direnç ( $R_s$ ).....                                                  | 44 |
| 5.3. Arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ ).....                                  | 47 |
| 5.4. Frekansa bağlı Dielektrik Parametreler, İletkenlik ve Elektrik Modülüs..... | 48 |
| 5.4.1. Dielektrik geçirgenlik.....                                               | 48 |
| 5.4.2. Elektriksel iletkenlik.....                                               | 52 |
| 5.4.3. Elektrik modülüs.....                                                     | 53 |
| 5.4.4. Empedans Analizi.....                                                     | 55 |
| 6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....                                                        | 57 |
| KAYNAKLAR.....                                                                   | 61 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                    | 69 |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                       | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. MOS yapının şematik diyagramı.....                                                               | 6     |
| Şekil 2.2. $V_G=0$ durumunda p-tipi ideal MOS yapının enerji-bant diyagramı.....                            | 7     |
| Şekil 2.3. MOS yapının eşdeğer devre modeli.....                                                            | 8     |
| Şekil 2.4. n-tipi ideal MOS yapıda; yığılım, tükenim ve tersinim durumlarının Enerji-bant diyagramları..... | 9     |
| Şekil 2.5. Gerçek MOS yapıdaki yükler.....                                                                  | 11    |
| Şekil 2.6. Hareketli iyonik yükleri içeren C-V eğrisi.....                                                  | 12    |
| Şekil 2.7. Oksit/yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumlarının dağılımı.....                               | 13    |
| Şekil 2.8. Hem verici hem de alıcı durumları içeren arayüzey durumları.....                                 | 14    |
| Şekil 2.9. Arayüzey durumları gösteren eşdeğer devreler.....                                                | 15    |
| Şekil 2.10. Seri direnç etkisini içeren eşdeğer devreler (a) düşük frekans<br>(b) yüksek frekans.....       | 16    |
| Şekil 2.11. p-tipi MOS kapasitörün yüksek ve düşük frekans eğrileri.....                                    | 17    |
| Şekil 3.1. Dielektrikli kapasitör.....                                                                      | 21    |
| Şekil 3.2. Dielektrik kutuplanma.....                                                                       | 22    |
| Şekil 3.3. Dielektriklerdeki polarizasyon mekanizmaları.....                                                | 25    |
| Şekil 3.4. Elektronik kutuplanma.....                                                                       | 26    |
| Şekil 3.5. İyonik (Atomik) kutuplanma.....                                                                  | 26    |
| Şekil 3.6. Yönelimli kutuplanma.....                                                                        | 27    |
| Şekil 3.7. Arayüzeyssel kutuplanma.....                                                                     | 28    |
| Şekil 3.8. Dielektrik malzeme içeren paralel plakalı kapasitörünün eşdeğer devresi.....                     | 30    |
| Şekil 3.9. Dielektrik sabitinin ve dielektrik kaybın açısıl frekansa bağlı değişim grafiği.....             | 32    |
| Şekil 3.10. Akım-voltaj eğrisi.....                                                                         | 32    |

| Şekil                                                                                                                              | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.1. Kalay oksitin kristal yapısı.....                                                                                       | 35    |
| Şekil 4.2. Tetrahedral kristal yapısı.....                                                                                         | 36    |
| Şekil 4.3. Au/SnO <sub>2</sub> /p-InP/Au (MOS) kapasitörün şematik gösterimi.....                                                  | 39    |
| Şekil 5.1. Farklı frekanslarda uygulanan öngerilimin fonksiyonu olarak MOS kapasitörün (a) C-V ve (b) G/ω-V eğrileri.....          | 42    |
| Şekil 5.2. MOS kapasitörün farklı doğru öngerilimler için frekansın bir fonksiyonu olarak (a) C-logf ve (b) G/ω-logf eğrileri..... | 43    |
| Şekil 5.3 Au/SnO <sub>2</sub> /p-InP (MOS) kapasitörün (a) R <sub>s</sub> -V (b) R <sub>s</sub> -logf eğrileri.....                | 46    |
| Şekil 5.4. Au/SnO <sub>2</sub> /p-InP (MOS) kapasitörün N <sub>ss</sub> -V grafiği.....                                            | 48    |
| Şekil 5.5. Au/SnO <sub>2</sub> /p-InP (MOS) kapasitörün (a) ε'-logf (b) ε''-logf (c) tanδ-logf eğrileri.....                       | 50    |
| Şekil 5.6 MOS kapasitörün σ <sub>ac</sub> -logf eğrileri.....                                                                      | 53    |
| Şekil 5.7 (a) M'-logf (b) M''-logf eğrileri.....                                                                                   | 54    |
| Şekil 5.8. MOS kapasitörün frekansa bağlı (a) Z'- logf eğrisi (b) Z''- logf eğrisi.....                                            | 56    |

**RESİMLERİN LİSTESİ**

| <b>Resim</b>                                 | <b>Sayfa</b> |
|----------------------------------------------|--------------|
| Resim 4.1. Püskürtme sistemi.....            | 38           |
| Resim 4.2. Termal buharlaştırma sistemi..... | 39           |
| Resim 4.3. Empedans Analizörü.....           | 40           |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

|                 |                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| $\text{\AA}$    | Angstrom                                      |
| $\epsilon_{ox}$ | Oksit tabakanın dielektrik sabiti             |
| $\epsilon_0$    | Boşluğun dielektrik geçirgenliği              |
| $\epsilon^*$    | Kompleks dielektrik geçirgenlik               |
| $\epsilon'$     | Dielektrik sabiti                             |
| $\epsilon''$    | Dielektrik kayıp                              |
| $\epsilon_s$    | Yarıiletkenin dielektrik sabiti               |
| $\tan\delta$    | Dielektrik kayıp tanjantı                     |
| $\sigma_p$      | Kutuplanma yük yoğunluğu                      |
| $\Phi_s$        | Yarıiletkenin iş fonksiyonu                   |
| $\Phi_m$        | Metalin iş fonksiyonu                         |
| $\Phi_{ms}$     | Metal-yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu    |
| $\Psi_s$        | Yüzey potansiyeli                             |
| $\sigma_{ac}$   | Altenatif akım elektriksel iletkenlik         |
| $\tau_{it}$     | Arayüzey durum zaman sabiti                   |
| $C$             | Kapasitans                                    |
| $C_m$           | Ölçülen kapasitans                            |
| $C_{ma}$        | Yığılım bölgesinde ölçülen kapasitans         |
| $C_0$           | Plakaları arası boş kondansatörün kapasitansı |
| $C_{ox}$        | Oksit tabakanın kapasitansı                   |
| $C_{sc}$        | Uzay yük kapasitansı                          |
| $C_D$           | Tükenim bölge kapasitansı                     |
| $C_p$           | Paralel iletkenlik                            |
| $C_{LF}$        | Düşük frekans kapasitansı                     |
| $C_{HF}$        | Yüksek frekans kapasitansı                    |
| $d_{ox}$        | Oksit tabaka kalınlığı                        |
| $D_{it}$        | Arayüzey durum yoğunluğu                      |

**Simgeler****Açıklamalar**

|          |                                                  |
|----------|--------------------------------------------------|
| $E$      | Elektrik alan                                    |
| $E_a$    | Aktivasyon enerjisi                              |
| $E_o$    | Plakaları arası boş kondansatörün elektrik alanı |
| $E_c$    | Yarıletkenin iletim bandı enerji seviyesi        |
| $E_F$    | Fermi enerji seviyesi                            |
| $E_g$    | Yasak enerji aralığı                             |
| $E_i$    | Saf enerji seviyesi                              |
| $E_p$    | Kutuplanma yük yoğunluğuna bağlı elektrik alan   |
| $E_v$    | Yarıiletkenin valans bandı enerji seviyesi       |
| $G$      | Kondüktans/İletkenlik                            |
| $G_{ma}$ | Ölçülen iletkenlik                               |
| $I$      | Akım                                             |
| $J$      | Akım yoğunluğu                                   |
| $M^*$    | Kompleks elektrik modülü                         |
| $M'$     | Modülüsün reel kısmı                             |
| $M''$    | Modülüsün sanal kısmı                            |
| $N_{ss}$ | Arayüzey durum yoğunluğu                         |
| $P$      | Dielektrik kutuplanma yoğunluğu                  |
| $Q$      | Kondansatörde depolanan yük miktarı              |
| $Q_{it}$ | Arayüzey tuzak yük yoğunluğu                     |
| $R_s$    | Seri direnç                                      |
| $V_{ox}$ | Oksit üzerindeki potansiyel                      |
| $V_{FB}$ | Düz bant voltaj kayması                          |
| $V_G$    | Giriş gerilimi                                   |
| $W_d$    | Tükenim tabaka genişliği                         |
| $\chi_e$ | Elektriksel duyguluk                             |
| $X_i$    | Oksidin elektron ilgisini                        |
| $Y$      | Admitans                                         |
| $Z'$     | Empedansın reel kısmı                            |
| $Z''$    | Empedansın sanal kısmı                           |

**Kısaltmalar****Açıklamalar****AC**

Alternatif akım

**C-V**

Kapasitans-gerilim

**DC**

Doğru akım

**FET**

Alan etkili transistör

 **$G/\omega$ -V**

İletkenlik-gerilim

**MIM**

Metal-Yalıtkan-Metal

**MIS**

Metal-Yalıtkan-Yarıiletken

**MOM**

Metal-Oksit-Metal

**MOS**

Metal-Oksit-Yarıiletken

**MOSFET**

Metal-Oksit-Yarıiletken Alan Etkili Transistör

**MS**

Metal-Yarıiletken

**RF**

Radyo frekansı

## 1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, ne iyi iletken ne de yalıtkan olmayan ancak kristal yapıya sahip olan ve oda sıcaklığında çok az serbest elektron içeren katı maddelerdir. Karbon (C), germanyum (Ge) ve silikon (Si) saf yarıiletken elementlerdir. Elektronik uygulamalarda en çok kullanılan yarıiletken malzemeler silikon, germanyum ve galyum arsenittir [1-4]. Saf bir yarıiletkenin iletkenliğini, sıcaklığını yükselterek veya katkılayarak arttırabiliriz. Katkılama (doping), en dıştaki üç (üç değerlikli) veya beş (beş değerlikli) elektrona sahip atomların eklenmesiyle bir örgüye "safsızlıkların" eklenmesini içerir. Bir yarıiletkene yabancı madde ekleme işlemine katkılama denir. Safsızlık durumuna bağlı olarak yük taşıyıcıları olarak serbest elektronlar veya deşikler oluşturulur. Bu taşıyıcılar malzemenin iletkenliğini arttırır. Daha fazla safsızlık eklendiğinde iletkenliği daha da artıran ve direnci azaltan daha fazla yük taşıyıcısı oluşturulur. Dolayısıyla katkılama yarıiletkenin iletkenliğini artırırken direncini de azaltır.

Diyotlar, alan etkili transistörler (FET'ler), metal/oksit/yarıiletken (MOS) alan etkili transistörler (MOSFET'ler),hatta ışık yayan diyotlar (LED'ler), lazerler, güneş pilleri ve fotodetektörler gibi optoelektronik cihazlar dahil tüm elektronik cihazların performansı cihaz malzemesi içindeki yük taşınmasına bağlıdır. Yarıiletkenlerdeki yük taşıyıcıları sırasıyla iletim bandında ve valans bandında bulunan elektronlar ve deşiklerdir [1-6]. Bu yük taşıyıcılarının cihaz aracılığıyla elektriği ilettiği mekanizma, yük aktarımı veya taşınması olarak bilinir.

Yarıiletken aygıt teknolojisinde kullanılan metal-yarıiletken (MS) kontaklar; diyotlar, güneş pilleri, kondansatörler, transistörler, laser, foto diyotlar, yarıiletken fotodetektörler gibi birçok yarıiletken cihazların yapısındaki en önemli bileşendir. Metal ve yarıiletken madde kontak yapıldığında, meydana gelen bu sistem metal-yarıiletken kontak olarak adlandırılır [1,7,8]. Metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonuna göre kontaklar, omik kontak ve doğrultucu kontak (Schottky kontağı ya da Schottky diyot) adını alır.

Yarıiletken cihazların çoğunda bulunan metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapısı elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1,9-11]. MOS yapı yarıiletkenden bir dielektrik yalıtkanla ayrılmış bir metal kontaklı oluşur. Bu üç katman, paralel plakalı bir

kapasitör oluşturur. Genellikle, yarıiletkenle omik bir kontak oluşturmak için arka tarafta da bir metal katman biriktirilir. Metal kapıyı alt tabakadan ayırmak için oksit yerine bir yalıtkan kullanılırsa, bu üç katmanlı yapıya, MOS benzeri yapılar için daha genel bir isim olan metal-yalıtkan-yarıiletken veya MIS adı verilebilir. İki plaka arasındaki dielektrikte depolanan kapasitansın sabit olduğu paralel plakalı kapasitörün aksine, MOS yapısının kapasitansı uygulanan voltaja bağlıdır. MOS kapasitör, MOS transistörünün bir parçasıdır. MOS transistör yaygın kullanılan yarıiletken cihazdır. Bir MOS transistörü, kapasitörün yanında iki PN bağlantı noktasına sahip bir MOS kapasitördür.

Yarıiletken-dielektrik arayüzeyinin elektriksel özellikleri cihazın güvenilirliğinde önemli bir rol oynar. Malzemelerin dielektrik özellikleri modern teknoloji için büyük önem taşımaktadır. Yalıtkan tabakanın sonsuz dirence sahip olduğunu ve metal ile yarıiletken arasına bir öngerilim voltajı uygulandığında dielektrik tabaka boyunca herhangi bir yük taşıyıcısı taşınmaz. Uygulanan voltaj, metalde ve yarıiletkenin arayüzey tabakasında yükleri ve zıt yükleri indükleyecektir. Bununla birlikte, uygulanan voltajı ile MOS kapasitörde, yarıiletkende indüklenen arayüzey yükünün türü (çoğunluk taşıyıcıları, azınlık taşıyıcıları ve tükenim yükü) kontrol edilebilir.

Dielektrik malzemeler mükemmel yalıtkanlardır. Dielektrikler, bir elektrik alanı uygulandığında polarize olan yalıtkanlardır. Tüm dielektrikler yalıtkanlar, ancak tüm yalıtkanlar dielektrik değildir. Yüklerin malzeme boyunca serbestçe hareket edebildiği metallerin aksine, dielektriklerde tüm yükler belirli atomlara ve moleküllere bağlıdır. Bu yüklere bağlı yükler denir. Ancak bu yükler bir atom veya molekül içinde yer değiştirebilir. Bir dielektrik malzemeye dış bir elektrik alanı uygulandığında malzeme polarize olur ve malzemede elektrik dipol momentleri oluşur. Başka bir deyişle, dielektriklerin içindeki elektrik alanları malzemeyi polarize eder, bu da malzemenin içindeki elektrik dipollerinin vektör toplamının artık sıfır olmadığı anlamına gelir. Dielektriklerin bu özelliğine polarizasyon denir [12-15]. Dielektrik polarizasyon, dışarıdan uygulanan bir elektrik alanı nedeniyle yalıtkan bir malzemede bir dipol momenti oluştuğunda meydana gelir. Temel olarak polarize edilebilirlik, tüm maddelerin yapı taşı olan moleküllerin hem pozitif yüklerden (çekirdekler) hem de negatif yüklerden (elektronlar) oluşmasının bir sonucudur. Bir elektrik alan bir moleküle etki ettiğinde, pozitif yükler alan boyunca yer değiştirirken, negatif yükler alanın tersi yönde yer değiştirir. Bu nedenle etki, zıt yükleri birbirinden ayırmak yani molekülü polarize etmektir. Elektrik alanının etkisi iki yönlü olabilir: 1.

Malzemede elektriksel dipolleri indükler ve bunları alan yönünde hizalamaya çalışır. Başka bir deyişle, elektrik alan ile birlikte malzemede alan olmadan var olmayan dipoller ortaya çıkar. 2. Malzemede zaten mevcut olan dipolleri hizalamaya çalışır. Başka bir deyişle malzeme, elektrik alan olmasa bile elektrik dipolleri içerir. Ayrıca her iki etkinin bir kombinasyonu olarakta, elektrik alan mevcut dipolleri hizalamaya çalışırken dağılımını değiştirebilir ve ek olarak yeni dipoller oluşturabilir.

ZnO, SnO<sub>2</sub>, NiO, ZrO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, WO<sub>3</sub>, CuO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub> vb. gibi metal oksitler, son zamanlarda optik, elektronik, optoelektronik ve biyolojik alanlar da temel malzeme olarak olağanüstü bir potansiyele sahiptir [16,17]. Oksijenin çoğu metal atomuyla güçlü, sıkı iyonik bağlar oluşturma eğiliminden dolayı çoğu oksit katı yalıtkandır. Ancak ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SnO<sub>2</sub> vb. gibi bazı metal oksitler ve Zn-Sn-O, In-Sn-O gibi karmaşık oksitler yarıiletken özelliğide göstermektedir. Kalay oksit/dioksit SnO<sub>2</sub> formülüne sahip inorganik bileşiktir. Kalay oksit, geniş bant aralığına sahip (300 K'da 3,6 eV), hem termal/kimyasal olarak oldukça stabil olan hem de oldukça aktif bir nanomateryal olarak ucuz bir şekilde üretilen n-tipi yarıiletken bir metal oksittir [18,19]. Kalay oksit ince filmleri yüksek elektrik iletkenliklerinden dolayı şeffaf iletken oksit grubunun en önemli materyallerinden biri olup elektronik uygulamalar için önemli bir yere sahiptir. Son yıllarda kalay oksit, radyo frekansı magnetron püskürtme, kimyasal buhar biriktirme, termal buharlaşma, hidrotermal, metal-organik kimyasal buhar biriktirme, atomik katman biriktirme sol-jel gibi yöntemler kullanılarak ince film olarak üretilmektedir. Kalay oksit, güneş pilleri, gaz sensörleri, sıvı kristal ekranlar gibi görüntüleme cihazlarındaki şeffaf elektrotlar, kızılötesi reflektörler, plazma ekran panelleri, oksit bazlı transistörler vb. gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, hazırlanan Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün elektriksel ve dielektrik karakteristikleri frekans ve voltaja bağlı olarak analiz edildi. Bu tez, altı bölümden meydana gelmektedir. Birinci bölümde, çalışmanın amacı ve konusu verildi. İkinci bölümde, metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapılar hakkında bilgi verildi. Üçüncü bölümde, dielektrikler hakkında bilgi verildi. Dördüncü bölümde, Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP yapının hazırlanması ve deneysel yöntem hakkında bilgi verildi. Beşinci bölümde, hem frekansa hem de voltaja bağlı elektriksel ölçümler, dielektrik karakteristikler ve elde edilen deneysel sonuçlar hakkında bilgi verildi. Altıncı bölümde ise, deneysel sonuçlar tartışılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

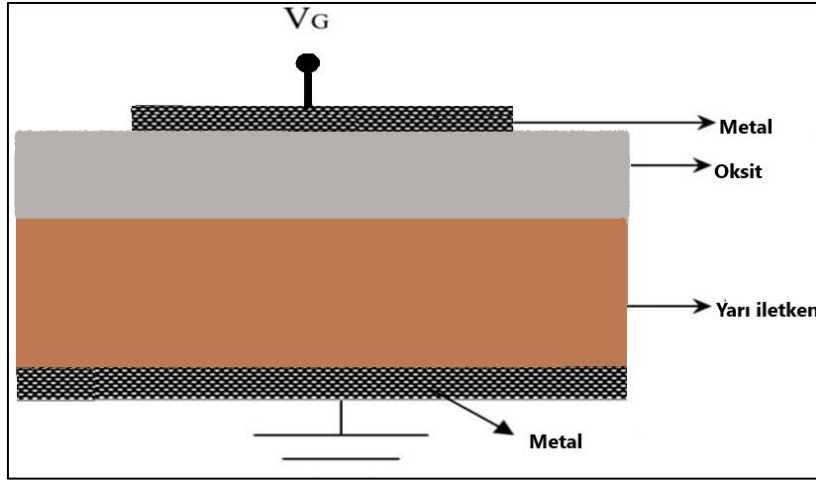


## 2. METAL-OKSİT-YARIİLETKEN (MOS) YAPILAR

Kapasitör (kondansatör), çok çeşitli endüstrilerde kullanılan elektronik bir bileşendir. Kapasitörler yaygın olarak enerji depolama, güç düzenleme, elektronik gürültü filtreleme, uzaktan algılama ve sinyal birleştirme veya ayırma için kullanılır. Ayrıca, kondansatör, entegre devre uygulamalarındaki temel bileşenlerden biridir. Bir kapasitör, eşit ve zıt yüklere sahip, bir dielektrik (yalıtkan) ile ayrılmış iki metal plakadan oluşur. Devre uygulamalarının farklı amaçlarını karşılamak ve farklı türde elektronik devreler oluşturmak için çeşitli tipte kapasitörler geliştirilmiştir. Günümüzde entegre devre uygulamalarında yaygın olarak metal-yalıtkan-metal (MIM) ve metal-oksit-metal (MOM), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitör kullanılmaktadır. MIM ve MOM kapasitör arasında, MIM kapasitör daha iyi bir kararlı kapasitans karakteristiğine sahiptir. Ancak, MIM ve MOM kapasitörlerinin kapasitans yoğunlukları MOS kapasitörlerden çok daha düşüktür. MIM ve MOM kapasitörler, radyo frekansı ayrıştırma ve analog karışık sinyal entegre devre uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu kapasitörler arasında MOS kapasitör, ince oksit yapısından dolayı en yüksek kapasitans yoğunluğuna sahiptir. MOS kapasitör, pozitif ve negatif plakalara karşılık gelen yarıiletken ve metal tabakaya ve dielektrik malzemeye karşılık gelen oksit tabakasına sahip paralel plakalı bir kapasitöre benzemektedir. Ayrıca, MOS) kapasitör, MOS transistörün (MOSFET) bir parçasıdır. MOS kapasitörler esasen kapasitör olarak kullanılan bir transistördür. Yani, kapı kapasitörün üst plakasıdır, kanal ve kaynak bağlantısı alt plakayı oluşturur ve kapıdaki ince oksit tabakası yalıtkan tabakadır [1,9-11,20,21].

MOS yapının şematik diyagramı Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekilde gösterilen alt metal kontak omik, üst metal kontak doğrultucu kontak olarak adlandırılan MS kontaklardır. Tek yönlü (doğru beslem) akım geçiren, diyota benzeyen bir I-V eğrisine sahip kontak, Schottky ya da doğrultucu kontak olarak adlandırılır. Her iki yönde de (ters ve doğru beslem) akım geçiren, doğrusal bir akım-gerilim eğrisine (I-V) sahip, küçük dirençli ve doğrultucu olmayan kontak, omik kontak olarak adlandırılır. Omik kontak, metalden yarıiletken ve tam tersi şekilde akım iletimi sağlar. P-tipi yarıiletken için, metalin iş fonksiyonu ( $\Phi_m$ ) yarıiletkenin iş fonksiyonundan ( $\Phi_s$ ) büyükse,  $\Phi_m > \Phi_s$ , bu durumda omik kontak oluşur.  $\Phi_s > \Phi_m$  durumunda ise doğrultucu kontak oluşur [1,7,22].

Metal plakaya uygulanan kapı gerilimi,  $V_G$ , oksit tabakası ve yarıiletken tükenim tabakası üzerine düşer. Metal üzerine uygulanan gerilimler, yarıiletkenin yüzeyinde pozitif (deşikler) veya negatif (elektronlar) yüklerin oluşmasına neden olur. MOS kapasitör olarak adlandırılan bu yapı, bir elektrotun metale ve diğer elektrotun yarıiletkenle bağlı olduğu iki terminalli bir cihaz olarak bağlandığında, voltaja bağlı bir kapasitans ortaya çıkar. MOS kapasitörlerin kapasitans değeri kapıya uygulanan DC voltajına bağlıdır. Sonuç olarak, MOS kapasitörünün çalışma modları uygulanan voltajın bir fonksiyonu olarak değişir. Değişen voltaj, kapıdaki tükenim alanlarını değiştirir, dielektrik özellikleri değiştirir ve ardından kapasitansı değiştirir.



