

**METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si )  
YAPILARIN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN  
FREKANS VE POTANSİYELE BAĞLI İNCELENMESİ**

**Zekayi SÖNMEZ**

**DOKTORA TEZİ  
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2012  
ANKARA**

Zekayi SÖNMEZ tarafından hazırlanan “METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si) YAPILARIN ELEKTRİK VE DİELETRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS VE POTANSİYELE BAĞLI İNCELENMESİ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

.....

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

.....

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

.....

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. İlbilge DÖKME

.....

Fen Bilgisi Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Adem TATAROĞLU

.....

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Halit ALTUNTAŞ

.....

Fizik Anabilim Dalı, Karatekin Üniversitesi

Tarih: 06 / 01 / 2012

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

Zekayi SÖNMEZ

**METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si )**  
**YAPILARIN ELEKTRİK VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN**  
**FREKANS VE POTANSİYELE BAĞLI İNCELENMESİ**  
**(Doktora Tezi)**

**Zekayi SÖNMEZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**Ocak 2012**

**ÖZET**

Bu çalışmada farklı yük arayüzey durumları, onların durulma zamanının ve oksit (SiO<sub>2</sub>) arayüzey kalınlığının elektriksel karakteristikler üzerine etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için, metal-yalıtkan-yarıiletken(Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si) yapılar, A (50 Å) ve B (826 Å) olarak isimlendirilen iki farklı kalınlıkta üretildi. Arayüzey durumları (N<sub>ss</sub>) ve onların durulma zamanı (τ) ve bu yapıların yakalama tesir kesitleri (σ<sub>p</sub>) enerjinin fonksiyonu olarak admittans spektroskopisi metodu kullanılarak (kapasitans voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V)) araştırıldı. Bu numunelerin C-V ve G/ω-V karakteristiklerinin frekans bağımlılığı, seri direnç (R<sub>s</sub>) etkisi dikkate alınarak, 1kHz-1MHz gibi geniş frekans aralığında araştırıldı. Özellikle düşük frekanslarda kapasitanstaki artış, Si/SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde arayüzey durumlarının varlığına atfedildi. N<sub>ss</sub>, τ ve σ<sub>p</sub> değerleri sırasıyla A numunesinde 9,55x10<sup>13</sup> - 5,82x10<sup>13</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>, 6,31x10<sup>-6</sup> - 1,58x10<sup>-6</sup> s ve 3,55x10<sup>-21</sup> den 1,27x10<sup>-15</sup>cm<sup>2</sup> arasında değişirken B numunesinde ise 4,29x10<sup>13</sup> - 3,36x10<sup>12</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>, 6,31x10<sup>-6</sup> -1,58x10<sup>-6</sup> s ve 6,65x10<sup>-21</sup> - 6,69x10<sup>-15</sup> cm<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Bu da gösteriyor ki metal/yarıiletken arayüzeyindeki yalıtkan tabaka yüzey durumlarını oldukça azaltmaktadır. Ayrıca Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapıların dielektrik sabitlerinin (ε' ve ε'') ve elektrik modüllerinin

( $M'$  ve  $M''$ ) gerçel ve sanal kısımlarının, kayıp tanjant ( $\tan\delta$ ) ve ac elektrik iletkenliğinin ( $\sigma_{ac}$ ) frekansa ve voltaja bağıllığı; 1kHz-1MHz frekans aralığında ve oda sıcaklığında admittans spektroskopisi metodu kullanılarak araştırıldı.  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\tan\delta$ ,  $M'$ ,  $M''$  ve  $\sigma_{ac}$  değerleri frekansın ve tüketim bölgesi kapasitansı (C) ve kondüktansındaki ( $G/\omega$ ) ön gerilimin kuvvetli bir fonksiyonu olduğu bulundu. Deneysel sonuçlar, düşük frekanslarda arayüzey polarizasyonu kolay olduğu için MOS yapının  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\tan\delta$ ,  $M'$ ,  $M''$  ve  $\sigma_{ac}$  değerlerinde dispersiyona yol açar. Dielektrik özelliklerdeki dispersiyon, uzay yük taşıyıcıları ve arayüzey oksit tabakanın süreksizliği ile birlikte, Si/SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde arayüzey durumlarının özel bir yoğunluk katkısı olarak nitelenebilir. Buna ilaveten ac iletkenlik değeri artan frekansla artmaktadır. Bu durum sıçramalı tip iletim mekanizması olarak nitelenebilir.

**Bilim Kodu** : 202.1.147

**Anahtar kelimeler** : Ara yüzey durumları, durulma zamanı, yakalama tesir kesidi, admittans metodu, yalıtkan tabaka, dielektrik özellikler , elektrik modülleri , iletkenlik.

**Sayfa Adedi** : 97

**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

**THE INVESTIGATION OF FREQUENCY AND VOLTAGE DEPENDENT  
ELECTRICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF METAL-  
INSULATOR-SEMICONDUCTOR (Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si) STRUCTURES**

(Ph.D. Thesis)

Zekayi SÖNMEZ

GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
January 2012

**ABSTRACT**

In this study, in order to achieve a better understand of the effects of different charge interface states and their relaxation time and thickness of oxide layer (SiO<sub>2</sub>) on the electrical characteristics, we fabricated with thin (50 Å) and thicker (826 Å) metal-insulator-semiconductor (Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si) structures and these structures are called sample A and sample B, respectively. The energy distribution profile of the interface states ( $N_{ss}$ ) and their relaxation time ( $\tau$ ) and capture cross section ( $\sigma_p$ ) of these structures have been investigated using admittance spectroscopy method (capacitance-voltage(C-V) and conductance-voltage ( $G/\omega$ -V)). The frequency dependent C-V and  $G/\omega$ -V characteristics of these devices were investigated by considering the series resistance ( $R_s$ ) effects in a wide frequency range of 1 kHz-1 MHz at room temperature. The increase in capacitance especially at low frequencies results from the presence of interface states at Si/SiO<sub>2</sub> interface. The values of  $N_{ss}$ ,  $\tau$  and  $\sigma_p$  changed from  $9,55 \times 10^{13}$  to  $5,82 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^2$ ,  $6,31 \times 10^{-6}$  to  $1,58 \times 10^{-6} \text{ s}$ ,  $3,55 \times 10^{-21}$  to  $1,27 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ , for sample A,  $4,29 \times 10^{13}$  to  $3,36 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^2$ ,  $6,31 \times 10^{-6}$  to  $1,58 \times 10^{-6} \text{ s}$ ,  $6,65 \times 10^{-21}$  to  $6,69 \times 10^{15} \text{ cm}^2$  for sample B. The values of  $N_{ss}$  in sample A is almost one order higher than in those sample B. This indicates that the insulator layer at metal/semiconductor interface can passivate the surface states effectively. On

the other hand, the frequency and voltage dependence of real and imaginary parts of dielectric constant ( $\epsilon'$  and  $\epsilon''$ ) and electric modulus ( $M'$  and  $M''$ ), loss tangent ( $\tan\delta$ ) and ac electrical conductivity ( $\sigma_{ac}$ ) of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) structures have been investigated by admittance spectroscopy method in the frequency range of 1 kHz-1 MHz at room temperature. The values of  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\tan\delta$ ,  $M'$ ,  $M''$  and  $\sigma_{ac}$  were found to be a strong function of frequency and applied bias voltage in the depletion region of capacitance (C) and conductance (G/ $\omega$ ). The experimental results show that the interfacial polarization can more easily occur at low frequencies consequently contributing to the dispersion in  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\tan\delta$ ,  $M'$ ,  $M''$  and  $\sigma_{ac}$  values of MOS structure. The dispersion in the dielectric properties may be also attributed to a particular density distribution of interface states ( $N_{ss}$ ) at Si/SiO<sub>2</sub> interface as well as space charge carriers and in-homogeneity of interfacial oxide layer. In addition, the value ac conductivity increase with increasing frequency can be attributed hopping type conduction mechanism.

**Sinece Code : 202.1.147**

**Key Words : Interface states; Relaxation time; Capture cross section;  
Admittance method; Insulator layer; Dielectric properties;  
Electric modulus; Conductivity.**

**Page Number: 97**

**Adviser : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL**

## TEŞEKKÜR

Bana çalışmalarım boyunca büyük bir sabırla katkı sağlayan ve derin bilgi birikimlerinden faydalandığım Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi saygıdeğer hocam Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL' a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmalarım boyunca yaptıkları yardımları için hocamla birlikte çalışan çok kıymetli doktora öğrencileri Umut AYDEMİR, Yasemin ŞAFAK, Habibe USLU' ya çok teşekkür ederim.

Birde, çalışmalarım madden ve manen destek olan eşime, kızlarım Betülhan ve Neslihan' a teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

|                                                               | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET .....                                                    | iv           |
| ABSTRACT .....                                                | vi           |
| TEŞEKKÜR .....                                                | viii         |
| İÇİNDEKİLER .....                                             | ix           |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....                                    | xi           |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                                      | xii          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                 | xv           |
| 1. GİRİŞ.....                                                 | 1            |
| 2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN YAPILAR.....                    | 5            |
| 2.1. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) ve (MOS)Yapısı.....     | 5            |
| 2.1.1. İdeal MIS ve MOS yapısı.....                           | 6            |
| 2.1.2. Gerçek MIS ve MOS yapısı.....                          | 15           |
| 2.1.3. MIS yapılarında arayüzey durum yoğunluğu teorisi.....  | 24           |
| 2.2. Dielektrikler.....                                       | 30           |
| 2.2.1. Dielektriklerdeki statik elektrik alan etkisi.....     | 30           |
| 2.2.2. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör.....         | 31           |
| 2.2.3. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör.....          | 32           |
| 2.2.4. Dielektrik kutuplanma.....                             | 33           |
| 2.2.5. Kutuplanma mekanizmaları.....                          | 39           |
| 2.2.6. Dielektriklerde elektrik alan ve dielektrik kayıp..... | 43           |
| 2.2.7. Dielektrik sabiti ölçme yöntemi.....                   | 50           |

**Sayfa**

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.8. Dielektrik kayıplar.....                                                | 54 |
| 3. DENEYSEL YÖNTEM.....                                                        | 55 |
| 3.1. Diyot Yapımında Kullanılan Silisyum Kristalin Bazı Temel Özellikleri..... | 55 |
| 3.2. MIS Yapıların Hazırlanması.....                                           | 57 |
| 3.2.1. Kristal temizleme ve yalıtkan tabakanın oluşturulması.....              | 57 |
| 3.2.2. Omik kontağın oluşturulması.....                                        | 59 |
| 3.2.3. Doğrultucu kontağın oluşturulması.....                                  | 61 |
| 3.3. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri.....                                         | 62 |
| 4. DENEYSEL SONUÇLAR.....                                                      | 64 |
| 4.1. Oda Sıcaklığında Frekansa Bağlı C-V ve $G/\omega$ -V Ölçümler.....        | 64 |
| 4.1.1. Elektriksel karakteristikler.....                                       | 64 |
| 4.1.2. Dielektrik özellikler ve ac elektriksel iletkenlik ölçümleri.....       | 76 |
| 5. SONUÇ.....                                                                  | 88 |
| KAYNAKLAR.....                                                                 | 90 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                  | 96 |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

### Çizelge

### Sayfa

Çizelge 3.1. Silisyum yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300°K) bazı özellikleri...56

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                                                                                      | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Bir MIS (Metal-yalıtkan-yarıiletken) yapının şematik gösterimi.....                                                                                                                                             | 5     |
| Şekil 2.2. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı. (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken.....                                                                                                       | 6     |
| Şekil 2.3. Bir Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapının enerji bant diyagramı (n-tipi yarıiletken için).....                                                                                                               | 9     |
| Şekil 2.4. Bir Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının eşdeğer devresi.....                                                                                                                                               | 11    |
| Şekil 2.5. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması. (a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim.....                                                                                                            | 13    |
| Şekil 2.6. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması. (a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim.....                                                                                                                              | 15    |
| Şekil 2.7. İdeal olmayan MIS/MOS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....                                                                                                                           | 16    |
| Şekil 2.8. MOS yapısının eşdeğer devresi. (a) Bir enerji seviyesi için (b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için.....                                                                                                  | 17    |
| Şekil 2.9. Pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj ekseni boyunca C-V eğrisinin değişimi: (a) p-tipi (b) n-tipi yarıiletken için.....                                                                       | 20    |
| Şekil 2.10. (a) Yük olmadığında düz bant gerilim kayması (a eğrisi), yük enjekte edildiğinde (b eğrisi), hareketli yük durumunda (c eğrisi) (b) Enjekte olmuş yüke göre C-V eğrisi (c) Hareketli yüke göre C-V eğrisi..... | 22    |
| Şekil 2.11. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre.....                                                                                                                                                       | 26    |
| Şekil 2.12. MIS yapının eşdeğer devresi.....                                                                                                                                                                               | 28    |
| Şekil 2.13. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör.....                                                                                                                                                                 | 31    |
| Şekil 2.14. Dielektrikli Kondansatör.....                                                                                                                                                                                  | 32    |
| Şekil 2.15. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri.....                                                                                                                                                   | 35    |
| Şekil 2.16. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu.....                                                                                                                                                            | 36    |

| Şekil                                                                                                                                                                             | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.17. D'nin zamanla değişim grafiği ( $E=\text{sabit}$ ).....                                                                                                               | 45    |
| Şekil 2.18. Elektrik alanın (E) zamanla değişim grafiği ( $D=\text{sabit}$ ).....                                                                                                 | 46    |
| Şekil 2.19. Dielektrik sabitinin gerçekte ( $\epsilon'$ ) ve sanal ( $\epsilon''$ ) bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi.....                                                   | 49    |
| Şekil 2.20. Dielektrikli bir kondansatördeki ac akımı.....                                                                                                                        | 52    |
| Şekil 2.21. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı ( $I_c$ ) ile kayıp akımı ( $I_l$ ) arasındaki ilişki.....                                                              | 53    |
| Şekil 3.1. Oksit büyütmede kullanılan fırın sistemi.....                                                                                                                          | 59    |
| Şekil 3.2. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan vakum düzeneği.....                                                                                                | 60    |
| Şekil 3.3. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....                                                                                                                 | 61    |
| Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske .....                                                                                                          | 62    |
| Şekil 3.5. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) yapının şematik gösterimi.....                                                                                                         | 62    |
| Şekil 3.6. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek.....                                                                                          | 63    |
| Şekil 4.1. İnce yalıtkan tabakalı Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si yapının (A numunesi) deneysel değerlerinin değişik frekans değerlerinde (a) C-V ve (b) $G/\omega$ -V eğrileri.....    | 66    |
| Şekil 4.2 . Kalın yalıtkan tabakalı Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si yapının (B numunesi) deneysel değerlerinin değişik frekans değerlerinde (a) C-V ve (b) $G/\omega$ -V eğrileri ..... | 67    |
| Şekil 4.3. İnce yalıtkan tabakalı Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si yapının (A numunesi) 1MHz 'de düzeltilmiş (a) C-V ve (b) $G/\omega$ -V eğrileri .....                                 | 70    |
| Şekil 4.4. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) yapılar için oda sıcaklığında yüzey potansiyellerinin V ye karşı grafiği.....                                                          | 72    |
| Şekil 4.5. A numunesinin oda sıcaklığında, Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si yapısı için değişik giriş ön gerilimlerde frekansa karşı eşdeğer paralel kondüktans $G_p/\omega$ eğrisi..... | 73    |

| Şekil                                                                                                                                                                                       | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 4.6. B numunesinin oda sıcaklığındaki Al/ SiO <sub>2</sub> /p-Si yapısı için değişik giriş öngerilimlerde frekansa karşı eşdeğer paralel kondüktans $G_p/\omega$ eğrisi...            | 73    |
| Şekil 4.7. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si yapılar için oda sıcaklığında kondüktans metodundan elde edilen (a)ara yüzey durumlarının enerji dağılım profilleri ve (b)onların zaman sabitleri..... | 74    |
| Şekil 4.8. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si yapı için oda sıcaklığında kondüktans metodundan elde edilen enerjinin fonksiyonu olarak değişen yakalama tesir kesiti.....                            | 76    |
| Şekil 4.9. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MOS) yapının (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ ve (c) $\tan\delta$ larının değişik frekanslarda voltaja bağlılığı.....                               | 80    |
| Şekil 4.10. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MOS) yapının (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ ve (c) $\tan\delta$ ların bazı voltajlar için frekansa bağlı grafikleri .....                        | 82    |
| Şekil 4.11 Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MOS) yapının bazı voltajlar için (a) $M'$ ve (b) $M''$ lerin frekansa bağlı grafikleri.....                                                           | 84    |
| Şekil 4.12. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si(MOS) yapının $\sigma_{ac}$ sinin (a) voltaja bağlı (b) frekansa bağlı grafiği .....                                                                   | 86    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler     | Açıklama                                         |
|--------------|--------------------------------------------------|
| $\text{\AA}$ | Angström                                         |
| $A_{ox}$     | Oksit tabakasının alanı                          |
| $C$          | Kapasitans                                       |
| $C_{ma}$     | Kuvvetli yığılım bölgesindeki ölçülen kapasitans |
| $C_{ox}$     | Oksit kapasitansı                                |
| $C_{ss}$     | Arayüzey kapasitansı                             |
| $C_{sc}$     | Yüzey yük kapasitansı                            |
| $D$          | Elektrik yerdeğiştirme vektörü                   |
| $d_{ox}$     | Oksit tabaka kalınlığı                           |
| $E$          | Elektrik alan şiddeti                            |
| $E_F$        | Fermi enerji seviyesi                            |
| $E_c$        | İletim bandı enerjisi                            |
| $E_g$        | Yarıiletkenin yasak enerji aralığı               |
| $E_i$        | Saf Fermi enerji seviyesi                        |
| $E_v$        | Valans bandı enerjisi                            |
| $G$          | İletkenlik                                       |
| $G_{ma}$     | Kuvvetli yığılım bölgesindeki ölçülen iletkenlik |
| $G_p$        | Paralel iletkenlik                               |
| $M'$         | Elektrik modülünün gerçel kısmı                  |
| $M''$        | Elektrik modülünün sanal kısmı                   |
| $N_A$        | Katkı atomları konsantrasyonu                    |
| $N_{ss}$     | Arayüzey durum yoğunluğu                         |
| $P$          | Kutuplanma vektörü                               |

| Simgeler        | Açıklama                                        |
|-----------------|-------------------------------------------------|
| $\bar{P}$       | Elektrik dipol momenti                          |
| $Q$             | Elektrik yükü                                   |
| $Q_{sc}$        | Yarıiletkendeki uzay yükü                       |
| $R_s$           | Seri direnç                                     |
| $V$             | Uygulanan gerilim                               |
| $Y$             | Admittans                                       |
| $W_D$           | Tükenim bölgesi kalınlığı                       |
| $Z$             | Empedans                                        |
| $\epsilon'$     | Dielektrik geçirgenlik sabiti (gerçel) bileşeni |
| $\epsilon''$    | Dielektrik geçirgenlik sabiti (sanal) bileşeni  |
| $\phi_m$        | Metalin iş fonksiyonu                           |
| $\phi_s$        | Yarıiletkenin iş fonksiyonu                     |
| $\sigma_p$      | Yakalama tesir kesiti                           |
| $\sigma_{ac}$   | Eelektriksel iletkenlik(ac)                     |
| $\epsilon_0$    | Boşluğun dielektrik sabiti                      |
| $\epsilon_s$    | Yarıiletkenin dielektrik sabiti                 |
| $\epsilon_{ox}$ | Oksit tabakasının dielektrik sabiti             |
| $\sigma_f$      | Serbest yüzey yük yoğunluğu                     |
| $\sigma_b$      | Bağlı yüzey yük yoğunluğu                       |
| $\omega$        | Açısal frekans                                  |
| $\tau$          | Arayüzey tuzaklarının ömrü                      |
| $\chi_e$        | Dielektriğin elektrik alınganlığı               |
| $\chi$          | Yarıiletkenin elektron yakınlığı                |
| $\chi_i$        | Yalıtkanın elektron yakınlığı                   |
| $\tan\delta$    | Dielektrik tanjant (Kayıp açısı)                |
| $\psi_s$        | Arayüzeydeki bant gerilimi                      |
| $\phi_s$        | Yüzey potansiyeli                               |



| <b>Kısaltmalar</b>    | <b>Açıklama</b>                                      |
|-----------------------|------------------------------------------------------|
| <b>ac</b>             | Alternatif gerilim                                   |
| <b>dc</b>             | Doğru gerilim                                        |
| <b>C-V</b>            | Kapasitans-gerilim                                   |
| <b>C<sub>HF</sub></b> | Yüksek frekans kapasitansı                           |
| <b>C<sub>LF</sub></b> | Düşük frekans kapasitansı                            |
| <b>G/ω-V</b>          | İletkenlik-gerilim                                   |
| <b>HF</b>             | Yüksek frekans                                       |
| <b>LF</b>             | Düşük frekans                                        |
| <b>MIS</b>            | Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si Metal-Yalıtkan-Yarıiletken |
| <b>MOS</b>            | Metal-Oksit-Yarıiletken                              |

## 1. GİRİŞ

Metal–yalıtkan–yarıiletken (MIS) ve (MOS) yapılar, metal ile yarıiletken tabakaların arasında yalıtkan bir tabakanın doğal ya da yapay bir oksidasyon yöntemi kullanılarak oluşturulur. Metal olarak genelde altın (Au), alüminyum (Al) gibi yüksek saflıktaki metaller kullanılırken yalıtkan olarak silisyum-dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), kalay-dioksit ( $\text{SnO}_2$ ) gibi yalıtkanlar kullanılır. Metal ile yarıiletken arasına oluşturulan yalıtkan tabaka, hem metal ve yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de yük geçişlerini düzenler [1]. Bu yapıların hazırlanmasında, yarıiletkenin p-tipi veya n-tipi olmasına göre uygun iş fonksiyonlu metaller seçilir. Metalin iş fonksiyonu  $\phi_m$  ve yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\phi_s$  olmak üzere p-tipi yarıiletkenlerde  $\phi_m < \phi_s$  ise doğrultucu,  $\phi_m > \phi_s$  ise omik kontak oluşur. N-tipi yarıiletkenlerde durum bunun tersidir;  $\phi_m > \phi_s$  ise doğrultucu,  $\phi_m < \phi_s$  ise omik kontak oluşur. Yani, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları öyle seçilmelidir ki metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli oluşsun.

1950’li yıllarda başlayan mikro elektronik ile ilgili araştırmalar daha çok temel devre elemanları üzerine yapılmıştır. Bu dönemde yarıiletken olarak silisyum ve germanyum önemli ölçüde kullanılmış ancak zaman içinde silisyum kullanımı hakim olmuştur. Ayrıca galyum-arsenik (GaAs) gibi yarıiletkenler de kullanılmaktadır. Silisyumun doğada bol miktarda bulunmasının yanı sıra diğer önemli bir özelliği kristal yüzeyinde  $\text{SiO}_2$  gibi tabii yalıtkan tabakanın kolayca elde edilebilmesidir [2]. Yarıiletken üzerine bir yalıtkan tabaka büyütmenin birçok yöntemi vardır. Fakat bunlardan en çok kullanılan Si üzerine termal oksidasyon yoluyla, belirli sıcaklıklarda ortamdan belirli hızlarda kuru  $\text{O}_2$  geçirilerek,  $\text{SiO}_2$  büyütülmesidir. Özellikle  $\text{SiO}_2$  seçilmesinin sebebi; silisyum üzerine kolay büyümesi ve ideal örgü sürekliliğine yakın bir eklem oluşturmastır. Dolayısıyla  $\text{SiO}_2$  birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde çok sayıda enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açar.

Metal-yalıtkan-yarıiletken yapılar, metal ile yarıiletken arasında yalıtkan tabaka içerdiğinden ve yalıtkan tabakanın dielektrik özelliğinden dolayı MIS ve MOS yapılar, paralel levhali bir kondansatöre benzer. Aradaki yalıtkan tabakanın 100 Å'dan büyük olması durumunda MIS yapılar MOS olarak adlandırılır. Eğer bu yalıtkan tabaka çok ince ise ( $\sim 10-40$  Å), bu yapılar MIS tipi Schottky diyotu olarak adlandırılır ve bu yapıların elektriksel parametreleri sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V) ölçümleri ile kapasitans-voltaj (C-V) ölçümlerinden belirlenir. Kalın yalıtkan tabakalı MIS veya MOS yapılarda, kalın yalıtkan tabakadan dolayı I-V ölçümleri kullanılmadığından dolayı, elektriksel ve dielektriksel parametreleri genelde sıcaklık ve frekansa bağlı C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümlerinden hesaplanır. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhali kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Yalıtkan  $\text{SiO}_2$  birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar.  $\text{SiO}_2$  yarıiletkeni düşük elektriksel özdirenci ve yüksek optik geçirgenliği nedeniyle opto-elektronik devre elemanlarında, ince filmlerde, güneş pillerinde, anti statik tabakalarda ve gaz algılayıcılarında kullanılmaktadır [3,4].

Dielektrikler yani yalıtkanlar, elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıya sahip değildir. Dielektrik bir madde, elektrik alan içerisine konulduğunda olabilecek tek hareket, oluşan elektrostatik kuvvet altında pozitif ve negatif yüklerin zıt yönlerdeki küçük yer değiştirmeleridir. Bunun sonucunda dipol momentleri oluşur. İçinde böyle küçük yer değiştirmelerin olduğu dielektriklere kutuplanmış dielektrikler denir. Elektrik alan etkisi ortadan kaldırıldığında bu yükler eski yerlerine dönerler ve net dipol moment tekrar sıfır olur. Bazı dielektrik maddeler ise elektrik alan içine konmadan da içerisinde kendiliğinden bu yük ayrışımı vardır. Bu maddeler her zaman net bir dipol momente sahip olurlar. Bunlara polar dielektrikler denir. Dielektrik maddelerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Bu değer maddelerin çoğunda elektrik alan şiddetinden bağımsız olsada değişken elektrik alan etkisinde frekansa bağlı olurlar[5].

MIS ve MOS yapıların elektrik ve dielektrik özellikleri ile ilgili çok sayıda deneysel çalışma olmasına rağmen bunların özellikle iletim mekanizmaları, arayüzey durumları ve metal ile yalıtkan arasında oluşan engelin biçimi hakkında literatürlerimizde yeteri kadar aydınlatıcı bilgi mevcut değildir [6-29]. Bu yüzden bu çalışmada, Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) yapıların frekansa bağlı doğru beslem kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri geniş bir frekans (1 kHz-1 MHz) aralığında ve oda sıcaklığında incelendi. Bu ölçümler seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltildi. Oksit tabaka kalınlığının arayüzey durumların elektrik ve dielektrik değerlerinde ne gibi sonuçlar doğurduğunu daha iyi anlamak için bu çalışmada MIS (50 Å) yapı A numunesi ile MOS (826 Å) yapı B numunesi hazırlandı. Bu yapılarda C-V ve G/ω-V ölçümleri alınıp bu ölçümlerden MIS ve MOS yapının elektriksel karakteristikleri, MOS yapının dielektriksel özellikleri frekansa ve voltaja bağlı olarak mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelendi. Deneysel sonuçlar, hem elektriksel hem de dielektriksel özelliklerin frekansa oldukça bağlı olduğunu fakat metal/yarıiletken arayüzeyindeki yalıtkan tabakanın yüzey durumlarını oldukça etkisiz hale getirdiğini gösterdi. C-V-f ve G/ω-V-f ölçümlerinden dielektrik sabitinin (ε') ve dielektrik kaybın (ε'') frekansa bağlı tepkisi, özellikle düşük frekanslarda etkin olduğu gözlemlendi. Dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp ε'' artan frekansla azalırken elektriksel iletkenliğin sac artmakta olduğu gözlemlendi. Buna ilave olarak, iletim mekanizmalarında daha belirleyici olan elektriksel modülün hem gerçel (M') hemde sanal kısmı (M'') farklı voltaj değerleri için (3,3V, 3,4V ve 3,5V) frekansa bağlı incelendi. Tüm bu voltaj değerleri için M' değeri artan frekanla hemen hemen üstel olarak artarken, M'' değeri ise bir pik vermektedir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde bu çalışmanın içeriği ve bu konudaki benzer çalışmaların tarihi gelişimi hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde metal-yalıtkan-yarıiletken MIS ve MOS yapıların elektrik ve dielektrik teorisi detaylıca verildi. Üçüncü bölümde metal-yalıtkan-yarıiletken (Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si) yapıların hazırlanması detaylı olarak anlatıldı. Ayrıca, malzeme hazırlama aşamasında ve deneysel ölçüm sırasında kullanılan ölçüm cihazları tanıtıldı.

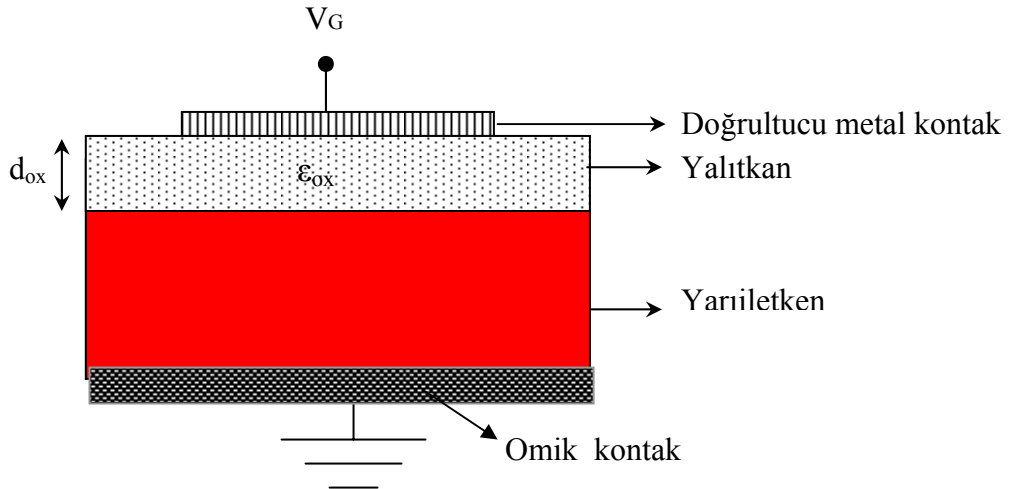
Dördüncü bölümde elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili gerekli tüm grafik ve tablolar verilerek mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelendi. Beşinci bölümde ise, elde edilen tüm deneysel sonuçlarla ilgili yorumlar yapıldı.

