

**MİS YAPILARIN FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI TEMEL  
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİ**

**Banu TATAROĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006  
ANKARA**

**MİS YAPILARIN FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI TEMEL  
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİ**

**Banu TATAROĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006  
ANKARA**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

BANU TATAROĞLU

Banu TATAROĞLU tarafından hazırlanan MIS YAPILARIN FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI TEMEL ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Tofig MAMMADOV

Üye : Prof. Dr. Bora ALKAN

Üye : Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Mahir BÜLBÜL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Metin ÖZER

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

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

**MIS YAPILARIN FREKANS VE RADYASYONA BAĞLI TEMEL  
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİ**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Banu TATAROĞLU**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2006**

**ÖZET**

Bu çalışmada, Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) yapıların bazı temel elektriksel parametreleri frekans ve radyasyona bağlı incelendi. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri farklı frekanslar için oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Bu ölçümlerden yapının seri direnç, arayüzey durumları gibi bazı temel elektriksel parametreleri frekansa bağlı hesaplandı. Daha sonra yapı <sup>60</sup>Co gama ışını kaynağında farklı dozlarda radyasyona tabi tutularak benzer ölçüm ve hesaplamalar tekrarlandı. Yapılan deneysel ölçümler ve hesaplamalar, bu yapıların hemen hemen tüm temel elektiksel parametrelerinin yapıdaki arayüzey durum yoğunluğuna, seri dirence, uygulanan d.c. gerilimine, frekansa ve radyasyon dozuna bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir.

**Bilim Kodu : 202. 1. 147**

**Anahtar Kelimeler : MIS yapı, frekansa bağlılık, radyasyon etkisi, seri direnç, arayüzey durumlar**

**Sayfa Adedi : 54**

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

**FREQUENCY AND RADIATION DEPENDENCE OF BASIC ELECTRICAL  
PARAMETERS OF THE MIS STRUCTURES**

**(M.Sc. Thesis)**

**Banu TATAROĞLU**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**June 2006**

**ABSTRACT**

**In this study, we have investigated some basic electrical parameters depend on frequency and radiation of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) structures. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si structure capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) measurements for different frequency were made in room temperature. From these measurements we calculate frequency dependent series resistance, interface state density of structure. After than with the <sup>60</sup>Co gamma-ray source in different doses, we made same measurement and calculations. Results show that in experiments this structure almost all basic electrical parameters of change by interface state density, series resistance, d.c. voltage, frequency and radiation.**

**Science Code : 202. 1. 147**

**Keywords : MIS structure, frequency dependent, radiation effect, series resistance, interface states**

**Page Number : 54**

**Adviser : Associate Professor Şemsettin ALTINDAL**

## TEŐEKKÖR

Çalışma boyunca değerli katkılarıyla beni yönlendiren ve çok büyük yardımlarını gördüğüm Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakóltesi Fizik Bölümü öğretim üyesi saygıdeğer hocam Doç. Dr. şemsettin ALTINDAL' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deneysel çalışma esnasında yardımlarını ve manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Adem TATAROğLU' na teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET.....                                                | iv    |
| ABSTRACT.....                                            | v     |
| TEŞEKKÜR .....                                           | vi    |
| İÇİNDEKİLER.....                                         | vii   |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                  | ix    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                            | xi    |
| 1. GİRİŞ.....                                            | 1     |
| 2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPISI.....          | 4     |
| 2.1. İdeal MIS Yapısı.....                               | 4     |
| 2.1.1. Yığılım.....                                      | 7     |
| 2.1.2. Tükenim .....                                     | 7     |
| 2.1.3. Tersinim .....                                    | 9     |
| 2.2. MIS Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar.....          | 10    |
| 2.2.1. Arayüzey durumları.....                           | 10    |
| 2.2.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri.....              | 11    |
| 2.2.3. Hareketli iyonik yük.....                         | 12    |
| 2.2.4. Oksitte tuzaklanmış yük.....                      | 12    |
| 2.3. MIS Yapılarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi..... | 13    |
| 2.3.1. Kapasitans metodu.....                            | 18    |
| 2.3.2. İletkenlik metodu.....                            | 19    |



|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3. RADYASYONUN MIS YAPI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....                             | 21 |
| 3.1. MIS Yapılarda Radyasyon Etkileri.....                                   | 21 |
| 3.2. Radyasyon Etkisiyle Oluşan Tuzakların Teorisi.....                      | 22 |
| 4. DENEYSEL YÖNTEM.....                                                      | 27 |
| 4.1. MIS Yapıların Hazırlanması.....                                         | 27 |
| 4.1.1. Kristal temizleme.....                                                | 27 |
| 4.1.2. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si MIS yapının hazırlanması.....               | 28 |
| 4.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri.....                                       | 31 |
| 5. DENEYSEL SONUÇLAR.....                                                    | 32 |
| 5.1. Radyasyon Öncesi Ölçümler.....                                          | 32 |
| 5.1.1. Al/SiO <sub>2</sub> /p-Si (MIS) yapının C-V ve G/ω-V eğrileri .....   | 32 |
| 5.1.2. Seri direnç değerlerinin frekans ve gerilime bağlı  incelenmesi.....  | 36 |
| 5.1.3. Paralel iletkenlik-frekans (G <sub>p</sub> /ω-f) eğrileri.....        | 39 |
| 5.1.4. Arayüzey durum yoğunluğu.....                                         | 40 |
| 5.2. Radyasyon Sonrası Ölçümler.....                                         | 41 |
| 5.2.1. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) eğrileri.....    | 41 |
| 5.2.2. Radyasyona bağlı seri direnç-voltaj (R <sub>s</sub> -V) eğrileri..... | 43 |
| 5.2.3. Radyasyona bağlı arayüzey durum yoğunluğu.....                        | 44 |
| 6. SONUÇ VE TARTIŞMA.....                                                    | 46 |
| KAYNAKLAR.....                                                               | 50 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                | 54 |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                           | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Bir MIS yapının şematik gösterimi.....                                                                                               | 4     |
| Şekil 2.2. MIS yapısının enerji bant şeması (p-tipi yarıiletken için).....                                                                      | 5     |
| Şekil 2.3. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....                                                                                              | 6     |
| Şekil 2.4. $V \neq 0$ durumunda MIS yapının enerji-bant şeması.....                                                                             | 8     |
| Şekil 2.5. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması.....                                                                                         | 10    |
| Şekil 2.6. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....                                                    | 11    |
| Şekil 2.7. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre.....                                                                             | 15    |
| Şekil 2.8. MIS yapının eşdeğer devresi.....                                                                                                     | 16    |
| Şekil 3.1. MIS yapıda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumların şematik gösterimi.....                                                | 21    |
| Şekil 4.1. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....                                                                               | 29    |
| Şekil 4.2. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske.....                                                                         | 30    |
| Şekil 4.3. $Al/SiO_2/p-Si$ (MIS) yapının şematik gösterimi.....                                                                                 | 31    |
| Şekil 4.4. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek.....                                                        | 31    |
| Şekil 5.1. MIS yapı için farklı frekanslarda çizilen C-V ve $G/\omega$ -V eğrileri.....                                                         | 33    |
| Şekil 5.2. Farklı ters beslem gerilimleri için kapasitans ve iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren C-f ve $G/\omega$ -f eğrileri..... | 35    |
| Şekil 5.3. Farklı frekanslar için seri direncin voltaja bağlı $R_s$ -V eğrileri.....                                                            | 37    |
| Şekil 5.4. Farklı ters beslem gerilimleri için seri direncin frekansa bağlı değişimini gösteren $R_s$ -f eğrileri.....                          | 37    |

| Şekil                                                                                                                                    | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 5.5. Yüksek frekans (1 MHz) için düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik eğrilerinin voltaja bağlı C-V ve $G/\omega$ -V eğrileri..... | 38    |
| Şekil 5.6. Farklı ters beslem gerilimleri için paralel iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren $G_p/\omega$ -f eğrileri.....     | 39    |
| Şekil 5.7. Arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişim ( $N_{ss}$ -V) eğrisi.....                                                  | 40    |
| Şekil 5.8. MIS yapı için 1 MHz' de farklı radyasyon değerleri için kapasitans- voltaj ve iletkenlik-voltaj eğrileri.....                 | 42    |
| Şekil 5.9. MIS yapının 1MHz'de farklı radyasyon değerleri için seri direnç-voltaj ( $R_s$ -V) eğrileri.....                              | 43    |
| Şekil 5.10. MIS yapı için radyasyondan önce ve sonra arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişim ( $N_{ss}$ -V) eğrileri.....      | 44    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler     | Açıklama                               |
|--------------|----------------------------------------|
| $C$          | Kapasitans                             |
| $G$          | İletkenlik                             |
| $C_{ox}$     | Yalıtkan oksit kapasitansı             |
| $A_{ox}$     | Yalıtkan oksit tabakanın alanı         |
| $d_{ox}$     | Yalıtkan oksit tabaka kalınlığı        |
| $V_{ox}$     | Yalıtkan oksit üzerine düşen gerilim   |
| $N_{ss}$     | Arayüzey durum yoğunluğu               |
| $E_v$        | Valans(değerlik) bandı kenarı enerjisi |
| $E_c$        | İletkenlik bandı kenarı enerjisi       |
| $E_F$        | Fermi enerjisi                         |
| $E_g$        | Yarıiletken yasak enerji aralığı       |
| $\epsilon_0$ | Boşluğun dielektrik sabiti             |
| $\epsilon_i$ | Yalıtkan dielektrik sabiti             |
| $\epsilon_s$ | Yarıiletkenin dielektrik sabiti        |
| $\tau$       | Arayüzey tuzaklarının ömrü             |
| $C_{ss}$     | Arayüzey kapasitansı                   |
| $W_D$        | Tükenim tabakasının kalınlığı          |
| $R_s$        | Seri direnç                            |
| $G_p$        | Paralel iletkenlik                     |
| $\omega$     | Açısal frekans                         |
| $Z$          | Empedans                               |
| $Y$          | Admittans                              |

| <b>Kısaltmalar</b>             | <b>Açıklama</b>            |
|--------------------------------|----------------------------|
| <b>MIS</b>                     | Metal-yalıtkan-yarıiletken |
| <b>MOS</b>                     | Metal-oksit-yarıiletken    |
| <b>C-V</b>                     | Kapasitans-gerilim         |
| <b>G/<math>\omega</math>-V</b> | İletkenlik-gerilim         |
| <b>a.c.</b>                    | Alternatif gerilim         |
| <b>d.c.</b>                    | Doğru gerilim              |
| <b>HF</b>                      | Yüksek frekans             |
| <b>LF</b>                      | Düşük frekans              |
| <b>C<sub>HF</sub></b>          | Yüksek frekans kapasitansı |
| <b>C<sub>LF</sub></b>          | Düşük frekans kapasitansı  |

## 1. GİRİŞ

Elektrik keşfedildikten sonra, katıların iletkenliği hakkında yapılan araştırmalarda bazı katıların elektriği iyi ilettiği, bazılarının kısmen ve bazılarının da hiç iletmediği gözlemlendi. Genel olarak iletkenliğin tanımlanması, iletim ve valans bantlarındaki taşıyıcı (elektron ve deşik) yoğunluğu ile bu iki bant arasındaki yasak enerji bant aralığına göre yapılabilir. Buna göre katılar; iletken, yalıtkan ve yarıiletken olmak üzere üç gruba ayrılır. Eğer iletim ve valans bantı birbirine çok yakın veya üst üste binmiş ise bu tür katılara iletken denir. Yüksek iletkenliğe ( $10^8$  ile  $10^2$  ( $\Omega\text{cm}$ )<sup>-1</sup>) sahip gümüş ve alüminyum örnek olarak verilebilir. Taşıyıcı sayısı çok az, yasak enerji bantı çok geniş ve iletkenliği  $10^{-8}$  ile  $10^{-18}$  ( $\Omega\text{cm}$ )<sup>-1</sup> arasında olan katılara ise yalıtkan adı verilir. Elmas, düşük iletkenli kadmiyum sülfür ve çinko sülfür bunlara örnek verilebilir. Taşıyıcı sayısı az, yasak enerji bantı yalıtkan ile iletken arasında bir bölgede ve iletkenliği  $10^2$  ile  $10^{-8}$  ( $\Omega\text{cm}$ )<sup>-1</sup> arasında olan katılara da yarıiletken adı verilir. Silisyum, germanyum ve galyum arsenik gibi kristaller ise yarıiletkenlere örnek verilebilir. Yarıiletken olarak silisyum ve germanyum önemli ölçüde kullanılmış ancak zaman içinde silisyum kullanımı hakim olmuştur. Silisyumun doğada bol miktarda bulunmasının yanı sıra diğer önemli bir özelliği kristal yüzeyinde SiO<sub>2</sub> gibi tabii yalıtkan tabakanın elde edilebilmesidir. Silisyum dioksit kullanılarak Schottky diyotlar, kapasitörler, alan etkili transistörler, ve entegre devrelerin yapılması mümkün olmuştur [1]. Yarıiletkenlerin iletkenliği; genellikle sıcaklığa, aydınlatma şiddetine, elektrik alanına, manyetik alan ve safsızlık atomlarının yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Yarıiletkenlerin elektronikte kullanılması, katıhal fiziğinin 20. yüzyıl teknolojisine getirdiği belki de en büyük katkıdır.