Şekil 2.1. MOS yapının şematik diyagramı

## 2.1. İdeal MOS yapı

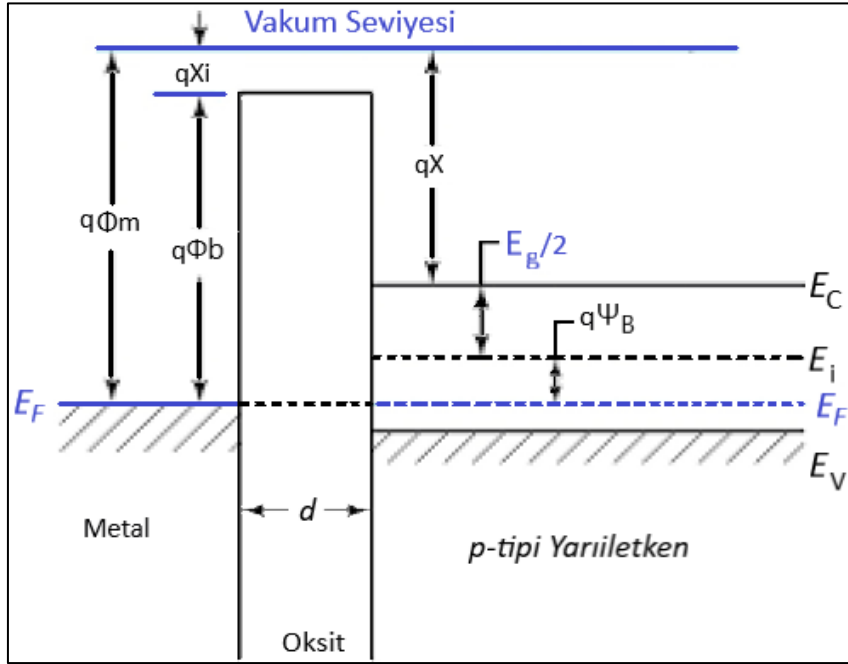
MOS yapısı yarıiletken yüzeylerin incelenmesi açısından oldukça yararlı bir malzemedir. Yarıiletken yüzeylerin kararlılığı yarıiletken aygıtların güvenilirliğinin bir ölçüsüdür. İdeal bir MOS yapıda metal-oksit ve oksit-yarıiletken arayüzeylerinde serbest ve hareketli yüklerin, tuzakların ve kusur durumlarının olmadığı kabul edilir.  $V_G=0$  durumunda, p-tipi yarıiletkenle sahip ideal MOS yapının enerji-bant diyagramı Şekil 2.2’ de verilmiştir. Bu durumda yarıiletkenin  $E_C$  ve  $E_V$  enerji bandı yarıiletken-oksit arayüzeyinde düzdür [1,9].

Metale bir kapı öngerilimi uyguladığımızda oluşan elektrik alan, yalıtkanın diğer yüzeyine zıt işaretli yükleri çeker. Yalıtkan oksit tabakada sabit olup elektrik alan yarıiletkende doğrusal olarak düşer. Bu, oksit içinde doğrusal bir potansiyel düşmesine ve yarıiletkende parabolik bir potansiyel düşmesine karşılık gelir. Bu durumda, yarıiletkende bantlar Fermi

seviyesine doğru bükülür. Oksit ve yarıiletken üzerine düşen gerilimlerin toplamı  $V_G$  gerilimine eşittir.

$$V_G = V_{ox} + \Psi_S \quad (2.1)$$

Burada,  $V_{ox}$ , oksit gerilimini,  $\Psi_S$  ise yüzey potansiyelini göstermektedir.



Şekil 2.2.  $V_G=0$  durumunda p-tipi ideal MOS yapının enerji-bant diyagramı

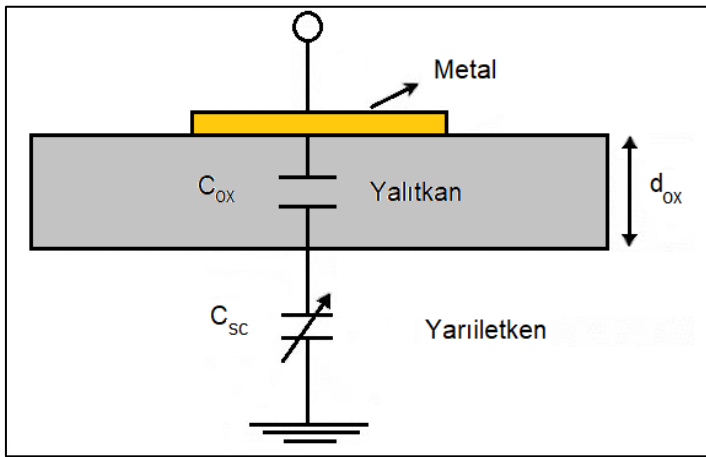
Şekil 2.2’de;  $\Phi_m$  metalin iş fonksiyonunu,  $X$  yarıiletkenin elektron ilgisini,  $X_i$  oksidin elektron ilgisini,  $E_g$  yasak enerji aralığını,  $\Phi_B$  metal ve yalıtkan arasındaki potansiyel engelini,  $q\Phi_B$  ise Fermi seviyesi  $E_F$  ve katkısız (saf) Fermi seviyesi  $E_i$  arasındaki enerji farkını göstermektedir.

İdeal bir MOS yapı özellikleri: [1,9,23].

1.  $V_G$  sıfır olduğunda  $\Phi_{ms}=\Phi_m-\Phi_s$  sıfırdır.
2. Metal kapı eş potansiyel yüzeylidir.
3. Oksit, içinde veya arayüzeylerinde yük bulunmayan mükemmel bir yalıtkandır.
4. DC gerilim altında oksitte yük iletimi yoktur.
5. Oksit-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey tuzağı yoktur.

6.  $V_G = 0$  olduğunda enerji bantları düzdür.
7. Herhangi bir uygulanan gerilimde oksitte ve metal yüzeyindeki yükler eşit ve zıt yüklü olmaktadır.
8. Arka kapı kontağı idealdir (omik). İdeal bir omik kontak, metal ile yarıiletken arasında hiçbir potansiyelin bulunmadığı bir kontak.
9. Yapı tek boyutludur, yani elektrik alan çizgileri yüzeye diktir.

MOS yapının eşdeğer devre modeli Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. MOS yapının eşdeğer devre modeli

Bu şekilde verilen  $C_{ox}$ , oksit kapasitansı ve  $C_{sc}$ , uzay yük veya tükenim bölgesi kapasitansıdır.  $C_{ox}$  sabit bir kapasitansdır.  $C_{sc}$  ise değişkendir ve yarıiletken yüküyle değişir. MOS kondansatörün eşdeğer kapasitansı  $C_{MOS}$  oksit kapasitansı ( $C_{ox}$ ) ve uzay yük kapasitansının ( $C_{sc}$ ) seri bağlanmasına eşdeğerdir. Bu durumda, eşdeğer kapasitans  $C_{MOS}$ ,

$$C_{MOS} = \left( \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} = \frac{C_{sc} \cdot C_{ox}}{C_{sc} + C_{ox}} \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilir. Oksit kapasitansı ( $C_{ox}$ ),

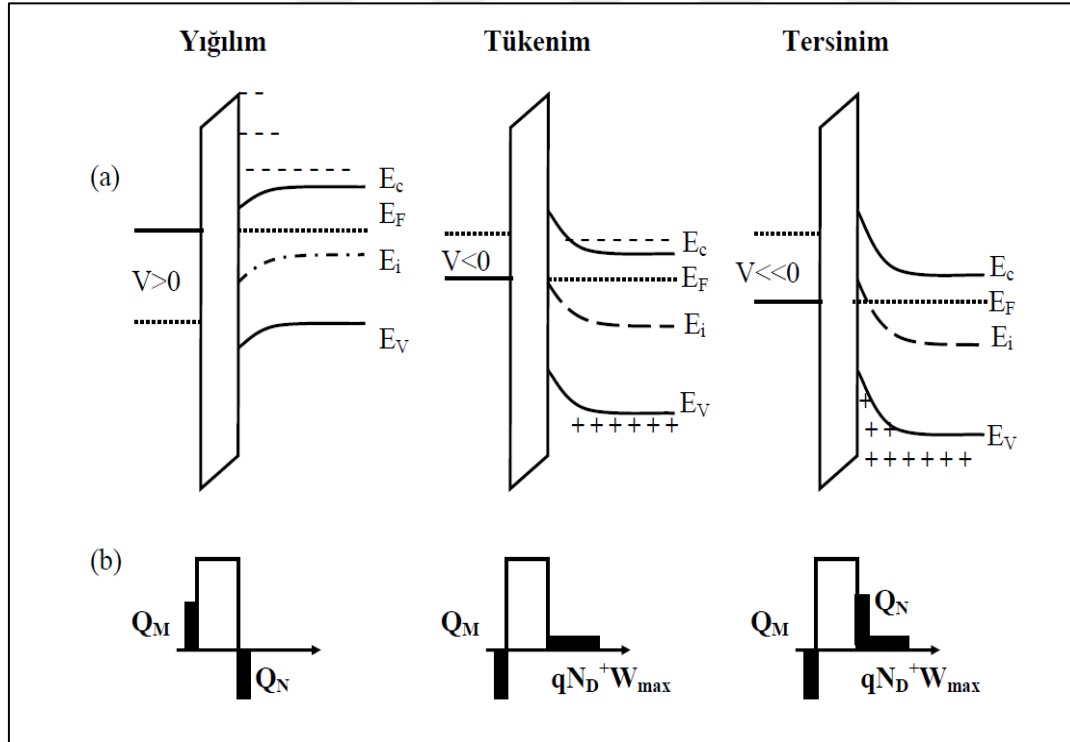
$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0 A}{d_{ox}} \quad (2.3)$$

ile ifade edilir. Burada,  $\epsilon_{ox}$  oksit dielektrik sabiti ve  $d_{ox}$  oksit kalınlığıdır. A ise MOS alanıdır. Uzay yük kapasitansı ( $C_{sc}$ ) aşağıdaki eşitlikle ifade edilir,

$$C_{SC} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 A}{W_d} \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabitini ve  $W_d$  tükenim tabaka genişliğini göstermektedir. Uygulanan  $V_G$  gerilime bağlı olarak MOS yapının dört çalışma modu vardır: düz bant, yığılım, tükenim ve tersinim [1,3,4,9-11,21]. Düz bant koşulları, yarıiletkende hiçbir yük bulunmadığında, yarıiletkenin enerji bandının düz olması durumunda ortaya çıkar. Yığılım ve tükenim arasındaki sınır düz bant voltajıdır ve tükenim ile tersinim arasındaki sınır eşik voltajıdır. Düz bant voltajı bant bükülmesinin meydana gelmediği ve bunun sonucunda bu bölgede sıfır net uzay yükü olacak şekilde uygulanan kapı voltajı olarak tanımlanır. Düz bant voltajında bantlar düzdür.

N tipi ideal MOS yapı için yığılım, tükenim ve tersinim durumlarını gösteren enerji-bant diyagramları Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4. n-tipi ideal MOS yapıda; yığılım, tükenim ve tersinim durumlarının enerji-bant diyagramları

### Yığılım

Kapı metal elektroda pozitif bir öngerilim uygulandığı zaman ( $V_G > 0$ ), oluşan elektrik alan n-tipi yarıiletkendeki çoğunluk yük taşıyıcıları olan elektronları yarıiletkenin arayüzeyine doğru çeker ve yarıiletken yüzeyinin yakınında elektronların yığılmaya başlar. Bir başka deyişle, yarıiletken/oksit arayüzeyinde yüksek elektron konsantrasyonuna sahip ince bir tabaka (birkaç Å) meydana gelir. Bu “yığılım” durumudur (Şekil 2.4). Biriken yük uzay yükü olduğundan  $C_{SC}$  çok büyük olur ( $C_{SC} \rightarrow \infty$ ). Bu durumda, MOS kapasitansını oksit kapasitansı belirler. Yani,  $C_{MOS} = C_{OX}$  olur.

### Tükenim

Kapı elektroda negatif bir öngerilim uygulandığı ( $V_G < 0$ ) zaman, oksitte oluşan elektrik alan yarıiletken yüzeyindeki çoğunluk taşıyıcıları olan elektronları yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda, yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu yarıiletkenin içindeki yoğunluğundan daha az olur. Sonuçta yarıiletkenin yüzeyinde serbest elektronların tükendiği bir bölge, tükenim bölgesi oluşur. Tükenim bölgesinde serbest taşıyıcı konsantrasyonu, malzemenin bulk halinden daha düşüktür. Bu durum tükenim olarak adlandırılır. Tükenim durumunda bant bükülmesi yukarı doğru olur. Ayrıca uygulanan gerilimin büyüklüğü tükenim tabakasının genişliğini belirler. Tükenim durumunda MOS yapının kapasitansı, hem uzay yükü kapasitansı ( $C_{SC}$ ) hem de oksit kapasitansı ( $C_{OX}$ ) tarafından belirlenir.

### Tersinim

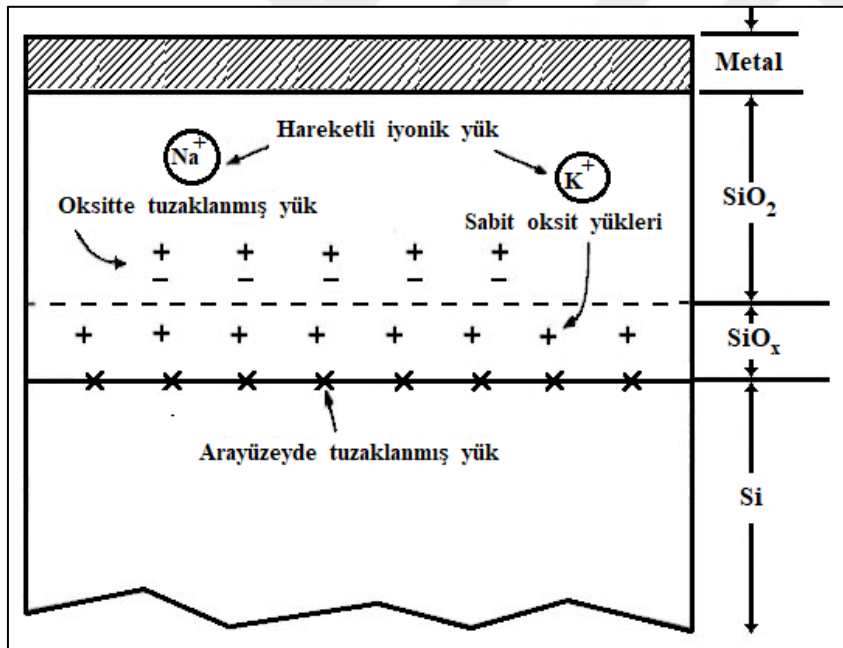
Kapı elektroda daha yüksek bir negatif öngerilim ( $V_G \ll 0$ ) uygulandığı zaman, yarıiletkenindeki azınlık taşıyıcıları olan deşikler yarıiletkenin yüzeyinde toplanmaya başlar. Daha da fazla negatif öngerilim uygulanması, yüzeydeki azınlık taşıyıcı yani deşik konsantrasyonunun artmasına neden olur. Azınlık taşıyıcılarının yüksek konsantrasyonu nedeniyle yarıiletken yüzeyi p-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu durum tersinim olarak adlandırılır. Tersinim tabakasının genişliği birkaç Å ile sınırlıdır. Tersinim durumunda bantlar yukarı doğru bükülür, iletkenlik bandı kenarı Fermi seviyesine yaklaşır (Şekil 2.4).

## 2.2. Gerçek MOS Yapı

İdeal MOS yapı genellikle birkaç faktörün sonucu olarak teorik davranıştan sapar. Gerçek MOS cihazlarının elektriksel davranışı, yarıiletken/oksit arayüzeyi yakınında bulunan yapısal hatalar, safsızlıktan kaynaklanan tuzaklar ve hareketli yükler tarafından belirlenir. Gerçek bir MOS yapısında bulunan yükler ve kusurlar şunlardır:

- i) Oksit-yarıiletken arayüzeyinde tuzaklanmış yükler
- ii) Sabit oksit yükleri
- iii) Oksitte tuzaklanmış yükler
- iv) Hareketli iyonik yükler

Gerçek MOS yapısındaki yükler Şekil 2.5’de gösterilmiştir.

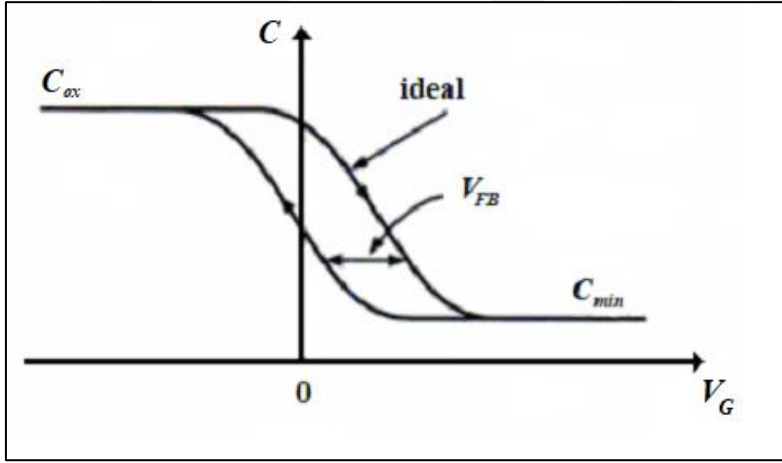


Şekil 2.5. Gerçek MOS yapısındaki yükler

### Hareketli iyonik yük

Oksitteki hareketli iyonlar; oksidasyon işlemi sırasında ortaya çıkar ve oksidasyon ekipmanından kaynaklanır. Bunlar genellikle alkali metallerin küçük iyonlarıdır. Bu iyonik yükler genellikle  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{H}^+$  gibi iyonik safsızlıklardır. Genellikle bu yüklerin kaynağı deiyonize olmayan suyun kullanılmasındandır. Hareketli iyonik yükler, sıcaklık ve

elektrik alan etkisi altında hareketlidirler. Bu yükler, elektrik alanının etkisi altında oksit tabakası boyunca ileri geri hareket ederler ve kapasitansa etki ederek kapasitans-voltaj (C-V) eğrisinin gerilim eksenini boyunca kaymasına neden olurlar. Hareketli yüklerin C-V eğrisi üzerindeki etkisi sıcaklık arttıkça daha belirgin hale gelmektedir. Genel olarak MOS yapısı içerisinde bulunan hareketli yükler, alan içerisinde hareket ederse MOS yapının kararlılığı bozulur. Arayüzeyde bu yüklerden dolayı, uygulanan voltaj negatiften pozitif veya pozitiften negatife geri çevrildiğinde C-V eğrisinde histerezis görülür (Şekil 2.6). Şekildeki histerezis eğrisinde görülen voltaj farkı  $V_{FB}$ , hareketli iyonların varlığından kaynaklanmaktadır ve düz bant voltaj kayması olarak ifade edilir. İdeal C-V eğrisi gerilim eksenini boyunca  $V_{FB}$  voltajı kadar kayar.



Şekil 2.6. Hareketli iyonik yükleri içeren C-V eğrisi

#### Oksitte tuzaklanmış yük

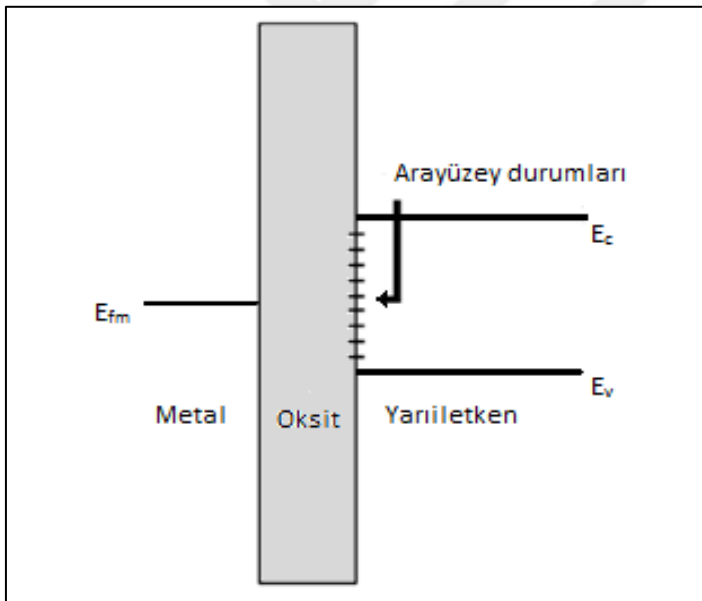
Oksit tabakası içerisinde arayüzeye yakın bulunan oksit yükleri ya da oksit tuzak yükü oksit tabakadaki kusurlarla ilgilidir. Bu yükler yarıiletken yüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Bu yükler nötr haldedir ancak elektronlar veya deşikler tarafından yakalandığında yüklü hale gelir. Ayrıca farklı yöntemlerle de oksit tabakada yükler oluşturulabilir. X-ışını radyasyonu etkisiyle veya elektron bombardımanı ile yükler oluşturulabilir. X-ışını radyasyonu elektron-deşik çiftlerinin oluşturur. Oluşan yük çiftleri oksitte tuzak yüke neden olur. Elektron-deşik çiftlerinden elektron deşikten daha hızlı hareket ettiğinden oksitten uzaklaşarak metale doğru çıkar. Deşikler ise daha çok oksit içerisinde tuzaklanır.

### Sabit oksit yükü

Sabit oksit yükü, oksidasyon işlemi sırasında oksitte ortaya çıkan ve örgü kusurlarından kaynaklanan yüklerdir. Bu yükler oksit yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde lokalize olmuştur ve oksit-yarıiletken arayüzeyinin yakınında bir pozitif yük tabakası oluştururlar. Bu sabit yükler MOS yapının yüksek frekanslarda C-V eğrisinin değişimine neden olur. Aynı zamanda flat (düz) bant voltajı ( $V_{FB}$ ) ve dolayısıyla eşik voltajı üzerinde etkisi vardır.

### Arayüzey durumları

Arayüzeyde tuzaklanmış yük, arayüzey tuzakları ya da durumları olarak da adlandırılmaktadır. Bu tuzaklar oksit-yarıiletken arayüzeyinde bulunan kusurlardır. Oksit-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumlarının dağılımı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

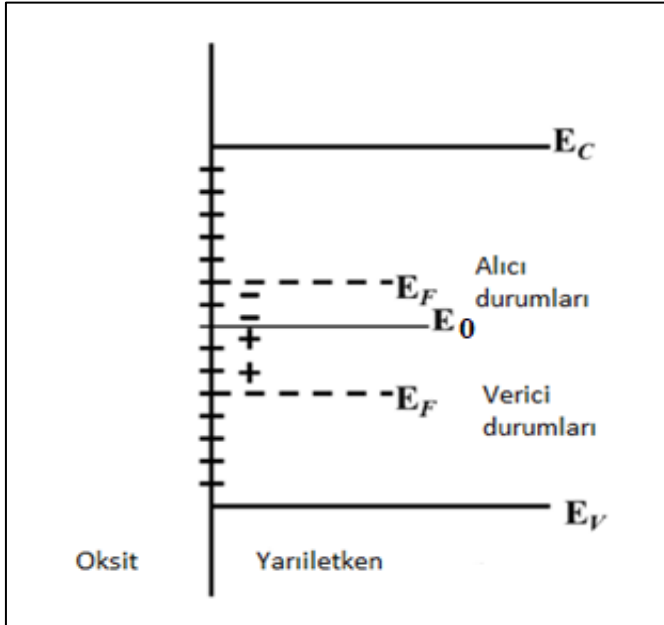


Şekil 2.7. Oksit/yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumlarının dağılımı

Arayüzeyde tuzaklanmış yüklere neden olan etmenler yapısal kusurlar, oksidasyona bağlı kusurlar, metal safsızlıkları ve radyasyondur. MOS kapasitansa gerilim uygulandığı zaman, arayüzey tuzak yükü değişir ve MOS kapasitansında artış meydana getirir. Yüksek frekans AC gerilim uygulandığında arayüzey tuzakları uygulanan alternatif sinyali takip edemez ve arayüzey tuzak yüklerinin varlığı toplam kapasitansın değerini değiştirmez. Fakat düşük frekans AC gerilim uygulanırsa arayüzey yükleri alternatif sinyali takip edebilir ve

dolayısıyla kapasitansa katkıda bulunur. Bu durumda kapasitans-voltaj (C-V) eğrisi değişir [1,9].