## 2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN YAPILAR

Bu bölümde, önce Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıların teorisi anlatılacak. Daha sonra metal ile yarıiletken arasında termal oksidasyon yada doğal bir yolla büyütülen yalıtkan (dielektrik) tabakanın temel fiziksel özellikleri etraflıca anlatılacak. Bu yalıtkan arayüzey tabakalarına  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$  ve organik tabakalar örnek verilebilir [6-29].

### 2.1. (MIS) ve (MOS) Yapısı

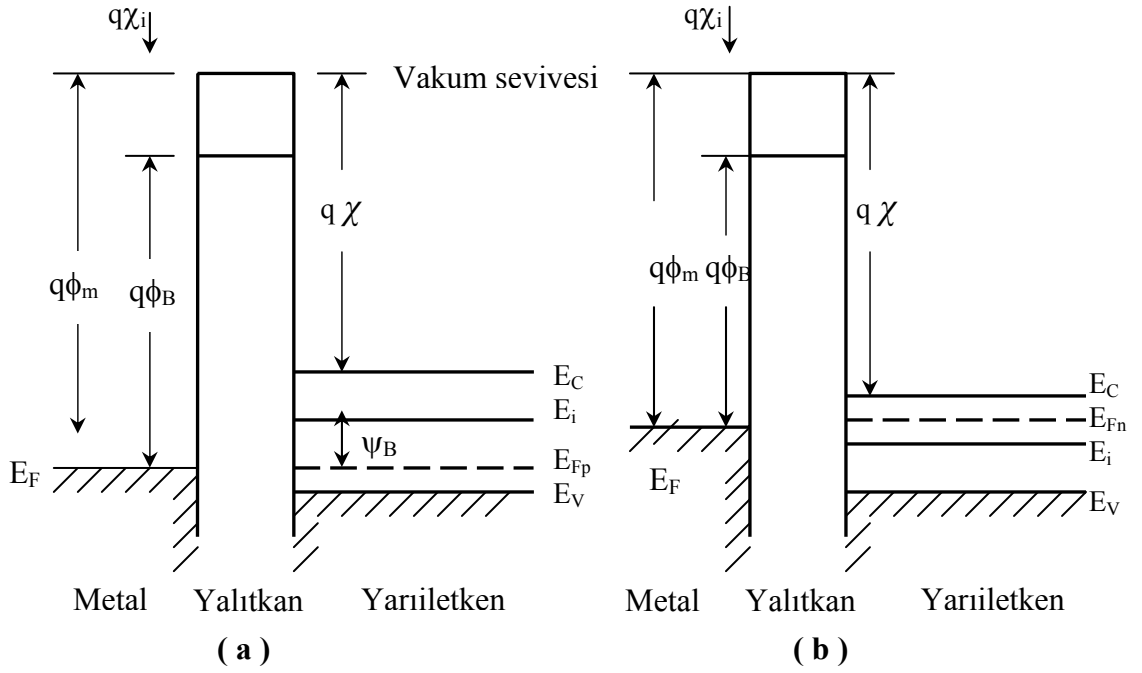
Bir MIS ve MOS yapının şematik gösterimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Bu yapılar, levhalardan birisinin metal, diğerinin yarıiletken olmasından dolayı paralel plakalı bir kondansatöre benzer [18]. Burada  $d_{\text{ox}}$  yalıtkan kalınlığı,  $\epsilon_{\text{ox}}$  yalıtkanın dielektrik sabiti ve  $V_G$  metal plakaya uygulanan gerilimdir.  $V_G$  gerilimi, metal plakaya omik kontakta göre pozitif bir gerilim uygulandığında pozitif, negatif bir gerilim uygulandığında negatiftir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhali kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir [19-25].



Şekil 2.1. Bir MIS (Metal-yalıtkan-yarıiletken) yapının şematik gösterimi

### 2.1.1. İdeal MIS ve MOS yapısı

İdeal bir MIS yapının, gerilim uygulanmadığı durum için enerji-bant diyagramı Şekil 2.2’de p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler için gösterilmiştir [20,21].



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

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

$\phi_m$  : Metalin iş fonksiyonu

$\phi_B$  : Metal ve yalıtkan arasındaki potansiyel engeli

$\chi$  : Yarıiletkenin elektron yakınlığı

$\chi_i$  : Yalıtkanın elektron yakınlığı

$E_v$  : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

$E_C$  : İletkenlik bandı enerji seviyesi

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

$E_F$  : Fermi enerji seviyesi

$\psi_B$  : Fermi ile saf Fermi enerji seviyesi arasındaki fark [20].

Şekil 2.2 üzerinde gösterilen bazı temel yarıiletken sembolleri tanımlanmasına ihtiyaç vardır. Bunlardan *Fermi enerjisi*, iletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında ( $T=0$  K), elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisine denir. Yarıiletkenlerde ise iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviyeye *Fermi enerji seviyesi* olarak tanımlanır. Bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı *Vakum seviyesi* olarak bilinir. Buna göre *metalın iş fonksiyonu* ( $\phi_m$ ); bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak veya serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır. Benzer şekilde *Yarıiletkenin iş fonksiyonu* ( $\phi_s$ ) ise, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır ve bu enerji seviyesi, yarıiletkene katkılanan katkı atomlarının (alıcı veya verici) yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olduğundan dolayı değişen bir niceliktir. Diğer değişken bir parametre olan *elektronun yakınlığı* ( $\chi$ ), vakum seviyesi ile yarıiletkenin iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkıdır.

İdeal bir MIS yapı aşağıdaki verilen özellikleri ile tanımlanabilir [18-29]:

i) Sıfır beslem durumunda metalin iş fonksiyonu  $\phi_m$  ve yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\phi_s$  arasındaki fark sıfırdır. Diğer bir deyişle metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı sıfırdır ( $\phi_{ms}=\phi_m-\phi_s=0$ ) ve n-tipi ile p-tipi yarıiletken için şu şekilde verilir [22,23]:

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

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



Burada  $E_g$  yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve  $\psi_B$  ise Fermi enerji seviyesi  $E_F$  ile saf enerji seviyesi  $E_i$  arasındaki enerji farkıdır [30-32].

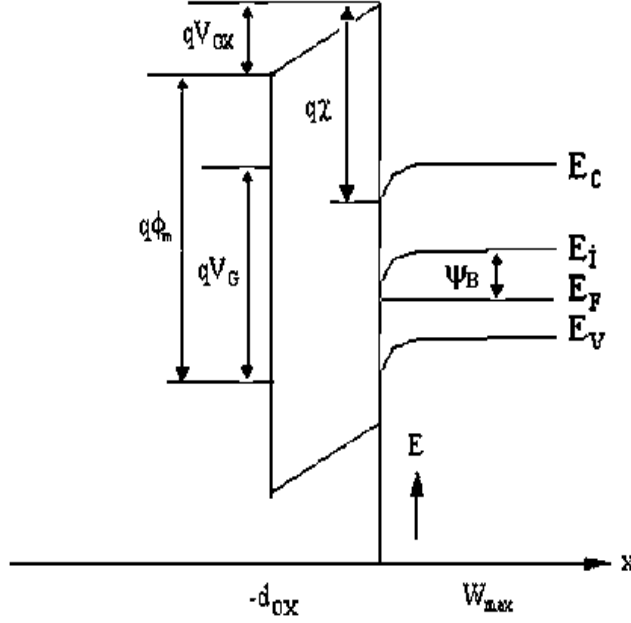
ii) Metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki yalıtkan, bant aralığı çok büyük olduğundan ideal bir dielektriktir. Yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz. Aynı zamanda yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumları ve arayüzey yükleri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

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

iv) D.C. gerilim altında (belsem altında) yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur. Yani yalıtkanın öz direnci sonsuzdur.

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

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



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

İdeal bir MIS yapıda, doğrultucu metal kontağa bir gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az ve uygulanan gerilime bağlıdır. Yarıiletken arayüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükleri ( $Q_{sc}$ ) oluşur [31-32]. Termal denge durumunda arayüzey bölgesindeki uzay yük yoğunluğu potansiyelin büyüklüğü ile belirlenir. Yarıiletkende yükler katkılama türüne göre çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olup, yarıiletkende metallere göre serbest olmayan yükler bulunduğu için uygulanan gerilime bağlı olarak yük, ya uzay yükü bölgesinde yada arayüzey bölgesinde yığılmalara neden olur. Uygulanan  $V_G$  geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine, bir kısmı da yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşer. Bu yüzden,

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

eşitliği yazılabilir. Bu ifadede  $V_{ox}$  yalıtkan arayüzey tabakası üzerine düşen gerilim,  $\psi_s$  ise arayüzeydeki bant gerilimidir [18]. Sistemdeki toplam yük, kondansatördeki yüklere benzetilerek aşağıdaki denklem ile verilebilir.

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

Burada  $Q_n$  tersinim bölgesinde birim alan başına düşen elektronların oluşturduğu toplam yük,  $qN_A W$  ise  $W$  genişliğinde uzay yükü ile uzay yükü bölgesinde birim alan başına iyonize olmuş alıcı katkı atomlarının sayısıdır.  $Q_s$  yarıiletkendeki toplam yük,  $Q_m$  metal yüzeyindeki toplam yük ve  $Q_{sc}$  ise uzay yükü bölgesinde biriken yüküdür [34].

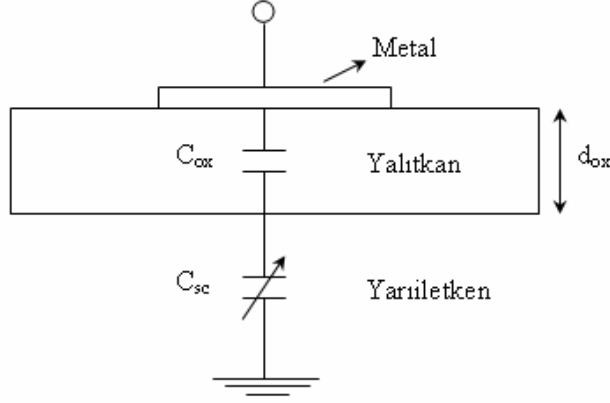
Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Kondansatörlerin özelliklerini metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka ve yalıtkan–yarıiletken arayüzeyi belirler. Kapasitans arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MIS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MIS yapının kapasitansı  $C$ , yalıtkan tabakanın kapasitansı  $C_{ox}$  ve uzay yükü kapasitansı  $C_{sc}$  olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer kapasitansları bize MIS kapasitansını verecektir. Uygulanan gerilimde çok küçük diferansiyel değişimlerin olduğunu varsayarak sırasıyla MIS, yalıtkan ve uzay yükü bölgesi kapasitanslarını sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir [29-32].

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

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

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

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



Şekil 2.4. Bir Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının eşdeğer devresi

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi MIS yapının eşdeğer kapasitansı, yüzey yük kapasitansı  $C_{sc}$  ile yalıtkan oksit kapasitansı  $C_{ox}$  in seri bağlanmasına eşdeğerdir [32].

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

Yalıtkan oksit kapasitansı  $C_{ox}$ ,

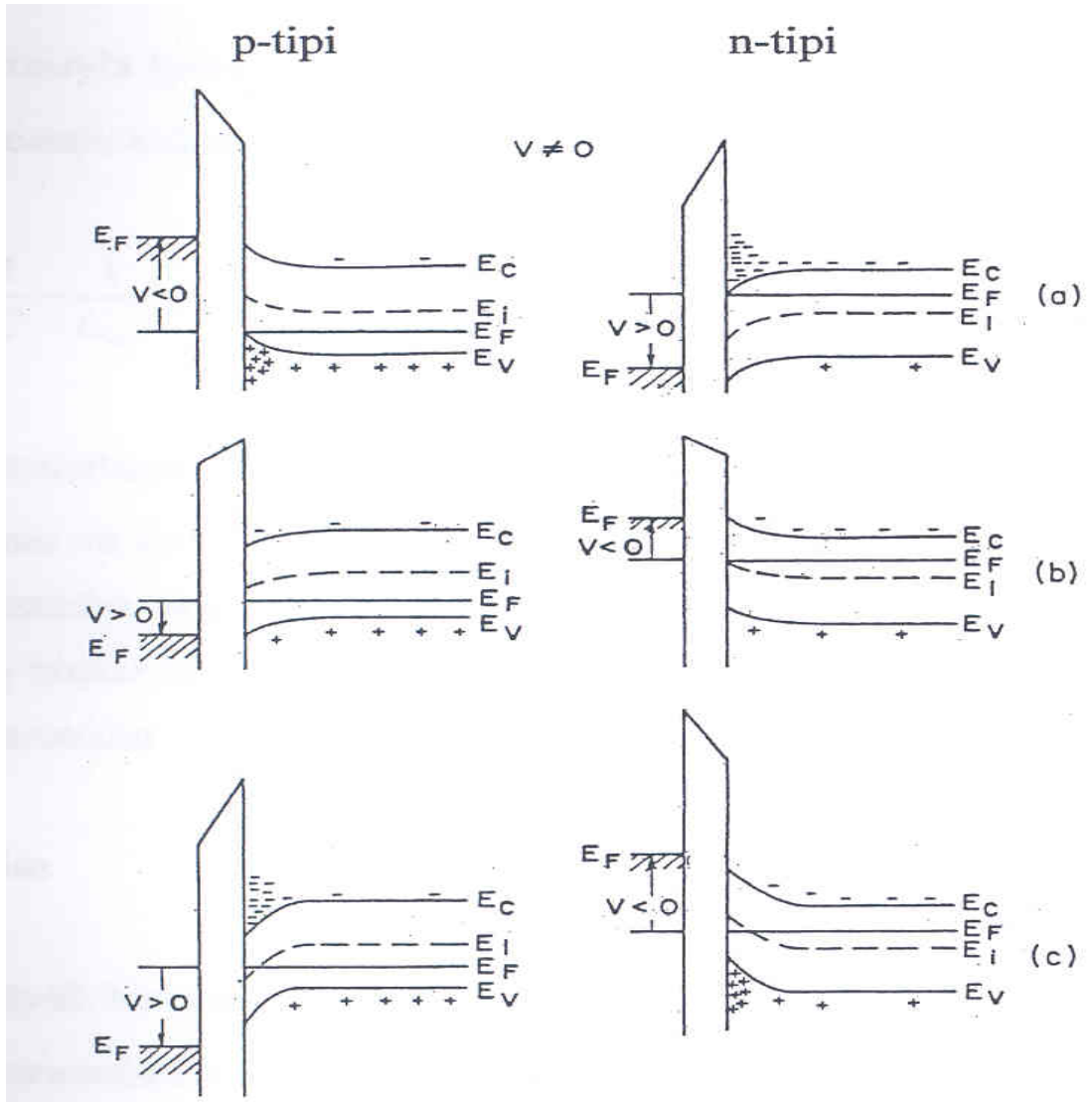
$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.7)$$

eşitliği ile verilir. Burada  $\epsilon_{ox}$  yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti,  $d_{ox}$  ise onun kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından dolayı  $C_{ox}$  değeri de uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MIS yapısının kapasitansındaki değişimi sadece  $Q_{sc}$  uzay yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen durumları Şekil 2.5’de gösterilen bir p-tipi yarıiletken için tanımlanabilir [18,32,33].

*Yığılım:* Metal plakaya bir negatif gerilim ( $V_G < 0$ ) uygulandığı zaman, bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olandeşikleri yarıiletken arayüzeyine doğru çekecektir (Şekil 2.5a). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ( $E_F - E_V$ ) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olandeşiklerin yığılmasına sebep olur. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletkenlik bandının da buna bağlı olarak yukarı doğru büküldüğü bu duruma, çoğunluk yük taşıyıcıların arayüzeyde birikmelerinden dolayı “yığılım” adı verilir [20,31]. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle  $C_{sc} \rightarrow \infty$ , dolayısıyla  $C \rightarrow C_{ox}$  olur.

*Tükenim:* Metal plakaya küçük bir pozitif gerilim ( $V_G > 0$ ) uygulandığı zaman, yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindekideşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Bu durumda yarıiletken yüzeyindekideşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındakideşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür. İletkenlik bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen  $w$  genişliğinde bir bölgede,deşiklerin azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Deşiklerin azaldığı bu bölgeye tükenim bölgesi, bu olaya “tükenim” olayı denir (Şekil 2.5b) [32].

Bu olayda bantlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk taşıyıcı durumundakideşikler arayüzey bölgesinde tükenirler. Uygulanan gerilim arttığında, tükenim tabakası yük dengesi için çok sayıda alıcı iyonları sağlamakla genişler. Tükenim yaygınlaştığı zaman, silisyum gibi yarıiletken yüzey yükü tabakası, derin beslem tükenimi ve katkı yoğunluğu 0,1-10  $\mu\text{m}$  civarında genişleyen iyonize olmuş katkılı iyonların bölgesini içerir. Tükenim durumunda uzay yükü yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle verilir [20,31,32].



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

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

$N_a^-$  ve  $Q_a$  sırasıyla iyonlaşmış alıcı yoğunluğu ve birim yüzeydeki alıcı yüküdür. Tükenim bölgesinin kalınlığı aşağıdaki eşitlikle verilir [32].

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

Burada  $\varepsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Bu bölgede MIS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler. Yüksek frekansta gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların tekrardan birleşme hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir bu da C-V eğrisinin  $C_{\min}$ 'un altına düşmesine sebep olur. Bu dengesiz bir durumdur ve derin tükenim olarak tanımlanır [20,21].

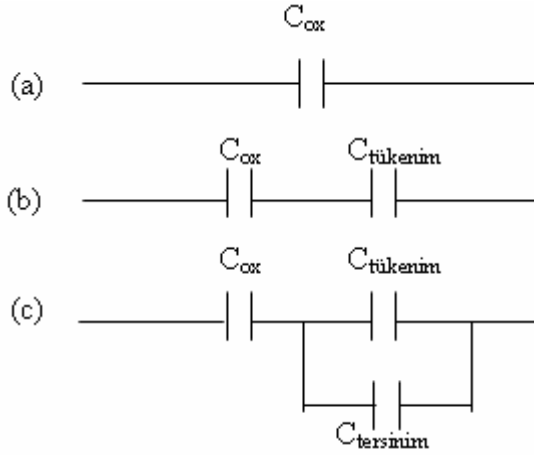
*Tersinim:* Metale daha büyük bir pozitif gerilim( $V_G \gg 0$ ) uygulandığı zaman bantlar aşağı doğru bükülür. Saf durumdaki enerji seviyesi  $E_i$ , Fermi enerji seviyesinin altına geçer. Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar. Elektron yoğunluğu deşik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

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

eşitliği ile verilir [32]. Burada  $Q_n$  tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü ve  $Q_a$  birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Şekil (2.5c)'de enerji bant şeması gösterilmiştir. Bu durumda MIS kapasitansını, elektron yoğunluğunun uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu a.c. sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve buna bağlı olarak kapasitans artan gerilimle yalıtkan kapasitansının değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür. Yüksek frekanslarda ise takip edemez. Sabit yük uzay yükü gibi etki eder ve kapasitans  $C_{\min}$ 'de kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin  $C_{\min}$ 'un altında değerler almasına sebep olur [20-23,32].

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

yapıda üç yük sistemi için devre şeması Şekil 2.6'deki gibidir [32]. Bu sistemler; yığılım, tükenim ve tersinim adını alır.

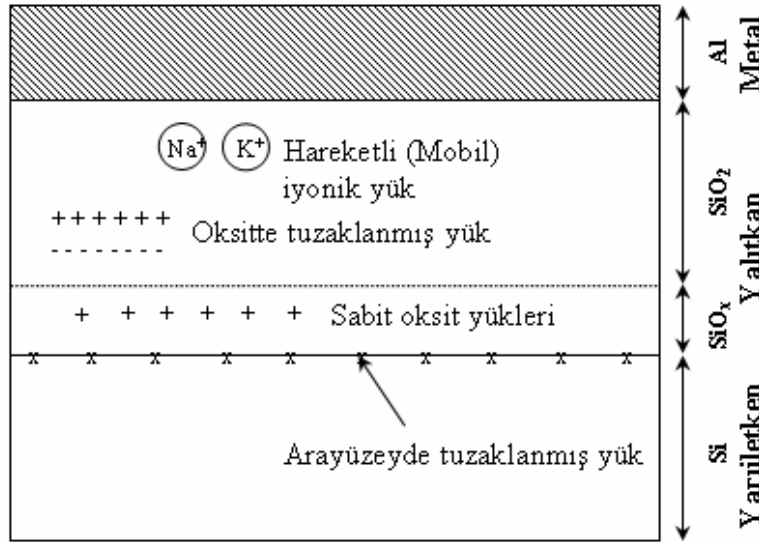


Şekil 2.6. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması.  
(a) Yığılım (b) Tükenim (c) Tersinim

### 2.1.2. Gerçek MIS ve MOS yapısı

İdeal bir yalıtkanın kendi içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir boşluk yükü veya hareketli yük yoktur. Gerçek yapılarda Yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr değildir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yonteme bağlı olarak ortaya çıkan, hareketli iyonlar, tuzaklar, sabit oksit ve arayüzey yüklerinin bulunması MIS ve MOS yapının özelliklerini değiştirmekte, böylece MIS ve MOS yapının ideal özelliklerinden sapmasına sebep olmaktadır [35]. Gerçek bir MIS ve MOS yapıda birçok durumlar ve yükler mevcuttur. Bu durumların ve yüklerin sınıflandırılması Şekil 2.7'de gösterilmiştir [32].





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

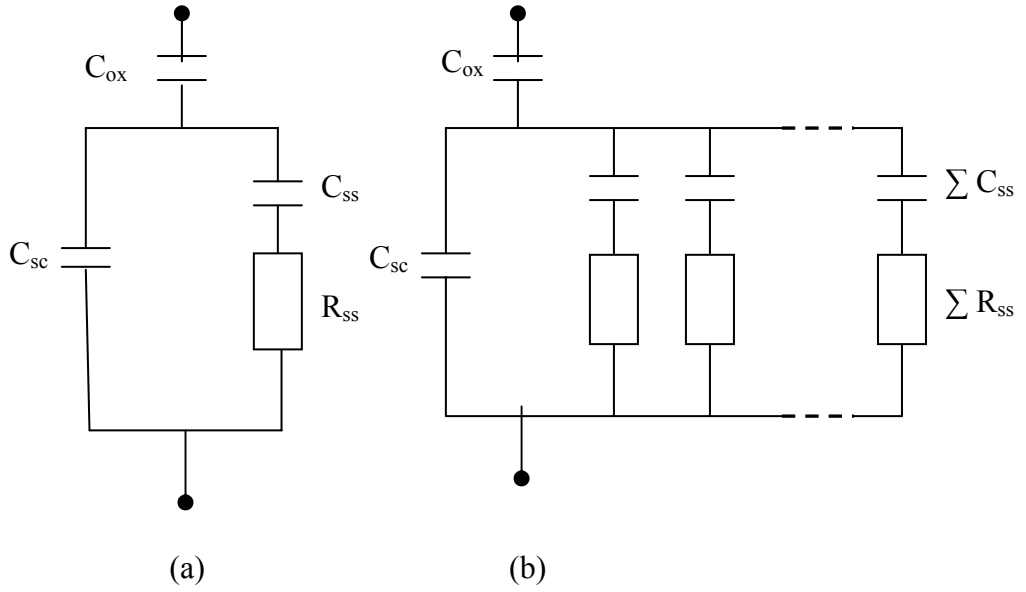
Bunlar sırayla;

- i) Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları.
- ii) Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri.
- iii) Yalıtkan içindeki hareketli iyonlar.
- iv) Numunenin radyasyona maruz kalmasıyla oluşan tuzaklar.

#### Arayüzey durumları

Arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Bir arayüzey durumu verici veya alıcı tipinde olabilir. Bir verici arayüzey tuzağı (seviyesi) dolu ise nötr ve bir elektron vermesiyle pozitif yüklü olur. Bir alıcı arayüzey tuzağı boş ise nötr ve bir elektron almasıyla negatif yüklü olur [27-31]. Bir gerilim uygulandığı zaman, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi geride sabit kalırken valans ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzakları iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla meydana gelir. Bu yükün değişimi MIS

veya MOS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MIS veya MOS eğrisini değiştirir. Arayüzey durumları genelde arayüzeye çok yakın bulunurlar. Arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu  $Q_{ss}$ , yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve yalıtkan kalınlığından etkilenmez. Arayüzey durumları uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yaptıklarından temel eşdeğer devre Şekil 2.8’de gösterildiği gibidir [32].



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

Arayüzey durumlarının elektriksel nicelikleri şöyle sıralanabilir [31-32].

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

*Arayüzey potansiyeli:* yukarıda ifade edilen kapasite ve iletim a.c. etkisindedir. Arayüzey durumları bunlara ek olarak bir d.c. etkisine de sebep olur. Arayüzey durumlarında depo edilmiş yük, arayüzey elektrik alanını değiştirir. Arayüzey

durumları mevcut olunca arayüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumdan daha fazla gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu etki kapasite-gerilimin zorunlu genişlemesi (stretch out) olarak gözüktür [20-22,31,32].

*İletim:* Arayüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından zaman gecikmesi ile birleştirilir. Bu zaman gecikmesi arayüzey durumunun bir RC devresiyle özdeşleştirilmesiyle ifade edilir. Bu zaman kayması aynı zamanda dolum boşalım zamanıdır ve  $\tau = 1/(R_{ss}C_{ss})$  bağıntısı ile verilir  $R_{ss}$  arayüzey direncidir [30,31]. Devredeki arayüzey kapasitansı  $C_{ss}$ ,

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

ile verilir. Arayüzey durumları C-V eğrisinin ideal C-V eğrisine göre kaymasına sebep olur. Arayüzey durumlarının birim enerji ve birim alan başına durum yoğunluğu,

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

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

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

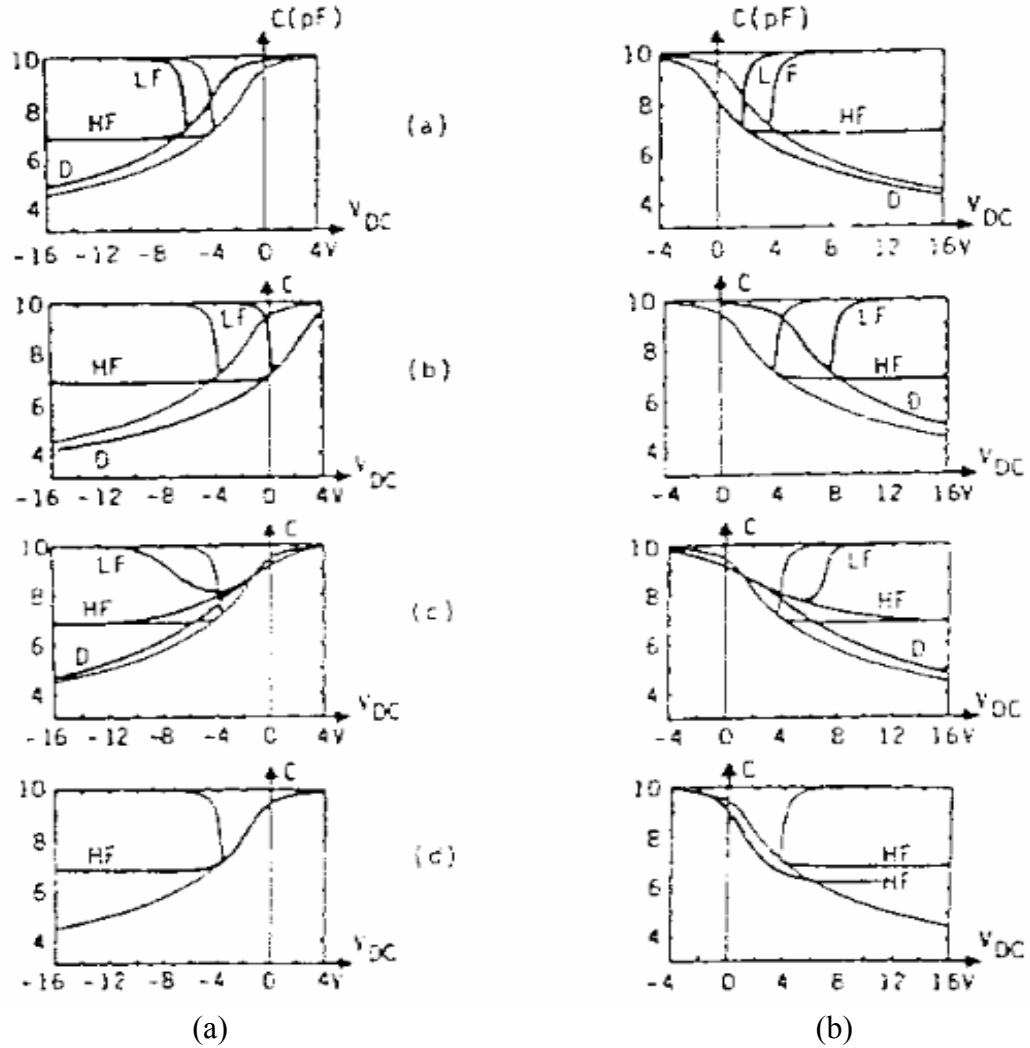
elde edilir [18].

Bir elektron veya deşik tarafından bir arayüzey durumunun işgal edilme olasılığı, bu yüzey durumunun safsızlık enerji seviyelerindeki gibi fermi seviyesiyle belirlenir. Bu

şekilde yüzey potansiyeli değıştikçe arayüzey durumun enerji seviyesi de onunla hareket eder. Sonuçta fermi seviyesinin bu bağıl değışikliği bir elektron tarafından bu arayüzey durumunun işgal edilme olasılığının değışimine sebep olur. Bantlar aşağı doğru eğildiğinde yüzey potansiyeli artar ve daha fazla arayüzey durumları fermi seviyesinin altına iner. Yüzey potansiyelindeki değışikliklerle ilgili olan tuzaklanmış arayüzey yükteki bu değışim yarıiletken kapasitansında ek bir katkı meydana getirir [29-31].

#### Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit oksit yükleri sabittir ve  $\psi_s$ 'in geniş değışimine karşı değışmezler. Bu yükler yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuşlardır. Sabit oksit yükünün yoğunluğu ( $Q_{fc}$ ), silisyumdaki kirlilik konsantrasyonundan ve oksit kalınlığından etkilenmezler [32]. Sabit oksit yükleri genellikle pozitifdir ve oksidasyona, tavlama şartlarına ve silisyumun yönüne bağlıdır. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde lokalize olmuş yükler gibi görülebilir. Arayüzeyde pozitif veya negatif sabit oksit yükleri mevcut olduğu zaman yüksek frekans C-V eğrilerinin gerilim eksenini boyunca değışimi Şekil 2.9'da gösterilmiştir [20,31,32].