Yarıiletken aygıtlarda kullanılan yarıiletken kristal yüzeyleri, genellikle laboratuvar ortamında organik kirler ve tabii oksit tabakalarıyla kaplı olurlar. Kimyasal olarak temizlenmiş yarıiletken yüzeylerde kaçınılmaz olarak oluşan tabii yalıtkan/oksit tabaka, yarıiletkenin temiz oda havasına maruz kalmasıyla ortaya çıkar [1,2]. Metal ile yarıiletken arasındaki bu yalıtkan tabakanın kalınlığı; kimyasal olarak

temizlenmiş numune üzerindeki kalıntı gazlara ve yarıiletken yüzeyin çevreye maruz kalma süresine bağlıdır.

Metal ile yarıiletken arasında doğal yolla yada deneysel olarak oluşturulan yalıtkan tabaka ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$  vb.), metali yarıiletkenden izole eder ve yapıyı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıya dönüştürür [3-10]. Kristalin temizlenmesi sırasında, kristal yapıdan kaynaklanan bir bozukluktan, termal işlemlerden ve oksidasyon işlemine bağlı olarak yarıiletken-yalıtkan ( $\text{Si/SiO}_2$ ) arayüzeyinde çok sayıda istenmeyen arayüzey durumları oluşur [11-13]. Card ve Rhoderick silisyum oksit arayüzeyinde arayüzey durumlarının yoğunluğunu değerlendirdiler [7].

Metal-yalıtkan-yarıiletken(MIS) yapılarda yalıtkan olarak silikon dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) kullanılır. Özellikle  $\text{SiO}_2$  seçilmesinin sebebi; silisyum üzerine kolay büyümesi ve ideal örgü sürekliliğine yakın bir eklem oluşturmastır. Yalıtkan  $\text{SiO}_2$  birçok yüzey etkilerini azaltarak eklem karakteristiklerinin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. Yalıtkan oksit tabakası büyütme için en çok kullanılan yöntem silisyum üzerine termal olarak  $\text{SiO}_2$  büyütülmesidir [14].

Yapılan araştırmalar x-ışını,  $\gamma$ -ışını ve elektron bombardımanı neticesinde  $\text{SiO}_2$  filminde pozitif bir uzay yük birikimi meydana geldiğini göstermiştir. Si üzerine termal olarak büyütülen oksit filmdeki deşik kusurların, safsızlıkların fiziksel ve kimyasal kaynağı ile  $\text{SiO}_2$ -Si arayüzeyine yerleşmiş arayüzey durumları birçok şekilde araştırılmıştır. Oksit yükleri ve arayüzey durumları metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıların ve entegre devrelerin elektriksel karakteristiklerini değiştirir. Radyasyon sırasında oksit içinde bulunan tuzaklar iyonize olur. Böylece elektron-deşik çiftleri meydana gelir. Daha sonra yapılan çalışmalar,  $\text{SiO}_2$ -Si sistemlerde radyasyon etkisiyle oksit yüklerin ve arayüzey durumların oluşması atomik modellerin ve üretim mekanizmaların keşfine büyük katkı sağlamıştır [15].

Bu çalışmada,  $\text{Al/SiO}_2/\text{p-Si}$  (MIS) yapının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümlerinin frekansa bağlı değişimini incelemek amacıyla ölçümler

oda sıcaklığında farklı frekanslar için yapıldı. MIS yapının seri direnç, arayüzey durumları gibi diğer karakteristikleri hesaplandı. Daha sonra MIS yapı üzerinde iyonlaştırıcı radyasyon etkisini incelemek amacıyla yapı farklı dozlarda radyasyona tabi tutularak aynı ölçüm ve hesaplamalar tekrarlandı.

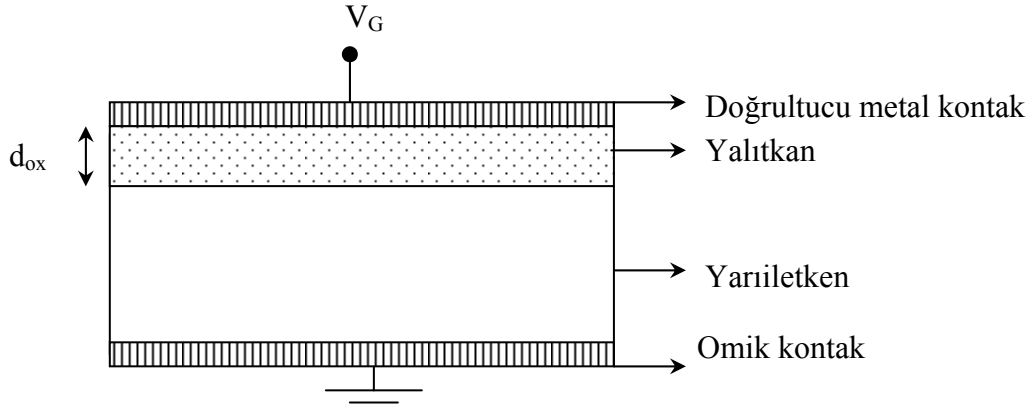
Bu tez çalışması aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. İkinci bölüm, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapının teorik bilgisini içermektedir. Üçüncü bölüm MIS yapı üzerindeki radyasyon etkilerini içermektedir. Dördüncü bölüm, numune hazırlama tekniği, deneysel sistem ve kullanılan araç ve gereçleri içermektedir. Beşinci bölüm, elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili grafikleri içermektedir. Altıncı bölüm ise elde edilen deneysel sonuçların tartışmasını içermektedir.



## 2. METAL-YALITKAN-YARIİLETKEN (MIS) YAPISI

Metal ile yarıiletken arasında doğal yolla ya da deneysel olarak oluşturulan yalıtkan bir oksit tabakası, metali yarıiletkenden izole eder ve yapıyı metal-yalıtkan-yarıiletken yapıya dönüştürür [3-10]. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken yapısı MIS olarak adlandırılır. Şekil 2.1’de MIS yapısı gösterilmiştir. Burada  $d_{ox}$  yalıtkan oksit tabakanın kalınlığı,  $\epsilon_{ox}$  yalıtkan oksit tabakanın dielektrik sabiti ve  $V_G$  metal plakaya uygulanan gerilimdir.  $V_G$  gerilimi, metal plaka omik kontakla göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir.

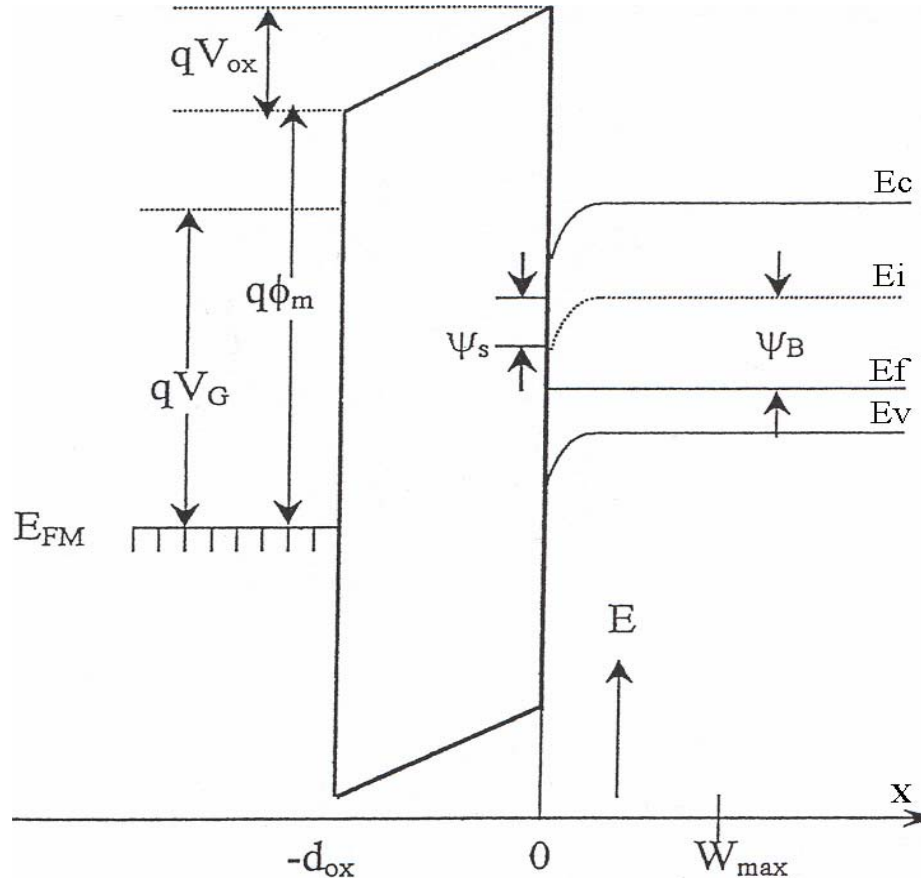
MIS yapılarda uygulanan doğru beslem geriliminin bir kısmı yarıiletken tüketim tabakasına düşerken bir kısmı da yalıtkan tabaka üzerine düşer ve  $V_G = V_{yi} + V_y$  şeklinde ifade edilir. Burada  $V_{yi}$ , uygulanan  $V_G$  geriliminin yarıiletken üzerine düşen kısmı,  $V_y$  ise yalıtkan üzerine düşen kısımdır. Bu yapının belirgin özellikleri yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir.



Şekil 2.1. Bir MIS yapının şematik gösterimi

### 2.1. İdeal MIS Yapısı

İdeal MIS yapının enerji-bant diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



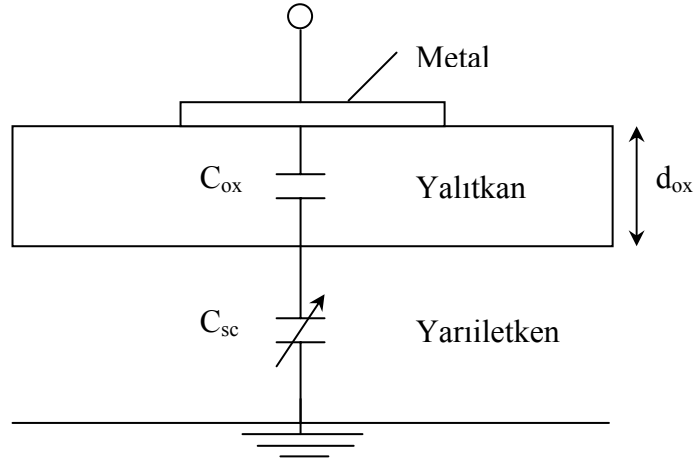
Şekil 2.2. MIS yapısının enerji bant şeması (p-tipi yarıiletken için)

İdeal bir MIS yapıda metal elektroda 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 yükü oluşur. Termal denge durumunda arayüzey bölgesindeki uzay yükü 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 bölgesini ya da arayüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturur. Uygulanan  $V_G$  gerilimi,

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

eşitliği ile yazılabilir. Bu ifadede  $V_{ox}$  yalıtkan oksit tabaka üzerine düşen gerilim,  $\psi_s$  arayüzeydeki bant gerilimidir.

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Bu kapasitans MIS kapasitansı olarak adlandırılır. Bu yapıların özelliklerini metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki yalıtkan ve yalıtkan–yarıiletken arayüzeyi belirler. Kapasitans arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MIS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MIS yapının kapasitansı  $C$ , yalıtkan oksit tabakanın kapasitansı  $C_{ox}$  ve uzay yükü kapasitansı  $C_{sc}$  olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer kapasitansları bize MIS kapasitansını verecektir.