Arayüzey durumları, yüzey durumuna bağlı olarak pozitif veya negatif yüklü olabilir. Elektronlar/deşikler bu arayüzey durumlarında tuzaklandığında arayüzeydeki pozitif ve negatif yükler gibi hareket ederler. Arayüzey tuzakları alıcı ve verici durumda olabilir. Verici durumu, tuzak seviyesi dolu olduğunda nötürdür ve bir elektron vererek pozitif olarak yüklenir ve genellikle bant aralığının alt yarısında bulunur. Alıcı durumu tuzak seviyesi boş olduğunda nötürdür ve bir elektron kabul ederek negatif yüklü hale gelir. Alıcı durumu genellikle bant aralığının üst yarısında yer alır. Alıcı ve verici durumları Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Negatif bir voltaj uygulandığında, Fermi seviyesi arayüzey tuzak seviyelerine göre aşağı hareket eder. Arayüzey tuzakları pozitif yüklü hale gelir. Arayüzeydeki Fermi enerji düzeyinin  $E_F$ , nötürlük seviyesi  $E_0$ ’a göre durumu arayüzeyin net yükünü belirler. Fermi enerji düzeyi  $E_F$ ,  $E_0$ ’ın üzerinde olduğunda  $E_F$  arayüzey durumları elektronlarca işgal edilir ve bu durumda net yük negatif olur. Fermi enerji düzeyi  $E_F$ ,  $E_0$ ’ın aşağısında olduğunda net yük pozitif olur.  $E_F$ , yük nötürlük seviyesi  $E_0$  ile çakıştığı zaman, tüm arayüzey yük nötürdür.



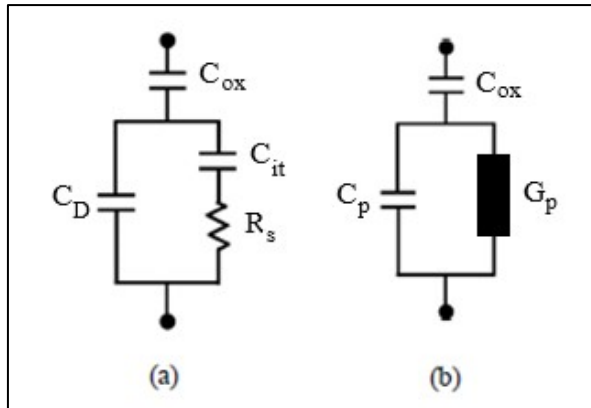
Şekil 2.8. Hem verici hem de alıcı durumları içeren arayüzey durumları

### 2.3. Arayüzey Durum Yoğunluğunu Belirleme Metodları

Gerçek bir MOS yapıdaki arayüzey durumları ve oksit yüklerinin varlığı, MOS yapının elektriksel karakteristiklerinin değişimine sebep olmaktadır. Ayrıca MOS kapasitör ve MOS tabanlı aygıtların elektriksel karakteristikleri oksit/yarıiletken arayüzey kalitesine bağlıdır. Arayüzey durum yoğunluğu  $D_{it}$  olarak adlandırılır ve oksit/yarıiletken arayüzey kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Arayüzey kalitesi düşükse  $D_{it}$  daha büyük değere sahip olur. MOS kapasitör ya da MOS tabanlı aygıtlar yüksek bir arayüzey durum yoğunluğuna sahip olduğunda bu aygıtların performansı düşük olur. Arayüzey durum yoğunluğunu ( $D_{it}$ ) belirlemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [20]. Bu yöntemler arasında; yüksek frekans (HF) düşük frekans (LF), iletkenlik gibi bazı yöntemleri sayabiliriz [1,4,9,24-26]. Düşük frekans (LF) –Yüksek Frekans (HF) ve iletkenlik yönteminde kapasitans-voltaj ilişkisinden yola çıkılarak  $D_{it}$  hesaplanmaktadır.

#### 2.3.1. Düşük frekans (LF) – yüksek frekans (HF) metodu

MOS kapasitör frekansa bağlı olarak değişen kapasitansa sahiptir. MOS kapasitörü arayüzey durumlarını ve seri direncin etkisini içeren bir eşdeğer devre ile modelleyebiliriz. Arayüzey durumlarını gösteren eşdeğer devreler Şekil 2.9. (a) ve 2.9 (b)'de verilmiştir. Bu şekilde oksit kapasitansı  $C_{ox}$ , yarıiletkenin tükenim bölgesi kapasitansı  $C_D$ , arayüzey yük kapasitansı  $C_{it}$  ve seri direnç  $R_s$  ile temsil edilmektedir. Arayüzey durumlarının frekansa bağlı davranışı arayüzey durum zaman sabiti sayesinde belirlenebilir. Arayüzey durum zaman sabiti  $\tau_{it} = C_{it}R_s$  olarak tanımlanır. Arayüzey durum zaman sabiti yüzey potansiyelinin ( $\Psi_s$ ) bir fonksiyonudur [24].



Şekil 2.9. Arayüzey durumları gösteren eşdeğer devreler

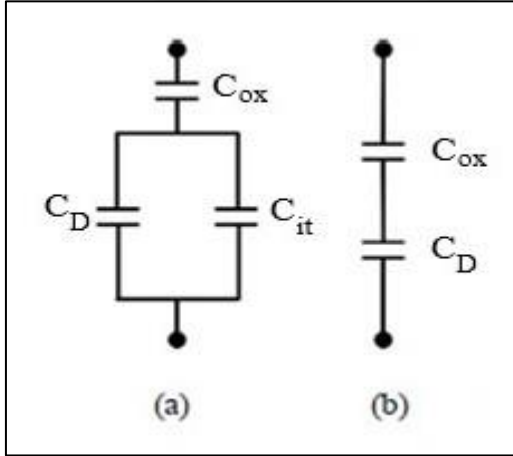
Şekil 2.9(b)' de yer alan  $C_p$  frekansa bağlı kapasitans,  $G_p$  ise ona paralel bağlı iletkenliktir.  $C_p$  ve  $G_p$  sırasıyla paralel kapasitans ve iletkenlik olarak tanımlanır ve

$$C_p = C_D + \frac{C_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau_{it}}{1 + \omega^2 \tau_{it}^2} \quad (2.6)$$

eşitlikleri ile verilir.

Düşük frekans (quasi-static) metodu C.Neil Berglund tarafından önerilmiştir [27]. Düşük frekanstan kastedilen arayüzey tuzakların uyarma frekansına tepki verebildiği en düşük frekanstır. Düşük frekans için MOS eşdeğer devresi Şekil 2.10 (a)'da verilmiştir. Şekildeki  $C_D$  kapasitansı  $C_{it}$  kapasitansına paraleldir. Düşük frekans için  $R_s$ , 0 alınır. MOS kapasitörün düşük frekans kapasitansını  $C_{LF}$  ile gösterirsek;  $C_{LF}$  paralel iki kapasitansa ( $C_D$  ve  $C_{it}$ ) seri bağlı olan  $C_{ox}$  bir kapasitanstan oluşur.



Şekil 2.10. Seri direnç etkisini içeren eşdeğer devreler (a) düşük frekans (b) yüksek frekans

$C_{LF}$  aşağıdaki formülle ifade edilir;

$$\frac{1}{C_{LF}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_D + C_{it}}, \quad C_{LF} = \frac{C_{ox}(C_D + C_{it})}{C_{ox} + C_D + C_{it}} \quad (2.7)$$

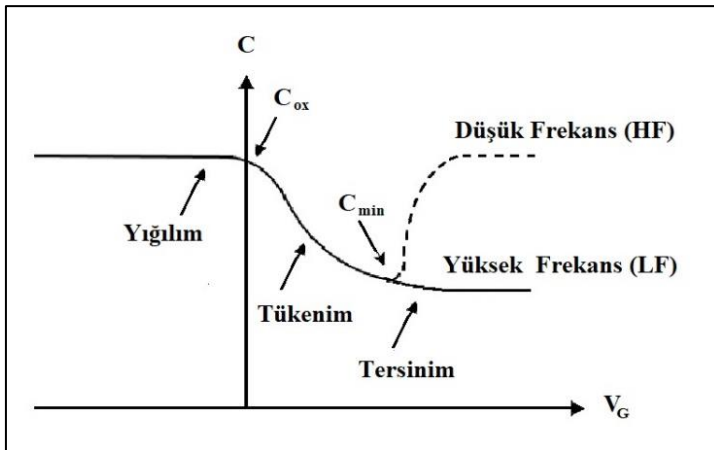
Burada, arayüzey yük kapasitansı  $C_{it} = qD_{it} = \partial Q_{it} / \partial \Psi_s$  ile verilmektedir.  $D_{it}$  arayüzey tuzak yoğunluğu ve  $Q_{it}$  arayüzey tuzak yük yoğunluğudur. Oda sıcaklığında arayüzey durum

yoğunluğunun belirlenmesine yönelik geliştirilen ilk metodlardan birisi olan yüksek frekans ( $\omega\tau \gg 1$ ) metodu L.M. Terman tarafından geliştirilmiştir [28]. Yüksek frekans için MOS eşdeğer devresi Şekil 2.10(b)'de gösterilmiştir. Bu eşdeğer devrede,  $C_{ox}$  ve  $C_D$  birbirine seri bağlıdır. Yüksek frekansta MOS kapasitansı  $C_{HF}$  aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\frac{1}{C_{HF}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_D}, \quad C_{HF} = \frac{C_{ox}C_D}{C_{ox} + C_D} \quad (2.8)$$

Bu iki yöntem daha sonra birleştirilerek yeni bir yöntem olan yüksek-düşük frekans kapasitans ( $C_{HF}-C_{LF}$ ) yöntemi geliştirilmiştir [29,30]. Bu yöntemle düşük ve yüksek frekans için ölçülen kapasitans-voltaj (C-V) eğrisinin farkından faydalanarak bant aralığı içinde sınırlı bir enerji aralığındaki arayüzey durum yoğunluğu ( $D_{it}$ ) hesaplanabilir.

Şekil 2.11'da p-tipi MOS kapasitörün yüksek frekans (HF) ve düşük frekansda (LF) elde edilen C-V eğrileri gösterilmiştir. Bir p-tipi MOS kapasitörün kapasitansını ölçmek için gerilim negatiften pozitive doğru taranarak uygulanmaktadır ve bunun için AC gerilim gerekmektedir. Negatif gerilim uygulandığında, HF ve LF eğrileri aynıdır. Fakat pozitif uygulama gerilimleri için eğrilerde sapma meydana gelmektedir. Bunun nedeni yüksek frekanslarda tersinim yükünün uygulanan AC gerilimini takip edememesidir. DC gerilim uygulandığında tersinim yükü oluşursa, bu durumda AC gerilimin frekansı yeteri kadar düşükse tersinim yükü AC frekansına cevap verebilir ve böylece düşük frekans eğrisi elde edilir. Tam tersi durumda eğer AC frekansı yeterince düşük değilse bu durumda yüksek frekans eğrisi elde edilir.



Şekil 2.11. p-tipi MOS kapasitörün yüksek ve düşük frekans eğrileri

Bu metoda göre arayüzey tuzak kapasitansı,  $C_{it}$ ,

$$C_{it} = \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - C_D = \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} \quad (2.9)$$

ile verilir. Arayüzey yük kapasitansı  $C_{it}$  ile arayüzey durum yoğunluğu  $D_{it}$  arasındaki bağıntı aşağıdaki denklem ile verilir;

$$C_{it} = \frac{dQ_{it}}{d\psi_s} = qD_{it} \quad (2.10)$$

Bu denklem kullanılarak arayüzey durum yoğunluğu,

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left( \frac{C_{ox}C_{LF}}{C_{ox}-C_{LF}} - \frac{C_{ox}C_{HF}}{C_{ox}-C_{HF}} \right) \quad (2.11)$$

olarak elde edilir.

### 3. DİELEKTRİKLER

Genel olarak malzemeler iletkenler, yarı iletkenler ve yalıtkanlar veya dielektrik malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Bir dielektrik, elektrik alan altında polarize olan yalıtkan bir malzemedir. Bir elektrik alanı uygulandığında, dielektrik malzeme içindeki yükler hızla kendilerini hizalayarak, dış alana karşı çıkan bir indüklenmiş elektrik alanının oluşmasına yol açar [12-14,31-33]. Malzemenin polarize edilebilirliği geçirgenlik (permittivity) ile ifade edilir. Geçirgenlik olarak da adlandırılan dielektrik sabiti, malzemenin bir elektrik alanına yerleştirildiğinde elektrik enerjisini depolama yeteneğidir. Geçirgenlik kompleks bir sayıdır ve reel kısmı dielektrik sabiti olarak adlandırılır. Mükemmel bir dielektrik, elektromanyetizmada, elektrik enerjisini depolama ve bir elektrik alanına tepki verme yeteneği ile ilgili belirli özelliklere sahip bir malzemeyi ifade eder. Bununla birlikte, mükemmel dielektrik, sıfır elektriksel iletkenliğine sahip bir malzeme, dolayısıyla yalnızca bir yerdeğiştirme akımı sergileyen bir malzemedir. Dielektrik malzemeler, 4 eV'dan büyük yasak enerji aralığına sahip ve yüksek dirençli malzemelerdir. Bu özellik, malzeme bir elektrik alanına maruz kaldığında herhangi bir akım sızıntısının olmamasını sağlar. Bir dielektrik, yalıtkan görevi görerek akımın içinden geçmesini engeller. Bu özellik, dielektriğin elektrik enerjisini depolamasını sağlar. Sonuç olarak, tüm dielektrikler yalıtandır, ancak tüm yalıtkanlar dielektrik değildir. Dielektrik malzemeler birçok uygulamada kullanılmaktadır.

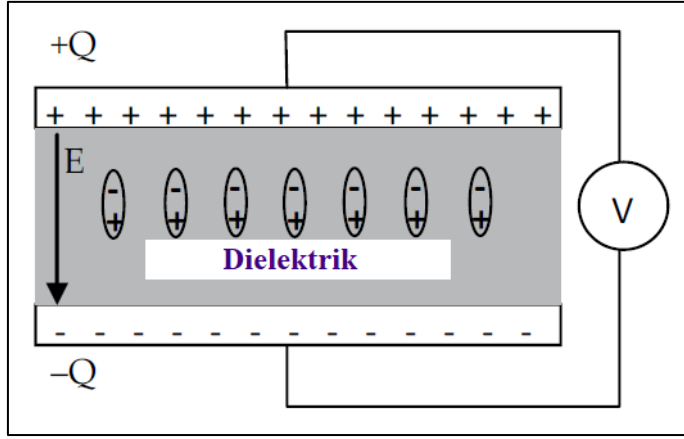
Yük depolama yeteneklerinden dolayı en yaygın olarak kapasitörlerde enerji depolamak ve radyo frekansı iletim hatları inşa etmek için kullanılırlar. Dielektrikler, yük depolama yeteneklerinden dolayı en yaygın olarak kapasitörlerde enerji depolamak için kullanılır. Seramik dielektrikler, dielektrik rezonatör osilatörlerinde kullanılır. Yüksek geçirgenliğe sahip dielektrik malzemeler, yarıiletken bir cihazın performansını artırmak için kullanılır. Sıvı dielektrikler, transformatörlerde, şönt reaktörlerde, reostatlarda vb. yalıtım ve soğutma için kullanılır. Elektronik devrelerin çalışması malzemelerin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Özellikle, dielektrik malzemelerin dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı önemlidir.

Bir malzemenin dielektrik sabiti ( $\epsilon=D/E$ ) veya spesifik endüktif kapasitesi olarak da bilinen bağıl dielektrik geçirgenliği, dielektrik ile doldurulmuş bir kapasitöre alan uygulandığında, düşük frekanslı ölçümlerle ilgili olarak dielektrik yer değiştirme D ile uygulanan elektrik

alanı  $E$  arasındaki orantı faktörü olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda bir malzemenin bağıl geçirgenliği  $\epsilon_r(=\epsilon/\epsilon_0)$  ile temsil edilir ve malzemenin gerçek geçirgenliğinin boşluğun dielektrik sabitine/elektrik geçirgenliğine ( $\epsilon_0$ ) oranına eşittir. Kompleks dielektrik geçirgenliğin ( $\epsilon^*=\epsilon'-i\epsilon''$ ) reel/gerçek kısmı ( $\epsilon'$ ) 'geçirgenlik' olarak adlandırılır ve artan frekansla azalır. İmajiner/sanal kısmı ( $\epsilon''$ ) ise 'dielektrik kayıp' olarak adlandırılır ve artan frekansla artabilir veya azalabilir. Bir malzemedeki DC iletimi, kompleks geçirgenliğin yalnızca sanal kısmına katkıda bulunur ve frekansla ters orantılı bir kayıp faktörüne yol açarken, dipol durulması veya uzay yükü oluşumu gibi diğer dielektrik süreçler hem geçirgenliğe hem de kayıp davranışına katkıda bulunur. Dielektrik özelliklerin geniş bir frekans aralığında ölçümü, bir malzemenin elektriksel özelliklerini (i) geçirgenliğin dağılımı açısından karakterize eder ve (ii) kayıp faktörü-frekans davranışı, dielektrik durulma davranışı ve dc iletim davranışı hakkında bilgi verir. Çoğunlukla bir malzemenin sabit bir frekanstaki ac iletkenlik ölçümü, malzemedeki dc iletkenliği belirtmek için kullanılır. Ayrıca, elektriksel özellikler (kompleks dielektrik geçirgenlik, dc iletkenlik) genel olarak uygulanan elektrik alanın genliğine bağlı olacaktır. Dielektrik kayıp, alternatif bir elektrik alan uygulandığında dielektrik içinde ısı şeklinde dağılan enerjiyi ifade eder. Dielektrik kayıp dielektrik özelliklerine bağlıdır ve büyüklüğü dielektrik kayıp tanjantı ve geçirgenlik değerleri tarafından belirlenir. Kayıp genellikle yüksek frekanslarda ve dielektrik kayıp tanjantı ve geçirgenlik arttıkça daha da artar. Dielektrik kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ), bir dielektrik malzemeye alternatif bir elektrik alanı uygulandığında ısı olarak dağılan enerji oranını yani bir periyotluk kayıp miktarını ifade eder. Aynı zamanda  $\tan\delta$ , dielektrik dağılım faktörü veya dağılım faktörü olarak da adlandırılmaktadır.

### 3.1. Dielektrikli Kapasitör

Kapasitör/kondansatör, dielektrik madde ile birbirinden ayrılmış zıt yüklü iki iletken levhadan oluşan bir devre elemanıdır. Kapasitör yüklendiği zaman plakalar eşit miktarda zıt yük taşırlar. Kapasitörün sığası plakaların yüzey alanı ile doğru, plakalar arasındaki mesafesi ile ters orantılıdır. Dolayısıyla kapasitörün depoladığı yük, plakaların boyutlarına, aralarındaki mesafeye ve plakalar arasına yerleştirilen dielektrik malzemeye bağlıdır. Dielektrik malzeme ne kadar kolay polarize edilirse, kondansatörde o kadar fazla yük depolanır. Dielektrikli paralel plakalı kapasitör Şekil 3.1'de gösterilmiştir [34].



Şekil 3.1. Dielektrikli kapasitör

Dielektrik maddelerin dielektrik sabiti  $\epsilon'$  ile gösterilir. Dielektrik maddeden dolayı potansiyel fark ve elektrik alan  $1/\epsilon'$  çarpanı kadar azalır. Elektrik alanının azalmasına neden olan dielektrik malzemenin yüzeyinde oluşan kutuplanma yükleridir. Elektrik alanının azalması dolayısıyla da potansiyel fark değişmektedir. Kapasitörün plakaları arasında dielektrik olmadığında voltaj ve elektrik alan sırasıyla  $V_0$  ve  $E_0$  olsun. Plakalar arasına dielektrik madde varken potansiyel ve elektrik alan değerleri şu şekilde ifade edilir;

$$V = \frac{V_0}{\epsilon'} \quad (3.1)$$

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} \quad (3.2)$$

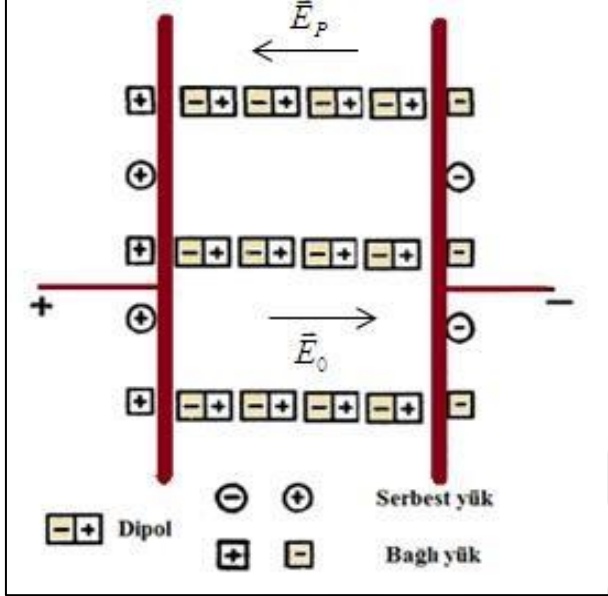
Kondansatörün sığası (kapasitesi), plakalar arasına dielektrik madde yerleştirildiğinde  $\epsilon'$  çarpanı kadar artar. Fakat plakalar üzerindeki toplam  $Q_0=Q$  yükü değişmemektedir.

$$C = \frac{Q_0}{V} = \frac{\epsilon' Q_0}{V_0} = \epsilon' C_0 = \frac{\epsilon' \epsilon_0 A}{d} \quad (3.3)$$

Burada,  $C_0$ : dielektrik madde olmadığında kondansatörün kapasitesini,  $A$ : plakaların yüzey alanını ve  $d$ : plakalar arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

Paralel plakalı kondansatöre uygulanan gerilim plakalar arasında elektrik alan oluşturur, bu elektrik alan nötr olan dielektrik maddeyi kutuplar yani polarize eder. Bu durumda, yönü negatif yükten pozitif yüke doğru olan elektrik dipol momentleri oluşur. Elektrik alan

kaldırıldığında kutuplanma ortadan kalkar ve dielektrikte net dipol moment sıfır olur. Dielektrikteki kutuplanma Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Dielektrik kutuplanma

Şekilde görüldüğü gibi, dielektriğin plakalara bakan kısımlarında indüklenmiş pozitif ve negatif kutuplanma yükleri oluşur. Bu yükler kutuplanma ( $E_p$ ) elektrik alanı oluşturur. Dış elektrik alana ( $E_0$ ) zıt yönde olan kutuplanma ( $E_p$ ) elektrik alanı dielektrikteki net elektrik alanı azaltır. Dielektrikteki net elektrik alan,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_p \quad (3.4)$$

olur.  $E_0$  plakalar üzerindeki serbest yüzey yük yoğunluğuna ( $\sigma$ ) bağlıdır.

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (3.5)$$

eşitliği ile verilir. Kutuplanma yük yoğunluğuna ( $\sigma_p$ ) bağlı olarak elektrik alan,

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} \quad (3.6)$$

ile verilir. Bu eşitliklerden yola çıkarak bileşke alan şu şekilde ifade edilir:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\epsilon' \epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} \quad (3.7)$$

Bu eşitlikten kutuplanma yük yoğunluğu,

$$\sigma_p = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon'}\right) \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir. Bu ifade edilen eşitlikten dielektrik kutuplanma yük yoğunluğunun plakalardaki yüzeysel yük yoğunluğundan küçük olduğu sonucuna ulaşıyoruz. Plakaların arasında dielektrik olmadığı durumda  $\epsilon'=1$ 'dir ve  $\sigma_p = 0$  olur.

Polarizasyon yoğunluğu, bir dielektrik malzemede indüklenen elektrik dipol momentlerinin yoğunluğunu ifade etmek için kullanılır. Dielektrik malzemenin elektriksel polarizasyonu, dielektrik maddenin birim hacmi başına elektrik dipol momentidir [35]. Dielektrik madde içinde oluşan dielektrik kutuplanma yoğunluğu (P) elektrik alana bağlı olup yönü alan yönündedir. Kutuplanma yoğunluğunun büyüklüğü şu eşitlikle verilir:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \vec{E} \chi_e \quad (3.9)$$

Eşitlikte yer alan  $\chi_e$  ( $=\epsilon'-1$ ) elektriksel duygunluk olarak adlandırılır ve her zaman 1'den büyük bir sayıdır. Elektriksel duygunluk dielektrik malzemenin elektrik alana tepki olarak ne kadar kolay polarize olduğunun bir ölçüsüdür. Vakumun elektriksel duygunluğu  $\chi_e=0$ 'dır. Elektriksel duygunluk malzemenin geçirgenliğini, dolayısıyla kapasitörlerin kapasitansını etkiler.