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

n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin her ikisi için, ideal C-V eğrisine göre, uygulama geriliminin negatif değerlerine doğru C-V eğrisinin kaymasına pozitif sabit oksit yükleri ( $+Q_f$ ), C-V eğrisinin ileri pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri ( $-Q_f$ ) sebep olurlar [31,32].

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

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

ile verilir. Sabit oksit ve arayüzey yüklerinin sebep olduğu, C-V eğrisi ile ideal C-V eğrisi arasındaki kaymadan yararlanarak yalıtkan içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu  $\Delta Q_{ox}$ , yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük yoğunluğu  $\Delta Q_{eff}$  ve arayüzey durum yük yoğunluğu  $\Delta Q_{ss}$  hesaplanır.  $\Delta Q_{ox}$ ,  $\Delta Q_{eff}$  ve  $\Delta Q_{ss}$  aşağıdaki bağıntılarla verilir [29,32].

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

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

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

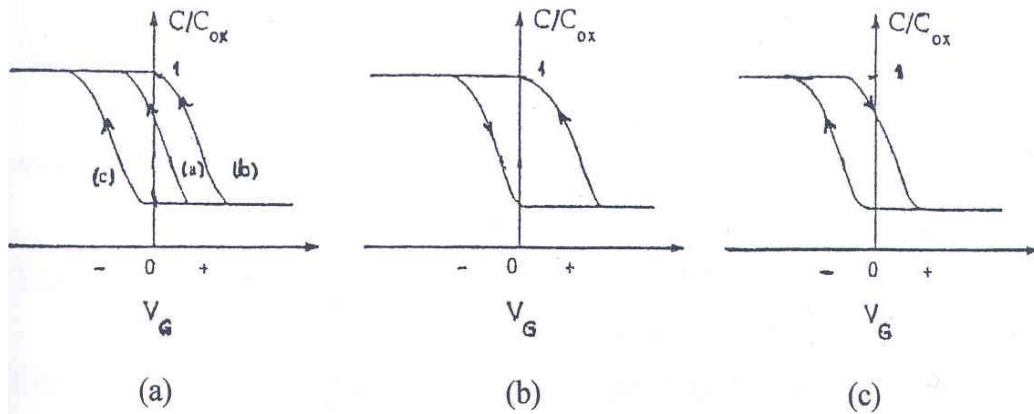
Burada,  $\Delta V_{MG}$  gerçek ve ideal C-V eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kaymasını ve  $\Delta V_{FB}$  düz bant durumunda gerilim kaymasını göstermektedir. Düz bant gerilim kaymasına, yalıtkan içine enjekte olmuş yükler yada yalıtkan içindeki hareketli yükler neden olabilir. p-tipi yarıiletken ile yapılmış bir MIS kapasitör göz önüne alalım. Şekil 2.10a'daki a eğrisi orta uygulama gerilimiyle elde edilmiştir. Daha sonra büyük bir pozitif gerilim uygulayalım. Bu durumda iki etki olabilir [31].

i) Elektronlar yalıtkan içine enjekte olabilir.

ii) Yalıtkan boyunca dağılmış pozitif yüklü hareketli iyonlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine sürüklenebilir.

Oksit içine enjekte olmuş negatif yük birinci işlem için pozitif  $\Delta V_{FB}$ 'ye sebep olur (b eğrisi). İkinci işlem için ters etki gözlenir, çünkü yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde

pozitif yük negatif  $\Delta V_{FB}$ 'ye sebep olur (c eğrisi). Bu tip davranışlar Şekil 2.10b ve Şekil 2.10c'deki C-V eğrileriyle ayrıca gösterilmiştir. Şekil 2.10b'de pozitif  $V_G$ , yalıtkan içine elektron enjeksiyonuna neden olur ve  $+V_G \rightarrow -V_G$  değişimi sola doğru ok işareti ile gösterilir. Büyük uygulama geriliminden dolayı tuzaklanmış elektronlar oksitten enjekte olunabilirler ve hatta oksit içine deşikleri enjekte etmek bile mümkündür. Ters taramada ( $-V_G \rightarrow +V_G$ ) okun yönü sola doğru gösterilir. Eğer hareketli yük C-V eğrilerini kaydırmışsa, Şekil 2.10c eğrisi elde edilir. Büyük pozitif uygulama gerilimleri için hareketli iyonlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine sürüklenirler. Büyük negatif uygulama gerilimleri için hareketli yük metal-yalıtkan arayüzeyine çekilir ve C-V eğrisini değiştirmez [31,32].



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

### Hareketli (Mobil) iyonik yük

Yalıtkan yükünün bir başka türü hareketli (mobil) iyonik yüküdür. Bu yüke çoğunlukla, sodyum veya potasyum gibi iyonize olmuş alkali metal atomları sebep olur [20-23]. Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde yada yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde lokalize olmuşlardır. Böyle iyonlar nispeten düşük

sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Hareketsiz oksit yükü, beslem sıcaklığı ile hareketli iyonik yükten ayırt edilebilir. Oksitte sabitleşmiş yükün yoğunluğu bu işlem esnasında değişebilir. Bununla beraber hareketli iyonik yük, metal-yalıtkan ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyi arasında ileri geri gidip gelebilir ve bunun neticesinde iyonik akım gözlenebilir. Hareketli iyonlar genellikle  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  iyonlarıdır [36]. Bunlardan  $\text{H}^+$  ve  $\text{H}_3\text{O}^+$  oda sıcaklığında geri kalanlar da  $100^\circ\text{C}$ ' de hareketlikleri gözlenir. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları ihtiva etmesi, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alan altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar. Hareketli yükleri C-V eğrisindeki düz bant kaymasından yararlanarak,

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

denklemleri ile hesaplanabilir[29-31].

#### Oksitte tuzaklanmış yük

Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar yalıtkan oksit içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece yalıtkan oksit ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Bir yalıtkan tabakasında elektron-deşik çiftleri meydana gelmişse (iyonlaştırıcı radyasyon ile) bu elektron ve deşiklerin bir kısmı sonradan yalıtkan tuzaklanabilir [31]. Bunun dışında, elektronlar ve deşikler yalıtkan tabakasına enjekte edildiğinde (tünelleme yoluyla) bunların bazıları da oksitte tuzaklanabilir. Bu tuzaklar yüksek enerjili foton veya parçacıklarla bombardıman edildiğinde de ortaya çıkabilir. Yapının üretiminde ortaya çıkan elektron ve deşik tuzakları daha sonradan  $550^\circ\text{C}$  üzerindeki sıcaklıklarda tavlama ile kaldırılabilir [20,31,36]. Oksitte tuzaklanmış yük, okside doğru dağıldığından genellikle yalıtkan-yarıiletken yüzeye yerleşmezler. Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yük ( $Q_{ot}$ ),



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

ile verilir [32]. Burada,  $\Delta V_{FB}$  düz bant gerilim kaymasını göstermektedir. İyonlaşmış tuzaklar kapasitans-voltaj eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasite değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklardan dolayı kapasitans-voltaj eğrisinde histeresis etkisi gözlenir [37]. MIS yapıya silisyum yüzeyinde deşik yığılmasını oluşturan negatif gerilim yeterince uzun süre uygulanırsa oksit içindeki tuzaklar boşalır. Bu boşalma, tuzaklarda bulunan elektronların deşikler tarafından yakalanmasıyla olur. Metal elektrota pozitif gerilim uygulanırsa Fermi düzeyi iletim bandına doğru kayacak ve yalıtkan tuzakları dolmaya başlayacaktır. Eğer uygulanan gerilim azalırsa Fermi düzeyi tekrar valans bandına kayar ve tuzakların elektronları deşikler tarafından yakalanırlar. Bunun sonucunda tuzaklar tekrar boşalır. Dolum-boşalım sırasında tuzaklarda bulunan elektron sayıları arasındaki fark, C-V eğrisinin kaymasına sebep olan histeresis yüküdür [31]. Kapasitans-voltaj eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı yalıtkan içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla histeresis yük yoğunluğu aşağıdaki formülle verilir [31,32]:

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

Burada  $\Delta V_{HisFB}$  düz banttaki kayma miktarıdır.

### 2.1.3. MIS yapılarda arayüzey durum yoğunluğu teorisi

Bir MIS yapıda arayüzey tuzaklar ve yalıtkan yüklerinin varlığı ideal MIS karakteristiklerini etkileyecektir. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açar [29-31]. Bir MIS yapılışı sırasında silisyum yüzeyi ne kadar temizlense de giderilemeyen yarıiletken örgünün son bulunduğu kristal yüzeyindeki

düzensizlikler sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Bu seviyelere yüzey durumları adı verilir [32,34].

Yüzey durumları yoğunluğu için kuramsal tahminler yüzey atomlarının yoğunluğu mertebesinde, yani  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  civarında fakat deneysel sonuçlar bunun sadece  $10^{11}$ - $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  mertebesinde olduğunu göstermektedir [32]. Yüzey durumları yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yavaş yüzey durumları yalıtkanın metal tarafındaki yüzeyinde bulunur. Bunlar yalıtkan yapısındaki hareketsiz yükler ihtiva eden bozukluklar ile yeterli sıcaklıklarda ve özellikle yüksek elektrik alan altında yalıtkan içerisinde göç etmeye yatkın, hareketli iyonlar tarafından meydana getirilir. Yavaş yüzey durumları termal oksidasyon ile hemen hemen giderilebilir. Yavaş yüzey durumları MIS kapasitesini etkilemez [21,31].

Hızlı yüzey durumları yalıtkanla yarıiletken arayüzeyi yakınında yer alır ve yasak enerji bölgesinin ortasına yakın enerjilere sahiptir. Dolayısıyla bant bükülmesi ile yani yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da bükülmeyen Fermi seviyesine göre aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alışverişi yapar. Arayüzeyde bulunan ve yasak enerji bölgesi dışındaki enerjilere sahip yüzey durumlarına sabit yüzey durumları ve taşıdıkları yüke de sabit yüzey yükü veya oksit yükü denir [20,21,32].

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

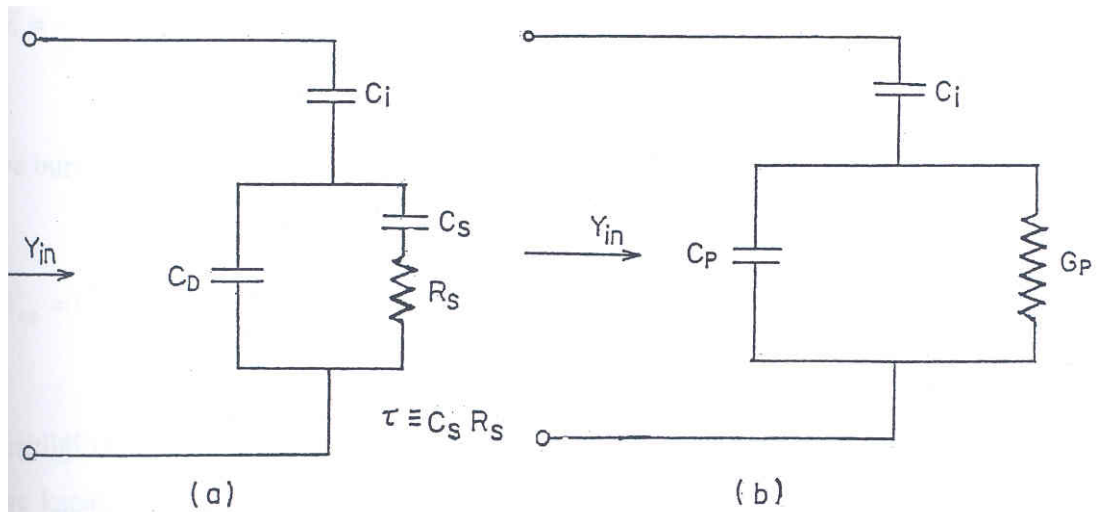
$$f_{SD}(E_t) = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_F - E_t}{kT}\right)} \quad (2.21)$$

ve alıcı arayüzey tuzaklar için ise,

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

şeklindedir. Burada  $E_t$ , arayüzey tuzak seviyesi enerjisi,  $E_F$  Fermi enerji seviyesi ve  $g$  ise termal durum dejenerasyonu olup değeri verici tuzakları için 2, alıcı tuzaklar için 4'dür [32,38].

Bir beslem altında arayüzey tuzak seviyeleri valans veya iletkenlik bantları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar yukarı veya aşağı hareket eder. Bu değişme MIS kapasitesinde ve ideal eğrisinde değişmeye sebep olur. Arayüzey tuzaklarının etkisini kapsayan eşdeğer devre Şekil 2.11'de gösterilmiştir [32].



Şekil 2.11. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre

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

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

şeklindedir. Burada iletkenlik  $G_P$  ve kapasitans  $C_P$ ,

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

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

eşitlikleri ile verilir. Toplam empedans  $Z$  ise,

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

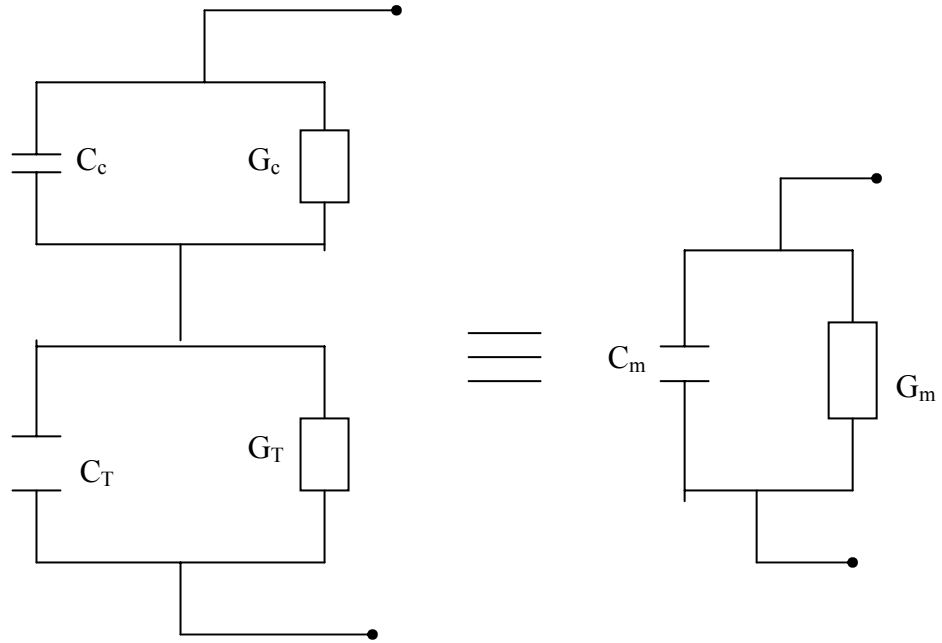
ve buradan toplam admittans  $Y_{top}$  için,

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

eşitliği elde edilir [31,32,39]. Eğer seri direnç varsa ve büyükse, ölçülen iletkenlik  $G_m$  ve kapasitans  $C_m$  gerçek değerler değildir [40]. Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 2.12’de gösterilmiştir.

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

şeklindedir.



Şekil 2.12. MIS yapının eşdeğer devresi

Şimdi  $C_c$  ve  $G_c$  analitik çözümünü yapılabilir.

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

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

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

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

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

elde edilir [31].. Burada seri direnç  $R_s$ , Şekil 2.12b'deki devrenin empedansı  $Z$ 'nin reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli yığılımdaki  $C_m$  ve  $G_m$  değerlerinden hesaplanabilir [31].

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

den,

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

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

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

şeklindedir. "Eş. 2.29" ve "Eş. 2.32" denklemlerini yeniden düzenlersek [31],

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

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

elde edilir. Burada,

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

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

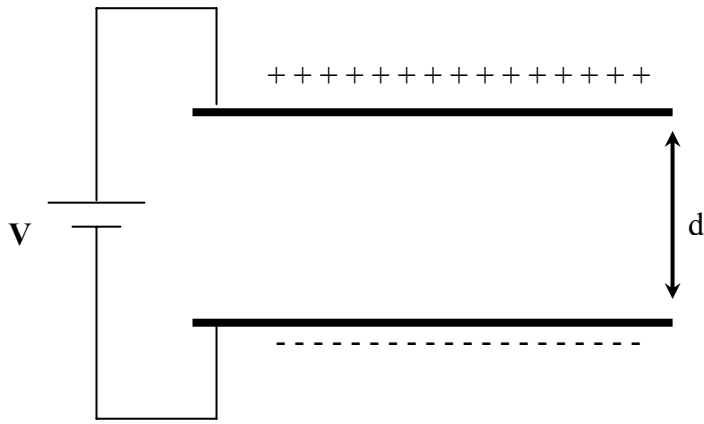
## 2.2. Dielektrikler

### 2.2.1. Dielektriklerdeki statik elektrik alan etkisi

Dielektrikler, bir dış elektrik alan etkisi altında içerisinde hareket edebilen serbest taşıyıcı bulundurmamaları bakımından iletkenlerden ayrılırlar. Dielektrikler, bir başka ifade ile yalıtkanlar, elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıya sahip değildir. Dielektriklerde tüm yükler belirli atom veya moleküllere bağlıdır ve hareketleri molekül içinde sınırlıdır. Dielektrik bir madde, elektrik alan içerisine konulduğunda olabilecek tek hareket, pozitif ve negatif yüklerin oluşan elektrostatik kuvvet altında zıt yönlerdeki küçük yer değiştirmeleridir [20,21]. Bunun sonucunda dipol momentleri oluşur. İçinde böyle küçük yer değiştirmelerin olduğu dielektriklere kutuplanmış dielektrikler ortadan kaldırıldığında bu yükler eski yerlerine dönerler ve net dipol moment tekrar sıfır olur. Pozitif ve negatif yüklerin elektrostatik kuvvet altında yer değiştirmesinden başka sürekli bir dipol momente sahip molekülleri de yönlendirir. Bu tür moleküller, kendilerini alan doğrultusunda yönlendirmeye çalışan bir kuvvet çifti etkisi altında kalırlar. Sonuçta, net bir yönelmenin olduğu denge kutuplanması elde edilir. Bazı dielektrik maddeler ise elektrik alan içine konmadan içerisinde bu yük ayrışımı vardır. Bu maddeler net bir dipol momente sahiptir. Dielektrik maddelerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Çoğu maddelerde bu değer, elektrik alan şiddetinden bağımsızdır, ancak değişken elektrik alan etkisinde frekansa bağlıdır [29-31].

### 2.2.2. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

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



Şekil 2.13. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör

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

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

ifadesi ile verilir [20]. Burada,  $\epsilon_0$  boşluğun geçirgenlik sabiti,  $\sigma$  ise her bir plaka üzerinde birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğudur. Aralarında  $d$  uzaklığı bulunan plakalar arasında oluşan potansiyel farkı,

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



olur [20,21]. Buna göre her plakanın sahip olduğu toplam yük  $\sigma A$  olmak üzere paralel plakalı kondansatörün sığası,

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

olarak ifade edilir[20,32].

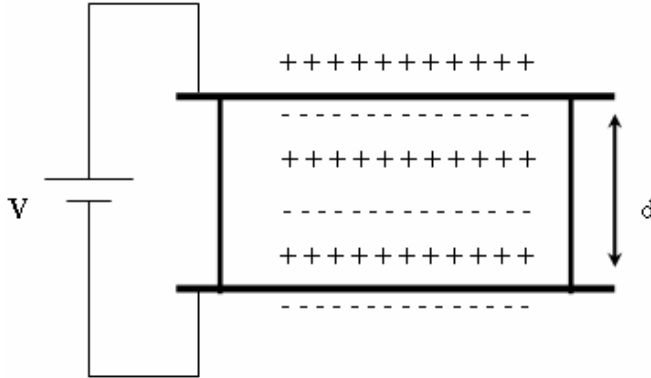
Ayrıca  $\sigma$  yüzey yük yoğunluğu, plakalar arasındaki bölgede elektrik yerdeğiştirme kaynağı olarak düşünülebilir. Buna göre elektrik yerdeğiştirme;

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

ile ifade edilir [21,41].

### 2.2.3. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör

Bir kondansatörün plakaları arasındaki boşluk tamamen bir yalıtkan (dielektrik) madde ile doldurulursa, kondansatörün sığası birimsiz  $\epsilon'$  çarpanı kadar artar. Bu  $\epsilon'$  çarpanına yalıtkanın dielektrik sabiti denir. Bu sabit her zaman boşluğun geçirgenlik sabiti ( $\epsilon_0$ ) cinsinden ifade edilir ve birden büyük bir sayıdır.



Şekil 2.14. Dielektrikli kondansatör

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

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

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

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

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

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

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

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

olarak ifade edilebilir [31,32].

#### 2.2.4. Dielektrik kutuplanma

Bir kondansatörün levhaları arasına bir dielektrik (yalıtkan) yerleştirildiği zaman potansiyelin azalması, elektrik alan şiddetinin ( $E=V/d$ ) azalmasını gerektirir. Elektrik alan şiddetinin ( $E=\sigma/\epsilon_0$ ) azalması ile birim yüzeydeki net yük azalır. Bu da ancak, dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yüklerin meydana gelmesiyle mümkündür. Bir iletken elektrik alan içine yerleştirildiğinde alan tarafından uygulanan kuvvetlerin etkisi altında serbest yükler yer değiştirir [21,31].

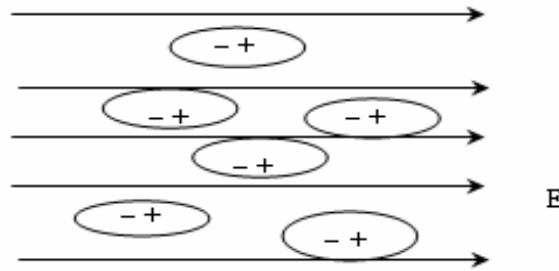
Elektrostatik denge kurulduğunda etkiyle meydana gelen yüklerin elektrik alanı bütün noktalarda dış alanı nötrleştirir ve iletken içinde elektrik alan sıfır olur [5].

Bir dielektrik kondansatörün levhaları arasına konulunca, dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerinde yükler meydana gelir. Bazı dielektriklerin molekülleri daimi dipol ihtiva ederler. Polar denilen bu maddelerde pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışmaz yani yükler birbirinden çok az miktarda ayrılırlar.  $N_2O$  ve  $H_2O$  moleküllerinin her ikisinde de hidrojen ve azot atomları oksijen atomunun aynı tarafında yer alırlar; bu moleküller polardırlar. Polar olmayan bir molekülde ise pozitif çekirdeğin ağırlık merkezi ile elektronların ağırlık merkezi normal olarak çakışır.  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  gibi simetrik moleküller polar değildir. Bir dielektrik elektrik alan içine yerleştirildiği zaman, bir yük hareketi olmamakla beraber, elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğine çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Böylece atomlar çok küçük (atomik) dipolar haline geçerler ve dielektrik kutuplanır. Böylece dipolar hale geçen molekül dipol momenti elektrik alana paralel olacak şekilde yönelir. Elektrik alan kaldırıldığı zaman atomlar tekrar normal hallerine dönerler ve dipoller kaybolur [5,20].

Polar olmayan molekül kutuplandığı zaman yer değiştiren yükleri geri çağıran kuvvetler oluşur. Dış alan tarafından yüklere etkiyen kuvvet geri çağırıcı kuvvetlere eşit oluncaya kadar yükler birbirinden ayrılırlar. Geri çağırıcı kuvvetler molekülden moleküle değişir, bu nedenle verilen bir alan için yüklerin yer değiştirmesi yani kutuplanma farklı olur. Moleküller sabit bir uyarım içinde bulunduklarından tam bir yöneliş olmaz. Fakat uygulanan elektrik alan şiddeti artıkça ve sıcaklık küçüldükçe yönelme derecesi artar [5].

Bir dielektrik polar moleküllerden (daimi dipollerden) meydana gelmiş ise bir dış alan mevcut olmadığı zaman dipoller rasgele doğrultularda yönelirler. Bir dış alanın etkisi altında bulundukları zaman P dipol momentleri Şekil 2.15'teki gibi alana paralel olacak şekilde yönelirler [20,42]. Kısmen yönelen bu dipoller, dış elektrik alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan oluştururlar. Dielektriğin molekülleri

daimi dipol momentine sahip değilse, bu durumda dış elektrik alan bir miktar yük ayrışmasına sebep olur. Bu da dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur.



Şekil 2.15. Dış elektrik alan uygulandığında dipollerin yönelimleri

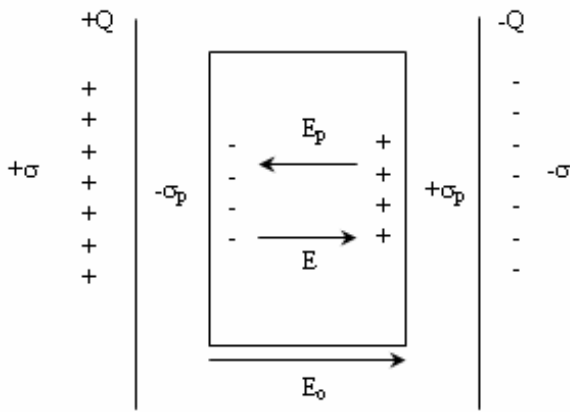
#### Kutuplanma yükleri

Bir dielektrik madde kondansatörün levhaları arasında bulunduğu zaman, yönelme ile olan kutuplanma, bütün dielektriğin pozitif yüklerinin merkezini, negatif yüklerin merkezinden uzaklaştıracak şekildedir. Dielektrik bütün olarak yük bakımından nötr olmakla beraber polarize olmuştur [20,21]. Net etki dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde zıt işaretli yük meydana getirecek tarzdadır. Dielektriğin içinde herhangi bir hacim elemanında bir yük fazlalığı yoktur. Dielektrik bütün olarak, elektrik bakımından nötr olduğuna göre, yüzeyde meydana gelen negatif ve pozitif kutuplanma yükleri eşit olmalıdır [20]. Bu olayda dielektriğin kondansatörün levhalarına bakan yüzlerinde meydana gelen yükler son derece ince bir tabaka içindedir. Bu yükler yakın atomların etkisi altındadır. Bunlara bağlı yükler denir. Çünkü dielektriğin yüzeylerine dokundurulan iletken bir levha ile bu yüzeylerden hiçbir yük kaldırılamaz. Bir iletken serbest yükler bulunduğu halde, polarize bir yalıtkanda meydana gelen yükler bağılırlar [5].

#### Kutuplanma yüklerinin alanı

Dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerinde meydana gelen kutuplanma yükleri nedeniyle levhalar üzerindeki serbest yüklerden ileri gelen alana ters yönde bir alan

meydana gelir. Bu durum Şekil 2.16'daki gibi açıklanabilir. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi düzgün bir  $E_0$  elektrik alan içindeki bir dielektrik maddede moleküllerin pozitif kısmı elektrik alan yönünde, negatif kısmı da alana zıt yönde yönelir. Böylece uygulanan elektrik alan, dielektrik madde tümü ile nötr olmasına karşın dielektriği polarize eder. Elektrik alanın etkisi sonucu, negatif yükler sol yüzeyde, pozitif yükler sağ yüzeyde birikmişlerdir. Dielektrik bütünü ile nötr kalmasından dolayı, negatif yüzeyde oluşan yük miktarı pozitif yüzeyde oluşan yük miktarına eşittir.  $E_0$  ile dielektrik bulunmadığı zamanki alan şiddetini ve  $E_p$  ile polarize olmuş dielektriğin meydana getirdiği alanın şiddeti gösterilirse, bileşke alan bunların vektörel toplamına eşit olur.



Şekil 2.16. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p \quad (2.43)$$

$E_0$  polarize eden alan ile, polarize yüklerden ileri gelen  $E_p$  alanı zıt yönlüdürler. O halde "Eş. 2.43" denklemi,

$$E = E_0 - E_p \quad (2.44)$$

yazılabilir.  $E_p$  alanı kutuplanmayı önlemeye çalışan alandır. Bileşke alan daima  $E_0$  yönündedir. Kondansatörün levhaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu  $\sigma$ ,

dielektriğin levhalara karşı olan yüzlerde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu  $\sigma_p$  ise, etkili yük yoğunluğu  $(\sigma - \sigma_p)$  olur.  $\sigma$  serbest yük yoğunluğu,  $E_o$  elektrik alanına,

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

ile bağlıdır [21].  $\sigma_p$  kutuplanma yük yoğunluğu ise  $E_p$  elektrik alanına,

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

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

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

olur.

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

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

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

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

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

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

olarak elde edilir [20,21,32]. "Eş. 2.50", "Eş. 2.47"de yerine konulursa,

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

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

elde edilir.  $E_o > E_p$  olduğundan, dielektrik üzerindeki  $\sigma_p$  kutuplanma yük yoğunluğu, kondansatörün plakaları üzerindeki  $\sigma$  serbest yük yoğunluğundan küçüktür ( $\sigma_p < \sigma$ ). Hiçbir dielektrik yoksa  $\epsilon' = 1$  ve  $\sigma_p = 0$  olur. Buna karşın, dielektrik yerine bir iletken yerleştirilirse  $E = 0$  olur, o zaman "Eş.2.44"den  $E_o = E_p$  elde edilir ki bu  $\sigma_p = \sigma$  karşılık gelir. Yani, iletken üzerinde kutuplanan yük, plakalar üzerindeki yüklerle eşit ve zıt işaretli olacak, dolayısıyla iletkendeki net alan sıfır olacaktır [32].

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

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

bağıntısı ile ifade edilir [21]. Burada  $\chi_e$ , dielektriğin elektrik alinganlığı olarak adlandırılan bir niceliktir. Boşlukta polarize olacak madde olmadığından  $\chi_e = 0$  olur.

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

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

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

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

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

olarak elde edilir [5,41,43].

### 2.2.5. Kutuplanma mekanizmaları

Dielektrikler polar ve polar olmayanlar diye genelde iki kısma ayrılırlar. Polar maddeler içerdikleri moleküllerindeki atomların konumlarından kaynaklanan pozitif ve negatif iyonların yük merkezleri bir noktada çakışmadıklarından kalıcı elektrik dipol momentlerine sahiptirler. Bu elektrik dipol momentleri çoğu zaman çift-kutup momentleridir ve bunlara çift kutuplu maddeler denir. Dielektriklerde temelde üç tip kutuplanma meydana gelmektedir. Bunlar elektronik, iyonik ve yönelme kutuplanmalarıdır [43,44].