Şekil 2.3. MIS kapasitansının eşdeğer devresi

Şekil 2.3’deki eşdeğer devrenin çözümünde MIS kapasitansı aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (2.2)$$

Bu sonuca göre MIS yapısının eşdeğer kapasitansı,  $C_{sc}$  ve  $C_{ox}$  kapasitanslarının seri bağlanmasına eşdeğerdir. Yalıtkan oksit tabaka kapasitansı  $C_{ox}$  ise,

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (2.3)$$

olarak verilir. Bağlantıda  $\varepsilon_{ox}$  yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti,  $d_{ox}$  ise onun kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından  $C_{ox}$  değeri uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MIS yapısının kapasitansındaki değişimi sadece  $Q_{sc}$  uzay yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen Şekil 2.4’de gösterilen durumları p-tipi bir yarıiletken için tanımlayalım [8,16-18].

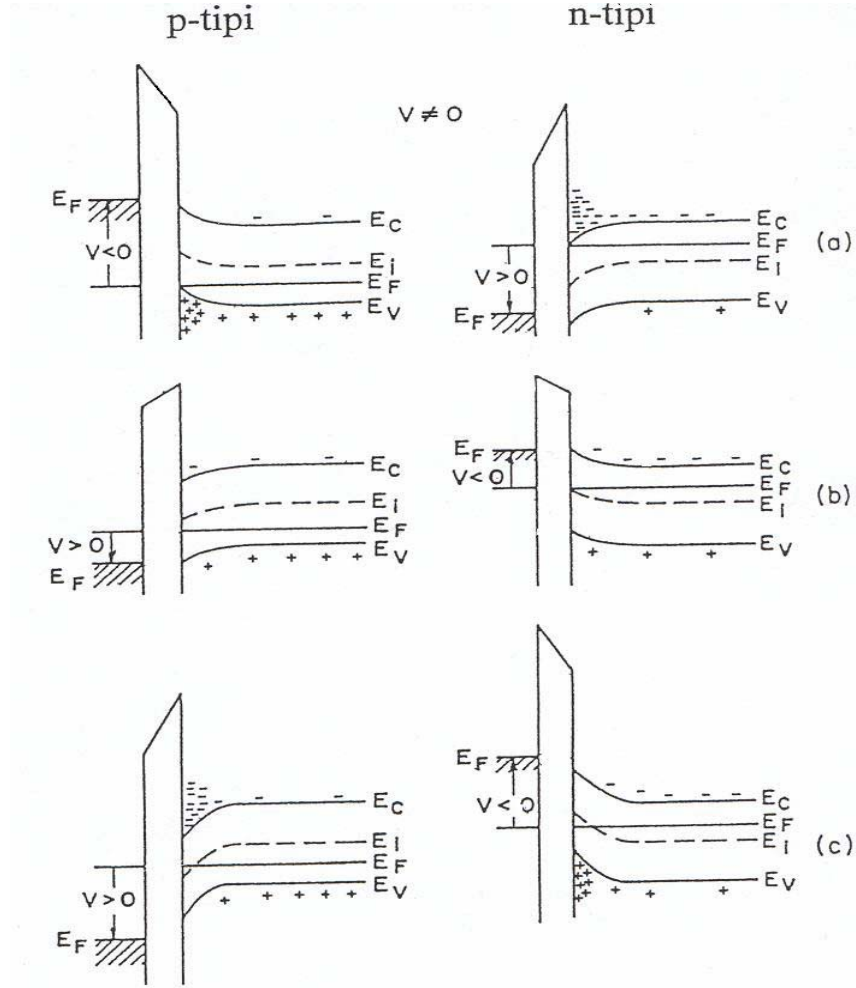
### 2.1.1. Yığılım

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

### 2.1.2. 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 2.4.b).



Şekil 2.4.  $V \neq 0$  durumunda MIS yapının enerji-bant şeması. a) Yığılım  
b) Tükenim c) Tersinim

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 bölgesinin kalınlığı aşağıdaki eşitlikle verilir:

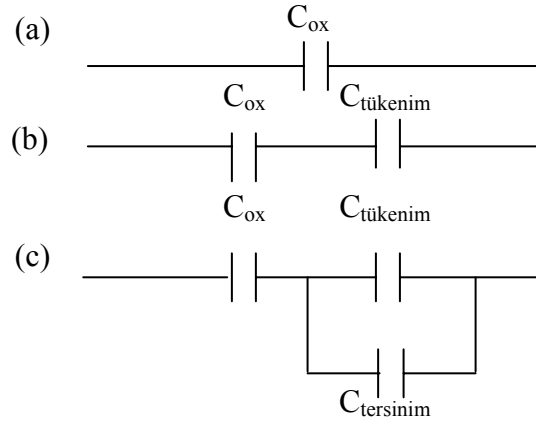
$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.4)$$

Burada  $\varepsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabitidir. Bu bölgede MIS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler.

### 2.1.3. 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 durumun enerji bant şeması Şekil (2.4.c)'de 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 oksit kapasitansının değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür. Yüksek frekanslarda ise takip edemez ve kapasitans  $C_{min}$  'da kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse kapasitans  $C_{min}$  'un altında değerler alır.

İdeal bir durumda yükler yarıiletkende ve yalıtkana yakın olan metal yüzeyinde bulunur. D.c. gerilim altında yalıtkan içinden hiçbir akım geçmez. Bir MIS yapıda üç yük sistemi için devre şeması Şekil 2.5'deki gibidir [8]. Bu sistemler; yığılım, yığılım, tükenim ve tersinim adını alır.



Şekil 2.5. İdeal bir MIS yapının elektronik şeması. a) Yığılım b) Tükenim  
c) Tersinim

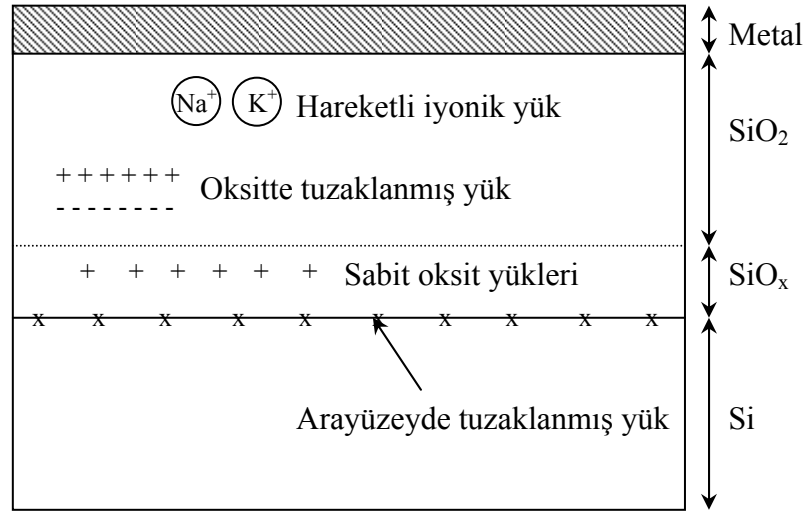
## 2.2. MIS Yapılarda İdeal Durumdan Sapmalar

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 yapısının özelliklerini değiştirmekte, böylece MIS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına sebep olmaktadır [19]. MIS yapısında birçok durumlar ve yükler mevcuttur. Bu durumların ve yüklerin sınıflandırılması Şekil 2.6'da gösterilmiştir [8].

### 2.2.1. Arayüzey durumları

Arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen oksit-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Bir arayüzey durumu verici veya alıcı tipinde olabilir. Bir verici arayüzey tuzağı(seviyesi) dolu ise nötr ve bir elektron vermesiyle pozitif yüklü olur. Bir alıcı arayüzey tuzağı boş ise nötr ve bir elektron almasıyla negatif yüklü olur. Bir gerilim

uygulandığı zaman, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi geride sabit kalırken valans ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzakları iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla meydana gelir. Bu yükün değişimi MIS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MIS eğrisini değiştirir. Arayüzey durumları genelde arayüzeye çok yakın bulunurlar. Arayüzey durumları uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisinde bulunurlar.



Şekil 2.6. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

### 2.2.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit oksit yükleri sabittir. Bu yükler yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuşlardır. 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. 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, C-V eğrisinin ileri pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri sebep olurlar [8,20]. 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.

### **2.2.3. Hareketli iyonik yük**

Oksit yükünün bir başka türü hareketli iyonik yüküdür. Bu yüke çoğunlukla, sodyum veya potasyum gibi iyonize olmuş alkali metal atomları sebep olur. Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde yada yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde lokalize olmuşlardır. Böyle iyonlar nisbeten düşük sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. 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 [21]. 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 yalıtkan içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alan altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

### **2.2.4. Oksitte tuzaklanmış yük**

Kimyasal yapı bozukluklarından bu tuzaklar yalıtkan tabaka içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Bir yalıtkan tabakada elektron-deşik çiftleri meydana gelmişse (iyonlaştırıcı radyasyon ile) bu elektron ve deşiklerin bir kısmı sonradan oksitte tuzaklanabilir. Yapının üretiminde ortaya çıkan elektron ve deşik tuzakları daha sonradan tavlamayla kaldırılabilir. Oksitte tuzaklanmış yük, yalıtkan doğru dağıldığından genellikle yalıtkan-yarıiletken yüzeye yerleşmezler [21].

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 farklılıklar meydana gelir [22]. Kapasitans-voltaj eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı yalıtkan içindeki tuzakların miktarını verir.

### 2.3. MIS Yapılarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi

Bir MIS yapıda arayüzey tuzaklar ve oksit yüklerinin varlığı ideal MIS karakteristiklerini etkileyecektir. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açar. Bir MIS yapılışı sırasında silisyum yüzeyi ne kadar temizlense de giderilemeyen yarıiletken örgünün son bulduğu kristal yüzeyindeki düzensizlikler sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Bu seviyelere yüzey durumları adı verilir [8,17].

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 [8]. Yüzey durumları yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yavaş yüzey durumları yalıtkanın metal tarafındaki yüzeyinde bulunur. Bunlar oksit yapısındaki hareketsiz yükler ihtiva eden bozukluklar ile yeterli sıcaklıklarda ve özellikle yüksek elektrik alan altında oksit içerisinde göç etmeye yatkın, hareketli iyonlar tarafından meydana getirilir. Yavaş yüzey durumları termal oksidasyon ile hemen hemen giderilebilir. Yavaş yüzey durumları MIS kapasitesini etkilemez.

Hızlı yüzey durumları yalıtkanla yarıiletken arayüzeyi yakınında yer alır ve yasak enerji bölgesinin ortasına yakın enerjilere sahiptir. Dolayısıyla bant bükülmesi ile yani yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da bükülmeyen Fermi seviyesine göre aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alışverişi yapar.

Tuzaklanmış arayüzey yükleri, yarıiletken-yalıtkan oksit arayüzeyinde, yarıiletkenin yasak enerji bant aralığındaki enerji durumlarına sahip ve kısa bir sürede

silisyumdaki iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alış verişı 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,

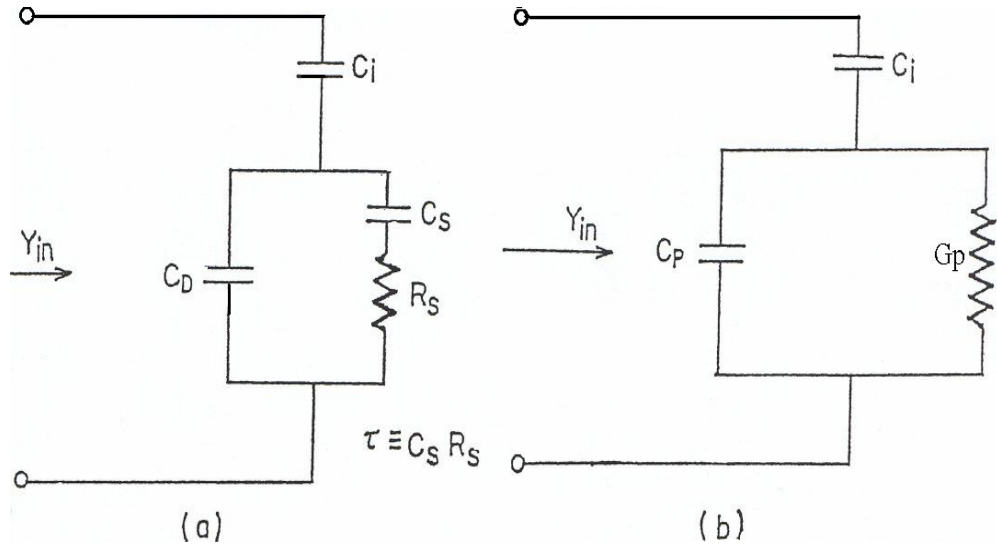
$$f_{SD}(E_t) = \frac{1}{1 + g \exp(\frac{E_F - E_t}{kT})} \quad (2.5)$$

ve alıcı arayüzey tuzaklar için ise,

$$f_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp(\frac{E_t - E_F}{kT})} \quad (2.6)$$

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 [23].