Elektrik alanı uygulanmadan önce malzeme elektriksel olarak nötrdür ve elektrik dipolleri oluşmaz. Dielektrik malzemeye E elektrik alanı uygulandığında malzeme içindeki bağlı yüklerin elektrik alanına tepki verdiği bulunmuştur. Pozitif yüklerin dağılımı elektrik alanı yönünde, negatif yüklerin dağılımı ise elektrik alanının tersi yönünde gerçekleşir [36]. D ile gösterilen elektriksel yer değiştirme, bir elektrik alan boyunca yerleştirilen bir iletken tabakası boyunca yer değiştirecek birim alan başına yüküdür. Elektrik akı yoğunluğu olarak da bilinir. D vektörel bir niceliktir. D ve E yüklü nesneler arasındaki etkileşimi tanımlar. D, bu etkileşimle ilişkili yük yoğunluklarıyla ilgilidir. E ise kuvvetler ve potansiyel farklarla

ilgilidir. Elektrik alanı  $E$  uygulandığında malzemelerin tepkisini bulmak için dielektrik malzemede elektriksel yer değiştirme kullanılır.  $D$ ,  $P$  ve  $E$  arasındaki bağıntı,

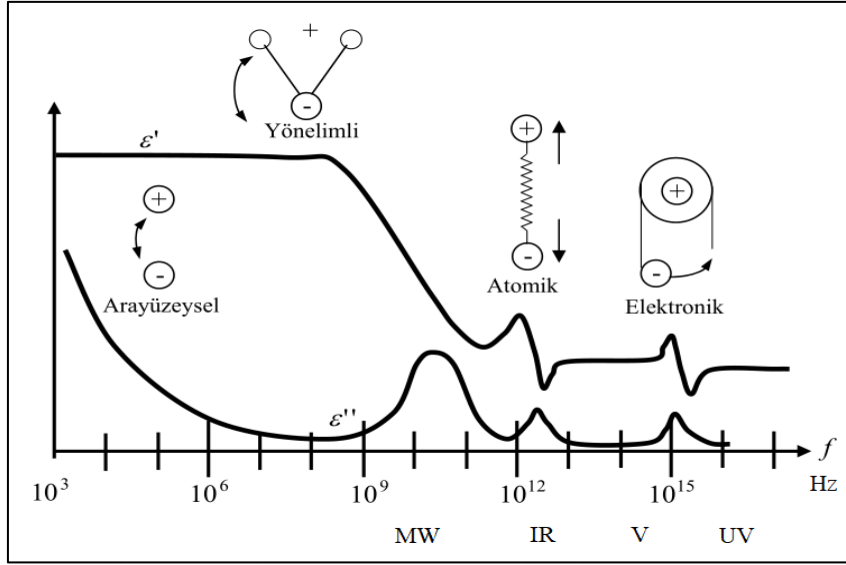
$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \epsilon' \vec{E} \quad (3.10)$$

eşitliği ile verilir. Dış elektrik alanda polarize olan dielektrik malzemedeki elektrik akı yoğunluğu, aynı alan altında dielektrik malzemenin olmadığı duruma göre polarizasyon kadar daha büyük olacaktır.

### 3.2. Kutuplanma ve kutuplanma mekanizmaları

Dielektrik, dış bir elektrik alanına yerleştirildiğinde ve bir elektrik dipol momenti kazandığında polarize hale gelir. Dış elektrik alan, yalnızca dipollerin oluşumunu sağlamakta birlikte, aynı zamanda kalıcı ve indüklenen dipolleri elektrik alanın yönüne doğru yönlendirilmesi veya yabancı maddelerin arayüzeylerinde veya diğer kusur sınırlarında mobil yük taşıyıcılarının ayrılması dış bir elektrik alanından kaynaklanır. Elektrik polarizasyonu, bir malzemedeki pozitif yük merkezinin ve negatif yük merkezinin ayrılmasını yani atomların veya moleküllerin negatif ve pozitif yüklerinin sonsuz küçük olarak yer değiştirmesini ifade eder. Elektrik polarizasyonu veya polarizasyon yoğunluğunu bir dielektrik malzemedeki kalıcı veya indüklenen elektrik dipol momentlerinin yoğunluğunu tanımlar. Polarizasyon ( $P$ ), enerji depolama ve piezoelektriklik gibi birçok dielektrik olay ile ilgilidir. Dört tür polarizasyon mekanizması vardır: elektronik, atomik (iyonik), yönelimli (dipolar) ve arayüzeyssel (uzay yük) polarizasyonu [15,37-39].

Atomlardan veya moleküllerden oluşan dielektrik malzemeler, molekül yapılarına, frekans ve sıcaklık gibi etkenlere bağlı olarak dört temel elektrik polarizasyon türünden bir veya daha fazlasını sergiler. Kutuplanma mekanizmaları alternatif elektrik alanın frekansına bağlıdır. Dielektrik madde içinde meydana gelen kutuplanma mekanizmaları Şekil 3.3'de verilmiştir [26,38-41].

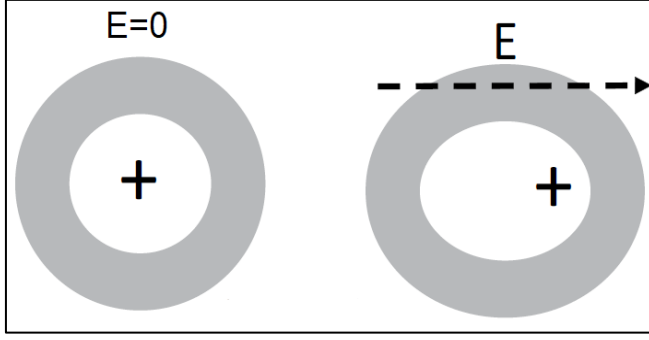


Şekil 3.3. Dielektriklerdeki polarizasyon mekanizmaları

Elektronik kutuplanma ve atomik kutuplanma aslında elektron bulutlarının yer değiştirmesinden ve atomlar/moleküller içindeki örgü titreşiminden ileri gelmektedir. Bu kutuplanma mekanizmaları sıcaklığa çok az bağlıdır. Fakat yönelimli kutuplanma parçacıkların esnek olmayan hareketini içerdiğinden onun etkileşimi moleküller arasında gerçekleşmektedir. Bundan dolayı yönelimli kutuplanma sıcaklığa oldukça bağlıdır. Yüksek iletkenliğe sahip diğer bir ifadeyle yüksek konsantrasyona sahip taşıyıcılardan oluşan malzemelerde yük taşıyıcılarının göçü nedeni ile arayüzeylerde uzay yükleri oluşur ve bu da kutuplanmaya neden olur. Bu tür kutuplanma uzay yükü veya arayüzeyssel kutuplanma olarak adlandırılır.

### 3.2.1. Elektronik kutuplanma

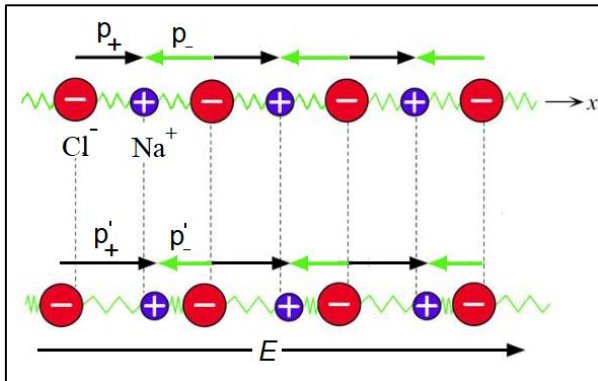
Elektronik polarizasyon, dış elektrik alanının etkisi altında bir molekül veya atom içindeki elektron bulutlarının kaymasını tanımlar. Bu kayma, pozitif yük merkezinin (çekirdekler) ve negatif yük merkezinin (elektron bulutları) ayrılmasıyla sonuçlanır. Elektronik polarizasyon sonucu oluşan dipol momentleri oldukça küçüktür. Yani, kutuplanma sonucunda oluşan dipoller çok küçük polarizasyon etkisine sahiptir. Elektronik kutuplanma, mor ötesi ve görünür bölge frekanslarında ( $10^{15}$  Hz) meydana gelir. İyonik yapılmayan malzemelerde yalnızca elektronik kutuplanma görülür. Elektron bulutunun uygulanan elektrik alandaki değişimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir [34,37,38].



Şekil 3.4. Elektronik kutuplanma

### 3.2.2. İyonik (Atomik) kutuplanma

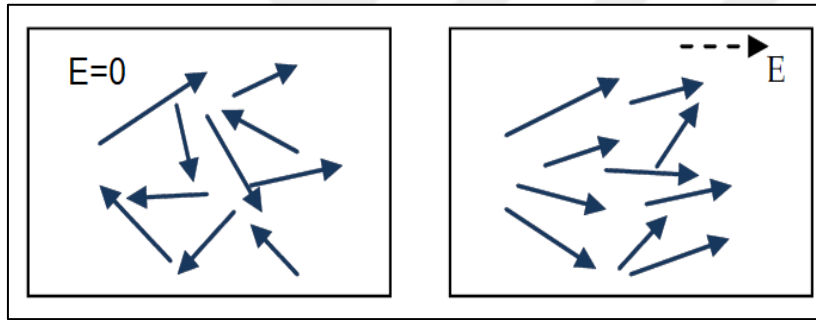
İyonik katılarda her komşu katyon ve anyon çifti bir dipol oluşturabilir. Elektrik alanının yokluğunda iyonik katının net elektrik dipol momenti sıfırdır. İyonik katıya elektrik alan uygulandığında, birbirine yakın pozitif (katyonlar) ve negatif (anyonlar) iyonlar zıt yönlerde çok küçük miktarda yer değiştirerek aralarındaki bağlar gerilir. Dış elektrik alanının neden olduğu bu değişiklik, iyonik katılarda net dipol moment yaratır. NaCl gibi kalıcı dipollere sahip olmayan iyonik katıdaki atomik kutuplanma mekanizması Şekil 3.5’de verilmiştir. Bu kutuplanma türünde malzemedeki molekülün atomları veya iyonları bir birine göre yer değiştirdiğinden normal örgü titreşiminde bozulma meydana gelir. Örgü titreşiminin bozulmasından dolayı bazen buna kutuplanma titreşimsel polarizasyon olarak da adlandırılmaktadır. Atomik kutuplanma yaklaşık ( $10^{12} \sim 10^{13}$  Hz) aralığında gerçekleşmektedir. Elektronik kutuplanmanın gerçekleşme süresi  $\sim 10^{-15}$  ve atomik kutuplanmanın gerçekleşme süresi  $\sim 10^{-13}$  saniyedir. İyonik polarizasyonda geçen süre elektronik polarizasyondan daha fazladır. Bunun nedeni iyonların elektronlardan daha büyük kütleye sahip olmasıdır.



Şekil 3.5. İyonik (Atomik) kutuplanma

### 3.2.3. Yönelimli kutuplanma

Çok atomlu moleküllerden oluşan bir dielektrik malzeme genellikle elektronik polarizasyona ve iyonik polarizasyona ve bazı durumlarda bir elektrik alanına maruz kaldığında yönelimli polarizasyona da sahiptir. Yönelimli polarizasyona aynı zamanda dipolar polarizasyon da denir. Bu tür polarizasyon yalnızca polar dielektriklerde meydana gelir. Bu tür dielektrikler kalıcı dipole sahiptir. Birçok polar molekülün kalıcı dipolleri vardır. Bununla birlikte, polar moleüllü malzemeler, elektrik alan yokken kalıcı dipollerin rastgele yönelimi nedeniyle net dipol momentine sahip değildir. Rastgele yönelmiş dipoller, uygulanan elektrik alanının yönü boyunca hizalanacak ve net bir dipol momentine sahip olacaktır. Elektrik alan kaldırıldığında dipol momentler eski konumlarına dönerler ve bu durumda net dipol moment sıfır olur. Elektrik alanı yok iken ve mevcutken yönelimli kutuplanmayı gösteren Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

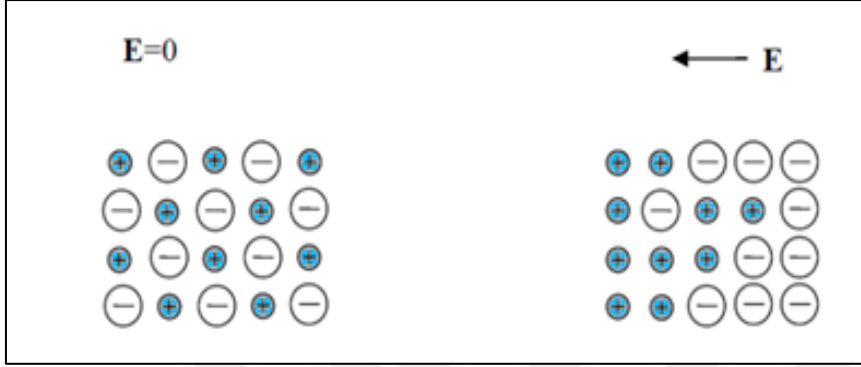


Şekil 3.6. Yönelimli kutuplanma

### 3.2.4. Arayüzeysel (uzay yük) kutuplanması

Arayüzeysel veya uzay yük polarizasyonu, birden fazla faz/bölge gösteren tüm malzemelerde yaygın olarak meydana gelir. Elektronik özelliklerdeki farklılıklar nedeniyle, polikristallerdeki tane sınırları, yarı kristal polimerlerdeki amorf faz ile kristal faz arasındaki arayüzey gibi farklı fazlar/bölgeler arasındaki arayüzeyde ve ayrıca bazı yapısal kusurlar ve safsızlıklarda yük birikmesi beklenebilir. Bu arada arayüzeysel polarizasyon, birçok kapasitör uygulaması için frekans aralığındaki birincil polarizasyon mekanizmasıdır. Arayüzeysel kutuplanma, yük taşıyıcılarının (elektronlar, deşikler veya iyonlar) arayüzeylerde veya tane sınırlarında tuzaklanmasından kaynaklanır. Bir dielektrik malzemede, lokalize olmuş yükler bulunduğu yerden komşu bir bölgeye sıçrayabilir. Sonrasında bu yükler lokalize durumlar içerisine tuzaklanır. Düşük frekanslı alan

uygulandığında, yük taşıyıcıları belli bir mesafe kadar yer değiştirebilir. Yer değiştiren yüklerin hareketi engellendiğinde arayüzeysel kutuplanma meydana gelir. Bu durum aynı zamanda yük birikimine ve bundan dolayı da kapasitans artışına neden olabilir. Bu kutuplanma türü düşük frekans bölgelerinde etkili olup radyo ve mikrodalga frekans bölgesinde görülür. Arayüzeysel kutuplanma mekanizması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Arayüzeysel kutuplanma

### 3.3. Dielektrik Malzemeler

Dielektrik, içinde hiçbir hareketli yük taşıyıcısının (elektronlar veya iyonlar) mevcut olmadığı malzeme anlamına gelir. Dielektrik malzemelerin akım taşıyacak serbest elektron bulunmadığından elektriksel iletkenliği çok düşüktür. Dielektrik malzemelerin direnç sıcaklık katsayısı negatiftir ve yalıtım direnci yüksektir. Yani, dielektrik malzemeler yüksek dirence sahiptir. Elektronlar ile çekirdek arasındaki çekim çok güçlüdür. Dielektrik maddeler katı (seramik, plastik, cam, metal oksitler vb.), sıvı (damıtılmış su) ve gaz (kuru hava, vakum, nitrojen ve helyum) halinde bulunabilirler. Dielektrikler çoğunlukla katıdır. Dielektriklerin bazıları ise zayıf bağlı moleküllerden oluşur. Ayrıca bazı sıvılar ve gazlar, dielektrik malzemeler olarak kullanılabilir. Örneğin suyun dielektrik özelliği oldukça yüksektir. Kuru hava mükemmel bir dielektrik, vakum ise son derece verimli bir dielektriktir. Enerji depolamak için dielektrik malzemeler kullanılır. Bir malzemenin yük depolama karakteristiği dielektrik sabiti olarak tanımlanır. Dielektrik malzemelerde dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp önemli parametrelerdir. Düşük dielektrik sabiti olan malzemelere örnek olarak vakum, kuru hava ve helyum ve nitrojen gibi saf, kuru gazlar verilebilir. Cam, seramik, kağıt, mika ve polietilen gibi katı malzemeler ise orta dielektrik sabitine sahiptir. Kapasitörlerde daha çok yüksek dielektrik sabitine sahip polimerler veya metal oksit malzemeler kullanılmaktadır [37,41].

Dielektrik malzemeler yalıtkan özellikleri nedeniyle birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek gerilim uygulamalarında, elektrikli cihazlarda, kablolarda, kapasitörlerde ve diğer elektronik devrelerde, radyasyon önleme ve manyetik alanların engellenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, dielektrik malzemeler, medikal cihazlarda, sabitleyicilerde, optik cihazlarda, mikrodalga fırınlarda ve otomobil endüstrisinde de kullanılmaktadır. Bu malzemelerin sertliği, dayanıklılığı ve yalıtkan özellikleri, çeşitli endüstrilerdeki ihtiyaçları karşılamak için idealdir [42].

Dielektrikler malzemeler, malzemede bulunan molekül tipine göre gruplandırılır. İki tür dielektrik vardır: Polar ve polar olmayan dielektrik.

#### Polar dielektrik

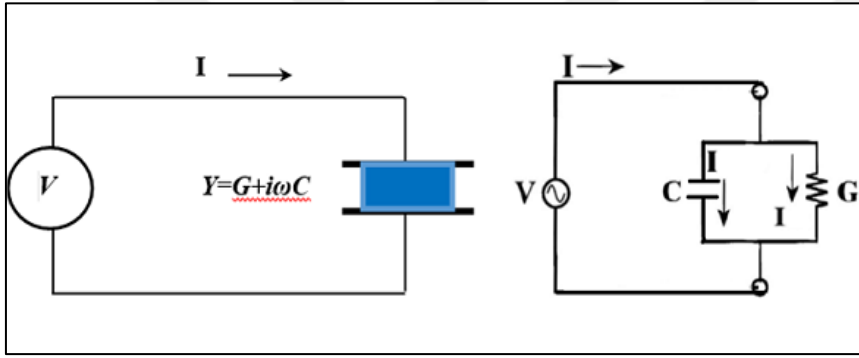
Polar dielektriklerdeki pozitif parçacıkların kütle merkezi, negatif parçacıkların kütle merkezi ile çakışık değildir. Dış elektrik alan yokken net ve kalıcı dipol momentine sahip olan dielektriklerdir. Moleküllerin şekli asimetriktir. Elektrik alanı uygulandığında moleküller elektrik alanıyla aynı hizaya gelir. Elektrik alanı kaldırıldığında rastgele dipol momentleri gözlenir ve moleküllerdeki net dipol momentleri sıfır olur. Bu nedenle polar dielektriklerde hem elektronik hem de iyonik kutuplanma görülür. Polar dielektriklere örnek olarak polimerler, su, alkol, aseton, diğer bazı organik sıvılar ve katılar, seramikler, inorganik oksitler, gaz halindeki HCl, buhar vb. malzemeler verilebilir.

#### Polar olmayan dielektrik

Polar olmayan dielektriklerde, pozitif parçacıkların ve negatif parçacıkların kütle merkezleri çakışıktır. Bu moleküllerin dipol momentleri yoktur. Bu dielektrikler simetri içeren moleküllerden oluşur. Dış elektrik alan yokken dielektriklerin net ve kalıcı bir dipol momentleri yoktur. Bu tür malzemelerde dış elektrik alan etkisiyle elektron bulutlarının yeri değişmektedir. Bu nedenle polar olmayan malzemelerde sadece elektronik kutuplanma meydana gelmektedir.  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  gibi aynı cins iki atomdan meydana gelen moleküller polar olmayan dielektriklerdir. Bu tür dielektriklerde mor ötesi ve görünür bölge frekanslarında ( $\sim 10^{15}$  Hz) rezonans olayı görülür. Rezonans frekansından daha küçük frekanslarda dielektrik sabiti frekanstan bağımsızdır.

### 3.4. Dielektrik Özellikler

Dielektrik malzemenin temel özellikleri arasında dielektrik geçirgenlik, elektriksel elektriksel duygunluk, dielektrik polarizasyon, dielektrik durulma, dielektrik dayanım, kayıp faktörü vb. yer almaktadır. Dielektrik geçirgenlik genel olarak dielektrik sabiti olarak adlandırılır. Dielektrik sabiti, alternatif elektrik alanının frekansına veya zamanla değişen alanın değişim hızına güçlü bir şekilde bağlıdır. Bu aynı zamanda malzemenin kimyasal yapısına ve kusurlarına olduğu kadar sıcaklık ve basınç gibi diğer fiziksel parametrelere de bağlıdır. Elektrik alanların dielektrik malzemeler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla dielektrik içeren paralel plakalı kapasitör bir eşdeğer elektriksel devre ile özdeşleştirilir. Bu eşdeğer devre Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Dielektrik malzeme içeren paralel plakalı kapasitörün eşdeğer devresi

Dielektrikli paralel plakalı bir kondansatörün admitansı (Y),

$$Y = G + j\omega C = \frac{1}{Z} \quad (3.11)$$

olarak verilir. Burada, C kapasitans, G iletkenlik/kondüktans ve  $\omega$  açısal frekanstır. Empedans (Z) admitansın tersine eşittir. Plakaları arasında dielektrik madde bulunan kondansatörün kapasitesi (sığası)  $\epsilon'$  çarpanı kadar artar. Admitans eşitliğinde C yerine  $C_0\epsilon^*$  yazılırsa,

$$Y = G + j\omega(C_0\epsilon^*) \quad (3.12)$$

Burada  $\epsilon^*$  kompleks dielektrik geçirgenlik veya dielektrik sabiti olup dielektrik malzemelerin dielektrik özelliklerini tanımlar ve,

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.13)$$

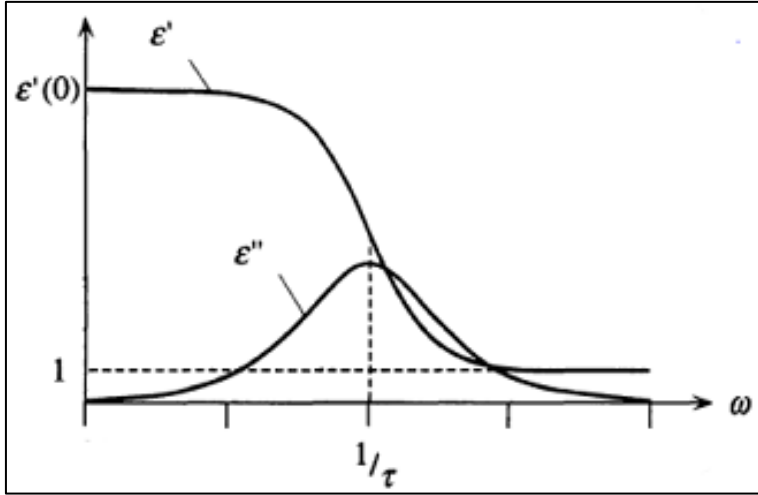
ile verilir [12-14,31,32]. Burada, ilk terim kompleks dielektrik geçirgenliğin reel kısmını ( $\varepsilon'$ ), ikinci terim ise imajiner kısmını temsil etmektedir ve dielektrik kayıp ( $\varepsilon''$ ) olarak adlandırılır. Dielektrik sabiti, uygulanan dış elektrik alan altında dielektrik malzeme tarafından depolanan enerjinin bir ölçüsüdür. Dielektrik kayıp dielektrik malzemede kaybedilen enerjiyi ifade eder. Elektrik alanda dielektrikteki dipollerin yeniden yönlendirilmesi sürtünme kayıplarına neden olur. Bu ifade admitans eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$Y = (G + \varepsilon'' C_0) + j\varepsilon C_0 \varepsilon' \quad (3.14)$$

eşitliği elde edilir. Buna göre admitansın reel ve sanal bileşenleri aşağıda verilen eşitliklerle ifade edilir:

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad \text{ve} \quad \varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} \quad (3.15)$$

Burada, dielektrik sabiti  $\varepsilon'$  ve dielektrik kayıp  $\varepsilon''$  frekansa bağlıdır. Dielektrik sabiti  $\varepsilon'$ , ve dielektrik kaybın  $\varepsilon''$  açısal frekansa ( $\omega$ ) bağlı değişim eğrileri Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Düşük frekanslarda ( $\omega \ll 1/\tau$ ), dielektrik sabiti maksimum değeri olan  $\varepsilon'(0)$ 'a yaklaşmaktadır. Diğer bir değişle  $\omega=0$  olduğunda dielektrik sabiti statik değerine ulaşır. Frekans arttıkça ( $\omega \gg 1/\tau$ ) dielektrik sabiti  $\varepsilon'(\infty)$  değeri olan 1 değerine ulaşır. Netice olarak, dielektrik sabiti frekansa bağlı olup artan frekansla azalmaktadır. Dielektrik kayıp  $\varepsilon''$  düşük ve yüksek frekanslarda sıfır değerine yaklaşmaktadır. Fakat  $\omega\tau=1$  olduğunda bir maksimum değer almaktadır. Dielektrik kaybın maksimum olduğu noktada, enerjinin alan tarafından depolanması ve rastgele çarpışmalara aktarılması aynı oranda gerçekleşir. Bundan dolayı enerji, ısı olarak aktarılır. Dielektrik kaybın ( $\varepsilon''$ ) maksimum olduğu frekans durulma frekansıdır ve  $\omega=1/\tau$  'dur. Dielektrik malzemelerde dielektrik sabiti  $\varepsilon' > 1$ 'dir ve her zaman  $\varepsilon'' > 0$ 'dır.