### Elektronik kutuplanma

Elektrik alanın uygulanmasıyla bütün atomlar ve iyonlarda ortaya çıkar ve tüm dielektriklerde diğer tür kutuplanmalar olmazsa dahi gözlenebilir. Bunun nedeni, bir atomdaki elektronların oluşturduğu negatif yük dağılımının merkezinin çekirdeğin yük merkezine göre dış elektrik alanın etkisiyle atomik ölçekte kaymasıdır. Elektronun kütlesi oldukça küçük olduğundan uygulanan dış elektrik alanla kısa bir süre içinde oluşur ( $10^{-15}$  sn) [21].

İyonik yapılmayan dielektriklerde yalnızca elektronik kutuplanma oluşur ve polar olmayan bu maddelerin optik kırılma indislerinin karesi dielektrik sabitine eşittir ( $n^2 = \epsilon$ ). Buna Maxwell ilişkisi denmektedir. Bunun fiziksel içeriği şöyle açıklanabilir: elektromanyetik dalganın elektrik vektörü madde içindeki yüklere, başlangıçtaki konumlarını değiştirecek kuvvet uygular ve sonuçta bir çift-kutup oluşturacaktır. Sıkı bağlı elektronlar oluşan bu kutuplanmaya daha az katkıda bulunurlar. Elektromanyetik dalganın elektrik vektörü devamlı değiştiğinden elektronlar bu değişmeyi izleyebildiği sürece etkileşmeli çift-kutup momentleri oluşacaktır. Ağır iyonlar elektromanyetik alanı kızıl ötesi bölgeye kadar izleyebildiklerinden görünür bölgede kutuplanmaya çok az katkıda bulunurlar [20,21]. Hâlbuki elektronlar bu bölgede de yanıt verebilirler ve elektronik kutuplanmayı oluştururlar. Sürekli yön değiştiren bu çift-kutuplar uyarıldığı frekansın aynısıyla ışırlar. Bu yüklerin varlığı ve elektromanyetik alan ile etkileşimi herhangi bir enerji kaybına neden olmaz, yalnızca geçişini geciktirir. Bu materyal, elektromanyetik dalganın hızını azaltarak, kendi içindeki dalganın hızının boşluktakine oranı biçiminde bilinen kırılma indisine sahip olur. Optiksel kırılma indisinin elektronik kutuplanmadan türediği görülür. Daha büyük kutuplanma daha fazla geciktirici davranışa neden olacağından bu da kırılma indisinin büyümesi demektir. Bu, manyetik olmayan materyaller için elektromanyetik teoremin bir sonucudur. Kutuplanmayan yükler içeren bir ortamda ise dielektrik sabitinin ( $\epsilon'$ ) değeri “1” olacak ve gecikme olmayacağından  $n = 1$  olur.

### İyonik kutuplanma

Elektronik ve iyonik kutuplanmanın ortak yönü, her ikisinde de yüklerin alan yönünde birbirlerine göre konum değiştirmesidir ve dolayısıyla bu iki kutuplanmaya etkileşmeli kutuplanma denmektedir [20,21,32]. İyonik kutuplanmada farklı tip atomlar molekülleri oluşturduğundan, bu atom elektronları simetrik olarak paylaşmayacaktır. Yani, elektron bulutu yük merkezi kayarak daha kuvvetli bağlayıcı atomlara doğru yönelecektir. Böylece atomlar zıt kutuplu yükler kazanırlar ve bu net yüklere etkileyen bir dış elektrik alan, atomların kendi aralarında denge konumlarını değiştirecektir. Yüklü atomların veya atom gruplarının birbirlerine göre bu yer değiştirmesi ile ikinci bir tip etkileşmeli çift-kutup moment meydana gelecektir. Bu, dielektriğin iyonik kutuplanmasıdır. Elektronik kutuplanmaya göre uzun olmakla birlikte iyonik kutuplanma içinde oldukça kısa bir süre yeterlidir ( $10^{-13}$ - $10^{-12}$  sn) [32]. Bu kutuplanmanın varlığında Maxwell ilişkisi geçerli değildir. Bağlı dielektrik katsayısı her zaman optik kırılma indisinin karesinden büyük olacaktır.

### Yönelme kutuplanması

Yönelme kutuplanması, dış elektrik alan olmadan da elektrik çift-kutup momentleri içeren, polar maddeler diye adlandırılan dielektriklerde oluşur. Bazı dielektriklerde kuadropol (dört kutuplu), oktipol (sekiz kutuplu) vb. çok kutuplular da bulunabilir. Fakat bunların kutuplanmaya katkısı oldukça azdır. Böyle elektrik momentlerine (çift-kutuplara) dış elektrik alan bir tork uygulayarak kendisiyle aynı yönetime zorlayacaktır ve sonuçta yönelme kutuplanması ortaya çıkacaktır [20]. Yönelim kutuplanmasında sıcaklık etkileri de göz önüne alınmalıdır. Yönelim kutuplanmasında çift-kutup momentli moleküllerin alan uygulanmadan önceki durumuna yeniden geçmesi için moleküllerin büyüklükleri ve ortamın viskozları ile doğru orantılı olan bir zamana ihtiyaç vardır [21,31,32]. Bu üç kutuplanmada dielektrik içinde yerel olarak bağlı yüklerle oluşmaktadır. İyonik ve elektronik kutuplanmanın ortak yönü; her ikisinde de yüklerin dönmeyip birbirlerinden uzaklaşmalarıdır. Yönelme kutuplanmasında kalıcı çift-kutuplar dış elektrik alan etkisiyle dönmeye zorlanırlar ve alanın hızlı değişimlerinde etkili değildirler. Düşük

frekanslarda her üç kutuplanma da oluşur. Frekans arttıkça önce kalıcı, sonra iyonik ve en sonunda da elektronik çift-kutuplar ki, son ikisi etkileşmeli çift-kutuplar olup, dış alanın değişmesini izleyemez duruma gelirler ve  $\epsilon_r$  “1” değerine ulaşır [42].

#### Arayüzey-uzay yük kutuplanması

Elektronik, iyonik ve çift-kutup yönelme kutuplanmalarının ortak yönü, materyalin sınır yüklerinin yer değiştirmesi ve yönelme etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Uzay yükü veya arayüzey kutuplanması diğerlerinden farklı olarak hareketli yüklerden oluşur. Diğerlerinde atom ve moleküller; kendilerini, çevrelerinin kutuplanması ile değişikliğe uğrayan, temelde ise uygulanan dış alanı da içeren bir yerel alan etkisi altında bulurlar. Arayüzey kutuplanmasında ise materyalin hacmindeki uzay yüklerinin veya dielektriğin arayüzeylerindeki yüzey yüklerinin birikmesine sebep olan büyük ölçüde elektrik alan değişiklikleri etkili olmaktadır [32].

Polikristal materyallerde birleşme yüzeylerinde serbest yükler birikebilir, bu da kristalin arayüzey kutuplanmasını doğurur. Bu birikmiş yükler, elektrotlardaki görüntü yükleri etkiler ve diğer kutuplanmalara olumlu etkide bulunurlar. Arayüzey kutuplanması üzerine temel düşünce; kristaller arası ayırıcı arayüzeylerle bağlantılıdır. Bu arayüzeyler, serbest yüklerin bir kristalden diğerine hareketini engelleyici rol oynarlar [20-23]. Yani kristalleri birbirinden izole ederler. Bu engeller, herhangi bir hava katmanından veya yüzey katmanının bir yalıtkan ile kaplanmasından kaynaklanabilir. Bu konuda çalışanlardan bir kısmı arayüzey kutuplanmasının nedeninin, tek bir kristaldeki kusurlar(boşluklar, safsızlıklar, çatlaklar) üzerinde boşluk yüklerinin birikimi olduğunu söylemişlerdir [42,44]. Bu kutuplanma, materyalin içinde herhangi bir şekilde yerleşmiş uzay yüklerinin elektrotlar üzerindeki görüntü yükleri etkilemesinin bir sonucudur. Bu kutuplanma mekanizması, düşük ve orta düzey frekanslardaki dielektrik yapıların tasarımında büyük rol oynamaktadır [44].

### 2.2.6. Dielektriklerde elektrik alan ve dielektrik kayıp

Net ve kalıcı dipol momente sahip bir numune elektrik alan içerisinde konulduğunda bu numune için elektrik yerdeğiştirme (D) ve elektrik alan (E) zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Elektrik yerdeğiştirme vektörünün (D) zamana bağlılığı (dipol-durulma olayı), daimi dipollere sahip numunelerde görülür. Bu durum, hiç dipolü olmayan numunelerden farklıdır. Bir kristale  $t=0$  anında statik bir elektrik alan (E) belli bir süre uygulanmış olsun. Kristaldeki dipollerin hareketi iki şekilde olur: Bu hareket, dipollerin ya uygulanan elektrik alan yönünde hemen düzenlenmesi ya da son konfigürasyonlarını yavaş bir şekilde bulmalarındır. İlk durum statik durum olarak bilinir. Diğeri ise elektrik alan ile kutuplanma vektörünün aynı fazda olmamalarından kaynaklanır [20].

Elektrostatikte elektrik yer değiştirmenin ifadesi,

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

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

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

elde edilir. a, b, c'nin eklenen terimlerdeki düzeltme sabitleri olduğunu düşünelim. Zamana göre ikinci, üçüncü vs. türev terimleri eklenebilir. Ancak orta şiddetli elektrik alanlar için yüksek dereceli türevlerin ihmal edildiğini düşünelim. Aşağıda verilen koşullar ele alınarak dielektrik davranış incelenecek olursa, a, b ve c sabitlerinin numuneye özgü oldukları ortaya çıkar [21,45].

*a*: Numunenin, sabit bir elektrik alan etkisinde bırakıldığını düşünelim. Bu statik bir durumdur ve bu koşulda elektrik alan ve dolayısıyla elektrik yerdeğiştirme niceliğinin zamanla değişimi görülmez (  $\frac{dE}{dt} = 0$  ,  $\frac{dD}{dt} = 0$  ). Bu durumda Eř. 2.59 bağıntısı,

$$D = \epsilon_s E \quad (2.60)$$

olur. Buradaki  $\epsilon_s$ , statik dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_s$ ) sabitidir. Yani Eř. 2.59 bağıntısı yeniden yazılırsa,

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

şeklinde ifade edilebilir.

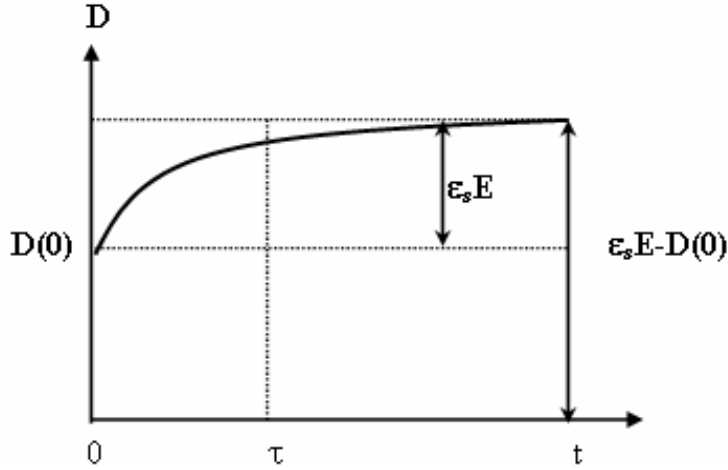
*b*: Numunenin ani olarak bir elektrik alan etkisinde bırakıldığını durumu ele alalım. Elektrik alan, uygulandığı süre boyunca sabit değerde kalsın. Bu durumda numunenin elektrik yerdeğiştirmesi ( $D$ ), ani olarak karakteristik bir değere ulaştıktan sonra dipoller belli bir düzene gelene kadar zamana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

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

olarak ifade edilir [21]. Bu denklemin çözümü, “ $\ln (D - \epsilon_s E) = -t/a + \text{sabit}$ ” ile verilir.  $t=0$ ’da  $D=D(0)$  olsun. Buna göre,

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

olur. Yukarıdaki denklem göz önüne alınarak  $D$ 'nin zamanla değişimi şekil 2.17.'de verilmiştir. Elektrik yer değiştirme'nin ilk değerinin  $D(0)$ , son değerinin de  $\epsilon_s E$  ile geldiği (maksimum değer olduğu) görülmektedir [21].



Şekil 2.17.  $D$ 'nin zamanla değişim grafiği (  $E$ =sabit )

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

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

olur.

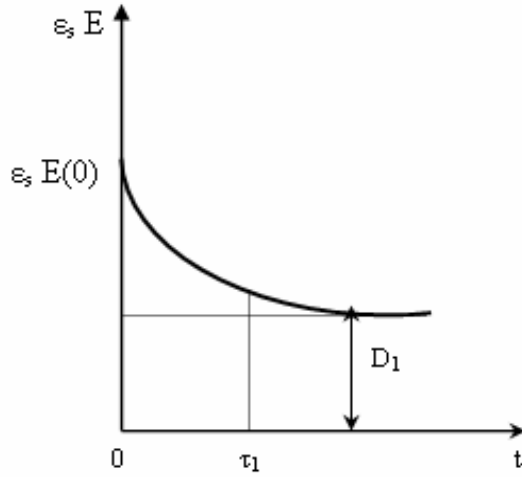
$c$ : Numune bu defa,  $t=0$  anında  $E(0)$  değerine sahip bir elektrik alan etkisinde kalmış olsun. Bu etki altında, numune içinde meydana gelen elektrik yerdeğiştirme değerinin  $D_1$  olduğunu düşünelim.  $D$ 'nin  $D_1$  değerinde sabit kalması için elektrik alan zamana göre değişir ve Eş. 2.64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

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

olur. Yukarıdaki denklemin integrali alındığında,

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

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



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

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

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

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

Dielektrik numuneye  $\Delta t$  süresince  $\Delta E$  artırımları ile elektrik alan uygulanırsa D'de  $\Delta D$  kadar bir artış meydana gelir. Eş. 2.67 denkleminde, bu değişimin etkisi diferansiyel formda  $\Delta t$  üzerinden terim integral alınarak anlaşılabilir [20,21].

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

$\Delta t$  zaman aralığı küçüldüğünde, denklemin her iki tarafındaki ilk terimler sıfıra yaklaşır.  $\Delta E$  dolayısıyla  $\Delta D$ , zamandaki bu daralmayı, herhangi bir değişim ile karşılamaz. Sözelimi bu zaman aralıklarında, elektrik alan  $\Delta E$  artırımları ile uygulandığında sözü edilen terimler sabit bir değerde kalır [20]. Buna göre,

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

Olur [20]. Bu ifadeler ışığında  $\varepsilon_\infty$  gibi bir terim kullanılabilir,

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

Buradaki  $\varepsilon_\infty$ , numunedeki sürekli dipoller hareket etmeden önce,  $\Delta D$  ve  $\Delta E$ 'deki ani bir değişime karşılık gelen geçirgenlik (permittivite) değerini ifade eder. Buna göre, Eş. 2.69;

$$\tau \varepsilon_\infty = \varepsilon_s \tau_1 \quad (2.71)$$

olur. Eş. 2.67 denkleminin, son hali,

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

olarak elde edilir.

Dipol yöneliminin en ilginç yanı Eş. 2.72 denkleminde görülebilir. Buna göre dielektrik numunedeki bir dipol yönelimi, frekansı  $\omega$  olan periyodik bir elektrik alan uygulandığında meydana gelir [21]. Periyodik alan,



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

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

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

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

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

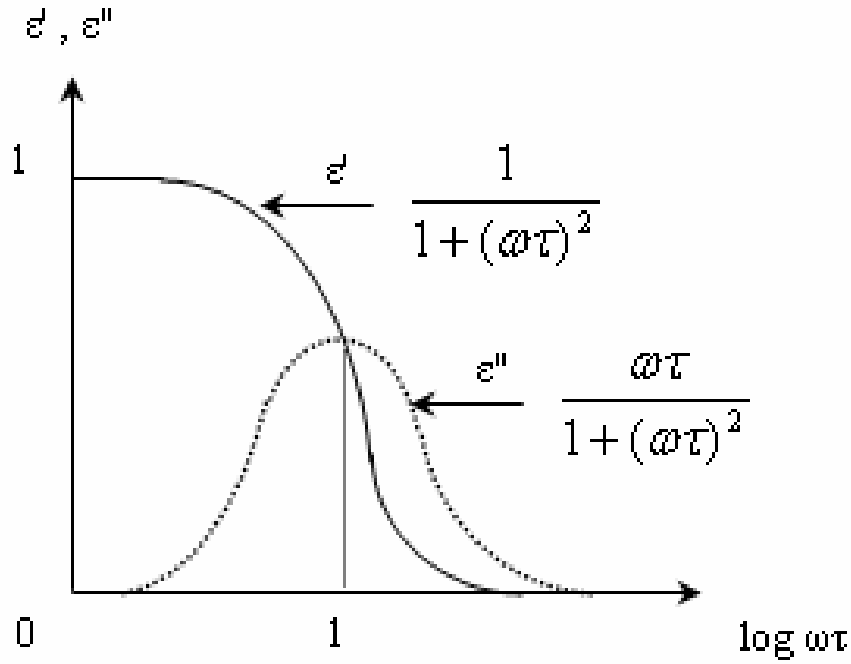
$$\epsilon^* = \left[ \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] + j \left[ \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \right] \quad (2.76)$$

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

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.77)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (2.78)$$

elde edilir [21,45].



Şekil 2.19. Dielektrik sabitinin gerçel ( $\epsilon'$ ) ve sanal ( $\epsilon''$ ) bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi

$\tau$  , numuneye özgü bir nicelikdir ve sıcaklığın bir fonksiyonudur.  $\omega$  ise sıcaklıktan bağımsızdır [45].

Eş. 2.76'in sağ tarafı frekans sıfırla sonsuz arasında değiştiğinde sıfıra yaklaşır. Bu terim şekil 2.19.'da dolu çizgi ile verilmiş olan  $\log \omega\tau$  'nın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Çok düşük frekanslarda ( $\omega \ll 1/\tau$ ), dielektrik sabitin gerçel bileşeni, statik dielektrik sabitine yaklaşır. Yüksek frekanslarda ( $\omega \gg 1/\tau$ ) ise, gerçel bileşen  $\epsilon_\infty$  değerine yaklaşır [45]. Yüksek ve alçak frekans arasında kalan bölgede ise düzgün geçişler ( iki faz bölgesi arasında ) olur. Dielektrik sabitin sanal bileşeni ile ilgili eğri yine şekil 2.19.'da (kesik çizgili olan) verilmektedir. Eğride bu terimin  $\omega=1/\tau$  olduğu noktada belirli bir maksimum verdiği görülmektedir. Elektrik yer değiştirme (D) ifadesindeki, elektrik alan ile farklı fazda olan terim, dielektrikteki enerji kaybını gösterir. Birim hacimdeki güç kaybı P,

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

ifadesi ile verilir: Burada J, E ile aynı fazda olan akım yoğunluğu bileşenidir. Toplam akım yoğunluğu [21,45].

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

Buna göre güç kaybı,

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

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

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

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

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

ifade elde edilir [45].

### 2.2.7. Dielektrik sabiti ölçme yöntemi

Dielektriklerin, dışardan uygulanan elektrik alana duyarlı olması onların elektriksel özelliklerini araştırmada önemli bir faktör olarak görülür. Bu nedenle bir dielektrik

madde, bir elektriksel devre ile ödeştirilir. Dielektrik madde ile doldurulmuş bir paralel plakalı kondansatör yapısı, admittans ile karakterize edilebilir. Admittans  $Y$  ile gösterilir. Buna göre,

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

ile ifade edilir [21,32,45].  $G$  iletkenlik,  $\omega$  sürücü geriliminin açısal frekansı,  $C$  ise toplam sığadır. Bu ifade,

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

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

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

olarak ifade edilmektedir [45,46]. Admittansın son hali,

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

olur [43,46].

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

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

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

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

olarak elde edilir [21,45,47].

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

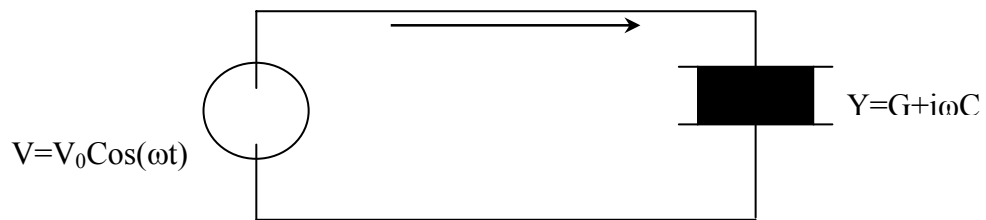
$$I = (\varepsilon^* C) \frac{dV}{dt} \quad (2.90)$$

olarak ifade edilir. Numuneden geçen akım,

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

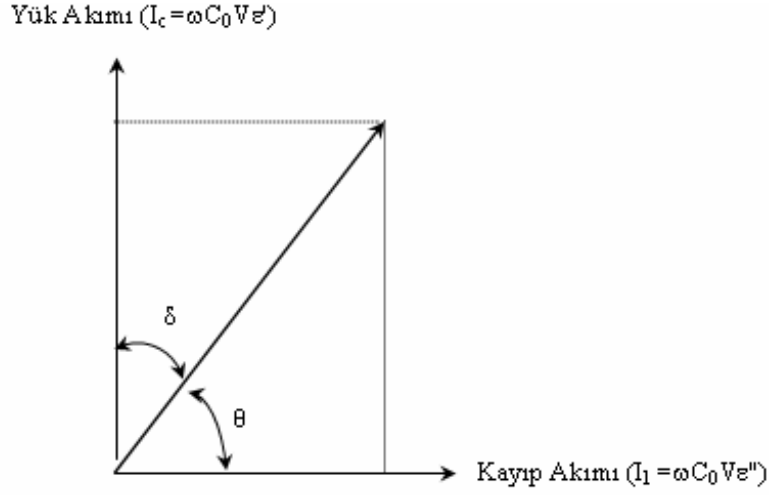
olarak ifade edilir

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



Şekil 2.20. Dielektrikli bir kondansatördeki a.c. akım.

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



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

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

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

kayıp açısı faktörünü ifade eder [2,46].

### 2.2.8. Dielektrik kayıplar

Bir dielektrik ihtiva eden kondansatörün plakaları arasına yüksek bir gerilim uygulanırsa (yalıtkanlığını koruyabildiği maksimum gerilimin altında) dielektrik ısınır. Yalıtkanı teşkil eden atomların dış tabakalarındaki elektronların ait oldukları atomları terk etmeleri sonucu meydana gelen bu iletkenlik, yabancı madde karışması ve özellikle nem ile artar. Eğer alternatif bir gerilim uygulanırsa, önemli bir ısınma olur ve açığa çıkan ısı frekansı ile artar. Buna sebep dış alanın değişen yönüne göre yönelecek olan moleküllerin birbirlerine sürtünmeleridir. Bu sürtünmelere karşı yaptıkları iş ısıya dönüşür [21]. Komşu moleküllerle olan sürtünmeler nedeniyle molekülün alanının değişimini takip edişi gecikmeli olur. Bu olaylarla dielektrikte ısıya dönüşen enerji “dielektrik kayıp” olarak tanımlanır. Sıcaklık artıkça dielektrik kayıplarda artar [5,20,21].

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1. Diyot Yapımında Kullanılan Silisyum Kristalin Bazı Temel Özellikleri

Silisyum doğada bol miktarda, silikat ve silisyum dioksit (kum) bileşikleri halinde bulunur. Saf bir silisyum kristalinin oda sıcaklığında (300 °K) bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Silisyum dioksitin elektrik arkında redüklenmesi ile elde edilen silisyum saf olmaması nedeniyle, silanli ( $\text{SiH}_4$ ) bir bileşiğe dönüştürülür. Sıvı olan bu bileşik, kademeli distilasyon yöntemi ile ayrılır ve silisyumu içeren kısım kendi başına veya hidrojen atmosferinde ısıtılarak saf silisyuma ulaşılır. Bu yöntemlerle kimyasal saflığa getirilen silisyum yarıiletkeni henüz elektronik eleman yapımı için yeterli saflıkta değildir.

Bu nedenle fiziksel saflaştırma yöntemi kullanılır. Bölgesel eritme adı verilen yöntemde, bazı safsızlık maddelerinin sıvı haldeki yarıiletkende çok daha çabuk çözünmesi gerçeğinden yararlanılarak, yarıiletken istenmeyen safsızlık maddelerinden arındırılır [48]. Bu yöntemle saflaştırılan yarıiletken henüz polikristal özelliğindedir. Bundan sonra yarıiletkenin tek kristal halinde büyütülmesi ve içine arzu edilen özdirenci sağlayacak safsızlık (katkı) maddelerinin katkılanması gerekir. Katkılanan safsızlığın cinsi yarıiletkenin tipini belirler ve miktarı (n) ise iletkenlik veya özdirencini ( $\rho = 1/\sigma = 1/\mu en$ ) tayin eder.



Çizelge 3.1. Silisyum yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki (300 °K) bazı özellikleri[32]

|                                                                   |                                                 |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Özellikleri<br>Atom/cm <sup>3</sup>                               | 5,0 x 10 <sup>22</sup>                          |
| Atom ağırlığı                                                     | 28,09                                           |
| Kırılma alanı (V/cm)                                              | 3x10 <sup>5</sup>                               |
| Kristal yapısı                                                    | Elmas                                           |
| Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )                                    | 2,328                                           |
| Dielektrik sabiti                                                 | 11,9                                            |
| İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu Nc (cm <sup>-3</sup> ) | 2,8 x 10 <sup>19</sup>                          |
| Valans bandındaki durumların yoğunluğu Nv (cm <sup>-3</sup> )     | 1,04 x 10 <sup>19</sup>                         |
| Saf taşıyıcı yoğunluğu ni (cm <sup>-3</sup> )                     | 1,45 x 10 <sup>10</sup>                         |
| Saf öz direnci (Ω.cm)                                             | 2,3x10 <sup>5</sup>                             |
| Örgü sabiti(Å)                                                    | 5,43095                                         |
| Elektronların etkin kütlesi, m*/m <sub>0</sub>                    | m <sub>l</sub> * =0,98, m <sub>t</sub> * =0,19  |
| Deşiklerin etkin kütlesi, m*/m <sub>0</sub>                       | m <sub>lh</sub> *=0,16, m <sub>hh</sub> * =0,49 |
| Elektron yakınlığı, χ (eV)                                        | 4,05                                            |
| Yasak enerji aralığı (eV)                                         | 1,12                                            |
| Hareketliliği (cm <sup>2</sup> /V.s)                              | 1500 (elektron için)<br>450 (deşik için)        |
| Erime sıcaklığı (°C)                                              | 1415                                            |
| Azınlık taşıyıcı yaşam süresi (s)                                 | 2,5x10 <sup>-3</sup>                            |
| Termal iletkenlik (W/cm-°C)                                       | 1,5                                             |

## 3.2. MIS Yapıların Hazırlanması

### 3.2.1. Kristal temizleme ve yalıtkan tabakanın oluşturulması

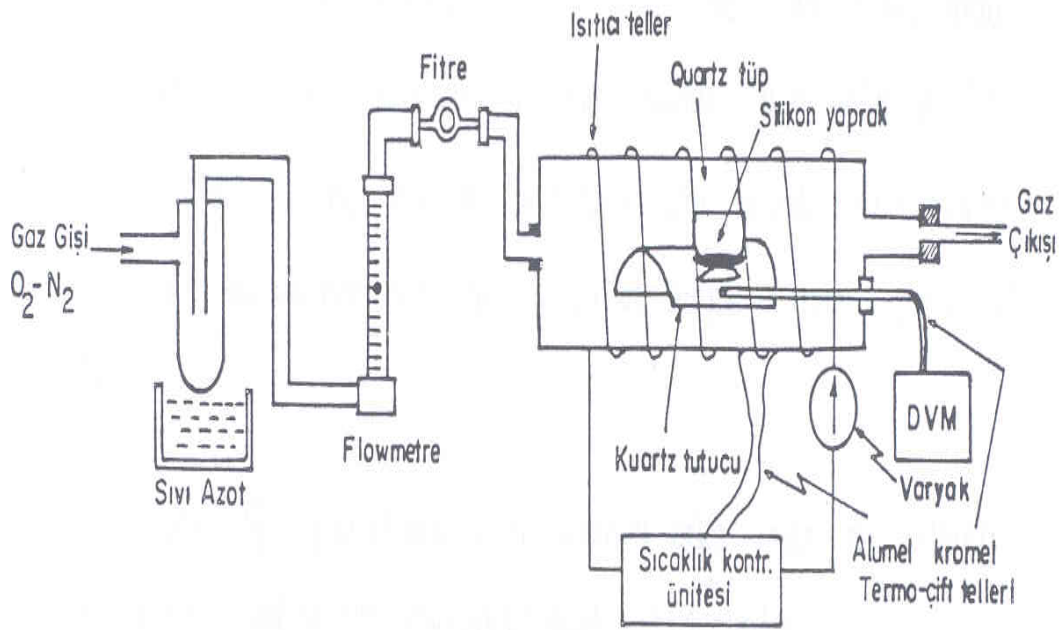
İdeale yakın bir metal-yarıiletken (MS) yada metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve Metal-okisit-yarıiletken (MOS) yapılar yada diğer adıyla Schottky diyotları yapabilmek için kullanılacak yarıiletken kristalin yüzeyi çok temiz olmalıdır. Çünkü iyi temizlenmiş bir yarıiletken birçok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırır. Bu çalışmada kullanılan kristal fabrikasyon olarak parlatılmış olduğundan mekanik temizleme yapılmadı. Ancak kristal üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini gidermek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için bir dizi kimyasal temizleme işlemi ultrasonik banyoda yapıldı. Bu çalışmada, MIS ve MOS yapıları oluşturmak için, <100> yüzey yönelimli, 1  $\Omega$ .cm öz dirençli, 350  $\mu$ m kalınlıklı, 2" (5,08 cm) çapında bor katkılı (p-tipi) Si tek kristal yapraklar kullanıldı. P-tipi Si yapraklar bir elmas kesici yardımıyla dört eşit parçaya (çeyrek yaprak) bölündü. Bu çeyrek Si yapraklardan iki tanesi üzerine farklı yalıtkan arayüzey tabakasına sahip ( $\text{SiO}_2$ ) MIS ve MOS yapılar oluşturuldu. Metal ile yarıiletken arasına doğal yada yapay olarak büyütülen bir yalıtkan tabaka, MIS ve MOS yapının hem elektriksel hem de dielektrik özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu nedenle Si yaprakların üzerine homojen bir oksit tabakanın büyütülmesi en önemli fabrikasyon adımlarından biridir. Bundan dolayı üzerine oksit büyütülecek yüzey ve onun üzerine oluşturulacak yalıtkan tabaka mümkün olduğu kadar temiz ve homojen olmalıdır. Kimyasal temizleme için çeşitli metotlar kullanılabilir. Bu çalışmada silisyum tabakanın

temizlenmesinde kullanılan kimyasal temizleme işlemi aşağıda verilmiştir. Temizleme işleminde, yüksek dirençli (18 MΩ) olan deiyonize su kullanıldı. Tüm kimyasal temizleme işlemleri, ses dalgaları ile titreştirilen ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan beherler, cımbız v.b araç ve kaplar önce yüksek saflıktaki aseton ile deiyonize su karışımında ultrasonik banyoda temizlenip deiyonize suda iyice durulandıktan sonra bir etüv fırınında yaklaşık 80 °C de ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra yarıiletken kristallerin temizlenmesi için aşağıdaki adımlar sırasıyla uygulandı:

1. Yarıiletken kristaller önce deiyonize su içerisinde ultrasonik banyoda yaklaşık 10 dakika kadar yıkandı.
2. Kristaller, 20 ml trikloretilen ( $C_2HCl_3$ ), 20 ml aseton ve 20 ml metil alkol ( $CH_3OH$ ) karışımı içerisinde üç dakika ultrasonik olarak temizlendi.
3. Kristaller deiyonize suda 5 dakika yıkandı.
4. 30 ml sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) ve 30 ml hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
5. Deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
6. 30 ml %38 saflıktaki hidroflorik asit (HF) ve 30 ml deiyonize su karışımı içerisinde 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
7. 30 ml nitrik asit ( $HNO_3$ ), 10 ml hidroflorik asit (HF) ve 50 ml hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) (3:1:5) karışımında 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
8. Tekrar deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
9. 40 ml %38 saflıkta hidroflorik asit (HF) ve 50 ml deiyonize su karışımında 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
10. Son olarak Si yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika durulandı.
11. Kimyasal olarak temizlenen bu p-tipi silisyum kristallerin yüzeyinin oksitlenmemesi için, kuru azot ( $N_2$ ) ile kurulandı.
12. Kimyasal olarak temizlenen ve kurulan Si yapraklar, Şekil 3.1 de gösterilen

oksidasyon fırınına alındı. Ortamdan 1,5 lt/dak. hızında kuru oksijen gazı ( $O_2$ )

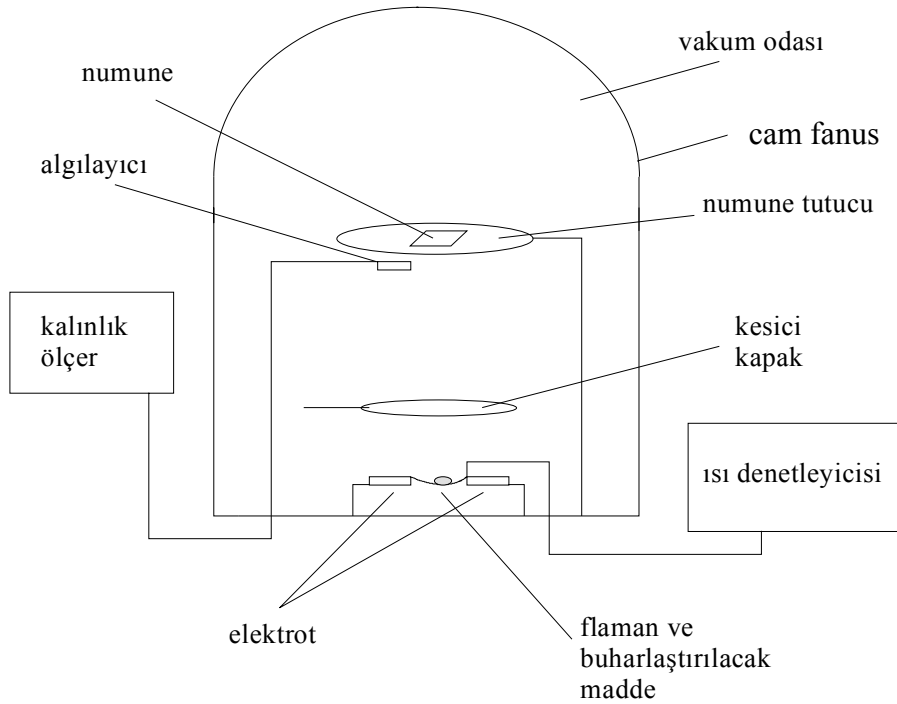
- geçirilerek Si yapraklar üzerinde termal olarak oksit ( $\text{SiO}_2$ ) tabakası oluşturuldu
13. A numunesi  $750^\circ\text{C}$  de 1,5 saat süreyle ısıtılıp  $\sim 50 \text{ \AA}$  kalınlığında , B numuneside  $900^\circ\text{C}$  de 4 saat ısıtılarak  $\sim 826 \text{ \AA}$  kalınlığına sahip numuneler üretildi.
14. Si yaprakların arka yüzeyindeki oksit tabakası ,numune HF içerisinde yüzdürülerek ortadan kaldırıldı.



Şekil 3.1. Oksit büyütmeye kullanılan fırın sistemi

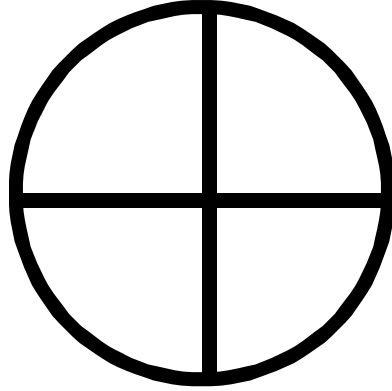
### 3.2.2. Omik kontağın oluşturulması

MIS ve MOS yapıların omik ve doğrultucu kontakları Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi(ANAEM) Katıhal laboratuvarında hazırlandı. Laboratuvar(ANAEM) içinde diyot yapımının gerçekleştirildiği kısım Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan vakum düzeneği

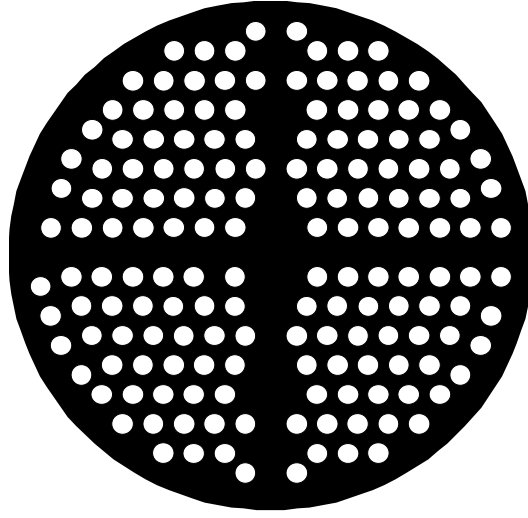
Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletkenin (Si) arka yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Fanus hemen kapatılarak vakumlama işlemine geçildi ( $10^{-6}$  Torr). Omik kontaklar için Şekil 3.3’de gösterilen 50 mm çaplı ve  $\approx 300$   $\mu\text{m}$  kalınlıklı bakır maske kullanıldı. Vakum  $\approx 10^{-6}$  Torr’a ulaştığında, flamanların biri üzerinden akım geçirilerek ( $\approx 35\text{A}$ ) %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş alüminyum metal parçacıklarının buharlaşması sağlandı. Buharlaşmanın başlamasından bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yan tarafa çekilerek, silisyumun mat yüzeyine alüminyum (Al) kaplandı. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının nedeni, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine yapışmasını önlemektir. Mat yüzeye saf alüminyum (Al) kaplama işleminden sonra aynı vakum ortamında  $650^{\circ}\text{C}$ ’de saf alüminyum (Al) silisyum içerisine çöktürüldü.



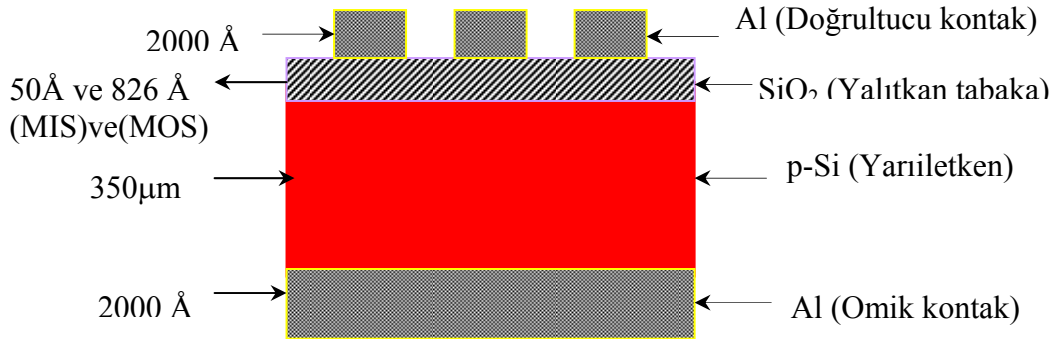
Şekil 3.3. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske

### 3.2.3. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Üzeri  $\text{SiO}_2$  kaplanmış numune, yüzey üzerine çok sayıda 1,2 mm çaplı delikler açılmış olan bakır maske (Şekil 3.4) üzerine, parlak yüzey aşağı gelecek şekilde yerleştirildi. Flamanların biri üzerine konulan, kimyasal olarak temizlenmiş %99,999'luk saflığa sahip alüminyum(Al) metal parçası  $\approx 2 \cdot 10^{-6}$  Torr vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (1mm çaplı) şeklinde ve  $\approx 2000 \text{ Å}$  kalınlığında alüminyum kaplanması sağlandı. Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla  $\text{Al/SiO}_2/\text{p-Si}$  şeklinde MIS ve MOS yapılar elde edildi. Soğuması için bir süre bekletilen kristal vakum ortamından çıkartılarak her bir dairecik (diyot) ortada kalacak şekilde, elmas kesici yardımıyla eşit dört parçaya bölündü. MIS yapının hazırlanış şeması Şekil 3.5' de verilmiştir.



Şekil 3.4. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske

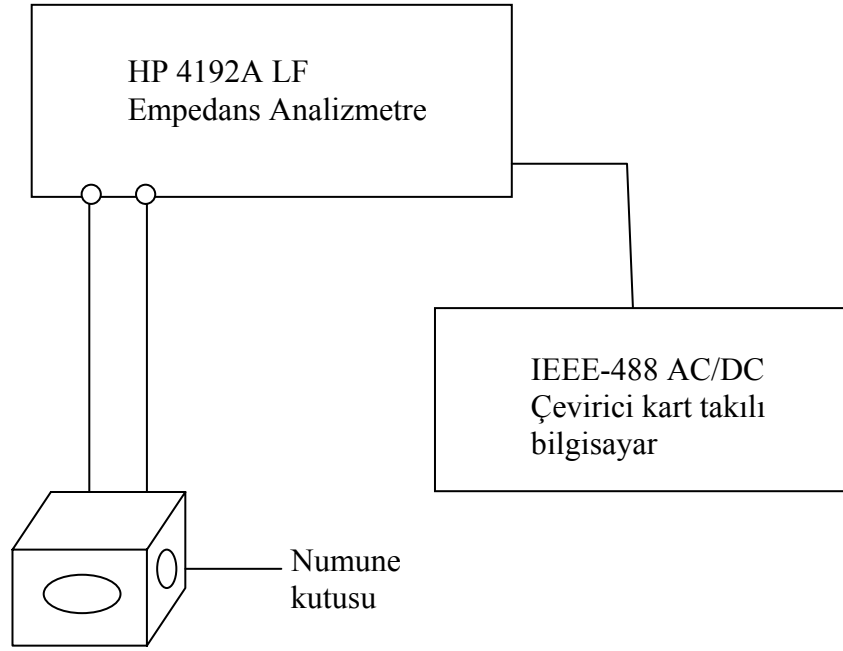


Şekil 3.5. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) ve (MOS) yapının şematik gösterimi

### 3.3. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Elektriksel karakterlerin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Katıhal Laboratuvarında yapıldı. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümlerinde Hewlett Packard 4192A LF Empedans Analizmetre (5Hz–13MHz) kullanıldı. Tüm bu ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE–488 AC/DC çevirici kart

yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.6’de gösterilmiştir.



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



#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Hazırlanan metal-yalıtkan-yarıiletken Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapıların bazı temel fiziksel özelliklerini geniş bir frekans ve voltaj aralığında araştırmak için; kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri sırasıyla 1kHz–10MHz frekans ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) ve (MOS) yapıların C-V ve G/ω-V ölçümleri hem negatif hem de pozitif gerilimde geniş bir aralıkta (-5V ile +5V) ölçüldü. Böylece, C-V ve G/ω-V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar (Tersinim, tükenim ve yığılım) elde edildi. Arayüzey yalıtkan/oksit (SiO<sub>2</sub>) tabaka kalınlık değerleri, kuvvetli birikim bölgesindeki yüksek frekans (1MHz) ölçümlerinin oksit kapasitansından (C<sub>ox</sub>) elde edildi. Deneysel C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçları kullanılarak MIS ve MOS yapının bazı temel elektriksel özelliklerden arayüzey durumları (N<sub>ss</sub>), durulma zamanı (τ) ve yakalama tesir kesiti (σ<sub>p</sub>) gibi temel parametreler hesaplandı. MOS yapının ise dielektrik özelliklerden; dielektrik sabiti (ε'), dielektrik kayıp (ε'') ve kayıp açısı (tanδ) ile M' ve M'' elektrik modülleri (gerçel ve sanal kısmı) ile ac elektrik iletkenliği (σ<sub>ac</sub>) potansiyele ve frekansa bağlı hesaplandı. C-V ve G/ω-V ölçümleri Hewlett Packard 4192A Düşük Frekans (LF) Empedans Analizmetre (5 Hz-13 MHz) ve bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla bilgisayarda kumanda edilerek gerçekleştirildi.

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

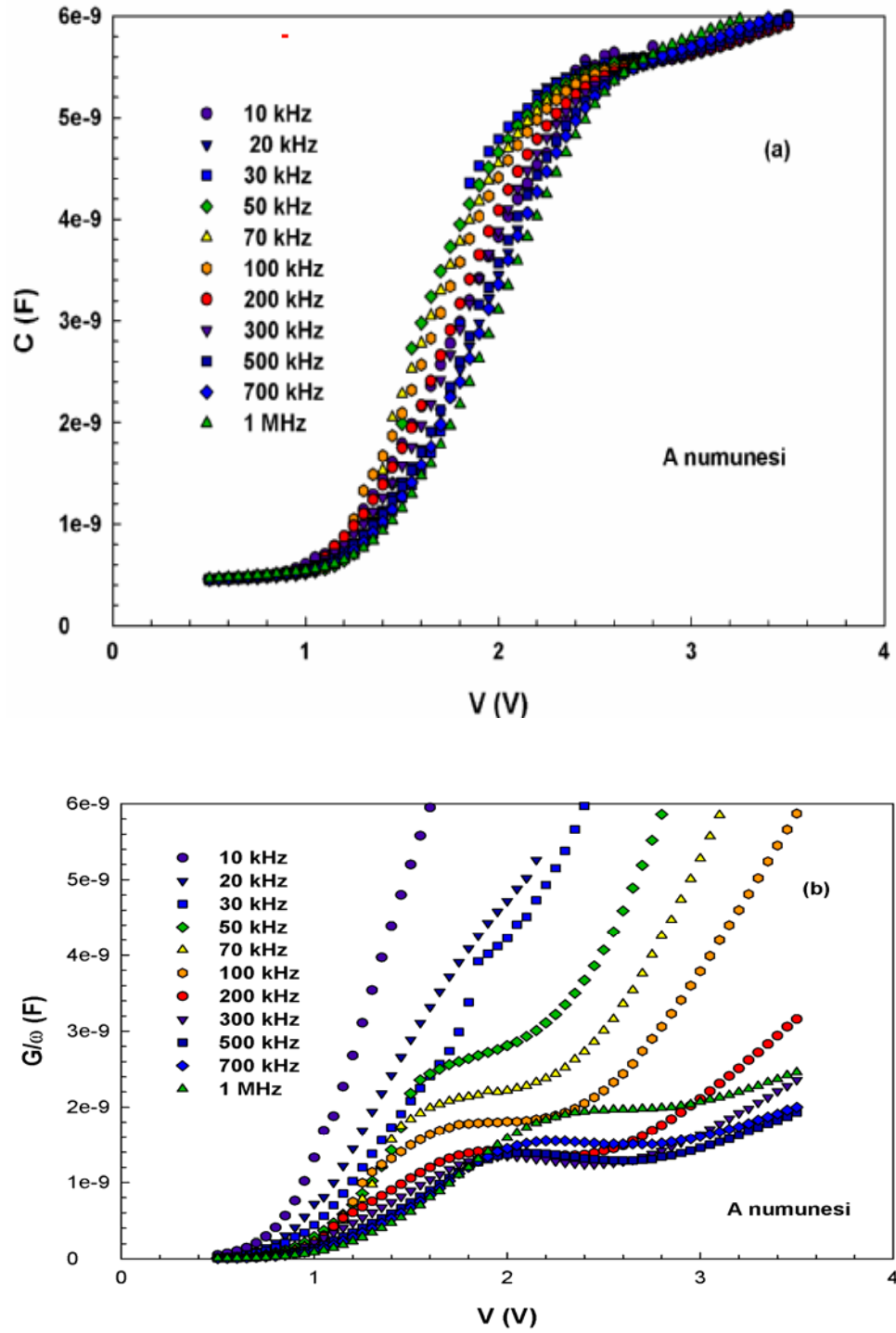
##### 4.1.1. Elektriksel karakteristikler

MIS ve MOS yapıların frekansa bağlı C-V ve G/ω-V ölçümleri, yarıiletkenin enerji band aralığında arayüzey durumları yoğunluğu (N<sub>ss</sub>), durulma zamanı (τ) ve yakalama tesir kesiti (σ<sub>p</sub>) hakkında doğru ayrıntılı bilgiler verir. N<sub>ss</sub> in enerjiye bağlı durum dağılımını elde etmek için birçok deneysel metot vardır [31,49-57]. Bunlar arasında kondüktans metodu, özellikle termal yolla oksitlenerek büyütülen N<sub>ss</sub>

yoğunluğunun düşük olduğu sistemlerde, doğru ve güvenilir neticeler verir [31,57]. Oksitlenmiş sistemlerdeki çoğu Si bandı üzerinde durumlar yoğunluğu oksit tabaka hazırlama metoduna bağlı olarak genellikle  $10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  den çok fazla veya  $10^{10} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  çok az değildir.

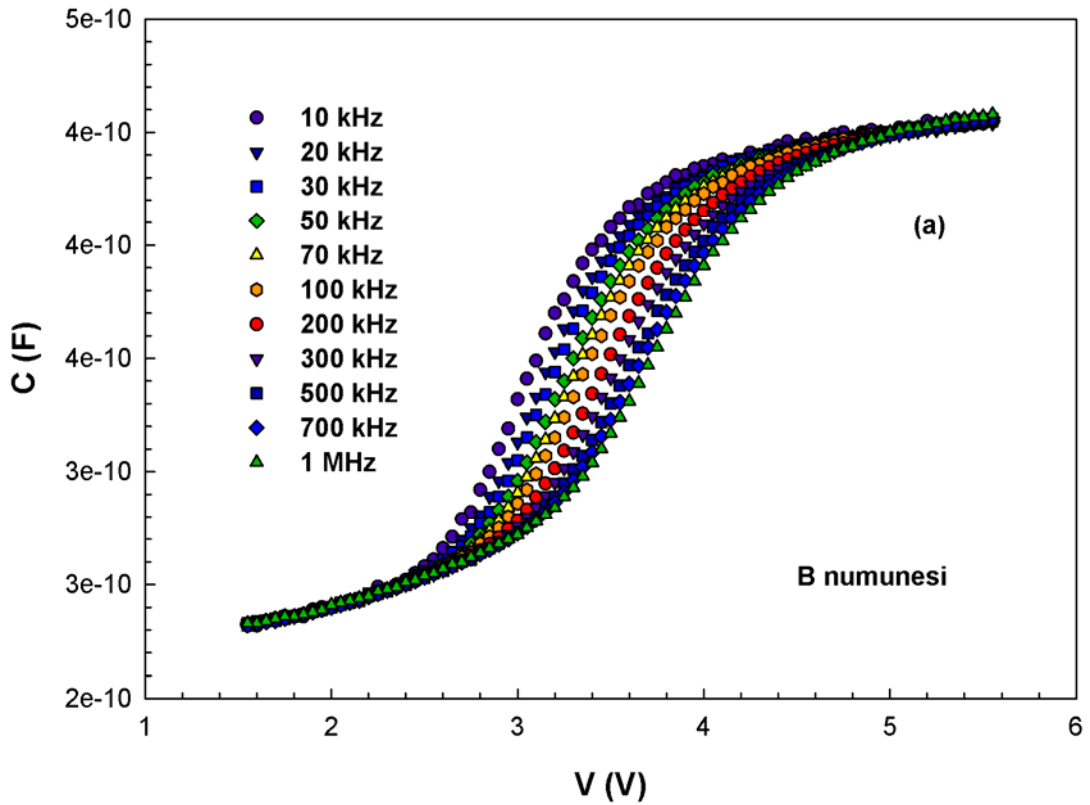
Özellikle tükenim bölgesinde MIS veya MOS yapının uçlarına ac sinyali uygulandığında bulk ve ara yüzey kusurlarını ortaya koyabilir [57-59]. Tükenim ve zayıf tersinim bölgesinde ara- yüzey durumları yoğunluğu, tam dc öngerilim için frekansın ( $f$ ) fonksiyonu olarak kapasitans ve condüktans değerlerinden ölçülen paralel condüktans ( $G/\omega$ ) hesaplamalarıyla ve uygun modelleme ile elde edilebilir. Ara yüzeydeki yüklerin ömrü (zaman sabiti yada  $\tau$  durulma zamanı) tayin edilebilir. Bunun için, oda sıcaklığında 10kHz-1MHz aralığında değerlendirilen A ve B numunelerinin C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri sırasıyla Şekil 4.1(a,b) ve Şekil 4.2(a,b) 'de verilmektedir.

Şekil 4.1(a) ve Şekil 4.2(a) dan da görüldüğü gibi C-V ölçümleri her bir frekans için tipik MIS veya MOS davranışına uyan birikim, tükenim ve tersinimin üç rejimine sahiptir. C-V ve  $G/\omega$ -V eğrilerinde çok geniş frekans dağılımı (özellikle birikim bölgesinde), yarıiletkenle termal dengede arayüzey durumlarının olmasını ve metalle irtibata geçemediğini gösterdiği açıktır. C-V grafiğinin ara bölgedeki bu davranışı yüzey yüklerinin rasgele katkılarından ortaya çıkar. Yüzey potansiyel dalgalanması tükenim bölgesindeki arayüzey durum sabitlerinde dağılıma (dispersiyona) sebep olur. C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri düşük frekanslarda yapıldığında, taşıyıcı ömrü ( $\tau$ ) periyottan  $T=(1/2\pi f)$  çok daha az olduğu ve böylece arayüzey durumlarının ac sinyalini kolayca takip edeceği [12-17,57] ve özellikle tükenim bölgesinde, frekans değerine bağlı olarak bir katkı kapasitansı sağladığı iyi bilinir.

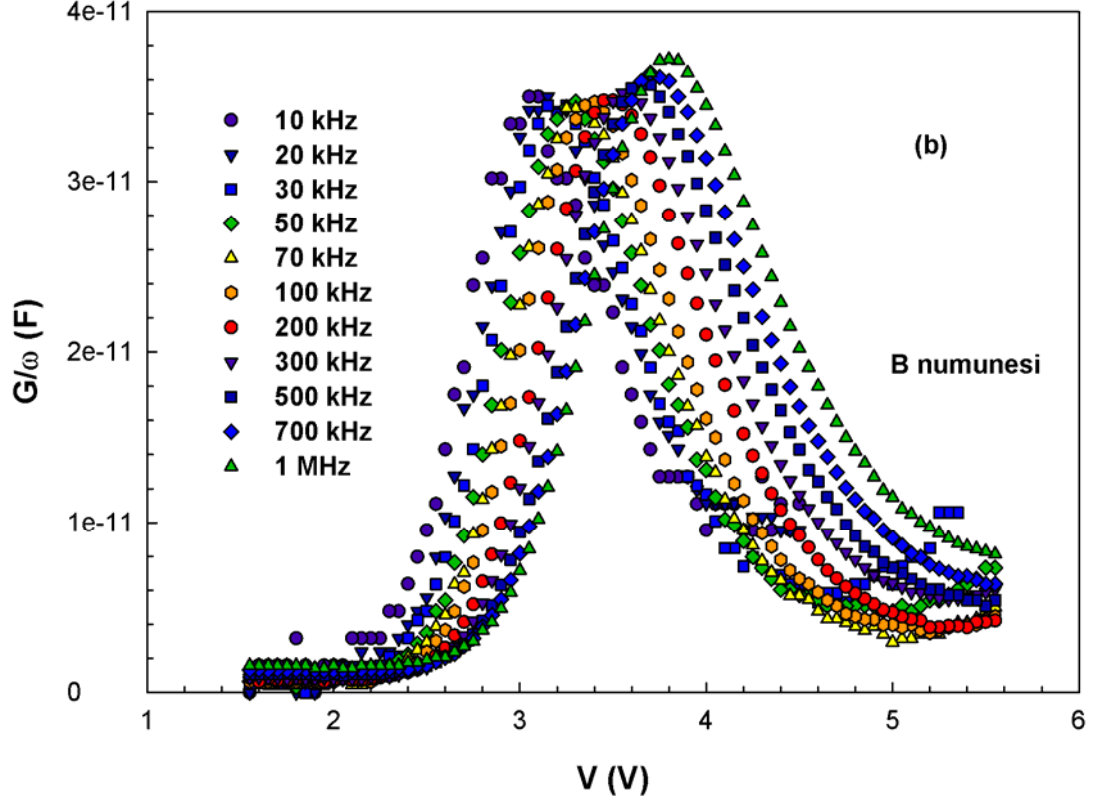


Şekil 4.1. İnce yalıtkan tabakalı Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapının (A numunesi) deneysel değerlerinin değişik frekans değerlerinde (a) C-V ve (b) G/ω-V eğrileri.

Şekil 4.2(b) den görüleceği gibi, değişik frekanslarda  $G/\omega$ -V grafikleri, arayüzey durumlarla ilgili band arasında yerleşik az sayıda çoğunluk taşıyıcılarından dolayı, tükenim bölgesinde bir pik verir. Tükenim bölgesinde  $N_{ss}$  katkısından kaynaklanan pik , küçük ön gerilim voltajından büyük ön gerilim voltajına doğru kayar. Düşük frekans değerlerinin tersine, kapasitörün düşük empedansından dolayı  $R_s$  değeri yüksek frekans değerlerinde önem kazanır. Fakat, Şekil 4.1(b)' de görüldüğü gibi,  $G/\omega$ -V grafiğinin değişik frekanslardaki değeri tükenim bölgesinde açık(net) bir pik göstermemektedir.



Şekil 4.2. Kalın yalıtkan tabakalı Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapının (B numunesi) deneysel değerlerinin değişik frekans değerlerinde (a) C-V ve (b)  $G/\omega$ -V eğrileri.



Şekil 4.2. (Devam) Kalın yalıtkan tabakalı Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapının (B numunesi) deneysel değerlerinin değişik frekans değerlerinde (a) C-V ve (b) G/ω-V eğrileri.

Yapıların eşdeğer devresine uygun olarak seri direnç etkisini yok etmek için Şekil 4.1(a,b) ve Şekil 4.2(a,b) de kullanılan bütün veriler düzeltildi [31]. A ve B numunelerinin gerçel  $R_s$  si kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasitans ( $C_{ma}$ ) ve kondüktans ( $G_{ma}$ ) dan elde edildi. A ve B numunelerinin düzeltilmiş kapasitans ( $C_c$ ) ve kondüktans ( $G_c/\omega$ ) değerleri aşağıdaki denklemlerden ve Şekil 4.3(a) ve (b) de sırasıyla verilen  $C_c$  ve  $G_c$  nin 1 MHz deki V ye bağlı grafiklerinden bulunabilir

$$C_c = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.1)$$

ve

$$G_c = \frac{G_m^2 + (\omega C_m)^2 a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.2)$$

Burada  $a = G_m - [G_m^2 + (\omega C_m)^2] R_s$  ve  $C_m$  ve  $G_m$  Al/SiO<sub>2</sub>/ p-Si yapının uçlarında ölçülen sırasıyla kapasitans ve kondüktans değerleridir. Şekil 4.3(a) ve (b) de görüldüğü gibi seri direnç, admittans temelli ölçüm metotlarında etkilidir ve bu sebepten yığılma ve tükenim bölgelerindeki C ve G/ω de çok büyük hatalar olur. Fakat tersinim bölgesinde C ve G/ω de önemli bir değişim yoktur. Diğer bir deyişle  $C_c (\omega R_s C_c)^2 \ll 1$  olduğundan tersinim bölgesinde C de ufak bir hata olur. Bunun için hesaplamalarda  $R_s$  dikkate alınmalıdır.