Bir beslem altında arayüzey tuzak seviyeleri valans veya iletkenlik bantları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar yukarı veya aşağı hareket eder. Bu değışme MOS kapasitesinde ve ideal eğrisinde değışmeye sebep olur. Arayüzey tuzaklarının etkisini kapsayan eşdeğer devre Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre

Burada  $C_i$  ve  $C_D$  sırası ile oksit(yalıtkan) kapasitans ve yarıiletken tükenim tabaka kapasitansdır.  $C_s R_s$  çarpanı arayüzey tuzaklarının ömrü( $\tau$ ) olarak tanımlanmış ve bu arayüzey tuzaklarının davranışını belirler. Şekil 2.7.a'nın paralel kolu, Şekil 2.7.b'deki gibi frekans bağımlı kapasitans  $C_p$  ve ona paralel bağlı frekans bağımlı iletkenlik  $G_p$  şeklinde yazılabildiği gösterilebilir. Paralel koldaki admittans,

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_s + \frac{1}{j\omega C_s}} = G_p + j\omega C_p \quad (2.7)$$

şeklindedir. Burada iletkenlik  $G_p$  ve kapasitans  $C_p$ ,

$$G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{C_s \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.8a)$$

$$C_p = C_D + \frac{C_s}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.8b)$$

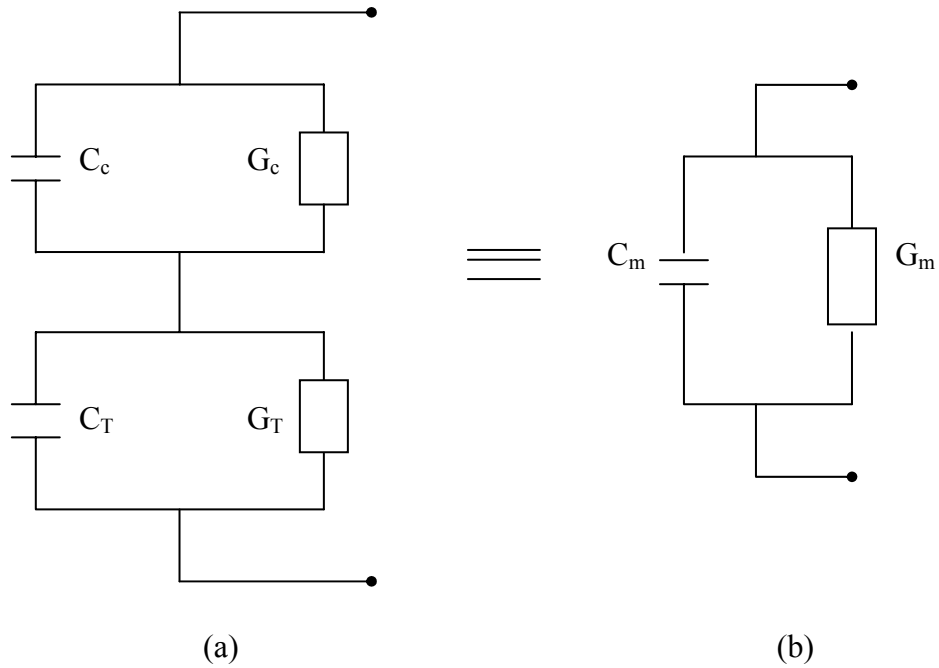
eşitlikleri ile verilir. Toplam empedans  $Z$  ise,

$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j\left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}\right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (2.9)$$

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

$$Y_{top} = \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p}\right) + j\omega\left(\frac{(G_p^2 + \omega^2 C_p^2)C_i}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p}\right) = G_{in} + j\omega C_{in} \quad (2.10)$$

eşitliği elde edilir [8,24]. Eğer seri direnç varsa ve büyükse, ölçülen iletkenlik  $G_m$  ve kapasitans  $C_m$  gerçek değerler değildir [25].



Şekil 2.8. MIS yapının eşdeğer devresi

Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c} \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \quad Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (2.11)$$

şeklindedir.

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

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

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_c + G_c = \left( \frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \right)^{-1}$$
$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \quad (2.12)$$

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

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.13)$$

elde edilir. Burada seri direnç  $R_s$ , Şekil 2.8.b'deki devrenin empedansı  $Z$ ' nin reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli yığılımdaki  $C_m$  ve  $G_m$  değerlerinden hesaplanabilir [20].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.14)$$

den,

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.15)$$

elde edilir. Eş. 2.12'in düzenlenmiş şeklinin imajiner kısmı yani düzeltilmiş kapasitans,

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.16)$$

şeklindedir. Eş. 2.13 ve Eş. 2.16 denklemlerini yeniden düzenlersek [20],

$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.17a)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.17b)$$

elde edilir. Burada,

$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s \quad (2.18)$$

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

Arayüzey durum yoğunluklarını hesaplamamanın en iyi ve en güvenilir yöntemlerinden ikisi kapasitans ve iletkenlik metodudur.

### 2.3.1. Kapasitans metodu

Tuzaklanmış arayüzey yüklerinden dolayı C-V eğrisinde genişleme meydana gelir. Beslem altında arayüzey tuzaklarının etkisiyle ideal MIS eğrisi gerilim eksenini boyunca kayar. Yüksek frekanslarda ( $\omega\tau \gg 1$ ) arayüzey tuzaklar C-V eğrisini etkilemez ve uygulanan gerilimin bir kısmı yalıtkan diğer kısmı da silisyum üzerine düşer.

Kapasitans metodunda, değişik yollarla şöyle hesaplanır: Birincisi, teorik yüzey yük kapasitansı  $C_{sc}$  ve düşük frekans paralel kapasitansı  $C_{LFP}$  deneysel değerleri kullanılarak arayüzey durum yoğunlukları hesaplanabilir.

$$N_{ss} = \frac{(C_{LFP} - C_{sc})}{qA} \quad (2.19)$$

İkinci yöntem ise düşük frekans  $C_{LF}$  ve yüksek frekans  $C_{HF}$  deneysel değerleri kullanılarak  $N_{ss}$ 'ler hesaplanabilir [25,26].

$$N_{ss} = D_{it} = \frac{C_{ox}}{qA} \left( \frac{C_{LF}}{C_{ox} - C_{HF}} - \frac{C_{HF}}{C_{ox} - C_{LF}} \right) \quad (2.20)$$

Burada  $C_{ox}$ , oksit kapasitans olup yüksek frekans ve kuvvetli yığılımda sabit maksimum kapasitans olarak kolaylıkla,

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_o \epsilon_{ox} A}{d_{ox}} \quad (2.21)$$

denkleminde bulunabilir. Burada  $\epsilon_{ox}$  yalıtkan oksit tabakanın dielektrik sabiti,  $\epsilon_o$  ise boşluğun geçirgenliği ve A ise numunenin alanıdır.

### 2.3.2. İletkenlik metodu

Bu metotta frekans sabit bırakılıp kapasitans-gerilim ve iletkenlik-gerilim eğrileri elde edilir [26]. Bu metotla  $10^9 \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  ve daha düşük arayüzey tuzak yoğunlukları ölçülebilir. Bu metotta farklı frekanslarda metal elektroda uygulanan gerilimi değiştirmek suretiyle kapasitans(C) ve iletkenlik(G) değerleri elde edilir. Paralel kapasitans  $C_p$  ve paralel iletkenlik  $G_p$  aşağıdaki eşitliklerle verilir [10].



$$\frac{C_p}{C_{ox}} = \frac{1 - \frac{C}{C_{ox}}}{\left(1 - \frac{C}{C_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{G}{\omega C_{ox}}\right)^2} - 1 \quad (2.22)$$

$$\frac{G_p}{\omega C_{ox}} = \frac{\frac{G}{\omega C_{ox}}}{\left(1 - \frac{C}{C_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{G}{\omega C_{ox}}\right)^2} \quad (2.23)$$

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

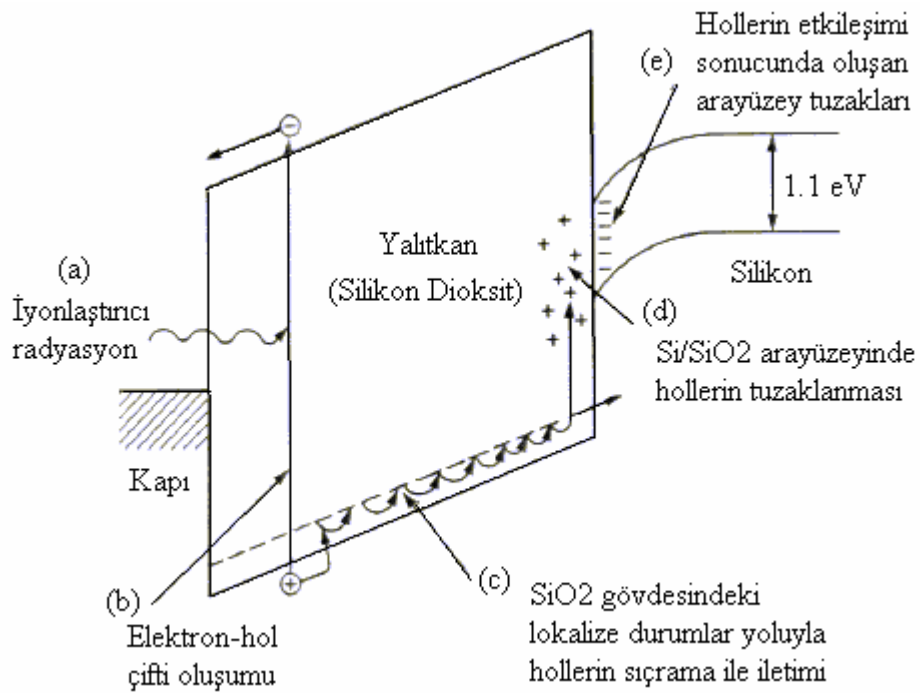
$$N_{ss} = \frac{C_{ox}}{qA_{ox}} \left( \frac{G_p}{\omega C_{ox}} \right) f_N(\sigma_g) \quad (2.24)$$

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

### 3. RADYASYONUN MIS YAPI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

#### 3.1. MIS Yapılarda Radyasyon Etkileri

Metal-yalıtkan-yarıiletken(MIS) yapılarda iyonlaştırıcı radyasyona en duyarlı kısım silikon dioksittir( $\text{SiO}_2$ ). MIS yapıda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumlar Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. MIS yapıda iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle oluşan durumların şematik gösterimi

MIS yapıya iyonlaştırıcı bir parçacık geldiğinde elektron-deşik çiftleri oluşur (durum:a). Materyal küçük dirençli olduğunda kapıdaki (metal) elektron-deşik çiftleri hızlı bir şekilde kaybolur. Oksit içindeki tamamen farklı büyüklükteki mobilitelere sahip olan elektronlar ve deşikler farklı davranışlar gösterirler [27]. Radyasyon etkisi ile oluşan elektron-deşik çiftlerinin bir kısmı oluşturulduktan sonra tekrar birleşirler. Birleşmeyen elektron-deşik çiftleri oksit içindeki elektrik alan etkisiyle birbirinden ayrılırlar (durum:b). Örneğin girişe uygulanan bir pozitif ön gerilim durumunda elektronlar çok kısa bir sürede( $10^{-12}$  sn) girişe ulaşmalarına

rağmen deşikler  $\text{SiO}_2$ -Si arayüzeyine doğru hareket ederler (durum:c). Arayüzeye yakın fakat halen yalıtkan oksitte bir sabit pozitif yük verebilen deşiklerin bir kısmı da tuzaklanabilir (durum:d). İyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle yalıtkan(oksit)-yarıiletken( $\text{SiO}_2$ -Si) arayüzeyinde, arayüzey tuzakları oluşur (durum:e).

### 3.2. Radyasyon Etkisiyle Oluşan Tuzakların Teorisi

Yalıtkan oksit ( $\text{SiO}_2$ ) tabakada radyasyon etkisiyle (x-ışını,  $\gamma$ -ışını ve elektron bombardımanı) oluşan hasarlar kalıcıdır [28]. Bu hasarlar üç unsurdan oluşur:

- i) Yalıtkan oksit içinde tuzaklanmış yüklerin sayısındaki artma.
- ii) Yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde arayüzey tuzaklarının sayısındaki artma.
- iii) Yalıtkan oksit gövdesindeki tuzaklarının sayısındaki artma.