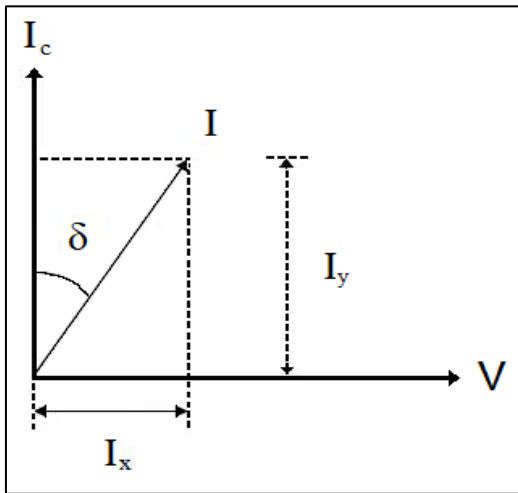


Şekil 3.9. Dielektrik sabitinin ve dielektrik kaybın açısal frekansa bağlı değişim grafiği

AC gerilim uygulandığında, dielektrik malzemeden geçen toplam akım  $I$ ,

$$I = I_x + jI_y \quad (3.16)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlikte  $I_x$  gerilim ile aynı fazda olan akımın reel bileşenidir.  $I_x = V\omega\epsilon''C_0$  ile verilir.  $I_y$  gerilim ile farklı fazdadır ve akımın sanal ya da sığasal bileşenidir.  $I_y = V\omega\epsilon'C_0$  eşitliği ile verilir. Akım-voltaj grafiği Şekil 3.10 da verilmiştir.



Şekil 3.10. Akım-voltaj eğrisi

Şekilde görülen  $\delta$  açısı, faz açısını 90 dereceye tamamlayan sapma açısıdır ve kayıp açısı olarak tanımlanır. Bu açının tanjantı ( $\tan\delta$ ) ise dielektrik kayıp açısı olarak adlandırılır ve aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$\tan\delta = \left| \frac{I_R}{I_C} \right| = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{G}{\omega C} = \frac{1}{\omega RC} \quad (3.17)$$

Dielektriksiz paralel plakalı bir kondansatöre V gerilimi uygulandığında plakalarda depolanan yük:

$$Q = C_0 V \quad (3.18)$$

eşitliği ile verilir. Burada,  $C_0$  plakalar arasındaki boş kondansatörün sığasıdır. Kondansatöre uygulanan alternatif bir gerilim:

$$V(t) = V_0 e^{i\omega t} \quad (3.19)$$

ile verilir. Bu eşitliğe göre, kondansatörden geçen akım,

$$I_1 = i\omega C_0 V \quad (3.20)$$

eşitliği ile ifade edilir. Dielektrik sabiti  $\varepsilon'$  olan malzeme paralel plakalı kondansatörün levhaları arasına yerleştirilirse, kondansatörün sığası,

$$C = C_0 \varepsilon' \quad (3.21)$$

olarak ifade edilir. Bu durumda kondansatörden geçen akım,

$$I_2 = i\omega \varepsilon' C_0 V \quad (3.22)$$

eşitliği ile verilir. Kondansatörden geçen akımın iki bileşeninden birisi uygulanan gerilimle aynı fazda olan bileşeni, diğeri ise gerilimle farklı fazda olan bileşenidir. Akım denklemi şu eşitlikle verilir.

$$I = i\omega(\varepsilon' - i\varepsilon'')C_0 V = \omega\varepsilon''C_0 V + i\omega\varepsilon'C_0 V \quad (3.23)$$

Akım yoğunluğu toplam akımın kesit alanına bölümüdür. Yani  $J = \frac{I}{A}$  dir. Bu durumda akım yoğunluğu,

$$J = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' E + i \omega \varepsilon_0 \varepsilon' E \quad (3.24)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlikten yola çıkarak kompleks elektriksel iletkenlik,

$$\sigma = \frac{J}{E} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' + i \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \quad (3.25)$$

ile ifade edilir. Bu eşitlikte kompleks iletkenliğin reel kısmı  $\omega \varepsilon_0 \varepsilon''$ , sanal kısmı ise  $\omega \varepsilon_0 \varepsilon'$  olup, reel kısım AC elektriksel iletkenlik ( $\sigma_{ac}$ ) olarak adlandırılır.

$$\sigma_{ac} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad (3.26)$$

Bunun dışında dielektriklerle ilgili olarak Elektrik modülüs ( $M^*$ ) kavramı geliştirilmiştir. Dielektrik durulma olayını analiz etmek için bu metod kullanılmaktadır [15,37,41-44]. Kompleks elektrik modülüs ( $M^*$ ) şu şekilde ifade edilir.

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + iM'' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (3.27)$$

Bu eşitlikte,  $M'$  elektrik modülüsün reel kısmını,  $M''$  ise sanal kısmını temsil etmektedir.

$$M'(\omega) = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'(\omega)^2 + \varepsilon''(\omega)^2} \quad (3.28)$$

$$M''(\omega) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'(\omega)^2 + \varepsilon''(\omega)^2} \quad (3.29)$$

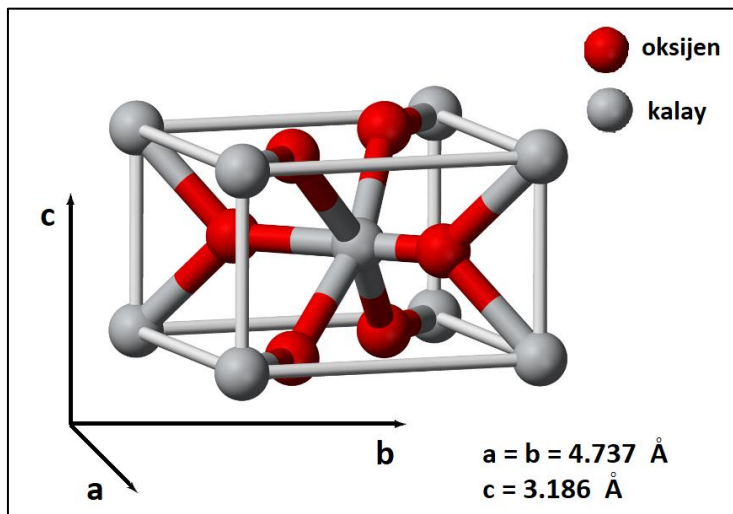
olarak ifade edilmektedir.

## 4. DENEYSEL YÖNTEM

### 4.1. Kalay Oksit ( $\text{SnO}_2$ ) Özellikleri

Kalay oksit,  $\text{SnO}_2$  formülüne sahip inorganik bir bileşik, ve renksiz, diyamanyetik, amfoterik bir katıdır.  $\text{SnO}_2$  genellikle oksijeni eksik olan n-tipi bir yarıiletken olarak kabul edilir. Yüksek optik geçirgenlik, yüksek yansıtıcılık, düşük iletkenlik ve yüksek mekanik sertlik  $\text{SnO}_2$ 'nin en belirgin özellikleridir.  $\text{SnO}_2$ 'nin sulu formları stannik asit olarak adlandırılır. Ayrıca kalay oksitin iletkenliği In, Nb, Sb, F gibi çeşitli elementlerin katkılanması ile artırılabilir [45-47].  $\text{SnO}_2$  cam, emaye ve seramik sırlarının üretiminde pigment olarak kullanılmaktadır. Kalay oksit cam, mermer ve gümüşün parlatılması için bazen kurşun oksitle de karıştırılarak parlatma tozu olarak da kullanılmaktadır.  $\text{SnO}_2$ , karbonmonoksit dedektörleri dahil yanıcı gaz sensörlerinde kullanılır [48-51].

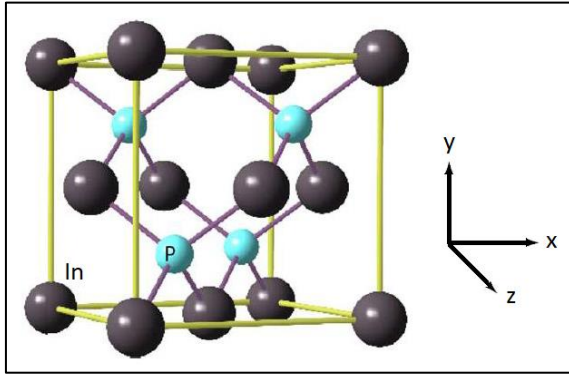
Kalay oksit rutil yapıyla kristalleşir. Bu nedenle kalay atomları altı koordinatlı, oksijen atomları ise üç koordinatlıdır. Kalay atomu, düzgün oktahedranların köşelerinde bulunan 6 oksijen atomun merkezinde bulunmaktadır. Her oksijen atomu eşkenar üçgenin köşelerindeki 3 kalay atomu tarafından çevrelenmiştir. Kristal yapıdaki iki oksijen atomunun arasındaki mesafe (O-O) 4.6646 Å'dur. Oksijen atomu ile kalay atomu arasındaki mesafe (O-Sn) 3.7662 Å 'dur. Kristal yapının boyutları  $a = b = 4.738$  Å ve  $c = 3.187$  Å'dur. Şekil 4.1'de kalay oksitin kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kalay oksitin kristal yapısı

## 4.2. İndiyum Fosfat (InP) Özellikleri

Periyodik tablonun üçüncü metalik grubunda bulunan bir element ile beşinci grubunda bulunan metal olmayan bir elementin bir araya gelmesiyle GaAs, InP, GaN, InSb ve InAs gibi ikili kristal yapıda bileşik yarıiletkenler oluşur. İndiyum-fosfat (InP), fosfor ve indiyum içeren ikili bir yarıiletken olup çinko blend kristal yapısına sahiptir [52,53]. Bu bileşik kristaller yüksek mobilitelere sahiptirler. Yüksek elektron mobilitesi ve yüksek ısısal iletkenliği nedeniyle InP, elektronik devre elemanların yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca, optik iletişimde kullanılan ışığın bant aralığına yakın bant aralığına sahip olması ve büyük kırılma indisine sahip olmasından dolayı milimetrik ve mikrodalga frekanslarında çalışan sistemlerde kullanılır [54]. III-V grubu bileşikleri, her köşesinde atomlar bulunan kübik kafes (tetrahedral) şeklinde benzeri bir yapıya sahiptir. Bu kristal yapısı Şekil 4.2’de gösterilmiştir. İndiyum-fosfat 1,344 eV’luk bir enerji bant aralığına sahiptir. Birçok yarıiletkenden farklı olarak doğrudan bir bant aralığına sahip olmasından dolayı lazer diyotlar gibi optoelektronik cihazlarda kullanılır. Ayrıca lazerler, ışık yayan diyotlar (LED), yarıiletken optik amplifikatörler, modülatörler ve foto-dedektörler olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 4.2. Tetrahedral kristal yapısı

## 4.3. Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) Kapasitörün Hazırlanması

### 4.3.1. Kristal temizleme

Bu tez çalışmasında, Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitörü hazırlamak için, 2" çaplı, 350  $\mu\text{m}$  kalınlığında, (100) yönelimli ve  $1-3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  taşıyıcı konsantrasyonlu çinko (Zn)-katkılı p-tipi indiyum fosfat (InP) alttaş kullanıldı. Fabrikasyon

işleminden önce, InP alttaş organik kirlerden arındırmak ve üzerindeki doğal oksit tabakasını kaldırmak için kimyasal temizleme işlemine tabi tutuldu. Her temizleme işleminden sonra alttaş yüksek dirençli deiyonize suda ultrasonik olarak yıkandı. Son olarak, alttaş kristal yüzeyinin oksitlenmemesi için azot ( $N_2$ ) gazı ile kurulandı. Kimyasal temizleme ve oksit aşındırma işleminden sonra InP alttaş radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme sistemine yerleştirildi. Kalay oksit ( $SnO_2$ ) film, radyo frekans (RF) magnetron püskürtme tekniği ile p-InP alttaş üzerini biriktirildi.

#### 4.3.2. InP üzerine $SnO_2$ tabakasının oluşturulması

Magnetron püskürtme sistemi, bir magnetron deşarj plazma sayesinde hedef malzemenin püskürtülmesi yoluyla alttaş yüzeyi üzerinde ince filmlerin biriktirilmesine imkan sağlamaktadır. Püskürtmeli biriktirme, fiziksel buhar biriktirme yöntemi olarak sınıflandırılan bir ince film biriktirme tekniğidir. Bu püskürtme sistemde, argon (Ar) işlem gazı kullanılarak düşük basınçlı bir plazma elde edilir. Radyo frekans (RF) magnetron püskürtme, argon iyonlarının püskürtülecek malzemeden yapılmış bir hedefi vurmak için bir RF elektrik alanı tarafından hızlandırıldığı bir tekniktir. Hedef malzeme ilk olarak bir plazma içinde iyon bombardımanı yoluyla püskürtülür ve böylece buhar fazına dönüştürülür. Parçacık buharı daha sonra kaplanacak alttaş üzerinde ince bir film olarak biriktirilir.

RF/DC magnetron püskürtme sistemi, püskürtme yoluyla ince film biriktirme aracıdır. Sistem, çok katmanlı optik kaplamalar, sensör cihazları, güneş pilleri, ince film araştırmaları, manyetik cihazlar ve biyomedikal araştırmalar olmak üzere çeşitli uygulamalar için filmleri biriktirmek için kullanılmaktadır. DC püskürtmede, güç kaynağı yüksek voltajlı bir DC kaynağıdır. DC püskürtme yöntemiyle Au, Ag, Pt, Cu ve Zn gibi metal filmler biriktirilebilir. RF püskürtmede, güç kaynağı genellikle 13.56 MHz'de sabitlenmiş yüksek voltajlı bir RF kaynağıdır. RF püskürtme yöntemiyle  $SiO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $TiO_2$ , ZnO,  $Al_2O_3$  gibi dielektrik malzemeler biriktirilebilir. Ayrıca magnetron püskürtme sisteminde, reaktif gaz olarak oksijen ( $O_2$ ) veya azot ( $N_2$ ) gazı kullanılmaktadır. Eğer bir malzemenin oksitli bileşimi oluşturulacak ise  $O_2$ , azotlu bileşimi oluşturulacak ise  $N_2$  gazı kullanılır. 2 RF kaynağı ve 3 tane DC güç kaynağından oluşan BESTEC püskürtme sistemi Resim 4.1'de verilmiştir.



Resim 4.1. Püskürtme sistemi

P-tipi InP üzerine RF magnetron püskürtme tekniği ile kalay oksit (SnO<sub>2</sub>) ince film biriktirmek için ilk önce InP yükleme odasına alındı. SnO<sub>2</sub> film oluşturmak için %99.99 saflıkta SnO<sub>2</sub> hedef malzemesi kullanıldı. Biriktirme öncesi püskürtme odası,  $3,7 \times 10^{-8}$  mbar taban basınca kadar vakumlandı. Film biriktirme sırasında, argon (Ar) püskürtme gazı olarak kullanıldı. Biriktirme haznesindeki Ar gazı akışı bir kütle akış kontrolörü kullanılarak kontrol edildi. Ar gazı akış oranı 12 sccm' de sabit tutuldu. Aynı zamanda, alttaş sıcaklığı ve biriktirme basıncı sırasıyla 200 °C ve  $3,9 \times 10^{-3}$  mbar olarak ayarlandı. Böylece, kalay oksit hedef kullanılarak InP alttaş üzerine SnO<sub>2</sub> yalıtkan oksit tabakası oluşturma işlemi tamamlandı.

#### 4.3.3. Omik ve doğrultucu kontağın oluşturulması

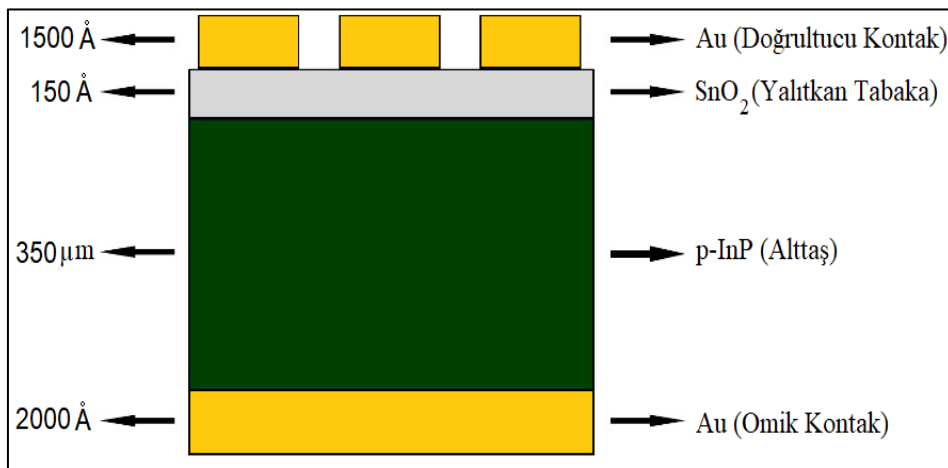
Omik ve doğrultucu kontakları oluşturmak için Resim 4.2'de gösterilen yüksek vakum termal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Biriktirme işleminden sonra, yaklaşık 2000 Å kalınlıkta altın (Au) omik kontak, 320 °C ve  $4,2 \times 10^{-8}$  mbar vakum altında p-InP alttaşın arka yüzüne oluşturuldu. Daha sonra, numune azot altında 3 dakika boyunca 300 °C'de hızlı tavlama sisteminde (RTA) tavlandı. Yaklaşık 1500 Å kalınlıklı Au dairesel üst veya

doğrultucu kontak 50 °C ve  $3,1 \times 10^{-8}$  mbar vakum altında bir maske kullanılarak hazırlandı ve böylece SnO<sub>2</sub> film yüzeyi üzerine oluşturuldu.



Resim 4.2. Termal buharlaştırma sistemi

Doğrultucu kontak olarak 2 mm çaplı bakır maske kullanıldığından kontak yani MOS alanı  $3,14 \times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Böylece, kontakların oluşturulmasıyla Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP metal-oksit-yarıiletken (MOS) kapasitörün fabrikasyon işlemi tamamlanmış oldu. Püskürtülerek biriktirilmiş SnO<sub>2</sub> film veya oksit tabaka kalınlığı, yığılım bölgesinde ölçülen oksit kapasitans ( $C_{ox}$ ) kullanılarak yaklaşık 150 Å olarak bulundu. Hazırlanan Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP MOS kapasitörün şematik gösterimi Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP/Au (MOS) kapasitörün şematik gösterimi

#### 4.4. Deneysel Ölçüm Sistemleri

Bu tez çalışmasında hazırlanan Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün oda sıcaklığında frekansa bağlı admitans ( $Y=G+i\omega C$ ) yani kapasitans ve ( $C$ ) ve iletkenlik ( $G/\omega$ ) ölçümleri Resim 4.3’ te gösterilen HP 4192A Empedans Analizörü (5Hz-13MHz) kullanılarak gerçekleştirildi.

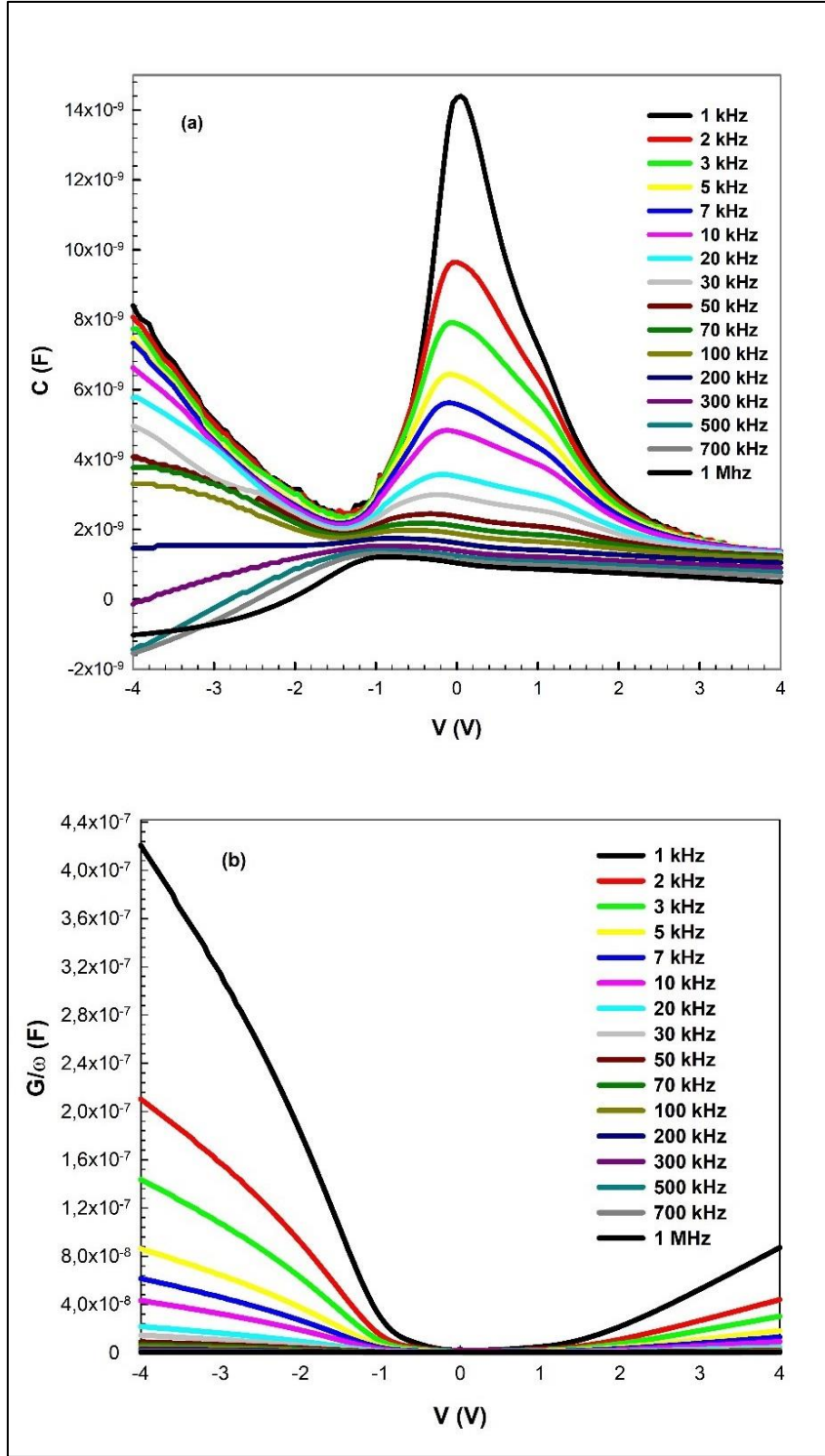


Resim 4.3. Empedans Analizörü

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

### 5.1. Kapasitans/İletkenlik-Gerilim-Frekans Karakteristikleri

Elektriksel admitans ( $Y=G+i\omega C$ ) ölçümleri, elektronik cihazların elektriksel karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılır. Ayrıca admitans tekniği paralel AC devrelerin analizinde kullanılmaktadır. Admitans ölçümleri, uygulanan ön gerilimin bir fonksiyonu olarak kapasitans (C) ve iletkenlik (G) ölçümlerine dayanır. Hazırlanan Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün oda sıcaklığında 1 kHz ile 1 MHz frekans ve -4 V ile +4 V voltaj aralığında admitans ölçümleri yani kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçlarından, uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak MOS kapasitörün C-V ve G/ω-V eğrileri çizildi ve sırasıyla Şekil 5.1 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Bu grafiklerden MOS kapasitörün kapasitans ve iletkenlik değerlerinin hem uygulanan öngerilime hem de frekansa bağlı olduğu görülmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, kapasitans ve iletkenlik değerleri artan frekans ile azalmaktadır. Kapasitansın ve iletkenliğin frekansa bağlı olarak değişmesi arayüzey durumlarının (N<sub>ss</sub>) varlığı ile açıklanabilir [1,4,9,10,55]. Arayüzey durumlarının /tuzaklarının varlığı, özellikle C-V eğrilerinde tükenim ve yığılım bölgelerinde ideal durumundan sapmalara neden olabilmektedir. Ayrıca, kapasitansın büyüklüğü, arayüzey durumlarının frekansını takip etme yeteneği ile belirlenir. Düşük frekanslarda, periyodun değeri (T) arayüzey tuzaklarındaki taşıyıcı ömrü yani arayüzey durumlarının yaşam süresinden (τ) çok daha büyüktür. Bu durumda arayüzey durumları uygulanan alternatif akım (ac) sinyali takip edebilmekte ve MOS kapasitansa bir katkı sağlamaktadır. Arayüzey durumlarının kapasitansa katkısı düşük ve orta frekanslar ile tükenim bölgesinde daha fazladır. Yüksek frekanslarda ise arayüzey durumları uygulanan ac sinyali yeterince takip edemez ve dolayısıyla MOS kapasitansına katkıda bulunmazlar [55-61]. Bu nedenle, yüksek frekanslarda kapasitans değeri düşük frekanslara göre düşüktür. Ayrıca, Şekil 5.1 (a)'da görüldüğü gibi, C-V eğrilerinde tükenim bölgesinde özellikle düşük frekanslarda bir pik ortaya çıkmaktadır. Bu durum düşük frekanslarda arayüzey durumlarının etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, pik şiddeti artan frekansla azalmaktadır.