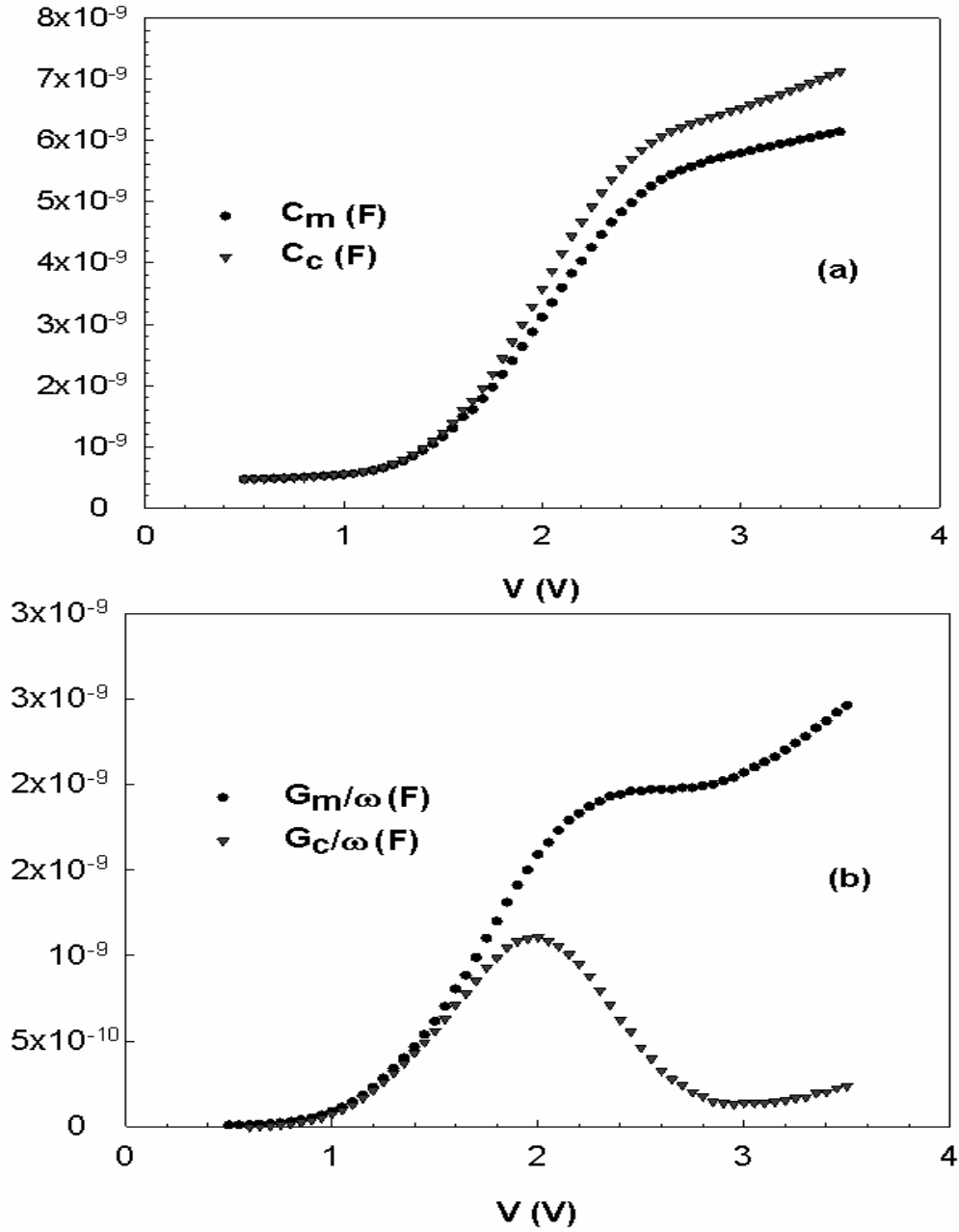
Arayüzey durum değerlerini ortaya çıkarmak için kondüktans metodunu kullandık [31,57]. Arayüzey durum admittansı  $Y_p (= 1/Z_p) = (G_p + j\omega C_p)$  ve özellikle  $G_p/\omega$ , deneysel olarak ölçülen  $Y_m (= G_m + j\omega C_m)$  admittanstan türetilir. Nikolian ve Goetzberger metoduna göre [31,57]. MIS veya MOS yapıların arayüzey kondüktansı şöyle tanımlanabilir:

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_{ox}^2 (G_m - \omega^2 C_m R_s - R_s G_m^2)}{(\omega^2 C_{ox} R_s C_m - G_m)^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m - C_{ox} R_s G_m)^2} \quad (4.3)$$

$$= \frac{qAN_{ss}}{2\omega\tau_p} \ln(1 + \omega^2 \tau_p^2)$$

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

$$C_{ox} = C_{ma} (1 + (G_{ma} / \omega C_{ma})^2) \quad (4.4)$$



Şekil 4.3. 1MHz de ince yalıtkan tabaka Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapının(A numunesi) düzeltilmiş a)  $C_c$ -V ve (b)  $G_c/\omega$ -V değerleri eğrileri.

Burada  $C_{ma}$  ve  $G_{ma}$  kuvvetli yığılım bölgesindeki ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerlerini temsil eder. Değişik enerji seviyelerindeki dolu ve boş  $N_{ss}$  lerin zaman sabiti  $\tau$  şöyle ifade edilebilir;

$$\tau = \frac{1}{\sigma v_{th} N_A} \exp(qV_d / kT) \quad (4.5)$$

Burada  $\sigma$ ,  $N_{ss}$  in yakalama tesir kesiti,  $v_{th}$  taşıyıcıların termal hızı,  $N_A$  katkı atomları konsantrasyonudur. Bir p-tipi yarıiletken, valans band tabanına ve yarıiletken yüzeyine göre  $N_{ss}$  enerji pozisyonu şöyle hesaplandı:

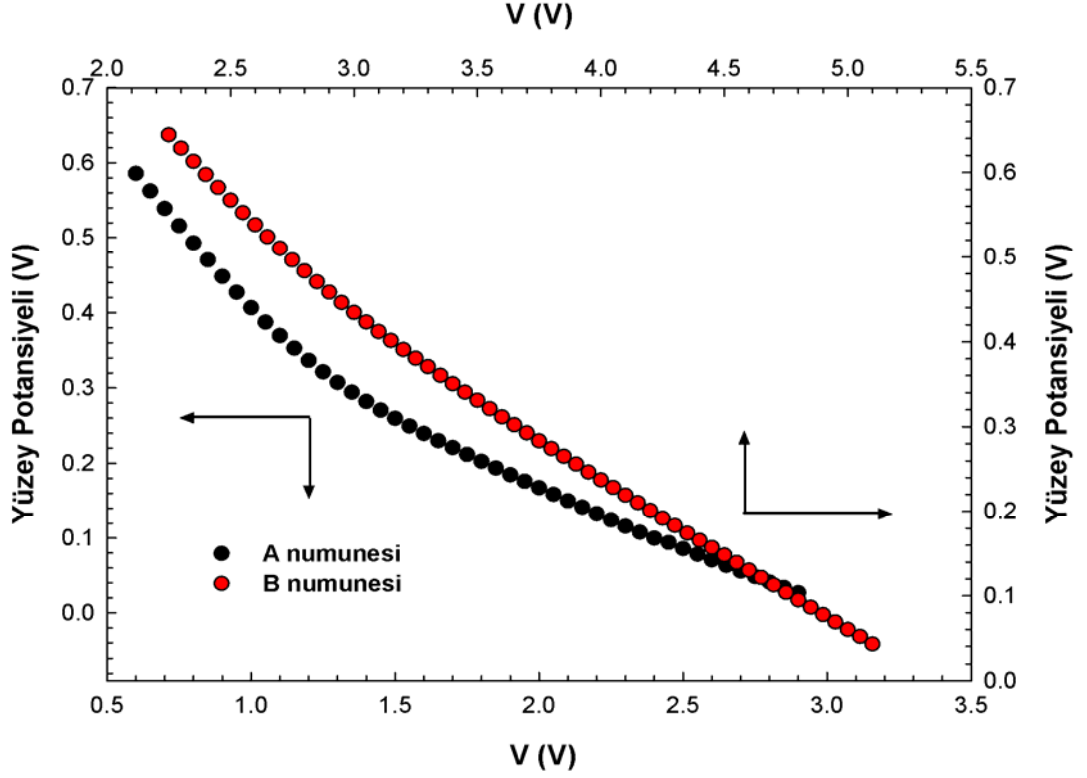
$$E_{ss}-E_v = q(\phi_s - E_F) \quad (4.6)$$

Burada  $E_F$  Fermi enerji seviyesi  $[E_F = \frac{kT}{q} \ln(N_v / N_A)]$  dir. Yüzey potansilyeli, düşük frekans kapasitans-voltaj eğrisinin sayısal integrasyonundan aşağıda verildiği gibi bulundu [13].

$$\phi_s = \int_{V_a}^{V_G} \left( 1 - \frac{C_{LF}}{C_{OX}} \right) dV_G + \phi^* \quad (4.7)$$

Burada  $V_a$  kapasitansın oksit kapasitansına  $C_{ox}$  eşit olduğunda kuvvetli yığılımındaki öngerilim voltajıdır ve integrasyon sabiti  $\phi^*$  tükenim bölgesinde  $C_{sc}^{-2}$ - $\phi_s$  eğrisini  $C_{sc}^{-2}=0$ ' a doğru ekstrepole edilerek hesaplandı [13,57]. Yüzey potansiyelinin uygulanan öngerilim voltajına bağlı grafiği A ve B numuneleri için Şekil 4.4' te gösterilmektedir.  $G_p/\omega$  nın dc gate (giriş) voltajına ve frekansına bağlı grafiği Şekil 4.5 ve 4.6 da sırasıyla gösterilmektedir.



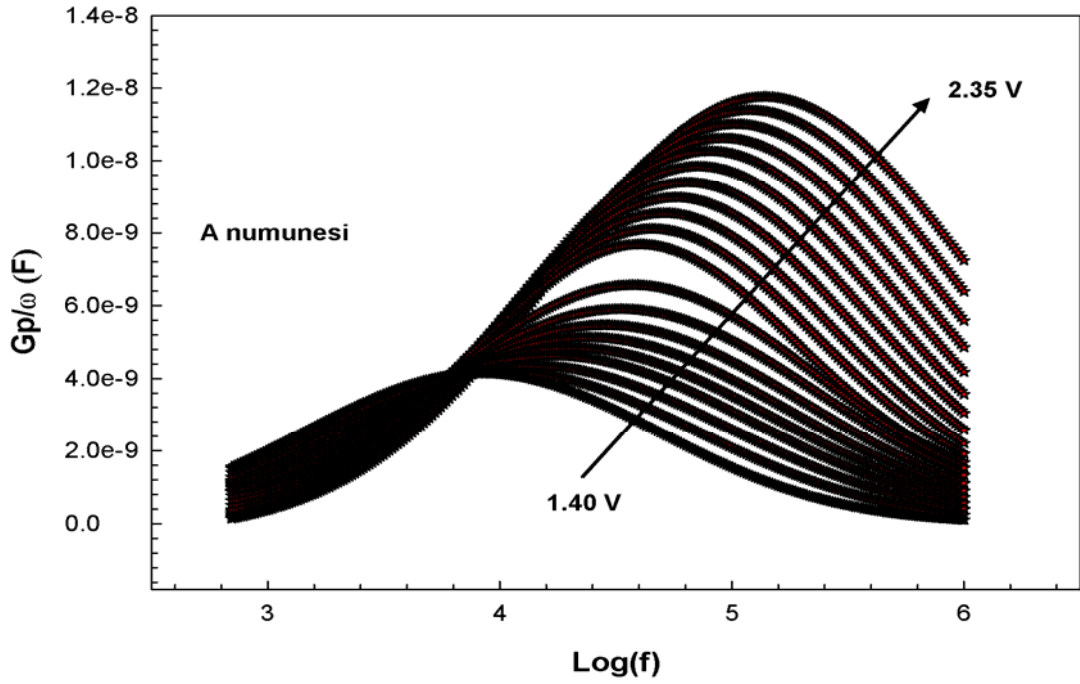


Şekil 4.4.Oda sıcaklığında Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapıların yüzey potansiyellerinin V ye karşı grafiği.

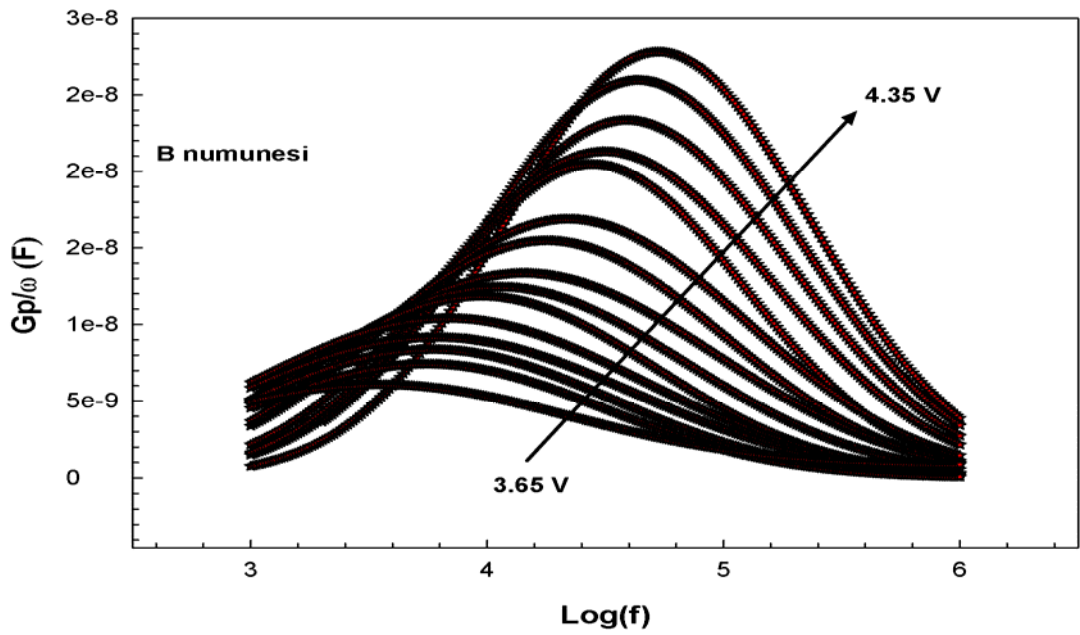
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 tüketim bölgesinde uygulanan değişik öngerilim voltajındaki denklem 4.3 'ten hesaplanan  $G_p/\omega$  nın  $\log(f)$  'ye karşı bir seriyi (grafiği) gösterir. Değişik öngerilim voltajları için çizilen  $G_p/\omega$  nın  $\log(f)$  ye bağlı grafikleri bir pik verir. Bu pikler uygulanan öngerilim voltajı arttıkça artar ve pik yerleri frekansı daha büyük noktalara doğru kayar.  $G_p/\omega$  nın  $\log(f)$  'ye karşı bu davranışı ara yüzey enerji seviyelerinin yaklaşık olarak sürekli bir dağılımının varlığı ile izah edilebilir. SiO<sub>2</sub>/Si arayüzey civarında yerleşik elektronik durumlar yalıtkan enerji aralığına bir başından öbür başına katkıda bulunmalı. Şekil 4.5 ve .Şekil 4.6 da pik değerler için  $d(G_p/\omega)/d(\omega\tau)=0$  olur. Bu durum bize 1,98 diye hesapladığımız maksimumlardaki  $\omega\tau$  yi verir. Bu değerleri önceki 4.3 denkleminde yerine koyarsak:

$$N_{ss} = (G_p/\omega)_{\max} / (0,402qA) \quad (4.8)$$

Elde edilir ve  $\tau = 1,98/\omega_p$  dir. Maksimum ordinat ve frekans değerleri  $N_{ss}$  ve  $\tau$  yi sağlar

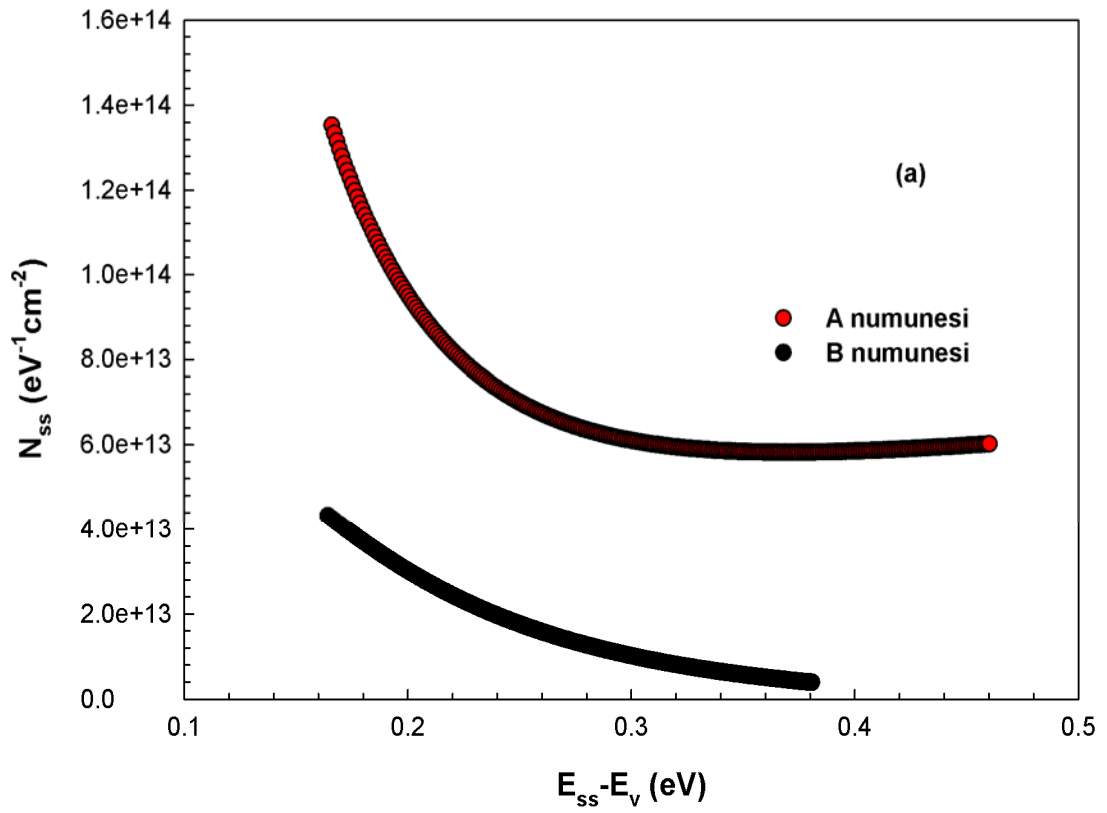


Şekil 4.5.A numunesinin oda sıcaklığındaki Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapısı için değişik giriş öngerilimlerde frekansa karşı eşdeğer paralel kondüktans  $G_p/\omega$  eğrisi.

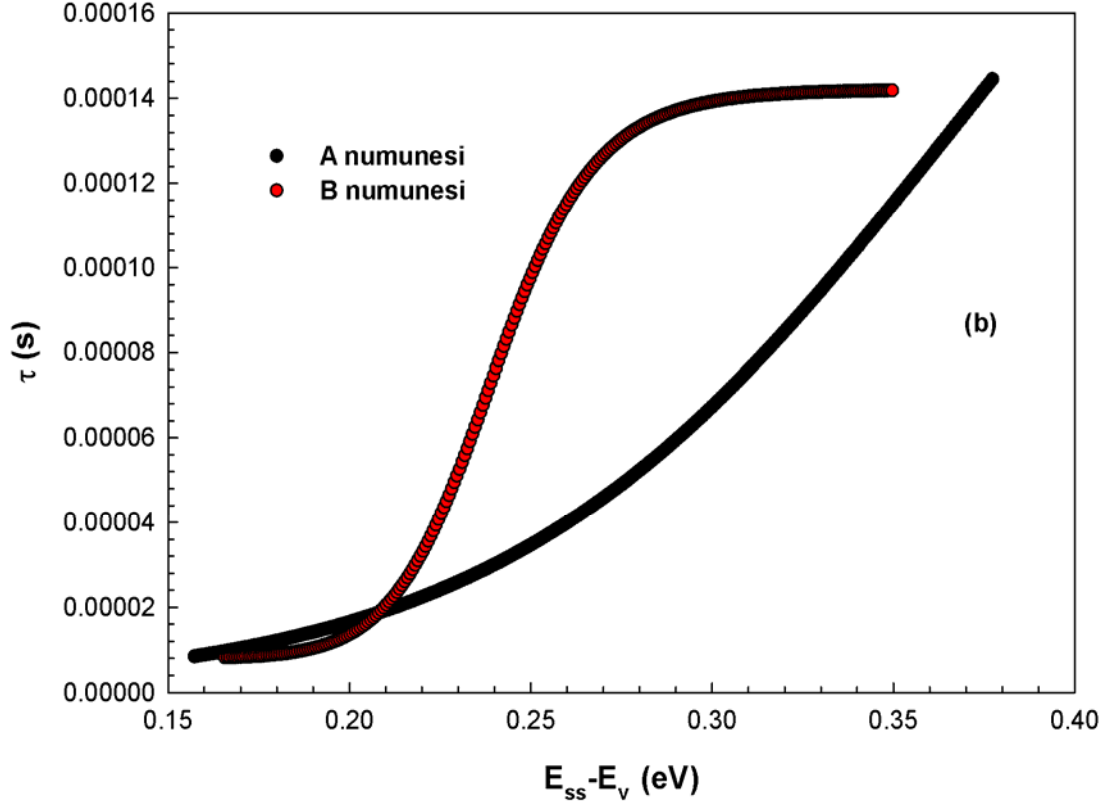


Şekil 4.6.B numunesinin oda sıcaklığındaki Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapısı için değişik giriş öngerilimlerde frekansa karşı eşdeğer paralel kondüktans  $G_p/\omega$  eğrisi.

Böylece denklem (4.6) kullanılarak,  $\tau$  ve  $N_{ss}$  in öngerilim bağımlılığı ( $E_{ss}-E_v$ ) enerjisinin bir fonksiyonuna dönüştürüldü.  $N_{ss}$  değerleri ve onun A ve B numuneleri içindeki durulma zamanları Şekil 4.7 (a) ve (b) de gösterildi. A ve B numunelerinin arayüzey durum yoğunluğu ve onların durulma zamanlarının enerji arttıkça arttığı gözlemlendi.



Şekil 4.7. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapılar için oda sıcaklığında kondüktans metodundan elde edilen (a) arayüzey durumlarının enerji dağılım profilleri ve (b) onların zaman sabitleri.



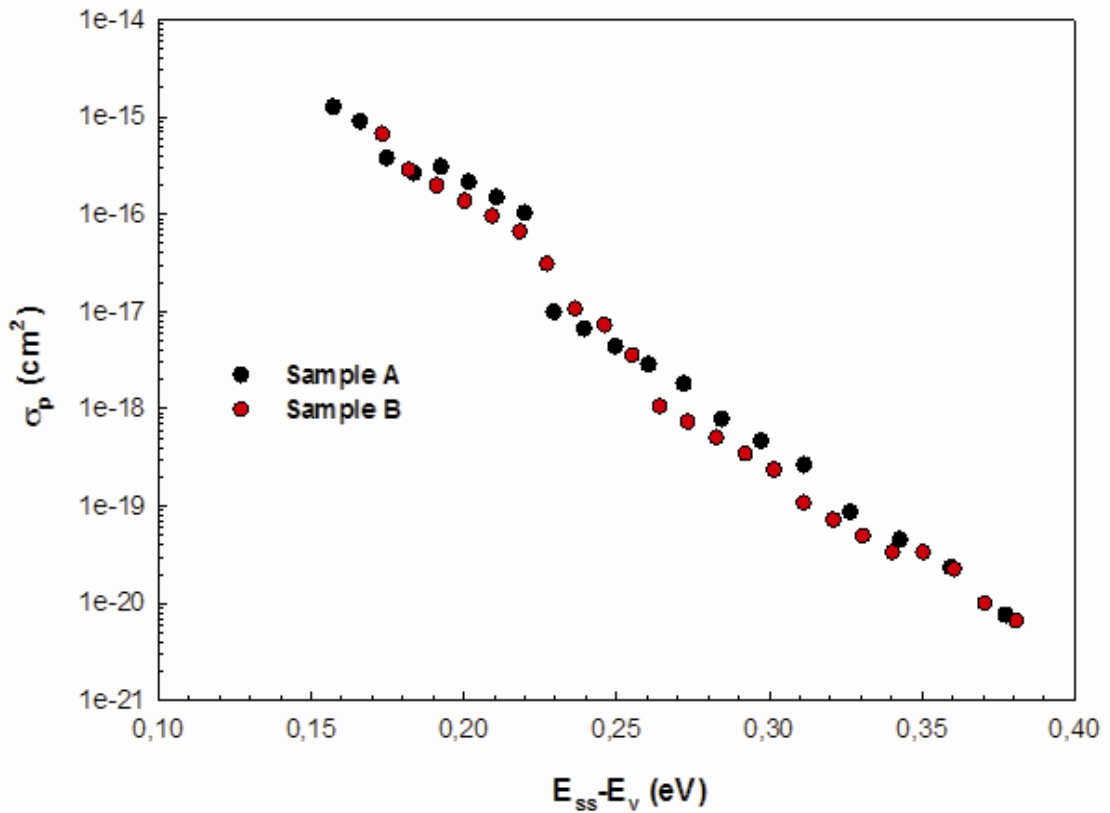
Şekil 4.7. (Devam) Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapılar için oda sıcaklığında kondüktans metodundan elde edilen (a) arayüzey durumlarının enerji dağılım profilleri ve (b) onların zaman sabitleri.

İlaveten hol'un yakalama tesir kesiti ( $\sigma_p$ ) şöyle ifade edilebilir:

$$\sigma_p = \frac{1}{(v_{th} \tau n_i)} \exp(-q\phi_p / kT) \quad (4.9)$$

Burada  $v_{th}$  taşıyıcıların termal hızı ( $=10^7$  cm/s oda sıcaklığında),  $n_i$  Si da öz taşıyıcı konsantrasyonu ( $1,55 \cdot 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>),  $\phi_p$  ise  $G_p/\omega$  da pik gösteren öngerilime uygun arayüzey potansiyeli ve T Kelvin cinsinden (300°K) sıcaklık.  $\sigma_p$  nin ara yüzey enerjisinin bir fonksiyonuna bağlılığı Şekil 4.8 de gösterilmektedir. Şekil 4.8 de görüldüğü gibi  $\sigma_p$  nin değerleri orta bölgeye kadar azalır ve A ve B numuneleri için

sırasıyla  $(0,397-E_v)$  de  $3,55.10^{-21} \text{cm}^2$  ve  $(0,157-E_v)$  de  $1,27.10^{-15} \text{cm}^2$ ,  $((0,381-E_v)$  de  $6,65.10^{-21} \text{cm}^2$   $(0,173-E_v)$  de  $6,69.10^{-15} \text{cm}^2$  bulundu. Benzer sonuçlar literatürlerde bahsedildi [14-17].



Şekil 4.8. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapısı için oda sıcaklığında koduktans metodundan elde edilen enerjinin fonksiyonu olarak değişim yakalama tesir kesiti.

#### 4.1.2. Dielektrik özellikler ve ac elektriksel iletkenlik ölçümleri

Dielektrik sabit ( $\epsilon'$ ), dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ), kayıp tanjant ( $\tan\delta$ ), elektrik modülün gerçel ( $M'$ ) ve sanal ( $M''$ ) kısımları ve ac elektriksel iletkenliklerinin ( $\sigma_{ac}$ ) frekans ve voltaja bağlılıkları Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapılar için oda sıcaklığında kapasitans-volaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ $\omega$ -V) ölçümlerinden çıkartıldı. Bu yapıların

elektrik özelliklerini tanımlamak için kompleks geçirgenlik şöyle tanımlanabilir [2,59-63]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (4.10)$$

Burada  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  kompleks dielektrik geçirgenlik sabitinin ( $\varepsilon^*$ ) gerçel ve sanal kısımları ve  $j$  -1'in sanal köküdür. Elektrik ve dielektrik özellikleri tanımlamak için kompleks geçirgenlik tanımı (biçimi) kullanıldı.  $\varepsilon^*$  dielektrik geçirgenlik sabiti formülü admittans ölçümlerinden, aşağıdaki formüllerden hesaplanabilir:

$$\varepsilon^* = \frac{Y^*}{j\omega C_o} = \frac{C}{C_o} - j \frac{G}{\omega C_o} \quad (4.11)$$

Burada  $Y^*$ ,  $C$  ve  $G$  sırasıyla yalıtkanın ölçülen admittans, kapasitans ve iletkenliği;  $\omega$  ise uygulanan elektrik alanının açısal frekansıdır ( $\omega=2\pi f$ ) [64]. Çeşitli frekanslardaki dielektrik sabitin ( $\varepsilon'$ ) ve dielektrik kayıp ( $\varepsilon''$ ) değerleri, deneysel  $C$  ve  $G$  değerleri kullanılarak sırasıyla aşağıdaki bağıntılardan hesaplandı [33,59-63].

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_o} = \frac{Cd_{ox}}{\varepsilon_o A} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{\omega C_o} = \frac{Gd_{ox}}{\varepsilon_o \omega A} \quad (4.13)$$

Burada  $C_o = \varepsilon_o A / d_{ox}$  metal ile yarıiletken arasında yalıtkan tabakanın olmadığı boş durum için kapasitörün kapasitansı,  $A$  ( $\text{cm}^2$ ), MOS yapının doğrultucu kontak alanı,  $d_{ox}$  (Å) yalıtkan arayüzey tabaka kalınlığı ve  $\varepsilon_o$  boşluğun dielektrik sabitidir. ( $\varepsilon_o = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ ). Kuvvetli yığılım bölgesinde, MOS yapının maksimum kapasitansı yalıtkan oksit tabaka kapasitansına karşılık gelir ( $C_i = C_{ac} = \varepsilon' \varepsilon_o A / d_{ox}$ ). Böylece denklem (4.12) ve (4.13) ten kayıp tanjant ( $\tan\delta$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [43,60-64].