Radyasyon etkisiyle oluşan hasar, aygıt tarafından soğurulan enerji miktarı yada aygıt tarafından alınan radyasyon dozu ile doğrudan ilişkilidir [29]. Radyasyon etkisiyle oluşan elektronlar deşiklerden daha hareketlidir. Pozitif yüklü deşikler nispeten hareketsiz ve yalıtkan oksit içerisinde tuzaklanmış olabilir. Diğerleri, Si- $\text{SiO}_2$  arayüzeyinde hareket edebilirler ve burada arayüzey tuzakların oluşumuna neden olurlar. Gelen radyasyon, yarıiletkenin tükenim bölgesinde elektron-deşik çiftleri oluşumuna neden olur. Elektronlar arayüzeye doğru, deşikler ise tükenim bölgesindeki mevcut alan altındaki gövdeye doğru hareket ederler. Arayüzey yakınında biriken fazlalık elektronlar arayüzey potansiyelinde azalmaya ve kuvvetli tersinim altında yapının kapasitansında bir artışa sebep olurlar.

Bir a.c. sinyal frekansı MIS yapının girişine uygulandığında azınlık taşıyıcıları voltaj frekansına cevap veremez. Işınlama durumunda uzaklığın bir fonksiyonu olan yarıiletken potansiyeli  $\Psi_r$ , Poisson denkleminde elde edilir [28].

$$\frac{d^2\Psi_r}{dx^2} = -\frac{\rho_r(x)}{\varepsilon_s} \quad (3.1)$$

Burada,  $\varepsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik sabitidir ve  $\rho_r(x)$  radyasyon durumunda uzay yükün hacim yük yoğunluğu olup,

$$\rho_r(x) = q(N_D - N_A + p_r - n_r) \quad (3.2)$$

ile verilir. Burada  $N_D$  ve  $N_A$  sırasıyla birim hacimdeki verici ve alıcı atomların yoğunluğudur.  $\Psi_r$ ' nin herhangi bir değeri için elektron ve deşiklerin radyasyon altında kararlı durum konsantrasyonu,

$$n_r = (n_{p0} + \Delta n) \exp(\beta\Psi_r) \quad (3.3a)$$

$$p_r = (p_{p0} + \Delta n) \exp(-\beta\Psi_r) \quad (3.3b)$$

ile verilir [30]. Burada,  $\Delta n$ , radyasyon durumunda birim hacimde oluşan fazlalık elektron-deşik çiftleri olup,

$$\Delta n = g_0 \dot{D} \tau_r \quad (3.4)$$

ile verilir. Burada,  $g_0$  oluşan taşıyıcı için değişme oran faktörü (taşıyıcı/m<sup>3</sup>rad),  $\dot{D}$  gelen radyasyon doz oranı (rad/s) ve  $\tau_r$  radyasyonla oluşan taşıyıcıların yaşam süresidir. İyonlaştırıcı radyasyon taşıyıcıların yaşam süresini değiştirir. Radyasyon durumunda taşıyıcıların yaşam süresi,

$$\frac{\tau_r}{\tau} = \frac{n_{p0}}{n_{p0} + \Delta n} \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir [28]. Burada  $\tau$ , radyasyon yokken azınlık taşıyıcıların yaşam süresidir. Eş. 3.4 ve Eş. 3.5 denklemleri kullanılarak radyasyonla oluşan taşıyıcıların yaşam süresi,

$$\tau_r = \frac{-n_{p0} + \sqrt{n_{p0}^2 + 4g_0\dot{D}n_{p0}\tau}}{2g_0\dot{D}} \quad (3.6)$$

elde edilir.

Radyasyon durumunda yüzeydeki elektrik alan( $E_{sr}$ ),

$$E_{sr} = -\frac{\partial\Psi_r}{\partial x} \Big|_{x=0} = \pm \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} F(\beta\Psi_{sr}, \frac{n_{p0} + \Delta n}{p_{p0}}) \quad (3.7)$$

ile verilir. Burada,  $\Psi_{sr}$  yüzey potansiyelidir.  $L_D$  ise Debye uzunluğu olup,

$$L_D = \left[ \frac{kT\epsilon_s}{(p_{p0} + \Delta n)q^2} \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

ile verilir. Gauss kanununa göre  $E_{sr}$  elektrik alanının neden olduğu birim alandaki uzay yükü,

$$Q_{sr} = -\epsilon_s E_{sr} = \mp \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} \epsilon_s F(\beta\Psi_{sr}, \frac{n_{p0} + \Delta n}{p_{p0}}) \quad (3.9)$$

ile verilir. İyonlaştırıcı radyasyon, düz bant gerilimini değiştirir. Dolayısıyla arayüzey durum yükünde bir değişime ve sabit oksit yükünde bir artışa neden olur. Uygulanan gerilim (V), ışınlama durumunda yüzey potansiyeli( $\Psi_{sr}$ ) ile,

$$V = -\frac{Q_{sr}}{C_{ox}} + \Psi_{sr} + \Delta V_{FB} \quad (3.10)$$

ilişkilidir. Burada,  $\Delta V_{FB}$ , radyasyonun neden olduğu düz bant gerilimindeki değişme olup,

$$\Delta V_{FB} = \frac{q}{C_{ox}} (\Delta N_{it} - \Delta N_{ot}) \quad (3.11)$$

olarak yazılabilir. Burada,  $\Delta N_{it}$  ve  $\Delta N_{ot}$  sırasıyla, iyonlaştırıcı radyasyon altında birim alanda arayüzey durum ve oksit yük artışıdır.  $C_{ox}$ , yalıtkan oksit tabakasının kapasitansdır. Arayüzey tuzak yük yoğunluğunda ( $\Delta N_{it}$ ) radyasyon etkisiyle oluşan değişim,

$$\Delta N_{it} = k_g f_y D t_{ox} f_{it}(N_{it}) \quad (3.12)$$

olarak yazılabilir. Burada,  $k_g$  birim dozda oluşan elektron-deşik çiftlerinin sayısını,  $f_y$  tekrar birleştirmeden kaçan elektron-deşik çifti olasılığını,  $D$  enerjinin bir fonksiyonu olarak gelen radyasyon dozunu ve  $f_{it}(N_{it})$  radyasyon etkisiyle oluşan elektron-deşik çifti tarafından oluşturulan arayüzey tuzak yüklerinin sayısını gösterir.  $N_{it}$  yüzey potansiyelinin bir fonksiyonu olan arayüzey yükleri olup,

$$N_{it} = \int_{E_{VB}+q\Psi_s}^{E_{CB}} D_{it}(E_t) f(E_t) dE_t \quad (3.13)$$

ile verilir. Burada,  $D_{it}$  yasak enerji aralığına dağılan arayüzey durumlar,  $(E_{VB}+q\Psi_s)$  ve  $E_{CB}$  ise sırasıyla silikonun valans bandı kenarı ve iletkenlik bandı kenarı,  $f(E_t)$  Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur. Oksit tuzak yük yoğunluğu,

$$\Delta N_{ot} = F_H f_T \quad (3.14)$$

olarak yazılabilir. Burada,  $F_H$  yalıtkan oksit tabakasında oluşandeşiklerin toplam sayısı olup,

$$F_H(E_{ox}, E) = t_{ox} [k_g(E) f_y(E_{ox}, E) D] \quad (3.15)$$

ile verilir. Eş. 3.14'deki  $f_T$  yalıtkan oksit tabakasında tuzaklanmış deşikleri oluşturan radyasyonun kesri olup,

$$f_T = \sigma_{ht}(E_{ox}) \bar{N}_{ht} \Delta x \quad (3.16)$$

ile verilir. Burada,  $\sigma_{ht}$  yakalanan deşikler için deşik tuzaklarının lokal yalıtkan oksit alanı,  $\bar{N}_{ht}$  deşik tuzaklarının ortalama yoğunluğu,  $\Delta x$  deşik tuzak bölgesinin genişliği,  $t_{ox}$  yalıtkan oksit tabakasının kalınlığıdır.  $k_g(E)$  enerjinin bir fonksiyonu olan yük üretim katsayısı,  $f_y(E_{ox}, E)$  alana bağlı kesirli serbest yük,  $D$  radyasyon dozu,  $E$  iyonlaştırıcı radyasyonun enerjisi ve  $E_{ox}$  oksit bölgesindeki elektrik alanıdır.

Radyasyon durumunda elde edilen yüksek frekans kapasitansı [27],

$$C_{Dr} = C_{FB} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1 - \exp(-\beta \Psi_{sr})}{[\exp(-\beta \Psi_{sr}) + \beta \Psi_{sr} - 1]^{1/2}} \quad (3.17)$$

ile verilir. Burada,  $C_{FB}$  düz bant durumunda elde edilen kapasitansdır. Radyasyon durumunda aygıtın birim alandaki toplam kapasitansı,

$$C_r = \frac{C_{ox} C_{Dr}}{C_{ox} + C_{Dr}} \quad (3.18)$$

ile verilir [28].

## 4. DENEYSEL YÖNTEM

### 4.1. MIS Yapıların Hazırlanması

#### 4.1.1. Kristal temizleme

İdeale yakın bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapabilmek için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. Çünkü iyi temizlenmiş bir yarıiletken birçok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırır. Kullanılan kristal fabrikasyon olarak parlatılmış olduğundan mekanik temizleme yapılmadı. Ancak kristal üzerindeki organik ve ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemi ultrasonik banyoda yapıldı. MIS yapıları oluşturmak için (100) yüzey yönelimli, 8  $\Omega\text{cm}$  öz dirençli, 280  $\mu\text{m}$  kalınlıklı, 2" çaplı ve boron katkılı p-tipi Si tek kristal yapraklar kullanıldı. Kullanılan kristaller yurt dışından Crys.Tec. firmasından, fabrikasyon yöntemiyle bir yüzeyi parlatılmış olarak satın alınmıştır. Yaklaşık 50 mm çaplı p-tipi Si yapraklar bir elmas kesici yardımıyla dört eşit parçaya(çeyrek yaprak) bölündü. MIS yapı oluşturma nın en önemli adımlarından biri Si yaprakların üzerine homojen bir oksit tabakanın büyütülmesidir. Bundan dolayı üzerine yalıtkan oksit tabakası büyütülecek yüzeyin son derece temiz olması gerekir. Kimyasal temizleme için çeşitli metotlar kullanılabilir. Bu çalışmada silisyum tabakanın temizlenmesinde kullanılan kimyasal temizleme işlemi aşağıda verilmiştir.

Temizleme işleminde direnci yaklaşık 18 M $\Omega$  olan deiyonize su kullanıldı. Bu deiyonize su (saf su) Ro&Up Water Purification System ile elde edildi. Tüm kimyasal temizleme işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Öncelikle kristalleri tutmak için kullanılan cımbız v.b araç ve kaplar fırında yaklaşık 100  $^{\circ}\text{C}$  ısıtılarak sterilize edildi. Daha sonra hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), aseton ve ardından da deiyonize su ile iyice durulandı. Kristaller önce deiyonize su içerisinde ultrasonik olarak yaklaşık 10 dakika kadar yıkandı.

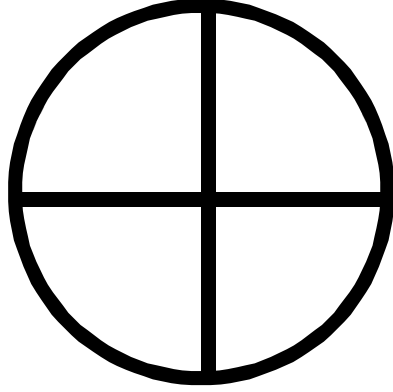


1. Kristaller sırasıyla 20 ml trikloretilen ( $C_2HCl_3$ ), 20 ml aseton ve 20 ml metil alkol ( $CH_3OH$ ) karışımı içerisinde üç dakika ultrasonik olarak temizlendi.
2. Kristaller deiyonize suda 5 dakika yıkandı.
3. 30 ml sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) ve 30 ml hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) karışımı içerisinde 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
4. Deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
5. 30 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 30 ml deiyonize su karışımı içerisinde 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
6. 30 ml nitrik asit ( $HNO_3$ ), 10 ml hidroflorik asit (HF) ve 50 ml hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) karışımında 5 dakika ultrasonik olarak temizlendi. Daha sonra deiyonize suda 5 dakika ultrasonik olarak yıkandı.
7. 40 ml %38 hidroflorik asit (HF) ve 50 ml deiyonize su karışımında 3 dakika ultrasonik olarak temizlendi.
8. Son olarak Si yapraklar deiyonize suda ultrasonik olarak 10 dakika temizlendi ve silisyum kristal yüzeyde oksitlenme olasılığını önlemek için kuru azot ( $N_2$ ) ile kurutulduktan sonra hemen vakum ortamına alındı.