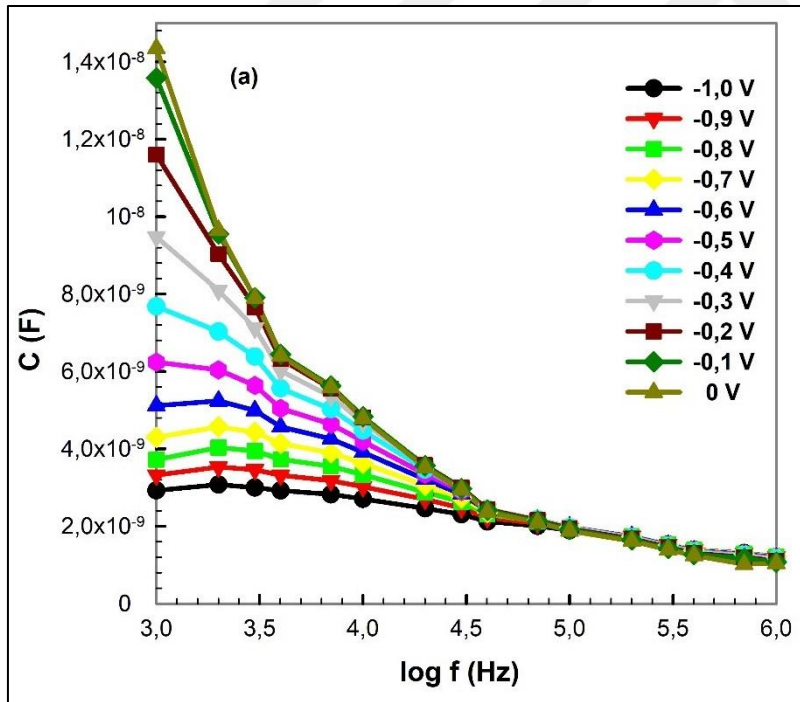


Şekil 5.1. Farklı frekanslarda uygulanan öngerilimin fonksiyonu olarak MOS kapasitörün  
(a) C-V eğrisi (b)  $G/\omega$ -V eğrisi

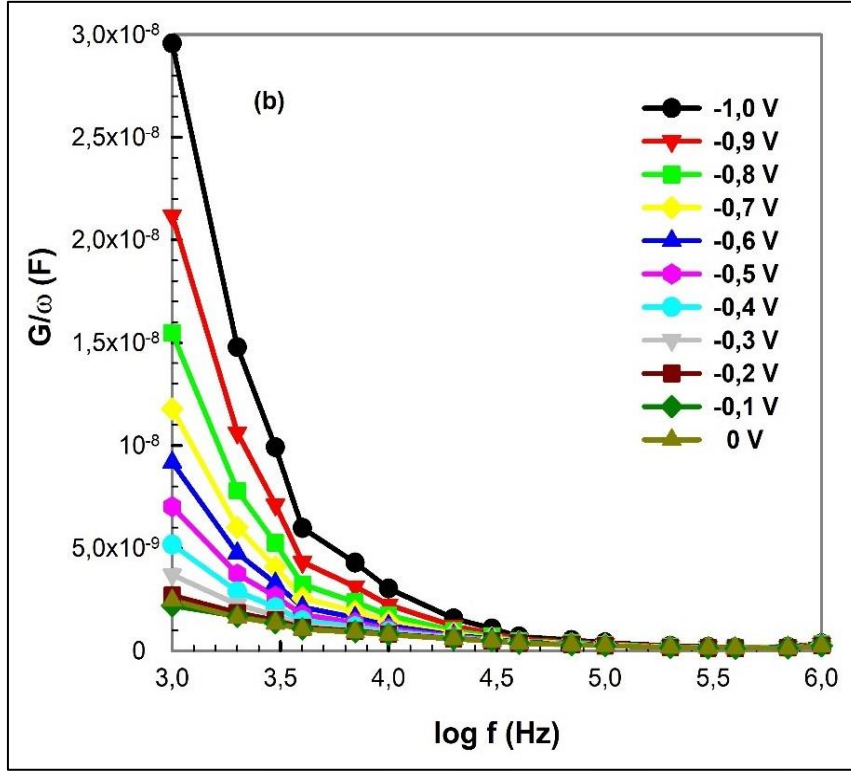
İlave olarak, Şekil 5.1 (a)'da görüldüğü gibi, kapasitans değerleri özellikle 100 kHz'den büyük frekanslarda yani yüksek frekanslarda negatif olmaktadır. Bu anormal durum, negatif kapasitans (NC) davranışı olarak adlandırılmaktadır. NC, uygulanan öngerilim voltajındaki artışın elektrotlardaki yük sayısında bir azalmaya neden olması nedeniyle meydana gelir [62-

65]. Negatif kapasitans, cihazın endüktif bir davranış sergilediğini de gösterir. Ayrıca, çeşitli elektronik cihazlar (p-n bağlantıları, metal-yarıiletken Schottky diyotları gibi) tarafından sergilenen negatif kapasitansın temel olarak kontak enjeksiyonuna, arayüzey durumlarına veya azınlık taşıyıcı enjeksiyon etkilerine atfedilmiştir.

C ve  $G/\omega$  değerlerinin uygulanan gerilim ile nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla, farklı doğru öngerilimler (pozitif gerilimler) için frekansın bir fonksiyonu olarak tükenim bölgesindeki C-logf ve  $G/\omega$ -logf eğrileri çizildi ve bu eğriler Şekil 5.2 (a) ve (b) de gösterilmiştir. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi, hem C hem de  $G/\omega$  değerleri düşük frekanslarda uygulanan gerilime bağlıdır. Fakat, hem C hem de  $G/\omega$  değerleri yüksek frekanslarda uygulanan gerilimden hemen hemen bağımsız hale gelmektedir. Yani, yüksek frekanslardaki değişim düşük frekanslara göre daha azdır. Düşük frekanslarda ise arayüzey durumların katkısından dolayı, hem C hem de  $G/\omega$  değerleri yüksektir. Yüksek frekanslarda ise kapasitansa arayüzey durumlarının katkısı yoktur.



Şekil 5.2. MOS kapasitörün farklı doğru öngerilimler için frekansın bir fonksiyonu olarak (a) C-logf ve (b)  $G/\omega$ -logf eğrileri



Şekil 5.2. MOS kapasitörün farklı doğru öngerilimler için frekansın bir fonksiyonu olarak (a)  $C-\log f$  ve (b)  $G/\omega-\log f$  eğrileri

## 5.2. Seri direnç ( $R_s$ )

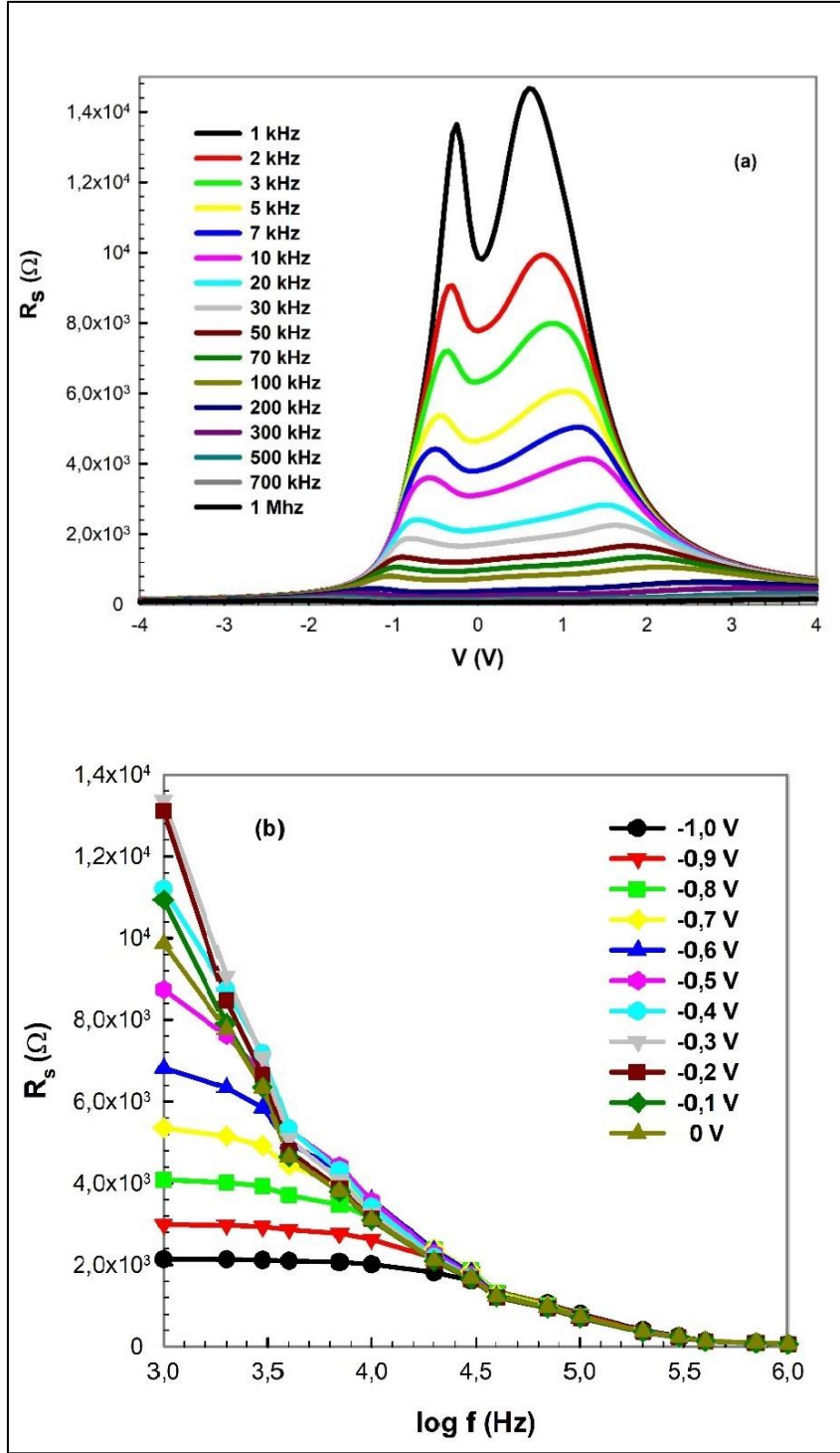
Seri direnç ( $R_s$ ), yarıiletken aygıtların akım-voltaj (I-V) and kapasitans/iletkenlik-voltaj (C/G-V) karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Aygıtların elektririksel performansı üzerinde önemli ve dezavantajlı bir etkiye sahiptir. MIS tipi Schotkyy diyotların ve MIS/MOS kapasitörlerin kapasitans/iletkenlik-voltaj (C/G-V) karakteristiklerinde özellikle yüksek frekanslarda seri direncin yığılım bölgesinde, düşük frekanslarda ise arayüzey durumlarının tükenim bölgesinde etkili olduğu görülmektedir. Seri dirençten dolayı ölçülen kapasitans beklenen kapasitanstan daha düşük olabilir ve ölçülen C-V eğrisini önemli ölçüde bozabilir. Seri dirence ( $R_s$ ) en büyük katkı, yarıiletken aygıt oluşturan iletken malzemenin direncinin yanı sıra, metalik iletkenle (metal kontaklar) temas halinde olan yarıiletkenin direncinden gelir.

Seri direnç değerini belirlenmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Empedans spektroskopisi, yarıiletken cihazların eşdeğer devrelerinin farklı bileşenlerini, özellikle de seri direnci analiz etmek için en uygun yöntemdir. Seri direnç ölçülen kompleks empedansın ( $Z^*=Z'+iZ''$ ) imajiner/sanal kısmını etkilemediğinden, MOS yapısının seri direncini ölçülen

kompleks empedansının reel/gerçel bileşeni belirlemektedir. Paralel bağlı direnç ve kapasitörden oluşan eşdeğer devre yani paralel RC eşdeğer devre modeline göre, MOS kapasitörün kompleks empedansının ( $Z=1/Y=1/(G+i\omega C)$ ) reel kısmı seri direnci ( $R_s$ ) verir. Ayrıca, paralel devrenin R değeri ile iletkenlik (G) değeri arasında  $G = 1/R$  ilişkisi vardır. Bu çalışmada, seri direnci belirlemek için Nicollian ve Goetzberger [9,24,55] tarafından geliştirilen iletkenlik yöntemini kullandık. Bu yöntemde MOS kapasitörün ölçülen  $C_{ma}$  ve  $G_{ma}$  değerleri kullanılır. Seri direnç değeri aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + \omega^2 C_{ma}^2} \quad (5.1)$$

Eşitlikte yer alan  $C_{ma}$  ve  $G_{ma}$ , sırasıyla kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak farklı frekans değerleri için çizilen  $R_s$ -V eğrileri Şekil 5.3(a)'da verilmiştir. Bu şekilden, seri direncin frekansa bağlı olduğu ve artan frekansla değerinin azaldığı görülmektedir.  $R_s$  -V eğrilerinin düşük frekanslarda hem negatif hem de pozitif gerilim bölgelerinde iki pik verdiği gözlenmiştir. Bu, piklerden birinin arayüzey durumlarının varlığından ve bunların yarıiletken bant aralığındaki özel dağılımından, diğerinin ise arayüzey oksit tabakasından kaynaklandığı söylenebilir. Bununla beraber, gözlemlenen bu piklerin şiddeti artan frekansa bağlı olarak azalmaktadır. Ayrıca, ilk pikin pozisyonu artan frekansla daha düşük negatif voltaja doğru, ikinci pikin pozisyonu ise artan frekansla daha yüksek pozitif voltaja doğru kaymaktadır. MOS kapasitörün farklı negatif gerilimler için çizilen  $R_s$ -logf eğrileri Şekil 5.3(b)'de verilmiştir. Seri direncin büyüklüğü düşük frekanslarda daha yüksektir. Bu durum oksit/yarıiletken arayüzeyinde yer alan arayüzey tuzak durumlarının belirli bir dağılımına atfedilir [60,66-71]. Ayrıca, arayüzey tuzak durumlarının uygulanan ac sinyaliyle tamamen takip edebildiği düşük frekanslarda, yük taşıyıcılarının arayüzey tuzak durumlarından kaçmak için yeterli enerjiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, düşük frekanslarda seri direnç yüksek bir değer gösterir. Bunun aksine, yüksek frekanslarda arayüzey tuzak durumları uygulanan ac sinyalini takip etmediğinden seri direnç düşük olacaktır. Ayrıca, yüksek frekanslarda seri direnç değerinin voltaj ile hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir.



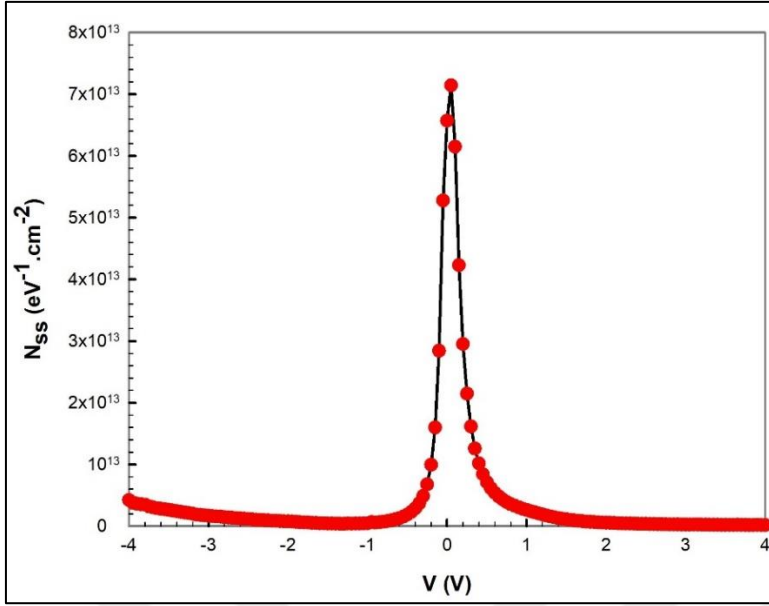
Şekil 5.3. Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün (a)  $R_s$ - $V$  eğrisi (b)  $R_s$ - $\log f$  eğrisi

### 5.3. Arayüzey durum yoğunluğu ( $N_{ss}$ )

MOS kapasitörün oksit/yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları kapasitans-voltaj (C-V) eğrisinin ideal C-V eğrisinden sapmasına neden olmaktadır. Arayüzey durumlarının kapasitansa katkısı düşük ve orta frekanslar ile tükenim bölgesinde daha fazladır. Arayüzey tuzak/durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) değerini belirlemek için, yüksek-düşük frekans kapasitans ( $C_{HF}-C_{LF}$ ), paralel iletkenlik, Hill-Coleman, Terman yöntemi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün arayüzey durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) hesaplanmasında yüksek-düşük frekans kapasitans yöntemi kullanıldı. Yüksek-düşük CV tekniğinde,  $C_{LF}$  ve  $C_{HF}$  kapasitansları,  $\omega_{LF}$  ve  $\omega_{HF}$  olmak üzere iki frekanstaki kapı voltajının bir fonksiyonu olarak ölçülür. Bu yöntemle göre, ölçülen  $C_{LF}$  ve  $C_{HF}$  kapasitans değerleri kullanılarak arayüzey durum yoğunluğu aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir [55,66,70-74].

$$qAN_{ss} = \left[ \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} \right] \quad (5.2)$$

Burada,  $q$  elektronik yük,  $C_{ox}$  oksit kapasitansı,  $C_{LF}$  ve  $C_{HF}$  MOS kapasitörün yüksek ve düşük frekanslarda kapasitansları ve  $A$  ise MOS kapasitör alanıdır. Hesaplama düşük frekans ve yüksek frekans değerleri olarak sırasıyla 1 kHz ve 1 MHz kullanılmıştır. MOS kapasitörün uygulanan öngerilimin bir fonksiyonu olarak arayüzey durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) dağılım profili Şekil 5.4’de gösterilmiştir.  $N_{ss}$  dağılım grafiğinden görüldüğü gibi  $N_{ss}$ -V eğrisi yaklaşık 0 V’da bir pik vermektedir. Yaklaşık tükenim bölgesine karşılık gelen  $N_{ss}$ -V grafiğindeki pikin olduğu bölgede oksit ile yarıiletken arasındaki arayüzey durumlarının daha yoğun olduğu söylenebilir. Başka bir deyişle, bu pik davranışı, oksit/yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumların yeniden yani özel bir dağılımının sonucudur [70-75]. Bu nedenle arayüzey tuzaklarının varlığı, düşük frekanslı ve yüksek frekanslı C-V ölçümleri arasında bir sapmaya neden olmaktadır. Elde edilen grafikten maksimum arayüzey durum yoğunluğu  $7,14 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  olarak bulundu.



Şekil 5.4. Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün  $N_{ss}$ -V grafiği

## 5.4. Frekansa bağlı Dielektrik Parametreler, İletkenlik ve Elektrik Modülü

### 5.4.1. Dielektrik geçirgenlik

Kompleks düzlem, kompleks geçirgenliğin ( $\epsilon^*$ ) ve kompleks elektrik modülüsün ( $M^*$ ), kompleks empedansın ( $Z^*$ ) ve kompleks admitansın ( $Y^*$ ) gerçel ve sanal kısımlarının elektriksel niceliklerini temsil etmek için kullanılır. Geçirgenlik, bir malzemenin elektrik alan E ile etkileşimini tanımlar ve kompleks bir niceliktir. Kompleks geçirgenlik olarak da bilinen kompleks dielektrik sabiti, bir malzemenin elektrik alanına nasıl tepki verdiğini gösteren bir ölçüdür. Genel olarak dielektrik geçirgenlik frekans alanında ölçüldüğünde kompleks bir niceliktir. Kompleks dielektrik sabiti, kapasitörler, antenler ve çeşitli elektronik cihazların tasarımında ve analizinde ve ayrıca malzemelerin optik özelliklerinin incelenmesinde önemli bir parametredir. Ayrıca kompleks dielektrik sabiti, elektromanyetik dalgaların bir ortamda ilerleme hızını etkilediğinden, malzemelerdeki elektromanyetik dalga yayılımının incelenmesinde önemlidir. Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı daha yüksek olan malzemeler (daha yüksek iletkenlik), bir elektrik alanından daha fazla enerji absorbe etme eğilimindedir ve dolayısıyla elektromanyetik dalgaları daha güçlü bir şekilde zayıflatır.

Dielektrik özelliklerin ölçümü, malzemelerin kompleks geçirgenliğinin ölçümlerini içerir. Bir dielektrik malzemenin  $\epsilon^*$  ile temsil edilen kompleks dielektrik geçirgenliği reel/gerçek bir kısım ve imajiner/sanal bir kısımdan oluşur ve

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (5.3)$$

ile ifade edilir [12-14,31,32,37,76]. Kompleks dielektrik geçirgenliğin reel kısmı ( $\epsilon'$ ) 'dielektrik sabiti' olarak adlandırılır ve artan frekansla azalır. İmajiner kısmı ( $\epsilon''$ ) 'dielektrik kayıp' olarak adlandırılır ve artan frekansla artabilir veya azalabilir. Dielektrik sabiti, malzemede depolanan dış bir elektrik alanından gelen enerji miktarının bir ölçüsüdür. Dielektrik kayıp, dış bir elektrik alanı nedeniyle malzemeden kaynaklanan enerji kaybı miktarının bir ölçüsüdür. Kayıpsız malzemeler için sanal kısım sıfırdır ve kayıp faktörü olarak da bilinir. Kompleks geçirgenliğin sanal kısmı her zaman sıfırdan büyüktür ve genellikle reel kısımdan çok daha küçüktür. Dielektrik özelliklerin geniş bir frekans aralığında ölçümü, bir malzemenin elektriksel özellikleri (kompleks dielektrik geçirgenlik, iletkenlik) karakterize edilebilir ve ayrıca, dielektrik durulma davranışı ve dc iletim davranışı da analiz edilebilir.

Tan  $\delta$  terimi dielektrik kayıp tanjant olarak adlandırılır ve kompleks geçirgenliğin sanal kısmının gerçek kısmına oranını temsil eder. Kayıp tanjantı ayrıca dağılım faktörü veya kayıp faktörü olarak da adlandırılmaktadır. Herhangi bir malzemenin dielektrik kayıp tanjantı, elektrik enerjisinin nicelik olarak dağılımını tanımlar. Bir dielektrik malzemedeki enerji kayıpları elektrik alan vektörü ile elektrik yer değiştirme arasındaki faz farkına neden olmaktadır. Dielektrik kayıp tanjantı aşağıdaki eşitlik ile verilir.