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (4.14)$$

Dielektrik malzemenin ac elektriksel iletkenliği ( $\sigma_{ac}$ ) aşağıdaki denklem ile verilebilir [16],

$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta (d / A) = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0 \quad (4.15)$$

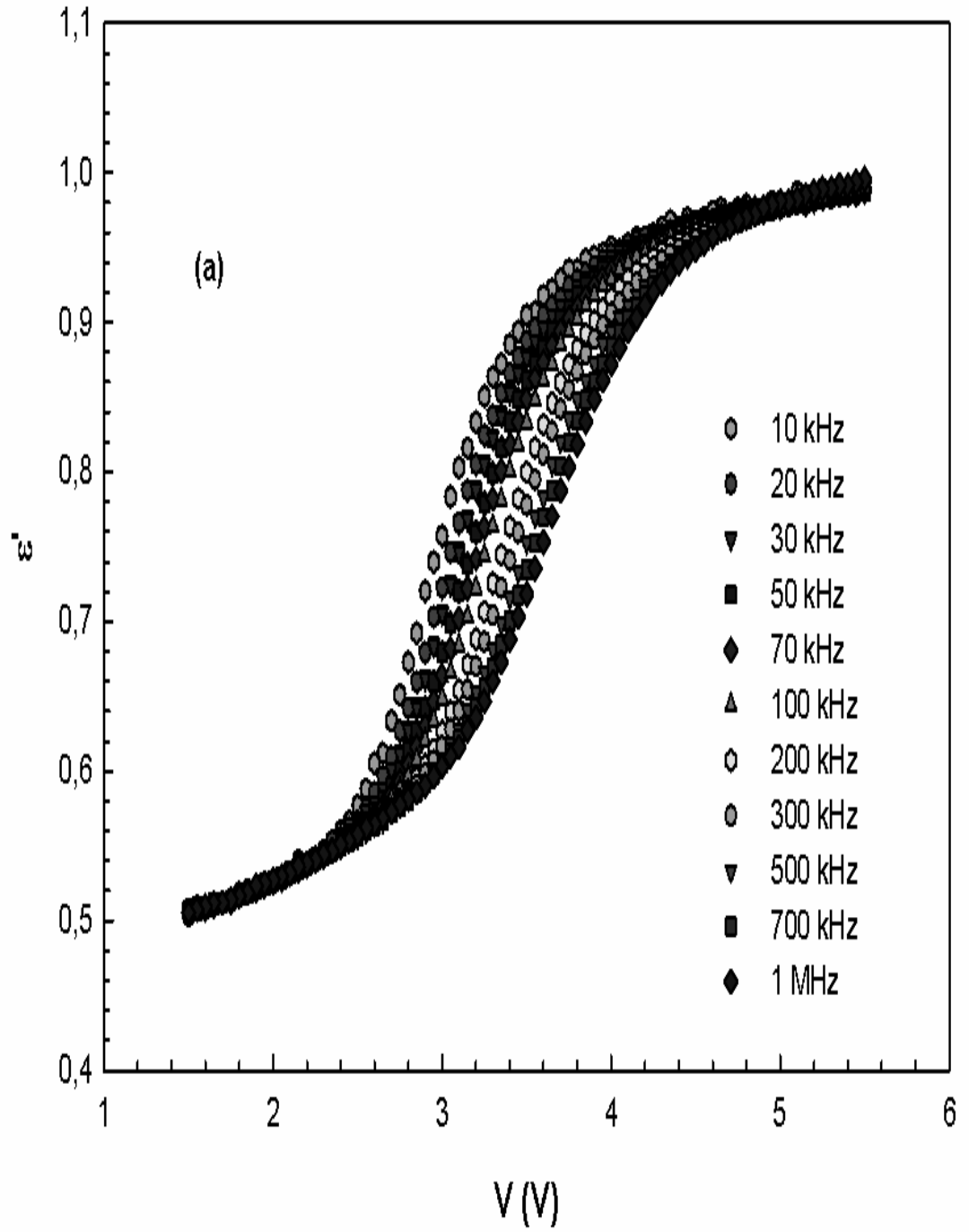
Kompleks empedans ( $Z^*$ ) ve kompleks elektrik modülü ( $M^*$ ), dielektrik malzemelerin analizine göre bazı yazarlarca tartışıldı [59,66,67]. Birçok yazar bu malzemelerin dielektrik özelliklerini elektrik modüllerinin formülizesini kullanarak tanımlamayı tercih etti [6,34,35]. Kompleks empedans veya kompleks geçirgenlik ( $\varepsilon^* = 1/M^*$ ) verisi aşağıdaki bağıntı kullanılarak  $M^*$  biçimine dönüştürülür [65,66].

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \quad (4.16)$$

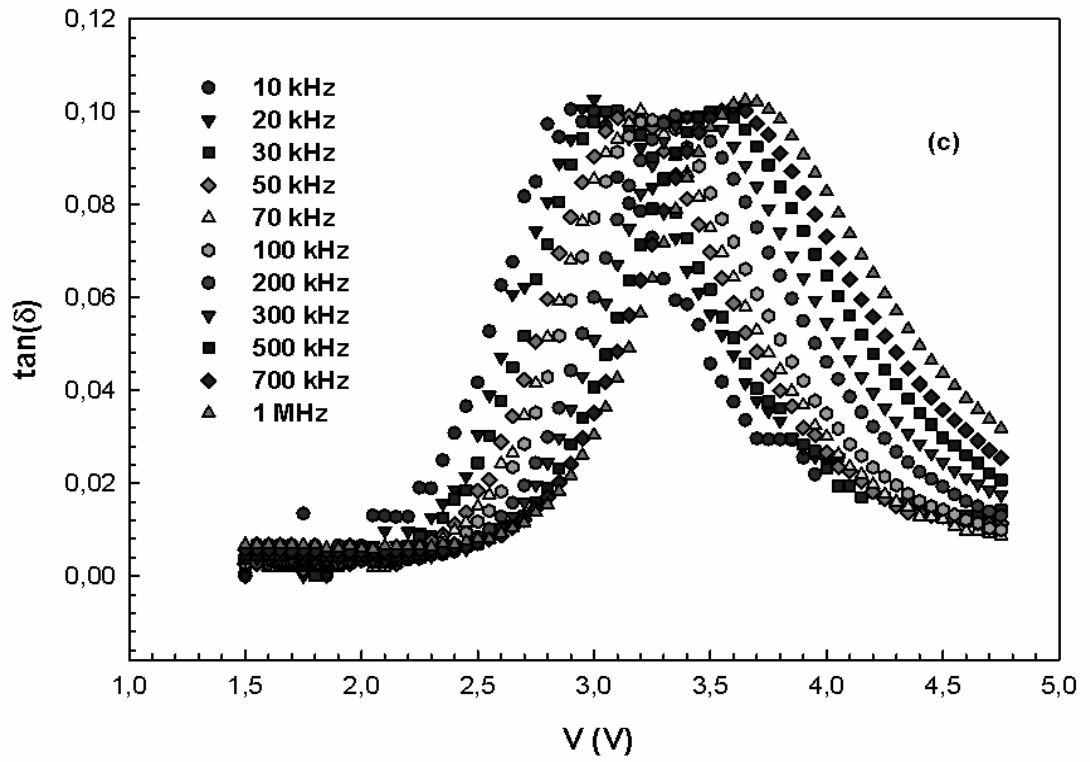
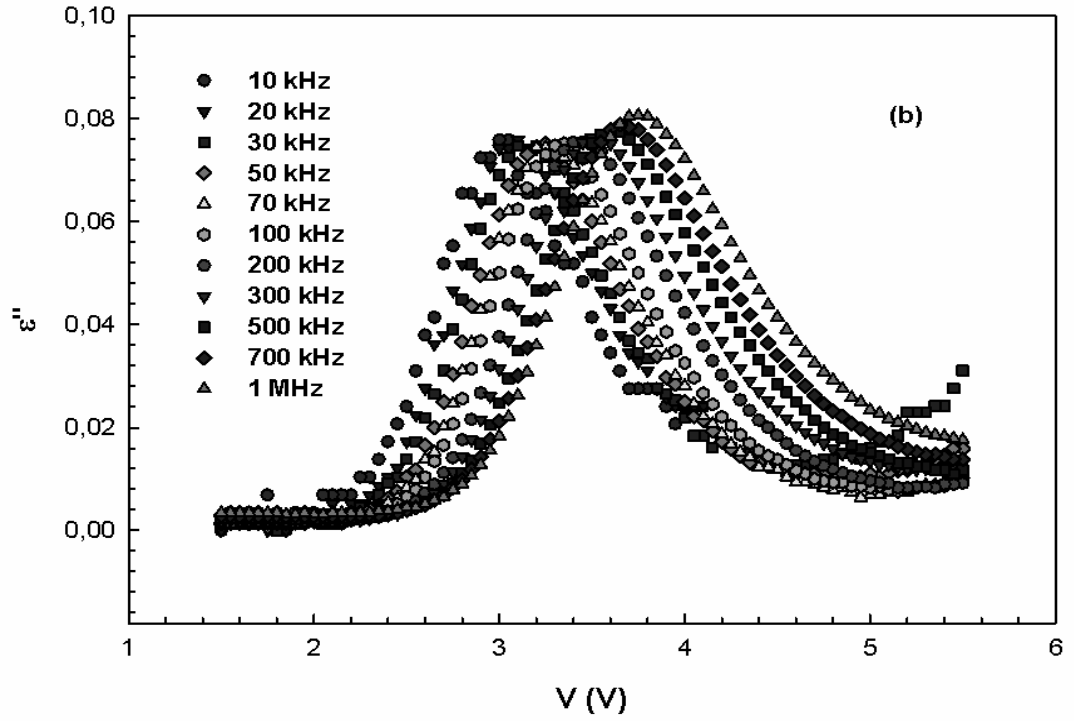
Şekil 4.9 (a),(b) ve (c) Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının değişik frekanslarda  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  ve  $\tan \delta$  grafiklerinin voltaja bağlılığını göstermektedir. Şekil 4.9(a) da görüldüğü gibi  $\varepsilon'$  değeri tersinim ve yığılım bölgelerinde sabit kalırken sadece tükenim bölgesinde uygulanan voltaj arttıkça artmaktadır. Ayrıca  $\varepsilon'$  değeri tersinim ve tükenim bölge aralığında artan frekansla azalmaktadır.  $\varepsilon'$  nin frekans artarken azalması, polarizasyonun frekans artarken azalmasına yorulabilir. Sonra  $\varepsilon'$  nin sabit bir değere ulaşması, dış alanların veya uygulanan voltajların bütün frekansları boyunca elektron sıçrama mekanizmalarının bu elektrik alanını takip edememesinden kaynaklanır.  $\varepsilon'$  nin frekansla dispersiyonu (dağılımı) Maxwell-Wagner tip arayüzey polarizasyona bağlanabilir [2,68,69]. Yani homojensizlik iletkenliğin frekansa bağlılığına sebep olur. Çünkü, yük taşıyıcıları az iletken bölge sınırlarında toplanır. Bu sebeple arayüzey ve uzay yük polarizasyonu ortaya çıkar [61].

Şekil 4.9 (b) ve (c) değişik frekanslarda  $\epsilon''$  ve  $\tan\delta$  nın voltaja bağlılığını göstermektedir. Bu şekillerden de görülebileceği gibi tükenim bölgesinde  $\epsilon''$  ve  $\tan\delta$  değerleri frekansa ve voltaja çok kuvvetli bağlıdır.  $\epsilon''$ -V ve  $\tan\delta$ -V grafikleri tükenim bölgesinde ve 3-4 volt aralığında her bir frekans için bir pike sahiptir. Bu piklerin büyüklükleri yaklaşık olarak sabit kalırken frekans arttıkça pik noktaları yüksek voltaja doğru kaymaktadır.  $\epsilon''$  ve  $\tan\delta$  nın pik davranışı Si/SiO<sub>2</sub> ara yüzeyinde  $N_{ss}$  arayüzey yoğunluğu, yapının  $R_s$  seri direnci, arayüzey oksit tabakanın kalınlığı ve onun homojensizliği gibi birçok değişkenlere bağlı olabilir [68,71,72]. Kapasitans ve kondüktansın arayüzey özelliklerine oldukça duyarlı olduğu bilinir [31-32,70-72]. Çünkü  $N_{ss}$  düşük ve yüksek frekanslara farklı tepki verir. Düşük frekanslarda  $N_{ss}$  ac sinyali kolayca takip edebilirken yüksek frekanslarda ( $f \geq 500$  kHz) ac sinyali takip edemez Bunun için düşük frekanslarda, özellikle dipolar ve arayüzey/yüzey polarizasyon tipi  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerlerine katkı yapar.



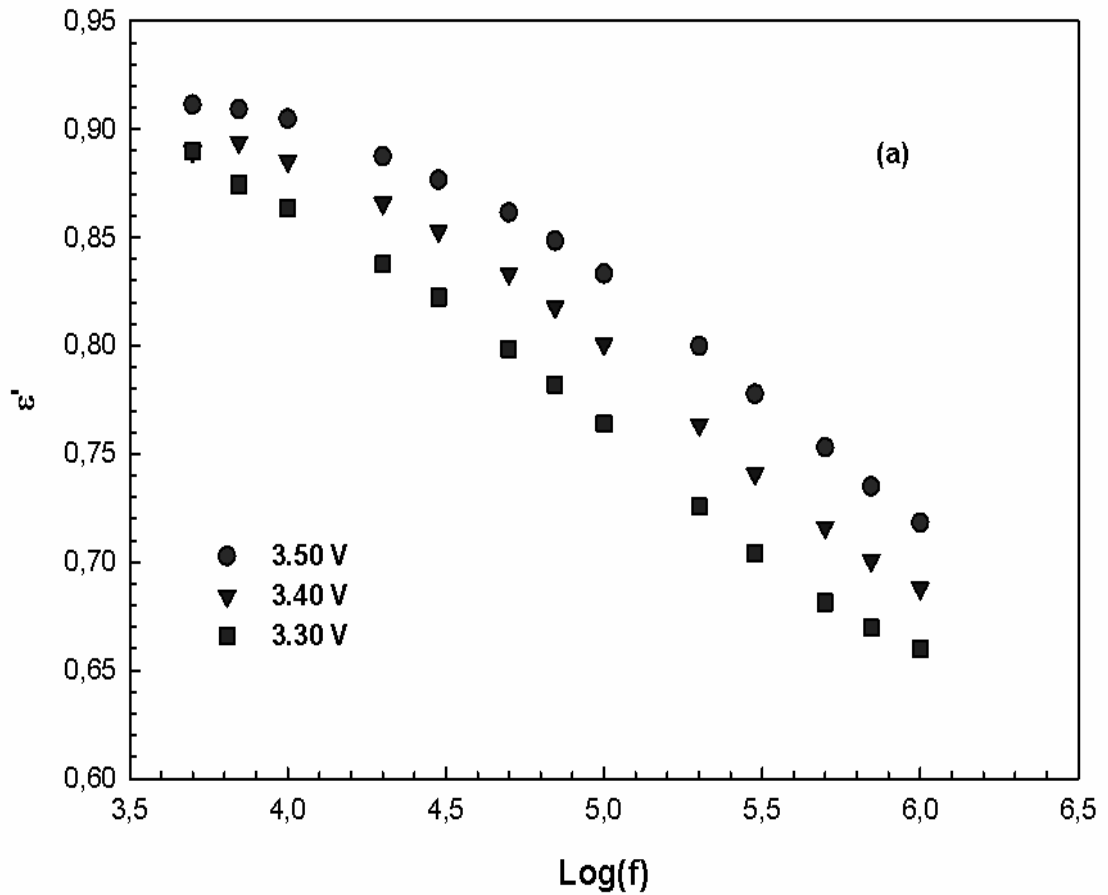


Şekil 4.9. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$  ve (c)  $\tan\delta$  larının değişik frekanslarda voltaja bağlılığı.

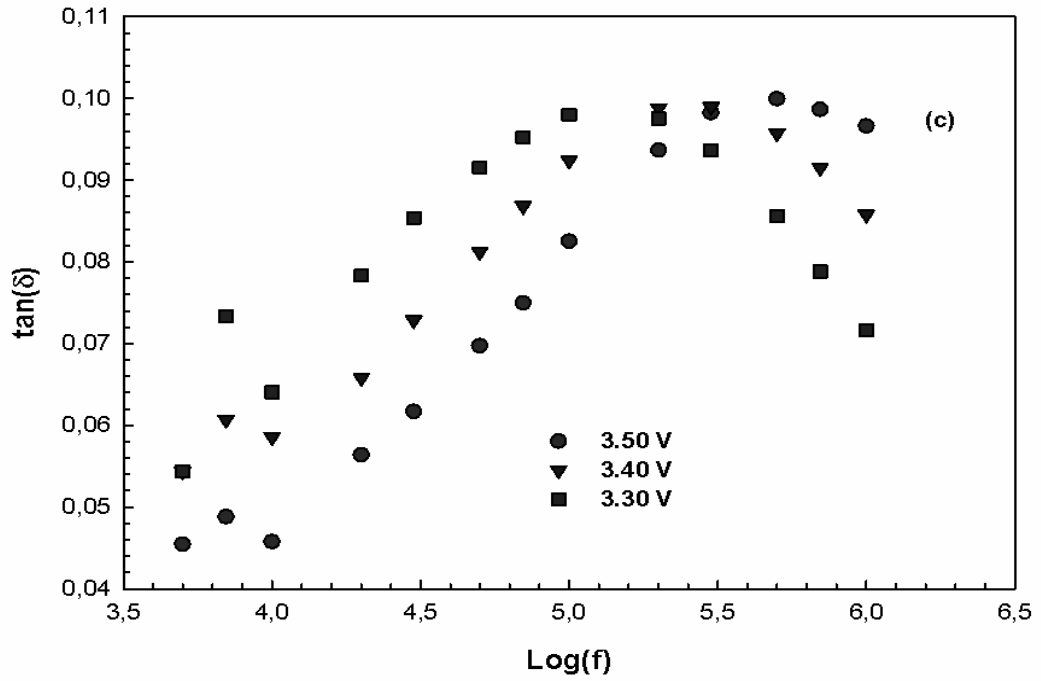
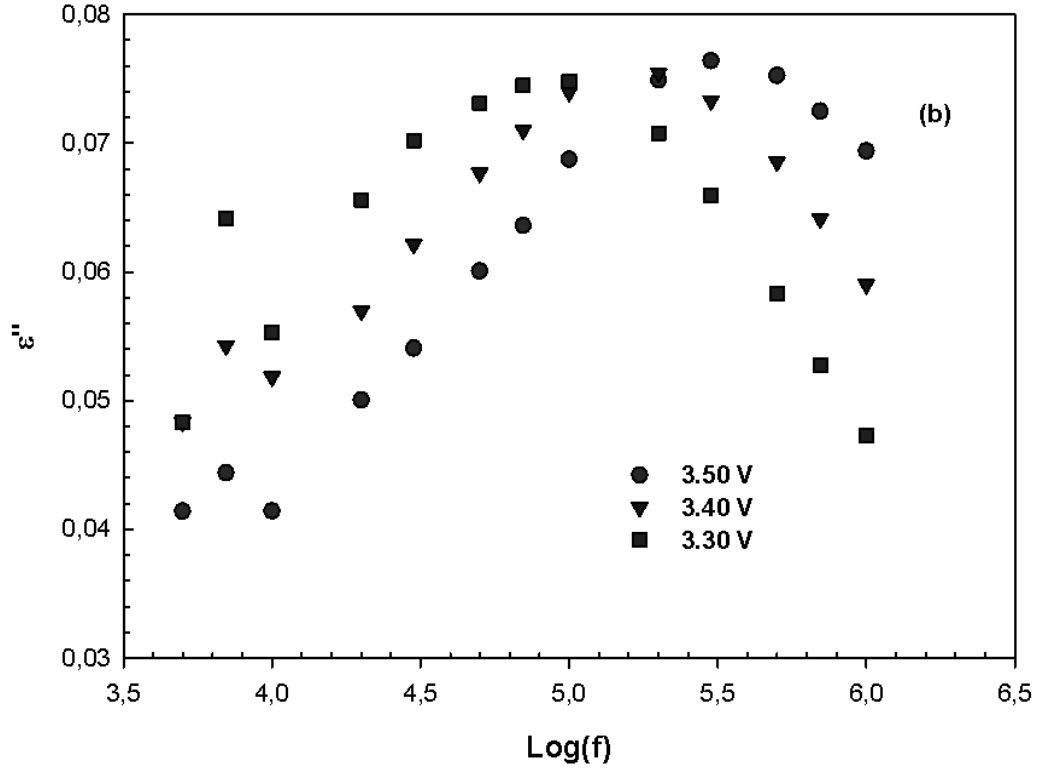


Şekil 4.9. (Devam) Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$  ve (c)  $\tan\delta$  larının değişik frekanslarda voltaja bağlılığı.

Şekil 4.10 (a),(b) ve (c) Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  ve  $\tan\delta$  sının farklı üç voltajda frekansa bağlı grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.10 (a)'da görüldüğü gibi,  $\epsilon'$  değeri, tersinim ve yığılım bölgelerinde sabit kalırken tüketim bölgesine uygun her üç ileri öngerilim voltajı için frekans arttıkça azalmaktadır. Artan frekanslarda arayüzey ve dipolar veya iyonik polarizasyon katkıları etkisiz olmaktadır. Frekansla  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  deki dağılım şöyle açıklanabilir; frekans artırıldığında arayüzey dipolleri alternatif alan doğrultusunda yönelebilmeleri için daha az zamana sahip olmalarındandır[59,64,73].

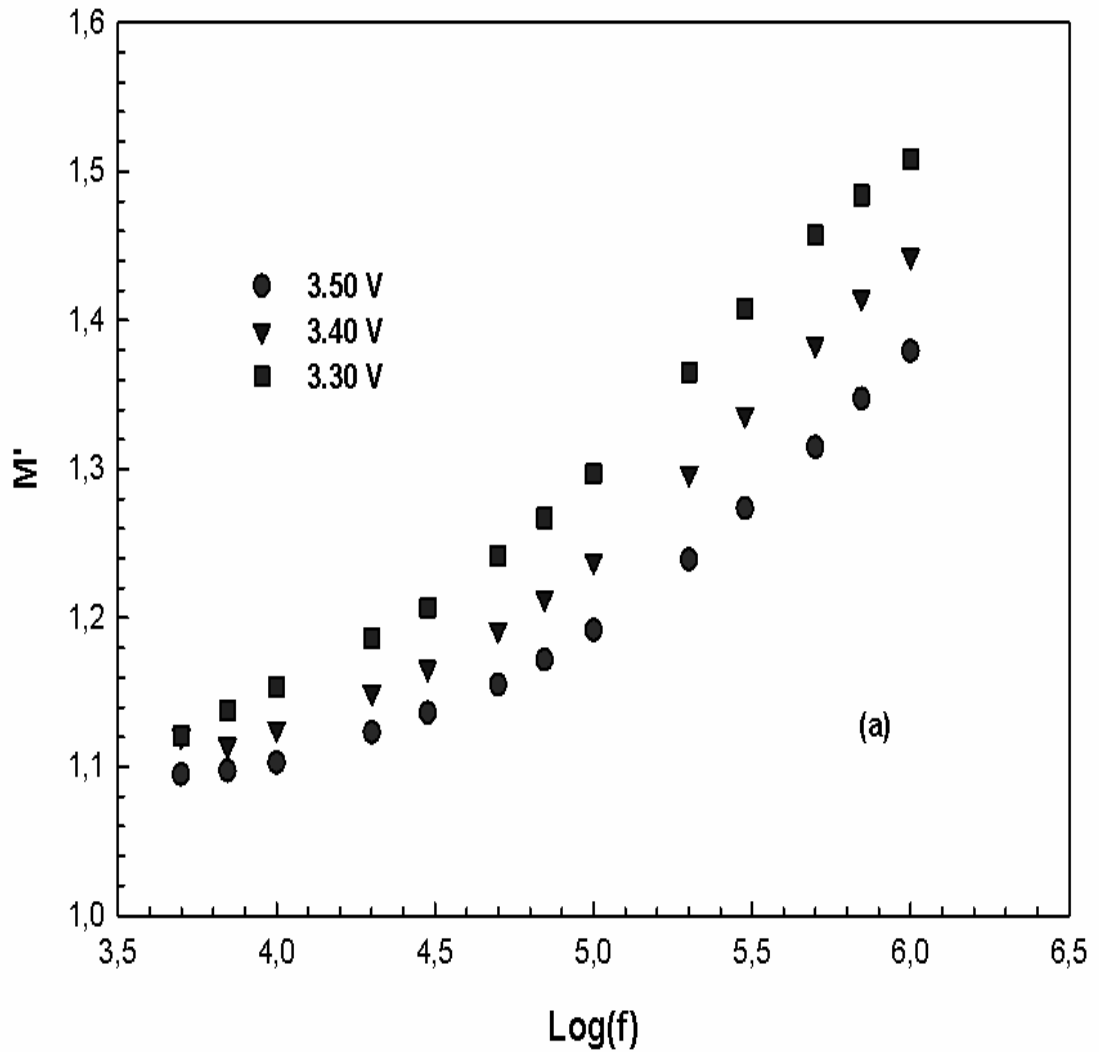


Şekil 4.10. Al/SiO<sub>2</sub> /p-Si (MOS) yapının (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$  ve (c)  $\tan\delta$  ların bazı voltajlar için frekansa bağlı grafikleri.

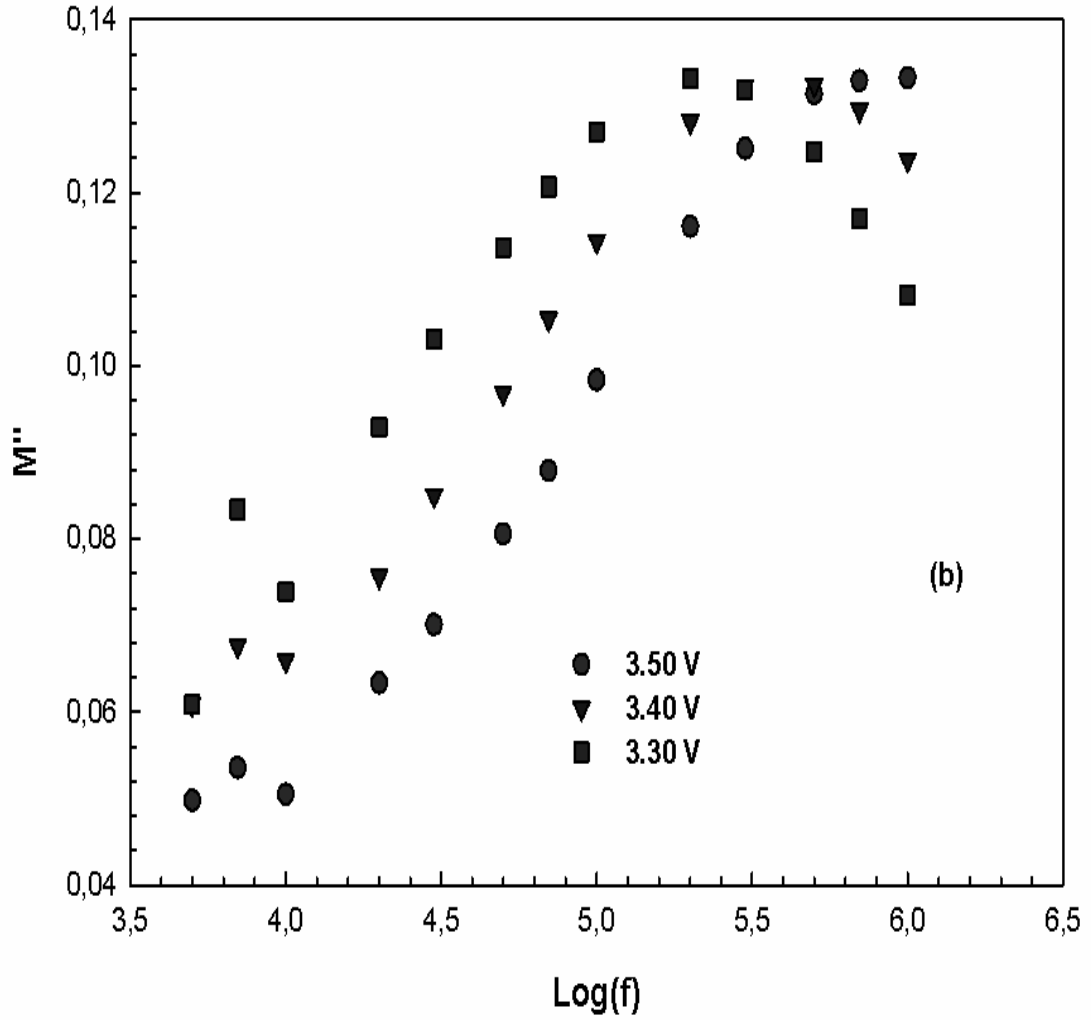


Şekil 4.10. (Devam) Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$  ve (c)  $\tan\delta$  ların bazı voltajlar için frekansa bağlı grafikleri.

Şekil 4.11(a) ve (b)'de gösterilen elektrik modüllerinin gerçel ve sanal kısımları oda sıcaklığında  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerleri kullanılarak tayin edildi. Şekil 4.11 (a)'da görüldüğü gibi  $M'$  nin değeri durulma işleminden dolayı artan frekansla artmaktadır. Yüksek frekansların aksine,  $M'$  değeri, elektrot polarizasyonun yerdeğiştirmesine uygun olarak düşük frekanslarda sifıra yaklaşır. Şekil 4.11 (b)' de görüldüğü gibi  $M''$  nin verilen voltajda bir pik değeri vardır.  $M''$  nin pik gösterdiği yerde açısal frekans ( $\omega=2\pi f$ ) ve  $\omega\tau=1$  şartına uyar ve burada  $\tau$  bahsedilen frekansta durulma zamanıdır.