#### 4.1.2. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si MIS yapının hazırlanması

MIS yapı hazırlanırken omik ve doğrultucu kontağın oluşturulmasında vakum buharlaştırma sistemi kullanıldı. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Omik kontaklar için Şekil 4.1’de gösterilen 50 mm çaplı bakır maske kullanıldı. Vakum sistemi ile elde edilen  $\approx 10^{-6}$  Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımı ile %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş alüminyum buharlaştırılarak Si yaprağın arka yani mat yüzeyine  $\sim 2500$  Å Al tabaka oluşturuldu.

Mat yüzeye saf alüminyum (Al) kaplama işleminden sonra aynı vakum ortamında 600 °C’de saf alüminyum (Al) silisyum içerisine difuze edildi.



Şekil 4.1. Omik kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske

Yalıtkan oksit tabakası büyütmenin birçok yöntemi vardır. Fakat bunlardan en çok kullanılan silikon üzerine termal olarak  $\text{SiO}_2$  büyütülmesidir. Kimyasal olarak temizlenen Si yaprakları üzerine yalıtkan oksit ( $\text{SiO}_2$ ) büyütme için en çok kullanılan yöntemlerden biri olan, fırında oksit büyütme yöntemi kullanıldı. Oksidasyon fırını  $650^\circ\text{C}$  sıcaklığa ayarlanarak ve numunenin bulunduğu ortamdan oksijen ( $\text{O}_2$ ) gazı bir saat süre ile geçirilerek yalıtkan oksit tabakası ( $\text{SiO}_2$ ) oluşturuldu.

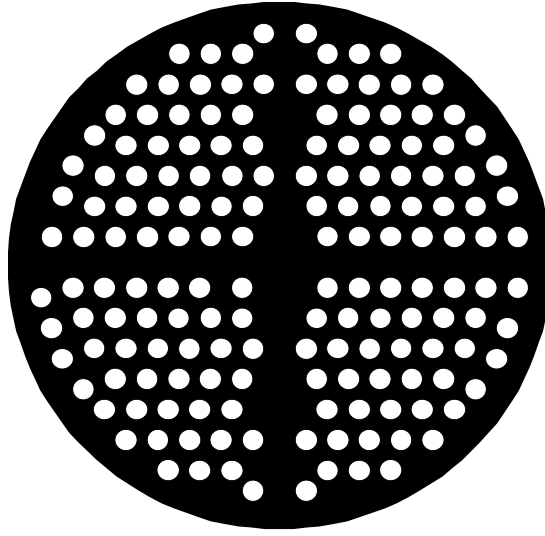
Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarda yalıtkan oksit tabaka büyütme işlemi ve alt-üst kontakların kimyasal temizleme işlemleri aşağıdaki şekilde yapıldı:

1. Yalıtkan oksit tabaka kalınlığı, kuartz tüpün içinden  $\sim 1.5$  lt/dak. hızın da kuru oksijen gazı( $\text{O}_2$ ) geçirilerek oluşturuldu. Oluşturulan yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı kapasitans-voltaj ölçümlerinde kuvvetli akümülyasyon durumundan ( $C \cong C_{\text{ox}}$ ) hesaplandı.

2. Silikon yaprakların ön yüzeyine "pozitif 20" spreyi sıkıldıktan sonra fırın ortamında  $75^\circ\text{C}$  'de 15 dakika süreyle kurutuldu. Sonra arka yüzeydeki yalıtkan oksit tabakası hidroflorik asit (HF) içinde  $\sim 5$  dakika süreyle yüzdürülerek kazındı ve Si yapraklar izopropil alkol ( $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ ) içinde  $\sim 10$  dakika süreyle

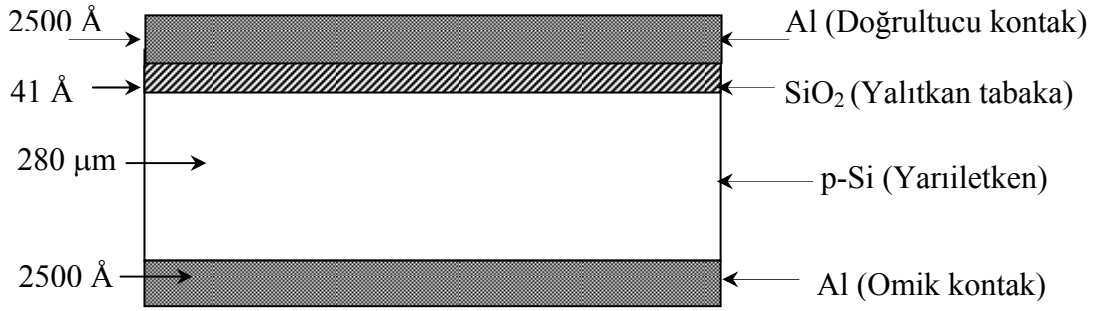
ultrasonik olarak temizlendi. Böylece sprej tamamen giderildi ve deiyonize suda 10 dakika süreyle durulandıktan sonra Si yapraklar kuru azot ( $N_2$ ) ile kurulandı.

3. Oksidasyon işlemi bittikten sonra Si yapraklar vakum sistemine yerleştirildi. Üzeri  $SiO_2$  kaplanmış yüzey üzeri çok sayıda 1mm çaplı delikler açılmış olan bakır maske (Şekil 4.2) üzerine parlak yüzey aşağı gelecek şekilde yerleştirildi.



Şekil 4.2. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan bakır maske

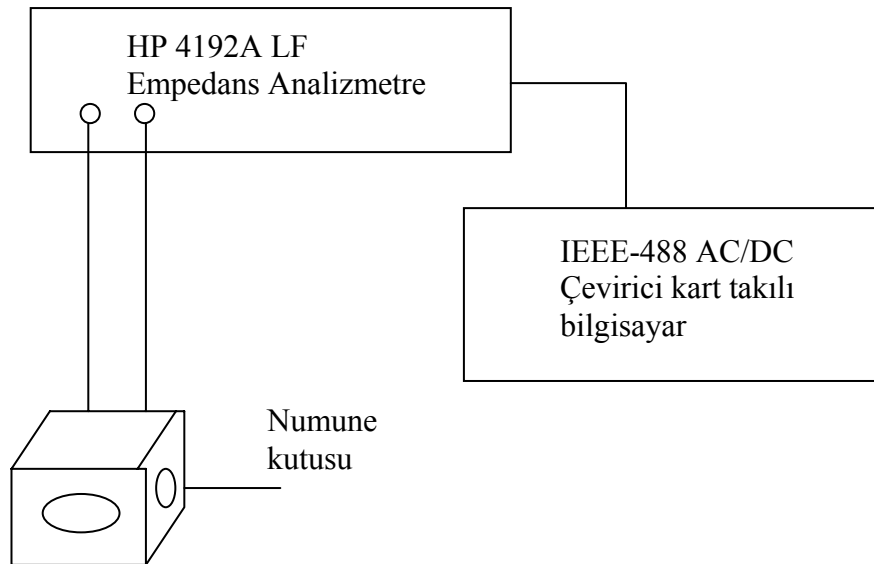
Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenen alüminyum( $Al$ ) metal parçası  $\sim 2 \times 10^{-6}$  Torr basınç altında buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (1mm çaplı) şeklinde ve  $\sim 2500$  Å kalınlığında alüminyum kaplanması sağlandı. Böylece doğrultucu kontağın da oluşturulmasıyla  $Al/SiO_2/p-Si$  şeklinde MIS yapılar elde edildi. Soğuması için bir süre bekletilen kristal vakum ortamından çıkartılarak her bir dairecik (diyot) ortada kalacak şekilde, elmas kesici yardımıyla eşit dört parçaya bölündü. MIS yapının hazırlanış şeması Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) yapının şematik gösterimi

#### 4.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Elektriksel karakterlerin ölçülmesi, Gazi Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Katıhal Laboratuvarında yapıldı. Kapasitans-voltaj(C-V) ve iletkenlik-voltaj( $G/\omega$ -V) ölçümlerinde Hawlett Packard 4192A LF Empedans Analizmetre (5Hz–13MHz) kullanıldı. Tüm bu ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj( $G/\omega$ -V) ölçümlerinin yapıldığı düzenek Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan düzenek

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

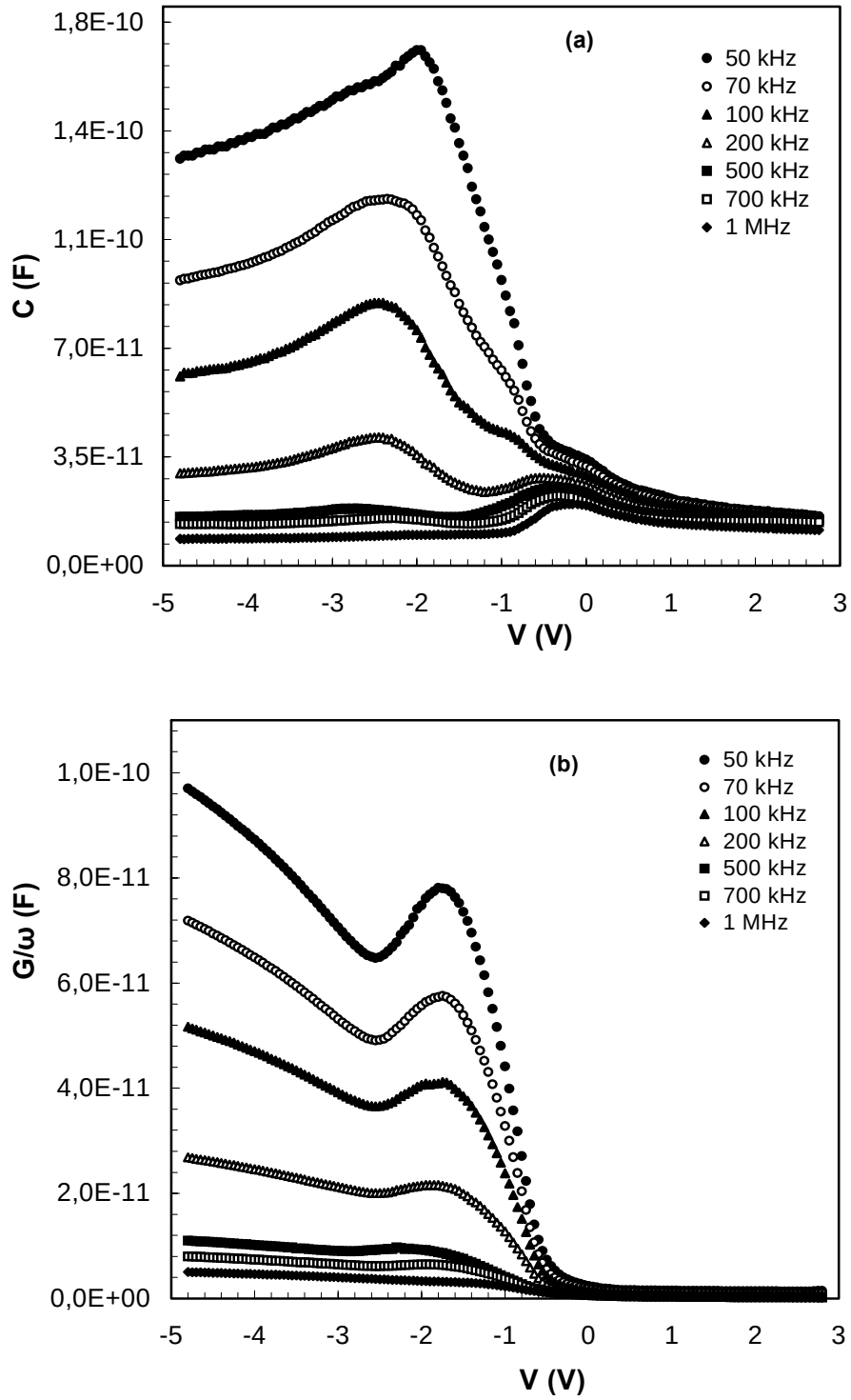
Hazırlanan Metal-Yalıtkan-Yarıiletken(MIS) yapının temel elektriksel özelliklerini belirlemek için oda sıcaklığında kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümleri frekansa bağlı olarak gerçekleştirildi. MIS yapının C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri negatif gerilimden yüksek pozitif gerilime geniş bir aralıkta ölçüldü. Yani, C-V ve  $G/\omega$ -V eğrileri kuvvetli tersinim bölgesinden kuvvetli yığılım bölgesine kadar elde edildi. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj 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.