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (5.4)$$

Kayıp faktörü hem dielektrik kaybın hem dc iletkenliğin etkilerini içerir. Bir malzemedeki bir dc iletimi, kompleks geçirgenliğin yalnızca imajiner kısmına katkıda bulunur ve frekansla ters orantılı bir kayıp faktörüne yol açarken, dipol durulması veya uzay yükü oluşumu gibi diğer dielektrik süreçler hem geçirgenliğe hem de kayıp davranışına katkıda bulunur. Genellikle bir dielektrik maddenin sabit bir frekansta ac iletkenliğinin ölçümü,

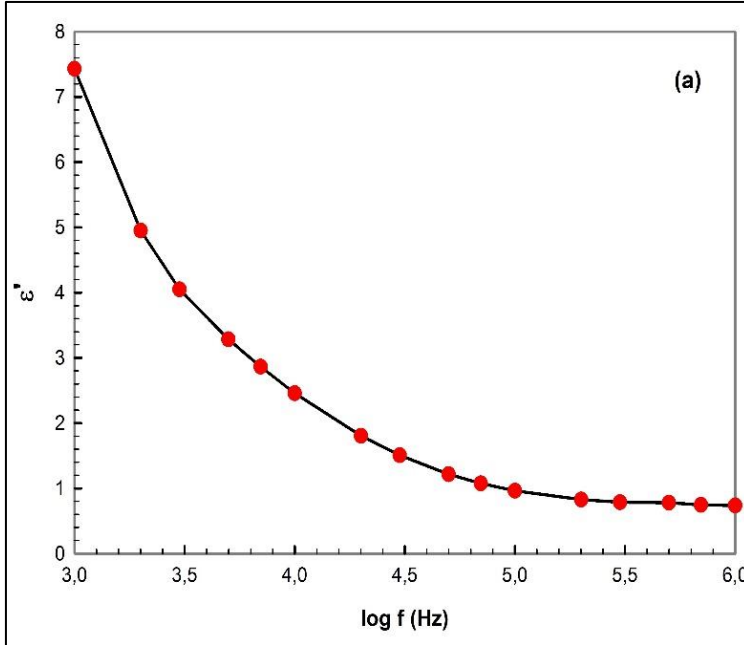
malzemedeki dc iletkenliği belirtmek için kullanılır. Bir dc iletim süreci, yalnızca dielektrik kayıp faktörünün veya ac iletkenliğinin frekansa bağımlılığının analiziyle belirlenebilir.

Hazırlanan Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün oda sıcaklığında ve geniş bir frekans aralığında ölçülen kapasitans ( $C_m$ ) ve iletkenlik ( $G_m/\omega$ ) değerleri kullanılarak dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) ve dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ) değerleri aşağıdaki verilen eşitliklerden hesaplanmıştır.

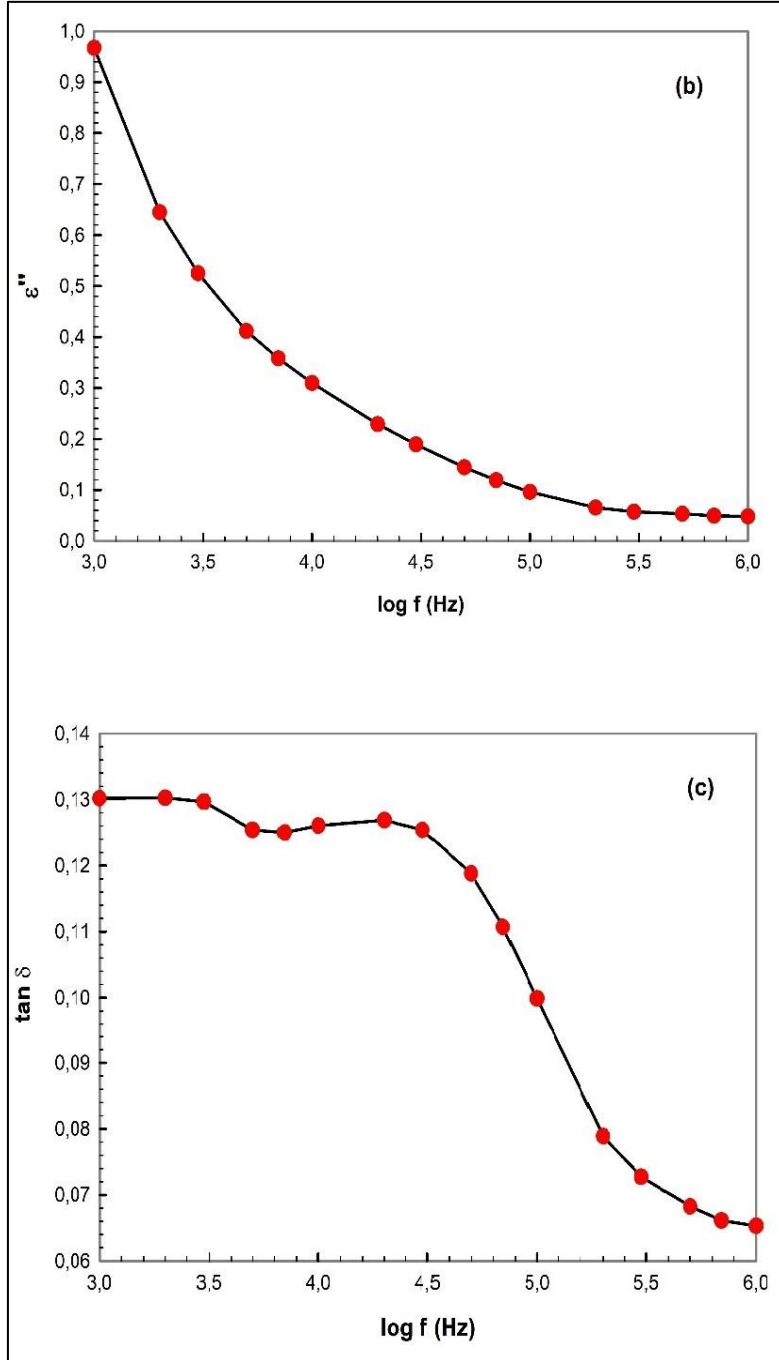
$$\epsilon' = \frac{C_m}{C_0} \quad (5.5)$$

$$\epsilon'' = \frac{G_m}{C_0 \omega} = \frac{d_{ox}}{A \epsilon_0} \frac{G_m}{\omega} \quad (5.6)$$

Formölde yer alan  $C_0 (= \epsilon_0.A/d_{ox})$  dielektriksiz yani plakalar arası boş kapasitörün kapasitans değerini, A MOS alanını,  $d_{ox}$  arayüzey oksit tabaka kalınlılığını,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabitini ( $=8,85 \times 10^{-12}$  F/m) ve  $\omega (=2\pi f)$  açısal frekansını göstermektedir. MOS kapasitörün frekansın fonksiyonu olarak dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ) ve dielektrik kayıp tanjant ( $\tan \delta$ ) eğrileri sırasıyla şekil 5.5. (a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir.



şekil 5.5. Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün (a)  $\epsilon'$ -logf (b)  $\epsilon''$ -logf (c)  $\tan\delta$ -logf eğrisi



Şekil 5.5. Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün (a)  $\epsilon'$ -logf (b)  $\epsilon''$ -logf (c)  $\tan \delta$ -logf eğrisi

Şekil 5.5 (a) ve (b)'den görüldüğü gibi, dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp uygulanan alternatif elektrik alan frekansına bağlı olup değerleri artan frekansla azalmaktadır. Frekans arttıkça malzemenin net polarizasyonu düşer ve dolayısıyla dielektrik sabiti düşer [77-81]. Uygulanan bir elektrik alan etkisiyle dielektrik malzeme polarize olmaktadır. Malzemenin polarize olması için, dipollerin uygulanan alanın yönüne göre yönelmesi gerekir. Daha düşük frekanslarda, dipoller alternatif elektrik alanının frekansını takip edebilir yani alan değişimine cevap verebilir. Ancak frekans arttıkça elektrik dipolleri dış alan değişimlerini

takip edemez ve onun gerisinde kalır ve dielektrik sabiti azalır. Düşük frekanslarda uzay yüklerinin birikmesinden kaynaklanan arayüzeysel yani uzay-yük polarizasyonu ( $\sim 0-10^3$  Hz frekans aralığında) nedeniyle daha yüksek  $\epsilon'$  değeri görülür. Yönelimli/dipolar polarizasyonu  $\sim 10^3-10^9$  Hz frekans aralığında etkilidir ve dielektrik sabiti artan frekansla azalır. Şekil 5.5 (c), frekansın bir fonksiyonu olarak dielektrik kayıp tanjantını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, kayıp tanjant değeri artan frekanslarla azalan davranış sergilemektedir [82-85]. Kayıp tanjantı, malzeme içindeki dielektrik kaybının ölçüsüdür. Bu kayıp, polarizasyon işlemleri sırasında sürtünme nedeniyle ısıнын yayılmasına neden olur. Uygulanan alanın frekansının artmasıyla birlikte uzay yükü ve yönelimli gibi polarizasyon mekanizmaları alanın gerisinde kalmaya başlar ve dolayısıyla dielektrik kayıp tanjant azalır.

#### 5.4.2. Elektriksel iletkenlik

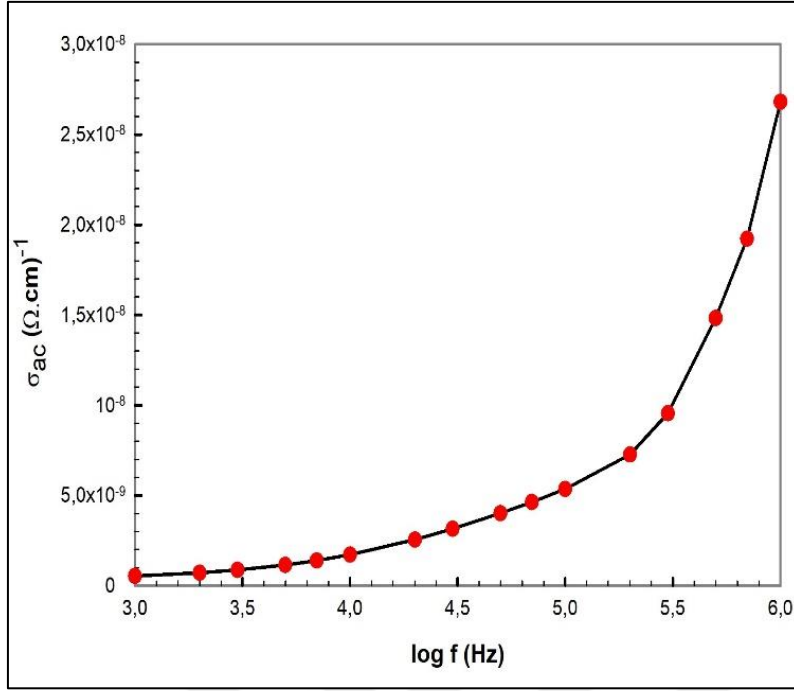
Bir dielektrik malzemenin kompleks iletkenliği  $\sigma^*$ , kompleks dielektrik geçirgenliği  $\epsilon^*$  cinsinden ifade edilir ve aşağıdaki eşitlik ile verilir [82-85].

$$\sigma^* = i\epsilon_0\omega\epsilon^* = i\epsilon_0\omega(\epsilon' - i\epsilon'') = \epsilon_0\omega\epsilon'' + i\epsilon_0\omega\epsilon' \quad (5.7)$$

Kompleks iletkenliğin reel kısmı olan ac elektriksel iletkenlik ( $\sigma_{ac}$ ) aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$\sigma_{ac} = \omega\epsilon_0\epsilon'' = \omega\epsilon_0\epsilon' \tan\delta \quad (5.8)$$

Şekil 5.6 'da ac iletkenliğinin ( $\sigma_{ac}$ ) frekansa göre değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi,  $\sigma_{ac}$  iletkenlik artan frekansla birlikte artar. Bu artış düşük ve orta frekanslarda yavaş, ancak yüksek frekanslarda daha hızlı olmaktadır.  $\sigma_{ac}$ 'in frekans bağımlılığı, mobil yük taşıyıcılarının hareketinden ve polarizasyon etkilerinden kaynaklanmaktadır. Düşük frekanslarda ac iletkenliğinin düşük değeri, elektronun sürüklenmesindeki azalmanın etkisidir. Frekansın arttırılması tuzaklardaki yük taşıyıcılarını serbest bırakır. Yük taşıyıcılarının sıçraması (hopping) ve serbest kalması, yük yoğunluğunu artırabilir ve dolayısıyla daha yüksek frekanslarda iletkenlikte artış meydana gelir [83-87].



Şekil 5.6. MOS kapasitörün  $\sigma_{ac}$  -  $\log f$  eğrisi

### 5.4.3. Elektrik modülüs

Malzemelerdeki elektriksel yer değiştirme sabit kaldığında, elektrik modülüs elektrik alan durulması ile ilişkilidir. Kompleks dielektrik modülüs ( $M^*=1/\epsilon^*$ ), kompleks geçirgenliğin tersine eşittir. Dielektrik malzemelerdeki durulma olayını anlamak ve analiz etmek için dielektrik modülüs yaklaşımı kullanılır. Kompleks elektriksel modülüs aşağıdaki ifade ile verilir.

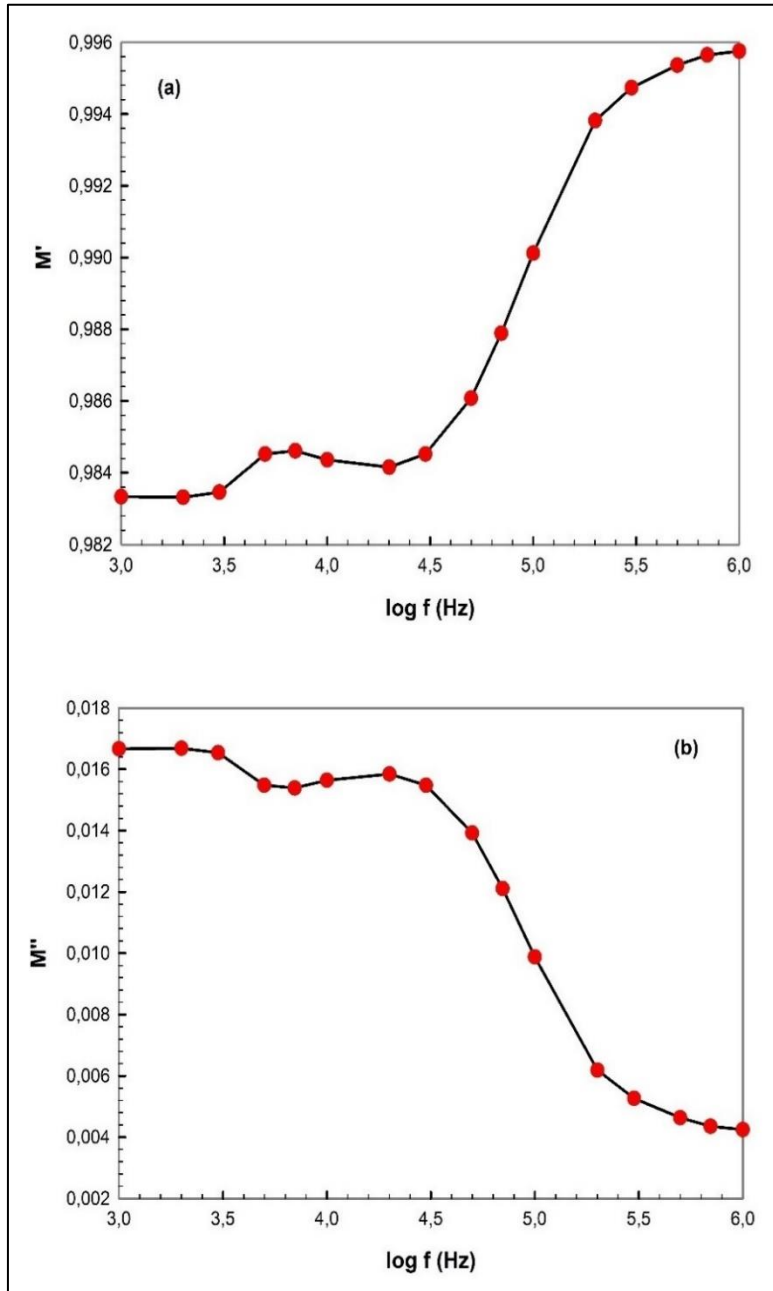
$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = i\omega C_0 Z^* = M' + iM'' \quad (5.9)$$

Burada  $M'$  ve  $M''$  sırasıyla kompleks modülüsün reel ve sanal kısımlarını temsil etmektedir.  $M'$  ve  $M''$  değerleri, aşağıda verilen denklemlerde kompleks geçirgenliğin  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  kısımları kullanılarak hesaplandı [83-90].

$$M'(\omega) = \frac{\epsilon'}{\epsilon'(\omega)^2 + \epsilon''(\omega)^2} \quad (5.10)$$

$$M''(\omega) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'(\omega)^2 + \epsilon''(\omega)^2} \quad (5.11)$$

Kompleks elektrik modülüsün reel ( $M'$ ) ve sanal ( $M''$ ) kısımlarının frekans ile değişim eğrileri sırasıyla Şekil 5.7 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Şekil 5.7 (a)'dan, artan frekansla  $M'$  değerinin arttığı görülmektedir. Düşük frekanslarda  $M'$  değerinin küçük olması elektrot polarizasyon katkısının ortadan kalktığını yani elektrot polarizasyonunun baskılandığını gösterir. Artan frekans ile  $M'$  değerinin artması, yük taşıyıcılarının kısa menzilli hareketliliğiyle ilgilidir. Şekil 5.7 (b)'den,  $M''$  değerinin artan frekansla azaldığı görülmektedir.  $M''$  değerinin düşük frekansta yüksek olması, elektrot etkisinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.7. (a)  $M'$ -log f (b)  $M''$ -log f eğrileri

#### 5.4.4. Empedans analizi

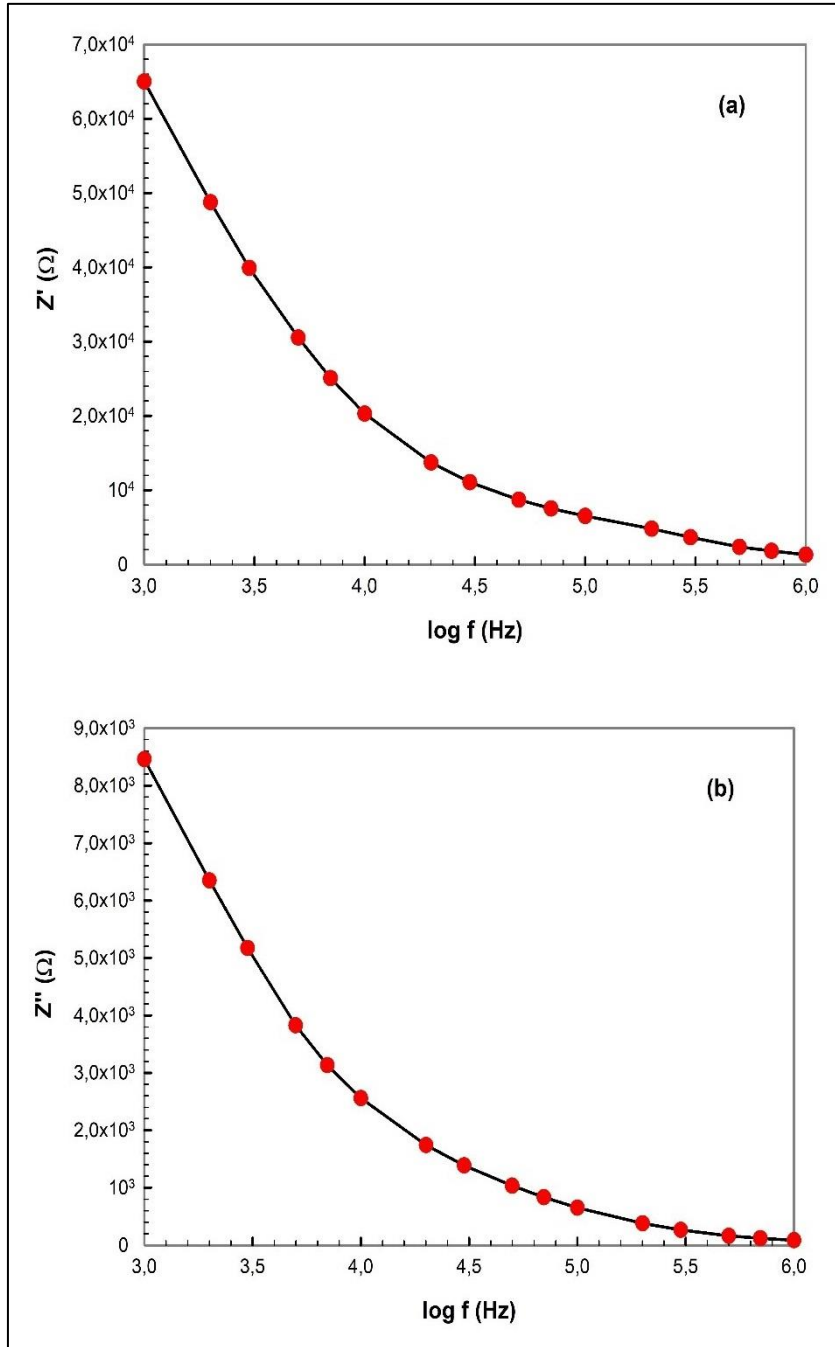
Empedans analizi, değişken frekansa, ac sinyal voltajına veya akımına maruz kalan bir malzemenin elektriksel ve dielektrik özelliklerini karakterize etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [83-90]. Kompleks empedans spektroskopisi malzemelerin karakteristik bir özelliği olan malzemedeki yük taşıyıcıların durulma frekansının/zamanının değerlendirilmesine olanak tanır. Ayrıca iletkenliğin, kompleks modülüsün ve kompleks geğirgenliğin frekansın bir fonksiyonu olarak incelenmesine de olanak tanır. Kompleks empedans ( $Z^*$ ) ile reel ( $Z'$ ) ve sanal ( $Z''$ ) kısımları şu şekilde tanımlanır.

$$Z^* = Z' + iZ'' \quad (5.12)$$

$$Z'(f) = \frac{\varepsilon''(f)}{\omega C_0 (\varepsilon'^2(f) + \varepsilon''^2(f))} \quad (5.13)$$

$$Z''(f) = \frac{\varepsilon'(f)}{\omega C_0 (\varepsilon'^2(f) + \varepsilon''^2(f))} \quad (5.14)$$

MOS kapasitörün kompleks empedansın ( $Z^*$ ) reel ( $Z'$ ) ve sanal ( $Z''$ ) kısımlarının frekansa bağlı değişim eğrileri şekil 5.8 (a) ve (b)'de verilmiştir. Bu şekillerden hem  $Z'$  hem de  $Z''$  değerlerinin artan frekansla azaldığı görölmektedir. Düşük frekanslarda  $Z'$  ve  $Z''$  değerinin yüksek olması uzay yükü polarizasyonundan dolaydır [93-97]. Ayrıca,  $Z'$  ve  $Z''$  değerleri, elektronların artan sıçraması nedeniyle yüksek frekanslarda azalmaktadır.



Şekil 5.8. MOS kapasitörün frekansa bağlı (a)  $Z'$ -  $\log f$  eğrisi (b)  $Z''$ -  $\log f$  eğrisi

## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, hazırlanan Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP metal-oksit yarıiletken (MOS) kondansatörün elektrik ve dielektrik özellikleri frekansa ve uygulanan voltaja göre incelendi. Bu maksatla MOS kondansatörün geniş bir frekans aralığında (1 kHz - 1 MHz) ve (-4 V ile +4 V) voltaj aralığında admitans ( $Y=G+i\omega C$ ) ölçümleri gerçekleştirildi. MOS kondansatörün admitans ölçümlerinden kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) karakteristikleri elde edildi. Bu verilerden MOS kondansatörün dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ), dielektrik kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ), ac iletkenlik ( $\sigma_{ac}$ ), kompleks elektrik modülüs ( $M^*$ ) ve empedans (Z) gibi elektrik ve dielektrik parametreleri hesaplandı.

Tezin ilk aşamasında, MOS kondansatörün oda sıcaklığında frekansa bağlı olarak hesaplanan kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) karakteristikleri incelendi. Kapasitans ve iletkenlik değerlerinin hem uygulanan gerilime hem de frekansa bağlı olduğu görüldü. C-V grafiğinde kapasitans değerinin yüksek frekanslarda ( $f>100$  kHz) negatif olduğu görüldü. Bu durum negatif kapasitans davranışı olarak adlandırılmaktadır. Negatif kapasitans değerinin oluşması temel olarak kontak enjeksiyonu, arayüzey durumları veya azınlık taşıyıcı enjeksiyon etkilerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. C ve  $G/\omega$  değerlerinin düşük frekanslarda uygulanan gerilime bağlı olduğu fakat, hem C hem de  $G/\omega$  değerlerinin yüksek frekanslarda uygulanan gerilimden hemen hemen bağımsız hale geldiği görülmüştür. Yüksek frekanslarda voltaja bağlı değer değişimi düşük frekanslardakinden daha azdır. Düşük frekanslarda ise arayüzey durumların katkısı belirgindir bundan dolayı, hem C hem de  $G/\omega$  değerleri yüksektir.