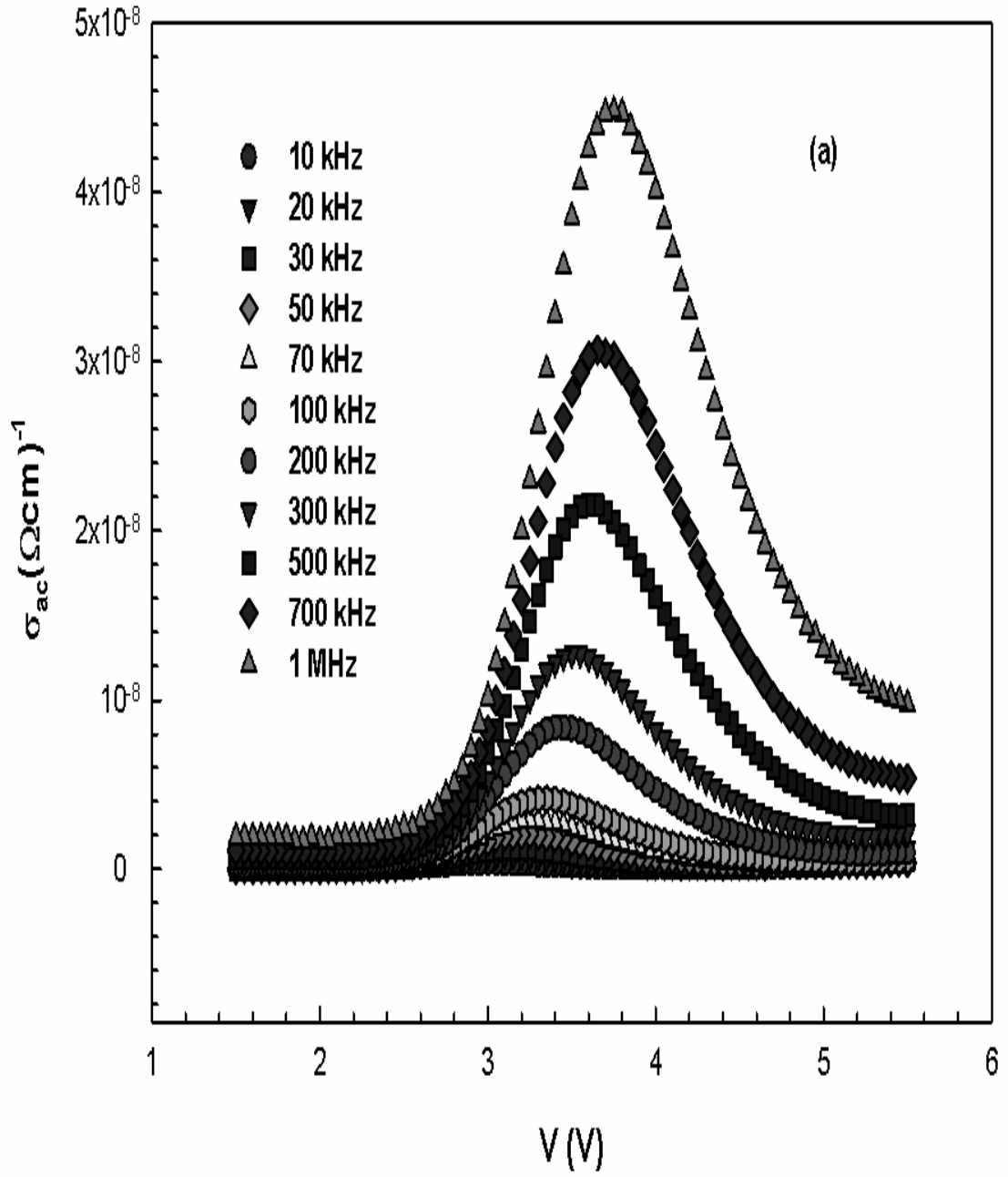


Şekil 4.11. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının bazı voltajlar için (a)  $M'$  ve (b)  $M''$  lerin frekansa bağlı grafikleri.

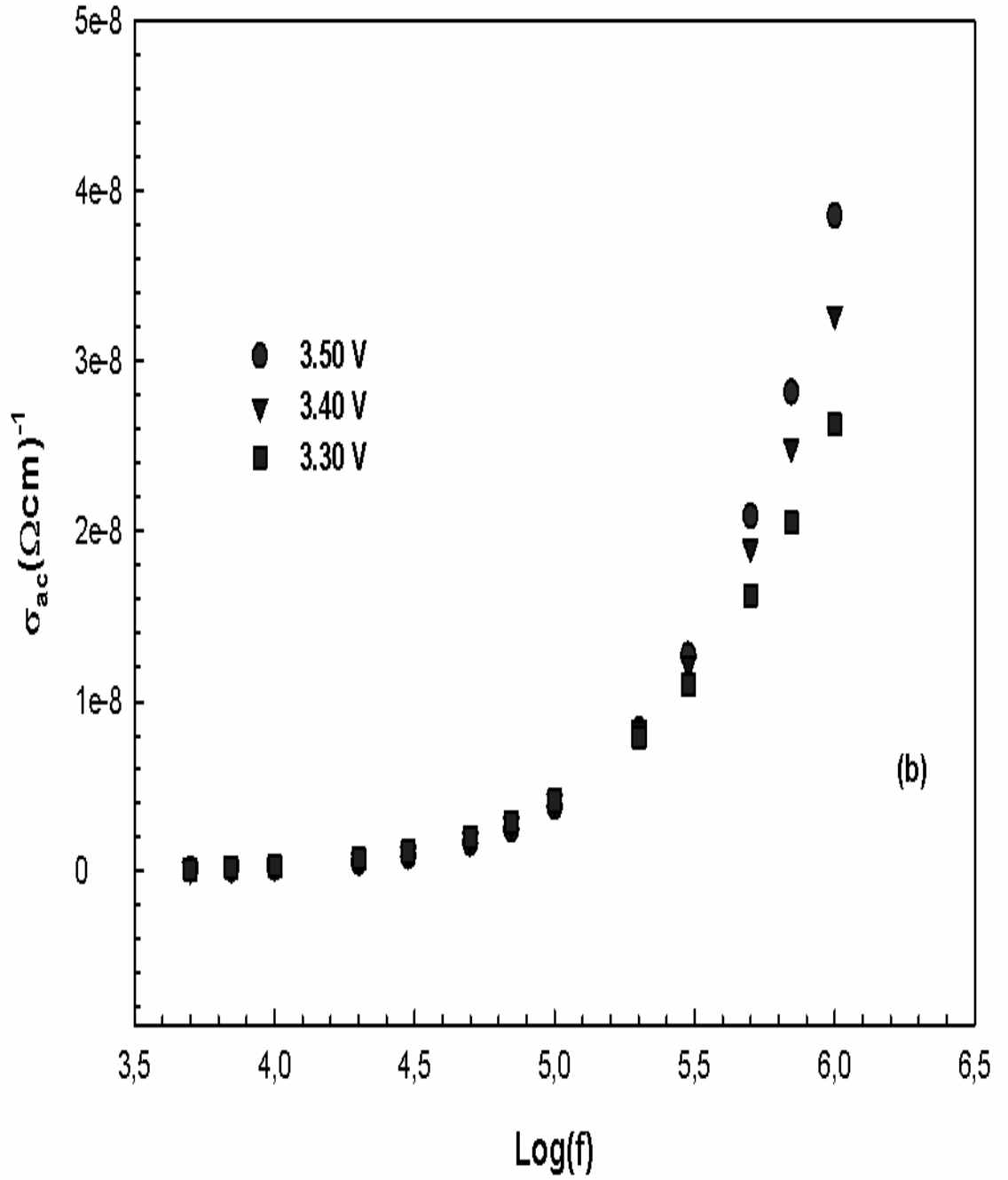


Şekil 4.11. (Devam) Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının bazı voltajlar için (a) M' ve (b) M'' lerin frekansa bağlı grafikleri.

Şekil 4.12 (a) ve (b) Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının  $\sigma_{ac}$  sinin sırasıyla voltaja frekansa bağlı grafiğini gösterir. Şekil 4.12 (a)'da görülebileceği gibi  $\epsilon''$ -V grafiğine benzer olarak  $\sigma_{ac}$ -V grafiği tükenim bölgesinde ve 3-4 volt aralığında her frekansta bir pike sahiptir. Pik değeri artan frekansla dahada artmakta ve daha büyük voltaj değerinde oluşmaktadır. Denklem 4.13' ten görüldüğü gibi  $\sigma_{ac}$  yalnız dielektrik kayıba ( $\epsilon''$ ) bağlıdır. Bu sonuçlar litaretürle uyumludur, ki Orada artan frekansla  $\sigma_{ac}$  aratışı  $R_s$  ye atfedilir [74,75].



Şekil 4.12. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının  $\sigma_{ac}$  sinin (a) voltaja bağlı (b) frekansa bağlı grafiği.



Şekil 4.12. (Devam) Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının  $\sigma_{ac}$  sinin (a) voltaja bağlı (b) frekansa bağlı grafiği.



## 5. SONUÇ

Bu Çalışmada hem ince (50 Å) hem de kalın (826Å) yalıtkan arayüzey tabakalı Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapılar hazırlandı ve bunlar sırasıyla A ve B numuneleri olarak adlandırıldı. Yalıtkan (SiO<sub>2</sub>) arayüzey tabakası termal oksidasyon yöntemiyle oluşturuldu. Bilindiği gibi sadece tek bir frekansta veya dar bir frekans aralığında ölçülen kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/w-V) değerleri, hazırlanan yarıiletken aygıtların elektriksel ve dielektrik özellikleri hakkında bize detaylı bir bilgi sağlamaz. Ancak geniş bir frekans ve voltaj aralığında elde edilecek bu ölçümler, hem elektriksel hem de dielektrik özellikleri ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumları hakkında bize daha detaylı bir bilgi sağlar. Bu nedenle, hazırlanan bu yapıların hem elektriksel hem de dielektrik özellikleri kondüktans yöntemiyle (C-V ve G/w-V) geniş bir frekans (1kHz-1MHz) aralığında oda sıcaklığında detaylıca incelendi. Hazırlanan ince yalıtkan arayüzey tabakalı Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) yapının arayüzey durumları  $N_{ss}$ , durulma zamanı  $\tau$ , yakalama tesir kesitleri  $\sigma_p$  enerjisinin bir fonksiyonu olarak elde edildi. Hazırlanan diğer kalın yalıtkan arayüzey tabakalı Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) yapının dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ), dielektrik kayıp ( $\epsilon''$ ), kayıp tanjant ( $\tan\delta$ ), elektrik modülün gerçek ve sanal kısımları ( $M'$ ,  $M''$ ) ile ac elektriksel iletkenliği ( $\sigma_{ac}$ ) frekansın bir fonksiyonu olarak incelendi.

Tüm frekansa bağlı C-V ve G/w-V eğrileri geniş bir voltaj aralığında (-5V ile +5V) elde edilerek bu dielektrik parametreler voltajın bir fonksiyonu olarak da incelendi. Bu geniş voltaj aralığındaki ölçümler, bize elektrik ve dielektrik özelliklerin hem voltaja hem de frekansa bağlı dağılım profillerini elde etme imkânı sağladı. Arayüzey durumunun ( $N_{ss}$ ) enerji dağılım profili ve onun durulma zaman sabiti ( $\tau$ ) ile yakalama tesir kesiti ( $\sigma_p$ ) admittans spektroskopisi metodundan (C-V ve G/ $\omega$ -V) elde edildi. C ve G/ $\omega$  nın deneysel değerleri Şekil 4.1 (a,b) ve Şekil 4.2(a,b) den de görüldüğü gibi büyük frekans dağılımı göstermektedir. Bu dağılım Si/SiO<sub>2</sub> ara yüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumları ve metal/yarıiletken ara yüzeyinde arayüzey yalıtkan tabakanın varlığına atfedildi. Kalın yalıtkan arayüzey tabakalı

(MOS) yapı için elde edilen arayüzey durumları ince yalıtkan arayüzey tabakalı (MIS) yapılara göre oldukça azalmaktadır. Bu durum, metal/yarıiletken arayüzeyindeki yalıtkan tabaka kalınlığı, yüzey durumlarını etkili biçimde pasivize edebilmektedir.  $N_{ss}$ ,  $\tau$  ve  $\sigma_p$  değerleri; A numunesi için sırasıyla  $9,55.10^{13}$ - $5,82.10^{13}$   $eV^{-1}cm^{-2}$ ,  $6,31.10^{-6}$  -  $1,58.10^{-6}$  s, ve  $3,55.10^{-21}$ - $1,27.10^{-15}cm^2$  aralığında değişirken B numunesinde  $4,29.10^{13}$  -  $3,36.10^{12}$   $eV^{-1}cm^{-2}$ ,  $6,31.10^{-6}$  -  $1,58.10^{-6}$  s ,  $6,65.10^{-21}$  -  $6,69.10^{-15}$   $cm^2$  aralığında değişmektedir. Bu sonuçlar açıkça göstermektedir ki,  $\tau$  değeri ileri öngerilimle valans band dibinden yasak enerji aralığının ortalarına doğru exponansiyel olarak artmaktadır. MIS ve MOS yapıların düşük frekans değerlerindeki C-V ve G/ $\omega$ -V eğrileri seri direnç bağıllığı göstermektedir. Bunun için, seri direnç etkisini elimine etmek için, ölçülen deneysel kapasitans  $C_m$  ve kondüktans  $G_m$  değerleri düzeltilerek yeniden çizildi.

Termal oksidasyon metodu ile p-Si üzerine 826 Å kalınlıklı arayüzey oksit tabaka ( $SiO_2$ ) oluşturuldu. Al/ $SiO_2$ /p-Si (MOS) yapıların ac elektriksel iletkenliği dielektrik özelliklerinin frekans ve voltaj bağımlılığı 1kHz-1MHz frekans aralığında ve oda sıcaklığında admittans spektroskopisi metodu ile etraflıca incelendi. Deneysel sonuçların analizi ve Şekil 4.9 (a,b)' deki grafiklerdende görüldüğü gibi,  $\epsilon''$  değerleri bir pik gösterirken her bir ileri öngerilim voltajı için  $\epsilon'$  değerleri artan frekansla bir azalış gösterir. Şekil 4.11 (a,b) ve Şekil 4.12 (a,b)'de görüldüğü gibi  $M'$  ve  $\sigma_{ac}$  değerleri artan frekansla artar. Artan frekansla iletkenliğin artması elektron sıçramalı tip iletim mekanizmasına bağlanabilir.

Bütün bu elde edilen deneysel sonuçlar; MOS yapıların  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\tan\delta$ ,  $M'$ ,  $M''$  ve  $\sigma_{ac}$  değerlerinde frekansa bağlı önemli ölçüde bir dalgalanma olduğunu ve bu dalgalanmaya arayüzey durumları ve arayüzey polarizasyonunun özellikle düşük frekanslarda çok etkili olduğunu göstermektedir. Dielektrik özelliklerdeki dispersiyon, Si/ $SiO_2$  arayüzeyinde uzay-yük taşıyıcıları ve arayüzey oksit tabakanın homojensizliği de neden olabilir. Sonuç olarak Al/ $SiO_2$ /p-Si (MOS) yapıda  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\tan\delta$ ,  $M'$ ,  $M''$  ve  $\sigma_{ac}$  değerleri özellikle sadece tüketim bölgesinde uygulanan ileri öngerilimlere ve frekansa oldukça bağlıdır.

## KAYNAKLAR

1. Northrop, D. C., Roderick, E. H., “The Physics of Shottky barriers, in Impedance Devices”, ***Solid State Electron***, 4: 37-73 (1978).
2. Chelkowski, A., “Dielectric Physics”, ***Elsevier***, Amsterdam, 97-105 (1980).
3. Jarzebski, Z. M., “Physical properties of SnO<sub>2</sub> materials: 1. Preparation and defect structure”, ***J. Electrochem. Soc.***, 123(7): 199-205 (1976).
4. Maudes, J. S., Rodriguez, T., “Sprayed SnO<sub>2</sub> films: Growth mechanism and film structure characterization”, ***Thin Solid Films***, 69(2): 183-189 (1980).
5. Oral, M., “Elektrostatik”, ***Ege Ün. Matbaası***, İzmir, 221-252 (1983).
6. Kar, S., Narasimhan, R. L., “Characteristics of the Si-SiO<sub>2</sub> interface states in thin (70-230 Å) oxide structures”, ***J. Appl. Phys.***, 61(12): 5353-5359 (1987).
7. Çakar, M., Türüt, A., “The conductance and capacitance–frequency characteristics of the organic compound (pyronine-B)/p-Si structures”, ***Synthetic Metals***, 138:549-554 (2003).
8. Çakar, M., Yıldırım, N., Doğan, H., Türüt, A., “The conductance and capacitance–frequency characteristics of Au/pyronine-B/p-type Si/Al contacts”, ***Applied Surface Science***, 253(7): 3464-3468 (2007).
9. Çağlar, Y., Çağlar, M., Ilican, S., Yakuphanoglu, F., “Determination of the electronic parameters of nanostructure SnO<sub>2</sub>/p-Si diode”, ***Microelect. Eng.***, 86(10): 2072-2077 (2009).
10. Truong, L., Fedorenko Y.G., Afanasev, V.V., Stesmans, A., “Admittance Spectroscopy of traps at the interfaces of (1 0 0) Si with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, and HfO<sub>2</sub>”, ***Microelectronics Reliability***, 45(5-6):823-826 (2005).
11. Aydoğan, Ş., Sağlam, M., Türüt, A., “Characterization of capacitance–frequency features of Sn/polypyrrole/n-Si structure as a function of temperature”, ***Polymer***, 46(16): 6148-6153 (2005).
12. Szatkowski, J., Sieranski, K., “Simple Interface-Layer Model for the nonideal Characteristics of the schottky-barrier diode”, ***Solid-State Electronics***, 35(7) : 1013-1015 (1992).
13. Berglund, C.N., “Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces”, ***IEEE Trans. Electron Devices***, 13: 701–705 (1966).

14. Werner, J., Ploog, K., Queisser, H. J., “Interface-State Measurements at Schottky Contacts: A New Admittance Technique”, *Physical Review Letters*, 57 (8):1080-1083 (1986).
15. Martens, K., Wang, W., De Keersmaecker, K., Borghs, G., Groeseneken, G., Maes, H., “Impact of weak Fermi-level pinning on the correct interpretation of III-V MOS CV and G-V characteristics”, *Microelectronic Engineering*, 84: 2146-2149 (2007).
16. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Bülbül, M.M., “Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) structure”, *Microelectronic Engineering*, 81: 140-149 (2005).
17. Martens, K., Chui, C. O., Brammertz, G., Jaeger, B.D., Kuzum, D., Meuris, M., Heyns, M.M., Krishnamohan, T., Sarazwat, K., Maes, H. E., Groeseneken, G., “On the Correct Extraction of Interface Trap Density of MOS Devices With High-Mobility Semiconductor Substrates”, *IEEE Trans. on Elec. Dev.*, 55 (2): 547-556 (2008).
18. Neamen, D. A., “Semiconductor Physics and Devices”, 2<sup>nd</sup> ed., *Mc Graw-Hill*, New York, 420-450, 517-523 (1997).
19. Tataroğlu, B., “MIS Yapıların Frekans ve Radyasyona Bağlı Temel Elektriksel Parametreler”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-5 (2006).
20. Yücedağ, İ., “Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 5-53 (2007).
21. Tataroğlu, A., “MOS Yapılarda Temel Fiziksel Parametrelerin Frekans ve Radyasyon Miktarına Bağlı İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-53 (2004).
22. Gökçen, M., “Au/SiO<sub>2</sub>/n-GaAs (MOY) Yapıların Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerinin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-41 (2008).
23. Pakma, O., “Metal/TiO<sub>2</sub>/n-Si/Metal Yapılarda Yüzey Şartlarının Elektriksel Belirtenler Üzerine Etkisi”, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara, 8-32 (2008).
24. Kanbur, H., “Yalıtkan Tabakalı Al/p-Si Schottky Diyotlarda Elektriksel Karakteristikleri Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 7-19 (2008).
25. Ataseven, T., “Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si (MIS) Yapıların Dielektrik Özelliklerinin

- İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 4-18 (2011).
26. Eroğlu, A.G., “Au/ SiO<sub>2</sub> /n-Si (MIS) Yapının Elektrik ve Dielektrik Karakteristiklerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 6-20 (2011).
  27. Yıldırım, M., “Au/ SiO<sub>2</sub> /n-Si (MY) Yapıların Elektriksel Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 8-18 (2010).
  28. Kaya, A., “Al/ SiO<sub>2</sub> /p-Si (MIS) Yapıların Elektrik Karakteristiklerinin Frekansa Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 6-25 (2010).
  29. Aydemir, U., “Au/ SrTiO<sub>3</sub> /n-Si (MFS) Schottky Diyotların Elektriksel Parametrelerinin I-V, C-V, ve DLTS Metodu ile İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 4-30 (2009).
  30. Gökçen, M., “MOS Yapılarda kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2-3, 13-14 (2005).
  31. Nicollian, E. H., Brews, J. R., “MOS Physics and Technology”, **John Wiley & Sons**, New York, 40-175, 222-226, 423-439 (1982).
  32. Sze, S. M., “Physics of Semiconductor Devices”, 2<sup>nd</sup> ed., **John Wiley & Sons**, New York, 362-390 (1981).
  33. Cooke, M. J., “Semiconductor Devices”, **Prentice Hall**, New York, 294-308 (1990).
  34. Grove, A. S., “Physics and Technology of Semiconductor Devices”, **John Wiley & Sons**, New York, 91-106, 334-357 (1967).
  35. Ghandhi, S. K., “VLSI Fabrication Principles”, **John Wiley & Sons**, New York, 401-405 (1983).
  36. Schroder, D. K., “Semiconductor Material and Device Characterization”, 2<sup>nd</sup> ed., **John Wiley & Sons**, New York, 337-379 (1998).
  37. Hofstein, S. R., Warfield, G., “Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer”, **Solid-State Electronics**, 8(3): 321-341 (1965).

38. Altındal, Ş., “Al - SiO<sub>x</sub> - pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 52-74 (1993).
39. Ulrich, B., Kuchar, F., “Capacitance-voltage measurements on a p-type InSb metal/insulator/semiconductor structure with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> as the insulator”, *Thin Solid Films*, 168(2): 157-168 (1989).
40. Haddara, S. H., El-Sayed, M., “Conductance technique in MOSFETs: study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes”, *Solid-State Electronics*, 31(8): 1289-1298 (1988).
41. Fröhlich, H., “Theory of Dielectrics”, *Clarendon Press*, Oxford, 1-21, 70-78 (1958).
42. Tareev, B., “Physics of Dielectric Materials”, *Mir Publishers*, Moscow, 67-95, 140-156 (1979).
43. Von Hippel, A. R., “Dielectrics and Waves”, *John Wiley & Sons*, New York, 3-8, 63-122, 160-166, 228-234 (1959).
44. Popescu, M., Bunget, I., “Physics of Solid Dielectrics”, *Elsevier*, Amsterdam, 206-245, 282-291 (1984).
45. Wert, C.A., Thomson, R.M., “Physics of Solids”, 2<sup>nd</sup> ed., *McGraw-Hill*, New York, 410-421, 388-403 (1970).
46. Daniel, V.V., “Dielectric Relaxation”, *Academic Press*, London, 1-19, 79-87 (1967).
47. Symth, C. P., “Dielectric Behaviour and Structure”, *McGraw-Hill*, New York, 52-61, 202-215 (1955).
48. Sharma, B.L., “Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications”, *Plenum Press*, New York, 113-118 (1984).
49. Castagne, R., Vapaille, A., “Description of the SiO<sub>2</sub>-Si interface properties by means of very low frequency MOS capacitance measurements”, *Surface Science*, 28(1): 157-193 (1971).
50. Kelberlau, U., Kassing, R., “Nonequilibrium properties of MIS-capacitors”, *Solid-State Electron*, 24(4): 321-327 (1981).
51. Konofaos, N., Evangelou, E.K., Wang, Z., Kugler, V., Helmersson, U., “Electrical characterisation of SrTiO<sub>3</sub>/Si interfaces”, *Journal of Non Crystalline Solids*, 303(1): 185-189 (2002).

52. Miller, E. J., Dang, X. Z., Wieder, H. H., Asbeck, P. M., Yu, E. T., Sullivan, G. J., Redwing, J.M., "Trap characterization by gate-drain conductance and capacitance dispersion studies of on AlGaN/GaN heterostructures field-effect transistor", *J. Appl. Phys.*, 87 (11):8070-8073 (2000).
53. Altındal, Ş., Kanbur, H., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A., "On the energy distribution of interface states and their relaxation time and capture cross section profiles in Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes", *Microelect. Eng.*, 85: 1495-1501 (2008).
54. Tataroğlu, A., Altındal, Ş., "Analysis of electrical characteristics of Au/SiO<sub>2</sub>/n-Si (MOS) capacitors using the high-low frequency capacitance and conductance methods", *Microelect. Eng.*, 85: 2256-2260 (2008).
55. Kuhn, M., "A quasi-static technique for MOS C-V and surface state measurements", *Solid State Electronics*, 13(6): 873-885 (1970).
56. Kar, S., Varma, S., "Determination of silicon-silicon dioxide interface state properties from admittance measurements under illumination", *J. Appl. Phys.*, 58(11): 4256-4266 (1985).
57. Nicollian, E. H., Goetzberger, A., "The Si-SiO<sub>2</sub> interface- silicon conductance technique", *Bell Syst. Tech. J.*, 46: 1055-1133 (1967).
58. Nicollian, E. H., Goetzberger, A., Lopez, A.D., "Expedient method of obtaining interface state properties from MIS conductance measurements", *Solid State Electronics*, 12(12): 937-944 (1969).
59. Sattar, A. A., Rahman, S. A., "Dielectric Properties of Rare Earth Substituted Cu-Zn Ferrites", *Physica Status Solidi (A)*, 200(2): 415-422 (2003).
60. Bidault, O., Goux, P., Kchikech, M., Belkaoui, M., Maglione, "Space-charge relaxation in perovskites", *Phys. Rev. B.*, 49(12): 7868-7873 (1994).
61. Kyritsis, A., Pissis, P., Grammatikakis, J., "Dielectric relaxation spectroscopy in poly(hydroxyethyl acrylates)/water hydrogels", *J. of Polymer Sci. Part B: Polymer Phys.*, 33 (12): 1737-1750 (1995).
62. Pissis, P., Kyritsis, A., "Electrical conductivity studies in hydrogels", *Solid State Ionics*, 97(1-4): 105 (1997).
63. Lee, J. S., Choi, K. H., Ghim, H. D., Kim, S. S., Chun, D. H., Kim, H. Y., Lyoo, W. S., "Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning", *Journal of Applied Polymer Science*, 93(4): 1638-1646 (2004).
64. Prabakar, K., Narayandass, S.K., Mangalaraj, D., "Dielectric properties of Cd<sub>0.6</sub>Zn<sub>0.4</sub>Te thin films", *Physica Status Solidi (A)*, 199(3): 507-514 (2003).

65. Mattsson, M.S., Niklasson, G.A., Forsgren, K., Harsta, A., “ A frequency response and transient current study of  $\beta$ -Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Methods of estimating the dielectric constant, direct current conductivity, and ion mobility”, *J. Appl. Phys.*, 85 :2185-2192 (1999).
66. Migahed, M.D., Ishra, M., Fahmy, T., Barakat, A ., “Electric modulus and AC conductivity studies in conducting PPy composite films at low temperature”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65(6): 1121-1125 (2004).
67. Macedo, P.B., Moynihan, C.T., Bose, R., “Role of Ionic Diffusion in Polarization in Vitreous Ionic Conductors”, *Phys. Chem. Glasses*, 13:171-179 (1972).
68. Arslan, E., Şafak, Y., Taşçıoğlu, İ., Uslu, H., Özbay, E., “ Frequency and dependence of the dielectric and AC electrical conductivity in (Ni/Au)/AlGaIn/AlN/GaN heterostructures ”, *Micro Electron. Eng.*, 87(10): 1997-2001 (2010).
69. Afandiyeva, İ. M., Dökme, İ., Altındal, Ş., Bülbül, M. M., Tataroğlu, A., “ Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of AL-TiW-Pd<sub>2</sub>Si/n-Si structures ”, *Microelectron. Eng.*, 85(2) : 247-252 (2008).
70. Card, H.C., Rhoderick, E.H., “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes ”, *J. Physic. D:Appl.Phys.*, 4 :1589 (1971).
71. Ch. W., Reddy, S., Han, X., Zhu, Q.Y., Mai, L.Q., Chen, W., “Dielectric Spectroscopy studies on (PVP + PVA) polyblend film ”, *Microelectron. Eng.*, 83(2): 281-285 (2006).
72. Mönch, W., “Semiconductor Surfaces and Interfaces”, 3<sup>rd</sup> ed., *Springer Verlag Pres.*, 37-80 (2001).
73. Fanggao, C., Saunders, G. A., Lambson, E.F., Hampton, R.N., Carini, R.N.G., Di Marco, G., Lanza, G.M., “Temperature and frequency dependencies of the complex dielectric constant of poly under hydrostatic pressure”, *J. Polymer Sc. Part B: Polymer Phys.*, 34: 425-433 (1996).
74. Pakma, O., Serin, N., Serin, T., Altındal, Ş., “Influence of frequency and bias voltage on dielectric properties and electrical conductivity of Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si/p<sup>+</sup> (MOS) structure”, *J.Phys.D :Appl.Phys.*, 41 : 215103 (2008).
75. Szu, S.P., Lin, C.Y., “AC impedance studies of copper doped silica glass”, *Materials Chemistry and Physics*, 82(2): 295-300 (2003).



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SÖNMEZ,Zekayi  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 01.03.1959 - Ordu  
 Medeni hali : Evli  
 e-mail : [zekayi.s.19@hotmail.com](mailto:zekayi.s.19@hotmail.com)

### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                               | Mezuniyet tarihi |
|---------------|---------------------------------------------|------------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üniversitesi – Fen Bilimleri Enstitüsü | 1991             |
| Lisans        | Ankara Üniversitesi Fizik Bölümü            | 1979             |
| Lise          | Ordu Lisesi                                 | 1975             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                     | Görev    |
|-----------|-------------------------|----------|
| 1980-1983 | Milli Eğitim Bakanlığı  | Öğretmen |
| 1983-1999 | Türk Silahlı Kuvvetleri | Öğretmen |
| 1999-2012 | Milli Eğitim Bakanlığı  | Öğretmen |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Ş. Altındal, A. Kaya, Z. Sönmez, Y. Şafak, “A comparative of enerji density distribution of surface states profiles with 50 and 826 Å insulator layer in Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si structures” , **Azerbaijan Jurnal of Physics**,16(2): 356-358 (2010).

2. Ş. Altındal, Y. Şafak, Z. Sönmez, A. Kaya “The determination of frequency and applied bias voltage of electrical and dielectric properties of Al/SiO<sub>2</sub>/p- Si (MOS) structures”, *Türk Fizik Derneği 27. Uluslararası Fizik Kongresi 14-17 Eylül (2010)*.
3. S. Demirezen, Z. Sönmez, U. Aydemir, Ş. Altındal., “Effect of series resistance and interface states on the  $I-V$ ,  $C-V$  and  $G/\omega-V$  characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature”, *Current Applied Physics*,12(1): 266-272 (2012).
4. Ş. Altındal, Y. Şafak, Z. Sönmez, A. Kaya “ The determination of frequency and voltage dependence of dielectric properties and ac electrical conductivity of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MOS) structures”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, ..(2010).
5. Ş. Altındal, Y. Şafak, Z. Sönmez, A. Kaya “The energy density distribution of interface states profile in Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si structures using conductance measurements ”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, ..(2010).

### Hobiler

Masa Tenisi, Basketbol, Voleybol, Futbol, Satranç, Türk Halk Müziği, Türk Sanat MOS- Müziği, Kitap Okumak.

### Teknik Beceri ve Yetenekler

MIS-MS yapılar ve analizleri.