Bu çalışmada yalıtkan oksit tabakasına( $\text{SiO}_2$ ) sahip  $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$  MIS yapının, oda sıcaklığında C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümlerinin frekansa bağlı değişimi geniş bir aralıkta incelendi. Bu MIS yapının radyasyona bağlı değişimini incelemek için C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri farklı radyasyon dozlarında (50, 200 ve 450 kGy) gerçekleştirildi. Deneysel C-V ve  $G/\omega$ -V ölçüm sonuçları kullanılarak yapının seri direnci ve arayüzey durum yoğunluğu uygulanan radyasyon dozuna bağlı olarak hesaplandı. Hem frekansa hem de radyasyona bağlı elde edilen sonuçların grafikleri aşağıda verildi.

### 5.1. Radyasyon Öncesi Ölçümler

#### 5.1.1. $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ (MIS) yapının C-V ve $G/\omega$ -V eğrileri

Yalıtkan oksit tabakasına sahip ( $41 \text{ \AA}$ )  $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{p-Si}$  MIS yapının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) ölçümleri oda sıcaklığında frekansa (100 Hz-1 MHz) bağlı elde edildi. Ölçümler, MIS yapı d.c. gerilimi altındayken, genliği d.c. gerilimden çok küçük olan (50 mV) bir a.c. uyarma sinyali uygulanarak gerçekleştirildi. MIS yapının C-V ve  $G/\omega$ -V eğrileri Şekil 5.1'de verildi. Şekil 5.1.a'dan görüldüğü gibi kapasitans değeri kuvvetli yığılımdan kuvvetli tersinim bölgesine doğru gittikçe azalmakta ve yığılım ile tükenim bölgesinde kapasitans değeri artan frekansla azalmaktadır [8,20,31,32].



Şekil 5.1. MIS yapı için farklı frekanslarda çizilen a) C-V ve b)  $G/\omega$ -V eğrileri

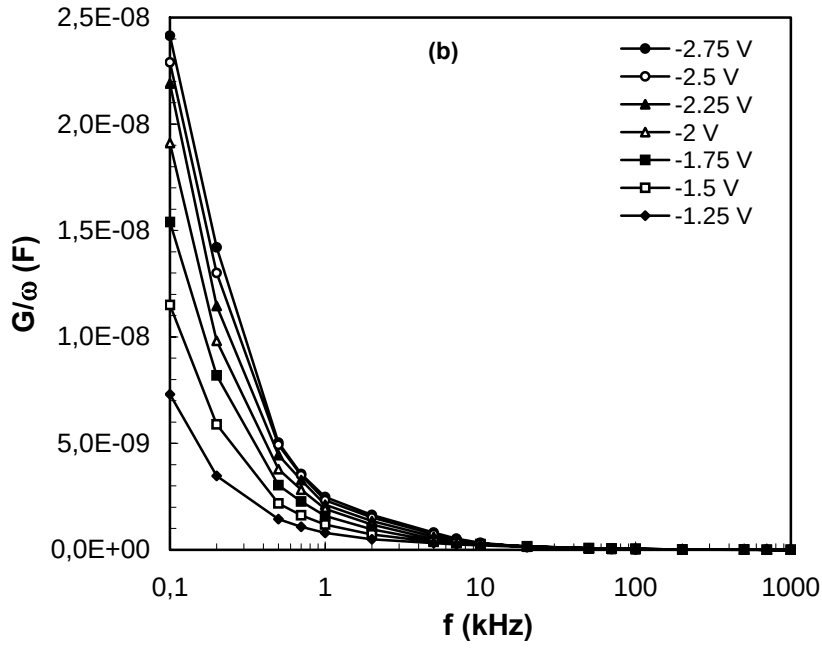
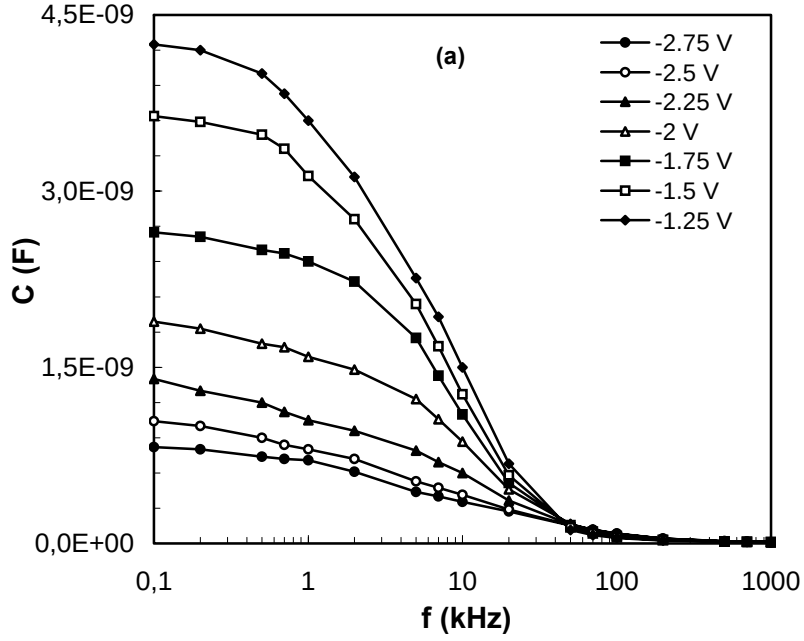
Şekil 5.1.b'den görüldüğü gibi iletkenlik değeri C-V eğrilerine benzer şekilde frekansa bağımlılık göstermektedir. Yani,  $G/\omega$ -V eğrilerinin değerleri artan frekansla

azalmaktadır. Düşük frekanslardaki iletkenlik-voltaj eğrileri daha uzun zaman sabitine sahip olduklarından arayüzey durumlarını takip edebilmekte ve yüksek frekanslarda ise zaman sabiti küçük olduğundan takip edememektedir [8].

C-V ve  $G/\omega$ -V eğrileri tükenim bölgesinde bir pik vermektedir. Bu davranış arayüzey durumlarının yalıtkan-yarıiletken( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) arayüzeyindeki özel bir dağılımına atfedilebilir [33,34]. Çünkü, yüksek frekans kapasitans-voltaj (C-V) eğrisinin sahip olduğu  $1/\omega$  yaşam süresi, taşıyıcının yaşam süresi( $\tau$ ) civarında yada daha küçükse arayüzey durumlarındaki taşıyıcı a.c. sinyali takip edemez. Bu nedenle yeteri kadar yüksek frekans( $\sim 1\text{MHz}$ ) bölgesinde arayüzey durumlarından dolayı kapasitansa gelen bir katkı yoktur ya da ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Böylece kapasitansa, yüksek frekanslarda olduğu gibi arayüzey durumlarından dolayı bir katkı gelmez ve eğriler ideal duruma yaklaşırlar. Bu durum, arayüzey durumlarının yüksek frekanslarda a.c. sinyali takip edememesi olarak belirtilir [35-38].

Arayüzey durumlarının etkisinin hemen hemen hiç olmadığı, yüksek frekans C-V eğrilerinin, kuvvetli yığılma bölgesindeki maksimum değerlerine karşılık gelen kapasitans değeri ( $C_{ox}$ ), yalıtkan oksit tabakasının kapasitansıdır [10,22]. Kapasitansın bu maksimum değeri( $C = C_{ox} = \epsilon'A/d$ ), yalıtkan oksit tabakası için dielektrik sabitinin teorik değeri( $\epsilon'_{\text{SiO}_2}=3,8\epsilon_0$ ) ve MIS alanı ( $A_{\text{SiO}_2}= 5,03.10^{-3} \text{ cm}^2$ ) kullanılarak metal ile yarıiletken arasında oluşturulan yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı hesaplandı.

Oda sıcaklığında farklı ters beslem gerilimleri için kapasitans ve iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren C-f ve  $G/\omega$ -f eğrileri sırasıyla Şekil 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.2.a'da görüldüğü gibi, maksimum kapasitans değerleri her gerilim değerinde artan frekansla sistematik bir şekilde azalmaktadır. Bu sonuç C-V karakteristiklerinin frekansa kuvvetlice bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.2. Farklı ters beslem gerilimleri için kapasitans ve iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren a) C-f ve b) G/ω-f eğrileri

Benzer davranış Şekil 5.2.b’de verilen iletkenlik-frekans (G/ω-f) eğrilerinde de gözlenmektedir. Yani her iki durumda da düşük frekanslardaki kapasitans-voltaj veya iletkenlik-voltaj eğrileri daha uzun zaman sabitine sahip olduklarından arayüzey



durumlarını takip edebilmekte ve yüksek frekanslarda ise zaman sabiti küçük olduğundan takip edemediğine bağlıdır [8].

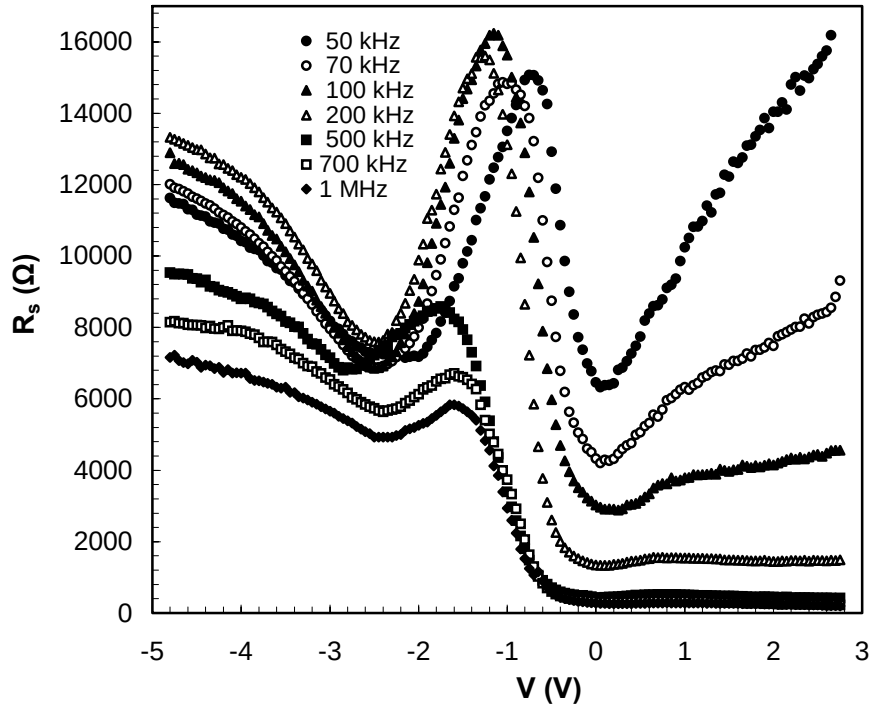
### 5.1.2. Seri direnç değerlerinin frekans ve gerilime bağlı incelenmesi

Her voltaj değerine karşılık gelen kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ $\omega$ -V) eğrilerinin kuvvetli yığılım bölgesindeki değerleri aşağıdaki eşitlikte yerine yazılarak her voltaj için seri direnç ( $R_s$ ) değerleri hesaplandı [20].