MOS konsatörün seri direnç değerinin hesaplanmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, seri direnci ( $R_s$ ) belirlemek için Nicollian ve Goetzberger tarafından geliştirilen iletkenlik yöntemi kullanıldı. Bu yöntemde MOS kapasitörün kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülen kapasitans ( $C_{ma}$ ) ve iletkenlik ( $G_{ma}$ ) değerleri kullanılmıştır. Seri direnç değeri hesaplanarak  $R_s$  -V ve  $R_s$ -logf eğrileri elde edildi. Bu eğrilerden  $R_s$  değerinin uygulanan voltaja ve bu voltajın ac frekansına bağlı olduğu görüldü. Seri direncin değerinin artan frekansla azaldığı görülmektedir.  $R_s$  -V eğrilerinde düşük frekanslarda hem negatif hem de pozitif gerilim bölgelerinde iki pikin olduğu gözlenmiştir. Bu piklerden birinin arayüzey durumlarının varlığından ve bunların yarıiletken bant aralığındaki özel

dağılımından, diğerinin ise arayüzey oksit tabakasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Gözlemlenen bu piklerin şiddetinin artan frekansla azaldığı görülmüştür.

Kapasitans-voltaj (C-V) eğrisinin ideal C-V eğrisinden sapmasına oksit/yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları ( $N_{ss}$ ) neden olmaktadır. Arayüzey durum yoğunluğunun belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kapasitörün arayüzey durum yoğunluğunun ( $N_{ss}$ ) hesaplanmasında yüksek-düşük frekans kapasitans yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen  $N_{ss}$ -V eğrisinden  $N_{ss}$  değerinin voltaja bağlı olarak değiştiği ve yaklaşık 0 V'da bir pik verdiği görülmüştür. Bu pik noktasında arayüzey durum yoğunluğu  $7,14 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  değerini almaktadır. Pikin görüldüğü yer yaklaşık tükenim bölgesine karşılık gelmektedir ve bu bölgede oksit ile yarıiletken arasındaki arayüzey durumlarının daha yoğun olduğu söylenebilir.  $N_{ss}$  değerinin artan frekansla azalmaktadır. Bunun nedeni arayüzey yük taşıyıcılarının sayısındaki azalmadır.

Oda sıcaklığında farklı frekanslarda ölçülen C ve  $G/\omega$  değerleri kullanılarak MOS kapasitörün dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), dielektrik kaybı ( $\epsilon''$ ) ve dielektrik kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) gibi dielektrik parametreleri hesaplandı. Hesaplanan bu parametrelerin uygulanan elektrik alanın frekansına kuvvetli şekilde bağlı olduğu görüldü.  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerleri yüksek frekans değerine ( $f > 100 \text{ kHz}$ ) kadar artan frekansla hızla azalmaktadır. 100 kHz'den sonra değerleri daha yavaş azalmakta, hemen hemen sabit kalmaktadır. Dielektrik sabitinin ( $\epsilon'$ ) değerinin artan frekansla azalmasının nedeni, frekans arttıkça malzemenin net polarizasyonunun düşmesidir. Benzer şekilde artan frekansla dielektrik kayıp azalmaktadır çünkü frekans arttıkça dielektrik malzemedeki dipoller değişen elektrik alanını takip edemez ve neticede kayıp azalır. Kayıp tanjant değeri ( $\tan\delta$ ) ise artan frekansla azalmaktadır. Kayıp tanjantı, malzeme içindeki dielektrik kaybının bir ölçüsüdür ve bu kayıp, polarizasyon sırasında sürtünme nedeniyle ısı olarak yayılır. Artan frekansla birlikte uzay yükü ve yönelimli gibi polarizasyon mekanizmaları alanın gerisinde kalmaya başlar ve dolayısıyla dielektrik kayıp tanjant azalır.

Frekansa bağlı olarak ac elektriksel iletkenliğin değişimi hesaplanarak incelendi. İletkenlik değeri ( $\sigma_{ac}$ ) değeri 10 kHz'e kadar yavaş artarken daha sonra iletkenlik artan frekansla hızlı bir biçimde artmaktadır. İletkenliğin frekansa bağlı oluşu, mobil yük taşıyıcılarının hareketinden ve polarizasyon etkilerinden kaynaklanmaktadır. Düşük frekanslarda ac iletkenliğinin düşük değeri, elektronun sürüklenmesindeki azalmanın etkisinden

kaynaklanmaktadır. Artan frekans ile lokalize durumlar arasındaki yük taşıyıcılarının sıçramalarına bağlı olarak iletim artar ve sonuçta ac iletkenlikte artış meydana gelir.

Kompleks elektrik modülüsün frekansa bağlı olarak reel ( $M'$ ) ve sanal ( $M''$ ) kısımlarının değerleri frekansa bağlı olarak kompleks geçirgenliğin  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  kısımları kullanılarak hesaplandı.  $M'$ -logf ve  $M''$ -logf eğrileri incelendiğinde  $M'$  değerinin artan frekansla arttığı  $M''$  değerinin ise artan frekansla azaldığı görülmektedir. Düşük frekanslarda  $M'$  değerinin küçük olması elektrot polarizasyon katkısının ortadan kalktığını yani elektrot polarizasyonunun baskılandığını gösterir. Artan frekansla  $M'$  değerinin artması elektrik alan etkisi altında yük taşıyıcılarının kısa menzilli hareketliliğinin artması ile ilgilidir.  $M''$  değerinin düşük frekansta yüksek olması, elektrot etkisinden kaynaklanmaktadır.

Kompleks empedansın ( $Z^*$ ) reel ( $Z'$ ) ve sanal ( $Z''$ ) kısımlarının değerleri frekansa bağlı olarak kompleks geçirgenliğin  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  kısımları ve boş kondansatör kapasitansı ( $C_0$ ) kullanılarak hesaplandı. Elde edilen  $Z'$ -logf ve  $Z''$ -logf eğrisi incelendiğinde hem  $Z'$  hem de  $Z''$  değerlerinin artan frekansla azaldığı görülmektedir. Düşük frekanslarda  $Z'$  ve  $Z''$  değerinin yüksek olması uzay yükü polarizasyonundan kaynaklanmaktadır. Yüksek frekanslarda elektronların artan sıçraması nedeniyle  $Z'$  ve  $Z''$  değerleri azalmaktadır.

Deneyssel ölçümlerden elde edilen sonuçlar; Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP metal-oksit-yarıiletken (MOS) kondansatörün elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin uygulanan ac gerilimin frekansına bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada yarıiletken üzerine oksit tabaka olarak oluşturulan kalay oksitin (SnO<sub>2</sub>) iyi bir dielektrik davranış sergilediği gözlemlenmiştir. SnO<sub>2</sub> gibi geniş bant aralıklı metal oksitler, düşük dielektrik kaybının yanı sıra yüksek bir dielektrik sabitine sahiptir, dolayısıyla elektronik endüstrisinde kullanım için büyük bir potansiyele sahiptir. Bununla beraber bu çalışmanın sonuçları, hazırlanan Au/SnO<sub>2</sub>/p-InP (MOS) kondansatörün elektronik bir bileşen olarak elektrik devrelerinde elektrik enerjisini depolamak için kullanılabileceğini göstermiştir.



## KAYNAKLAR

1. Sze, S. M. and Kwok, K. Ng. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
2. U.K. Mishra, J. Singh, (2008). *Semiconductor Device Physics and Design*. Netherlands: Springer.
3. Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles* (3rd ed.). New York: McGraw Hill.
4. Schroder, D. K. (2006). *Semiconductor Material and Device Characterization* (3rd ed.). New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
5. Sze, S.M.; Lee, M.K. (2012). *Semiconductor Devices, Physics and Technology* (3rd ed.). Hoboken, New Jersey: Wiley.
6. Ziel, A. (1968). *Solid State Physical Electronics* (2nd ed.). Hoboken, New Jersey: Prentice-Hall Inc.
7. Rhoderick E.H., Williams R.H., (1988). *Metal-semiconductor contacts* (2nd ed.), New York: Oxford University Press.
8. Sharma, B. L. (1984). *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press.
9. Nicollian, E. H. and Brews J. R. (1982). *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons.
10. Bentarzi, H. (2011). *Transport in metal-oxide-semiconductor structures: mobile ions effects on the oxide properties*. Heidelberg: Springer Science & Business Media.
11. Kasap, S.O. (2018). *Principles of Electronic Materials and Devices* (4th Ed.), New York: McGraw-Hill.
12. Von Hippel, A.R. (1954). *Dielectric and Waves*. New York: Chapman & Hall Ltd.
13. Tareev, B. (1979). *Physics of Dielectric Materials*. Moscow: Mir Publishers.
14. Chelkowski, A. (1980). *Dielectric Physics*. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub.
15. Raju, G.G. (2003). *Dielectrics in Electric Fields*. New York: Marcel Dekker Inc.
16. Cui Z. and Korotcenkov G. (2020). *Solution Processed Metal Oxide Thin Films for Electronic Applications*. Amsterdam: Elsevier Science.
17. Ahmad Zargar R. (2023). *Metal Oxide Nanocomposite Thin Films for Optoelectronic Device Applications*. Hoboken: Wiley.

18. Ornaghi Orlandi M. (2020). *Tin Oxide Materials: Synthesis, Properties, and Applications*. Amsterdam : Elsevier.
19. Das S., Jayaraman V.(2014). SnO<sub>2</sub> : A comprehensive review on structures and gas sensors, *Progress in Materials Science*, 66, 112-255.
20. Ibach H., and Lüth H. (2003). *Solid-state Physics: An Introduction to Principles of Materials Science* (3. Ed.). New York: Springer.
21. Van Zeghbroeck, B. (2004). *Principles of semiconductor devices*. Denver, Colorado: University Press of Colorado.
22. Mönch W.(1990). *Electronic Structure of Metal-Semiconductor Contacts*. Boston: Kluwer Academic.
23. Galup-Montoro C., Schneider M.C. (2007). *MOSFET modeling for circuit analysis and design*. New Jersey: World Scientific.
24. Nicollian, E. H. and Goetzberger, A. (1965). MOS conductance technique for measuring surface states parameters. *Applied Physics Letters*, 7, 216–219.
25. Cooke, M. J. (1990). *Semiconductor Devices*. New York: Prentice Hall.
26. Acar F.Z.(2022). *Au/ZnO/p-InP (MOS) Kapasitörün Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
27. Berglund, C. N. (1966). Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 13(10), 701-705.
28. Terman M., (1962). An investigation of surface states at silicon-silicon oxide interface employing metal oxide silicon diodes, *Solid State Electron*, 5, 285- 299.
29. Castagne R., and Vapaille A. (1971). Description of the SiO<sub>2</sub> Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements. *Surface Science*. 28,157–193.
30. Brews J. R., and Nicollian E. H. (1984). Improved MOS capacitor measurements using the QC method. *Solid-state electronics*, 27(11), 963-975.
31. Smyth, C.P. (1955). *Dielectric Behaviour and Structure*. New York: McGraw-Hill.
32. Fröhlich H.(1950). *Theory of dielectrics; dielectric constant and dielectric loss*, Oxford: Clarendon Press.
33. Boetcher C.J.F, (1973). *Theory of Electric Polarization* (2nd ed.), Amsterdam: Elsevier.

34. Türkay, S. (2019). *Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MOS) Kondansatörün Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,15-28.
35. Parker C.B. (1994). *McGraw Hill Encyclopaedia of Physics* (2nd Edition). New York: McGraw Hill
36. Griffiths, D.J., (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Hoboken: Prentice-Hall International.
37. Kao K.C. (2004). *Dielectric Phenomena in Solids*. London: Elsevier.
38. Zhong W.H., Li B. (2017). *Polymer Nanocomposites for Dielectrics*. Singapore :Pan Stanford Publishing.
39. Maheshwari P. (2006). *Electronic component and processes*. New Delhi: New Age International.
40. Yıldırım T. Ş., (2018). *Bazı Mikrodalga Dielektrik Malzemelerin Dielektrik Geçirgenliklerinin R-Bant Dalga Kılavuzu Rezonatörü ile İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
41. Martinez-Vega, J. (2007). *Dielectric Materials for Electrical Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons.
42. Choudhary R.N.P., (2009). Patri S.K., *Dielectric Materials Introduction, Research and Applications*. New York: Nova Science Publishers.
43. Zhong, K., and Li, B. (2017). *Polymer Nanocomposites for Dielectrics*. Singapore: Pan Stanford Publishing.
44. Raicu V., and Feldman Y. (2015). *Dielectric Relaxation in Biological Systems*. Oxford: Oxford University Press.
45. Greenwood, Norman N.; Earnshaw, Alan (1984). *Chemistry of the Elements*. Oxford: Pergamon Press.
46. Elaine A. Moore, Smart L.(2005). *Solid State Chemistry: An Introduction*. Boca Raton, Florida :CRC Press.
47. Wiberg E., Wiberg N.(2001). *Inorganic Chemistry*. Cambridge, Massachusetts, ABD: Academic Press
48. King R.B. (1994). *Encyclopedia of Inorganic Chemistry*. New Jersey: John Wiley & Son Ltd.
49. Taylor F.S. (1943). *Inorganic & Theoretical chemistry, (6th Edition)*. London: Heineman.

50. Comini E., Faglia G., Sberveglieri G., Calestani D., Zanotti L. and Zha M. (2005). Tin oxide nanobelts electrical and sensing properties. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 111–112, 2-6.
51. Ihokura K., Watson J. (2017) *The Stannic Oxide Gas Sensor Principles and Applications*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
52. Bachmann, K. J. (1981). Properties, preparation, and device applications of indium phosphide, *Annual Review of Materials Science*, Volume 11, Pages 441-484.
53. Adachi, S. (2013). *Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors: numerical data and graphical information*. New York: Springer Science
54. Aslan F., (2013). *Metal/ CuPc / İnorganik Yarıiletken Kontakların Fabrikasyonu Ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bingöl Üniversitesi-Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Ortak Lisansüstü Programı, Bingöl.
55. Nicollian E. H., and Goetzberger A. (1967). The si-sio<sub>2</sub> interface–electrical properties as determined by the metal-insulator-silicon conductance technique. *The Bell System Technical Journal*, 46(6), 1055-1033.
56. Acar F.Z.,Buyukbas–Uluslan A.,Tataroglu A., (2018). Analysis of interface states in Au/ZnO/p-InP (MOS) structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 29, 12553–12560.
57. Cherif A., Alotaibi S., Saghrouni H., Beji L., (2023). Improvement of physical properties of MOS devices based on rare earth oxides. *AIP Advances* 13, 025042.
58. Meitei P.N., Khelchand Singh N., (2023). Effect of annealing on forming-free bipolar resistive switching of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films. *Journal of Alloys and Compounds*.941, 168900.
59. Berkun O., Ulusoy M., Altındal Ş., Avar B., (2023). On frequency and voltage dependent physical characteristics and interface states characterization of the metal semiconductor (MS) structures with (Ti:DLC) interlayer, *Physica B* 666,415099.
60. Guclu C.S., Altındal S., Erbil Tanrikulu E., (2024). Voltage and frequency reliant interface traps and their lifetimes of the MPS structures interlayered with CdTe:PVA via the admittance method, *Physica B* 657 , 415703.
61. Kumar V., Kaminski N., Singh Maan A., Akhtar J., (2016). Capacitance roll-off and frequency dispersion capacitance–conductance phenomena in field plate and guard ring edge-terminated Ni/SiO<sub>2</sub>/4H-nSiC Schottky barrier diodes. *Physica Status Solidi A*, 213, 193–202.
62. Asar Y.Ş., (2012). *(Ni/Au)/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>N/AlN/GaN Çoklu-Yapıların Elektriksel Karakteristiklerinin Admitans Spektroskopisi Metoduyla İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

63. Jones B.K., Santana J., McPherson M., (1998). Negative capacitance effects in semiconductor diodes, *Solid State Commun.*107, 47–50.
64. Tanrikulu E.E., Demirezen S., Altındal Ş., Uslu İ., (2018). On the anomalous peak and negative capacitance in the capacitance–voltage (C–V) plots of Al/(%7 Zn-PVA)/p-Si (MPS) structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* 29, 2890–2898.
65. Ma J.-G., Yeo K.S., Do M.A., (1999). Comments on Negative Capacitance Effect in Semiconductor Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices.* 46, 2357–2358.
66. Dokme I., Altındal S., (2007). The C–V–f and G/o–V–f characteristics of Au/SiO<sub>2</sub>/n-Si capacitors. *Physica B* 391; 59–64.
67. Boualem S., Benamara Z., Akkal B., Amrani M., Kacha A.H., Benamara M.A., Anani M., (2018). Effects of Series Resistance and Frequency on the Capacitance/Conductance –Voltage C/G-V Characteristics of Au/GaN/GaAs and Au/GaAs Diodes. *International Journal of Nanoelectronics and Materials* 11, 399-410.
68. Ahmad Z., Sayyad M.H., Karimov Kh.S., Saleem M., Shah M., (2010). Frequency Dependent Electrical Characteristics of Au/n-Si/CuPc/Au Heterojunction. *Acta Physica Polonica A*, Volume 117; 493-496.
69. Al-Sehemi A.G., Ocakoğlu K., Ince M., Karabulut A., Tataroğlu A., Dere A., Ahmed A. Al-Ghamdi, Yakuphanoglu F., (2024). The electronic and optoelectronic properties of Al/hydroxymethyl functionalized Zn(II)Pc/p-Si photonic device. *Polymer Bulletin* 81; 4351–4368.
70. Güçlü Ç. Ş., Tanrikulu E.E., Ulusoy M., Kalandargh Y.A., Altındal Ş., (2024). Frequency-dependent physical parameters, the voltage-dependent profile of surface traps, and their lifetime of Au/(ZnCdS-GO:PVP)/n-Si structures by using the conductance method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 35, 348.
71. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2020). C-V-f and G/ω-V-f characteristics of Au/(In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PVP)/n-Si (MPS) structure. *Physica B*, 582, 411996.
72. Verma Penumatcha A., Swandono S., Cooper J.A., (2013). Limitations of the High–Low C–V Technique for MOS Interfaces With Large Time Constant Dispersion, *IEEE Transactions on Electron Devices.* 60, 923-926.
73. Saghrouni H., Cherif A., Beji A., (2022). Electrical and Dielectric Properties of a Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOS Capacitor. *Journal of Electronic Materials*, 51, 1250-1260.
74. Ata D., Altındal Ş. Yeriskin, Tataroglu A., Balbasi M., (2022). Analysis of admittance measurements of Al/Gr-PVA/p-Si (MPS) structure. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 169, 110861.

75. Zhu, Z. F., Zhang, H. Q., Liang, H. W., Peng, X. C., Zou, J. J., Tang, B., and Du, G. T. (2017). Characterization of interface state density of Ni/p-GaN structures by capacitance/conductance-voltage-frequency measurements. *Chinese Physics Letters*, 34(9), 097301.
76. Kremer F., Schönhalz A., (2003). *Broadband Dielectric Spectroscopy*. New York: Springer-Berlin Heidelberg.
77. Yıldız D.E. , Tataroglu A., (2023). Analysis of dielectric, impedance and electrical properties of interfacial layer: AlN. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 34, 1057.
78. Büyükbaş, A, Tataroğlu A, Balbaş, M (2015). Dielectric, conductivity and modulus analysis of AuGe/SiO<sub>2</sub>/p-Si/AuGe capacitor. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, (17), 1134– 1138.
79. Acar F.Z. , Uyar R.E. , Tataroglu A., (2023). Dielectric, Conductivity and Modulus Properties of Au/ZnO/p-InP (MOS) Capacitor. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 12, 033009.
80. Akbaş, A. M., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., and Azizian-Kalandaragh, Y. (2021). Frequency dependence of the dielectric properties of Au/(NG: PVP)/n-Si structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(6), 7657-7670.
81. Gunasekaran R., Charles, J.(2024). Structural characterization and dielectric properties of ternary polyaniline/berlin blue/ruthenium dioxide nanocomposite. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63, 716-737.
82. Afify, E-S I.H., Farag M., Abo-Ghazala M.S., El-Zaidia M.M, (2024). AC conductivity and dielectric properties of In<sub>x</sub>Te<sub>202x</sub>Se<sub>80</sub> chalcogenides, *Indian Journal of Physics*. September 2023, 967–973.
83. Purusothaman R., Shankar M., Raj A.D., Vimalan M., Vetha Potheher I., (2023). A study on NLO, ultraviolet transparency, photoconductivity, and dielectric response of organic single crystal, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 34, 2292.
84. Sedky A., Afify N., Almohammed A., Sayed M.A. , A. Mossad Ali and A.M. Abd-Elnaiem, (2024). Structural, optical, and dielectric properties of M/SnO<sub>2</sub> (M= Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanocomposites. *Ceramics International* 50, 3409–3421.
85. M.-Ding Li, X.-Gui Tang, S.-Ming Zeng, Y.-Ping Jiang, Q.-Xiang Liu, T.-Fu Zhang and W.-Hua Li, (2018). Oxygen-vacancy-related dielectric relaxation behaviours and impedance spectroscopy of Bi(Mg<sup>1/2</sup>Ti<sup>1/2</sup>) O<sub>3</sub> modified BaTiO<sub>3</sub> ferroelectric ceramics. *Journal of Materiomics* 4, 194-201.
86. S. Turkey, A. Tataroglu, (2021). Complex dielectric permittivity, electric modulus and electrical conductivity analysis of Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-GaAs (MOS) capacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32 , 11418–11425.

87. Barde, R. V., Nemade, K. R., and Waghuley, S. A. (2015). AC conductivity and dielectric relaxation in V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3(1), 116-122.
88. Demirezen S., Yeriskin S.A., (2021). Frequency and voltage-dependent dielectric spectroscopy characterization of Al/(Coumarin-PVA)/p-Si structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 25339–25349.
89. Pradhani N. , Mahapatra P.K. , Choudhary R.N.P., (2018). Effect of cerium oxide addition on optical, electrical and dielectric characteristics of (Bi<sub>0.5</sub>Na<sub>0.5</sub>)TiO<sub>3</sub> ceramics. *Journal of Physics: Materials*. 1, 015007.
90. Nasri M., Rejaiba O., Charguia R., Wederni,M.A. Robei,H.A. Bouazizi, M.L. ,Khirouni K., Khelif J., (2022). Temperature and Frequency Dependence of Negative Capacitance, Dielectric and Electric Properties in La<sub>0.57</sub>Nd<sub>0.1</sub>Sr<sub>0.13</sub>Ag<sub>0.2</sub>MnO<sub>3</sub> Ceramic. *Journal of Low Temperature Physics* 206, 250–268.
91. Barsoukov, E., Macdonald, J.R. (2005). *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
92. Lvovich,V.F. (2012). *Impedance Spectroscopy: Applications to Electrochemical and Dielectric Phenomena*. New Jersey: John Wiley & Sons.
93. Büyükbaş, A., Tataroğlu, A., Balbaş, M. (2014). Analysis of electrical characteristics of metal-oxide-semiconductor capacitor by impedance spectroscopy. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 9(4), 515-519.
94. Altındal Ş., Yeriskin, Tanrikulu,E.E., Ulusoy M., (2023). Dielectric properties of MS diodes with Ag:ZnO doped PVP interfacial layer depending on voltage and frequency. *Materials Chemistry and Physics* 303; 127788
95. Chen, C. C., Huang, B. C., Lin, M. S., Lu, Y. J., Cho, T. Y., Chang, C. H., ... & Wu, C. C. (2010). Impedance spectroscopy and equivalent circuits of conductively doped organic hole-transport materials, *Organic Electronics*, 11(12), 1901-1908.
96. Kumari K., Prasad A., Prasad K., (2016). Dielectric, Impedance/Modulus and Conductivity Studies on [Bi<sub>0.5</sub>(Na<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>)<sub>0.5</sub>]<sub>0.94</sub>Ba<sub>0.06</sub>TiO<sub>3</sub>, (0.16 ≤ x ≤0.20) Lead-Free Ceramics. *American Journal of Materials Science*, 6 , 1-18.
97. Joel C., Biju R., Bennie, Antony A.J., S., Abi S.V.V., (2023). Role of Deep Eutectic Solvent in the surface modification of Yttria based WO<sub>3</sub> nanocomposite for application in Nanoarchitectonics. *Ceramics International* 49 ; 36189–36.





*Gazili olmak ayrıcalıktır*