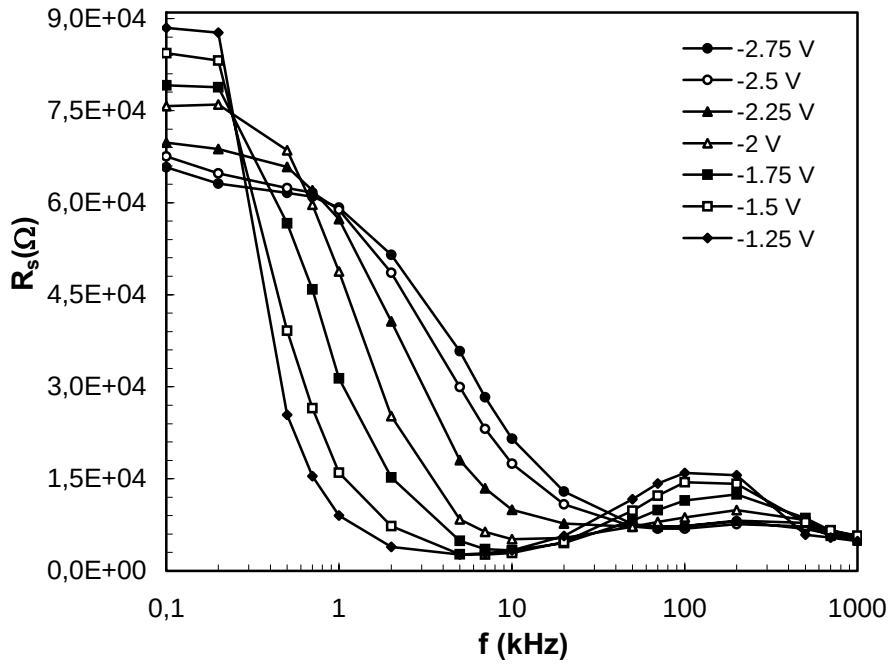
$$R_s = \frac{G_m}{(G_m^2 + C_m^2 \omega^2)} \quad (5.1)$$

Burada  $C_m$  ve  $G_m$  sırasıyla kuvvetli yığılım bölgesinde ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Örneğin, 1 MHz için kuvvetli yığılım bölgesindeki (+2,5 V)  $C_m=1,66 \times 10^{-11}$  F ve  $G_m=1,88 \times 10^{-13}$  F değerleri için  $R_s=220,49 \Omega$  olarak elde edildi. Bir yarıiletken aygıtın (diyot v.b.) gerçek seri direnç değeri yeterince ileri pozitif gerilimde elde edilen değerdir. Çünkü yarıiletken aygıtın seri direnci ileri pozitif gerilimlerde gerçek değerine ve ters gerilimlerde sonsuza gider. MIS yapı için bulunan  $R_s$  değerlerinin voltaja bağlı değişimi Şekil 5.3’de verildi. Şekilden de görüldüğü gibi seri direnç, arayüzey durumlarının etkili olduğu doğru beslem bölgesinde kapasitans ve iletkenlik eğrilerine benzer şekilde bir pik vermekte ve bu pik artan frekansla yığılım bölgesine doğru kaymaktadır. Bu piklerin meydana geldiği gerilim bölgelerinde arayüzey durumlarının daha yoğun şekilde yerleşmiş olduğuna atfedilebilir [33-38].

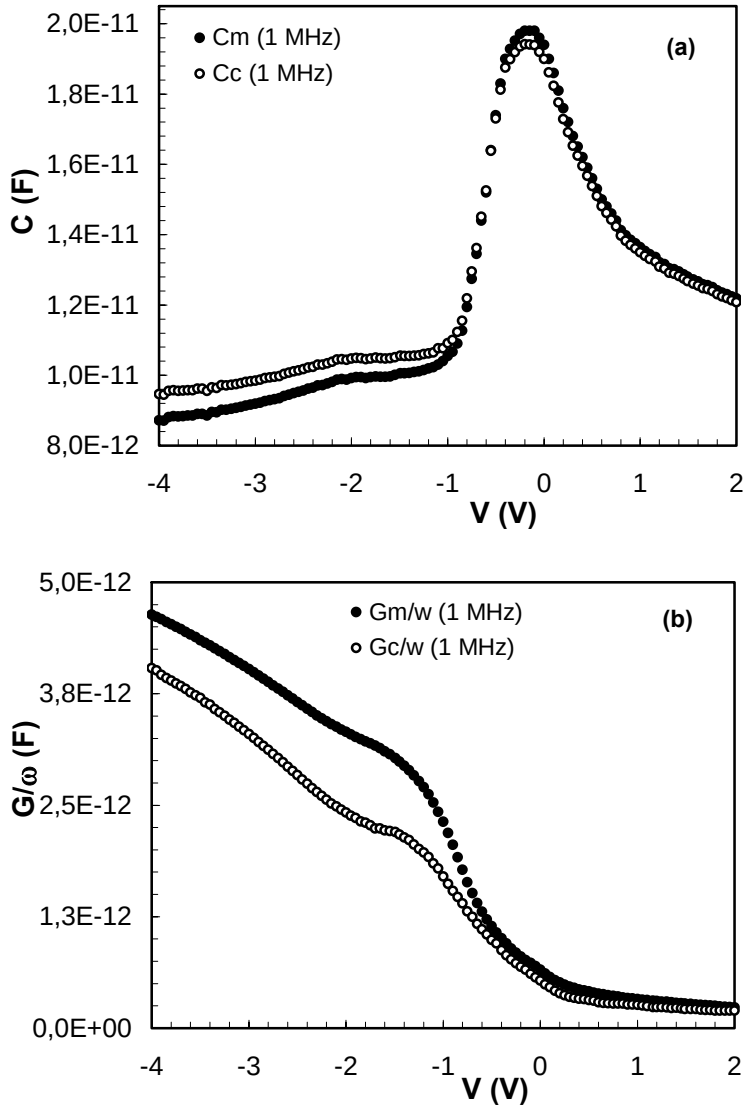
Tüm frekanslar için kuvvetli yığılım bölgesinde hesaplanan ve farklı ters beslem gerilimleri için seri direnç değerlerinin frekansa bağlı değişimi Şekil 5.4’de verildi. Şekilden görüldüğü gibi seri direnç değerleri her gerilim değerinde artan frekansla azalmakta ve düşük frekanslarda sabit hale gelmektedir [39]. Bu sonuç, arayüzey durumlarının düşük frekanslarda uygulanan a.c. sinyali tarafından takip edilebildiğini ve yüksek frekanslarda ise hiç takip edilemediğini göstermektedir. Ayrıca  $R_s$ -f eğrileri yüksek frekanslarda bir pik vermektedir.



Şekil 5.3. Farklı frekanslar için seri direncin voltaja bağlı  $R_s$ -V eğrileri



Şekil 5.4. Farklı ters beslem gerilimleri için seri direncin frekansa bağlı değişimini gösteren  $R_s$ -f eğrileri

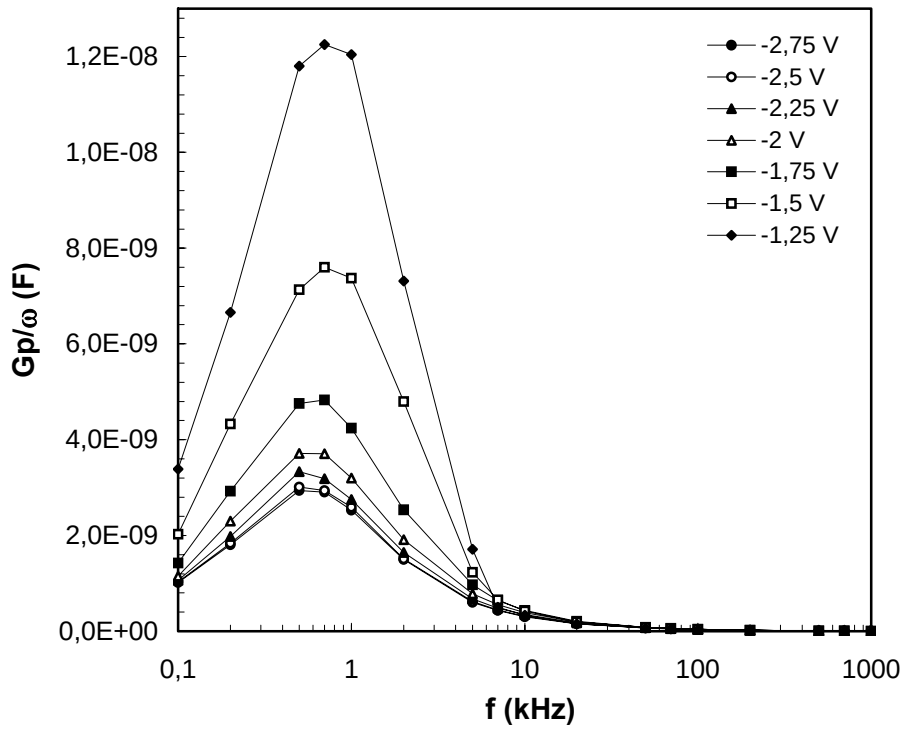


Şekil 5.5. Yüksek frekans (1 MHz) için düzeltilmiş kapasitans ve iletkenlik eğrilerinin voltaja bağlı a) C-V ve b)  $G/\omega$ -V eğrileri

Şekil 5.5'den görüldüğü gibi özellikle yüksek frekanslarda ölçülen kapasitans ( $C_m$ ) ve iletkenlik( $G_m/\omega$ ) değerleri hem tükenim hem de tersinim bölgesinde seri dirençten( $R_s$ ) oldukça etkilenmektedir. Bu yüzden, diyodun gerçek kapasitans ve iletkenliğini elde etmek için yüksek frekans kapasitans ölçümü sırasıyla Eş. 2.17.a ve Eş. 2.17.b kullanılarak seri direnç etkisi için doğru ve ters gerilim altında düzeltildi. Seri direnç etkisi için C-V ve  $G/\omega$  eğrileri düzeltildiği zaman Şekil 5.5.a ve Şekil 5.5.b'de görüldüğü gibi özellikle ters gerilim altında düzeltilmiş kapasitans ( $C_c$ ) ve iletkenlik ( $G_c/\omega$ ) değerleri değişmektedir.

### 5.1.3. Paralel iletkenlik-frekans ( $G_p/\omega$ -f) eğrileri

Paralel iletkenlik  $G_p$  veya  $G_p/\omega$ , frekans parametre iken gerilimin fonksiyonu olarak yada gerilim parametre iken frekansın fonksiyonu olarak farklı frekanslardaki C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümlerinden elde edilebilir [27]. Farklı gerilim değerleri için MIS yapının paralel iletkenlik( $G_p/\omega$ -f) karakteristikleri Şekil 5.6’de verildi.



Şekil 5.6. Farklı ters beslem gerilimleri için paralel iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren  $G_p/\omega$ -f eğrileri

Paralel iletkenlik, Şekil 5.1’de verilen C-V ve  $G/\omega$ -V eğrilerinden faydalanılarak aşağıdaki eşitlikten elde edildi [20,38].

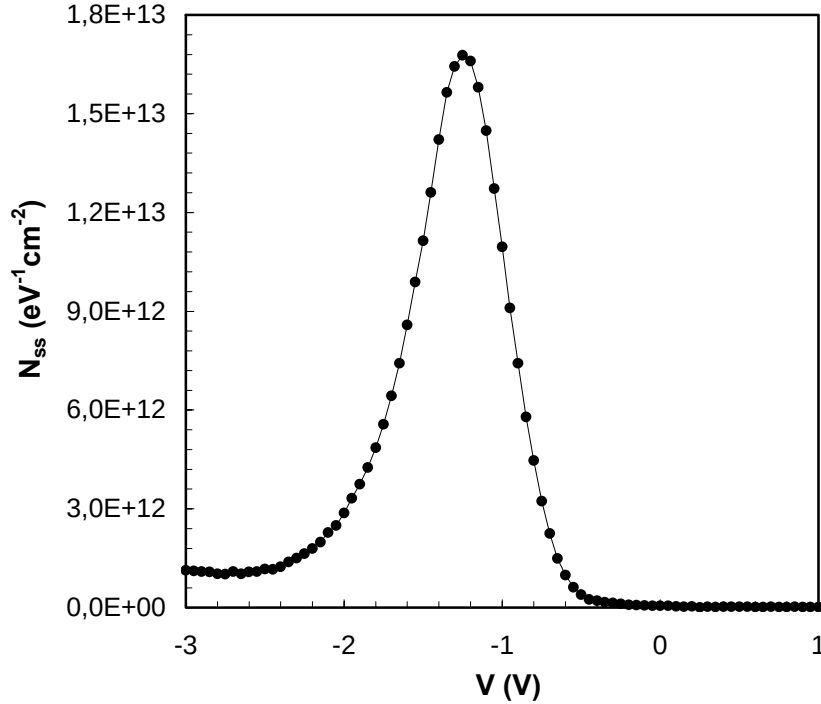
$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_{ox}^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad (5.2)$$

Burada  $C_m$  ve  $G_m$ , ölçülen kapasitans ve iletkenlik değerleridir. Şekil 5.6'de görüldüğü gibi  $G_p/\omega$ -f eğrileri her gerilim değerinde bir pik vermektedir [33]. Bu piklerin genişliği ise yüzey potansiyellerin dalgalanmalarına atfedilebilir [25,40].

#### 5.1.4. Arayüzey durum yoğunluğu

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapıda yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde arayüzey durumlarının büyüklüğü ve voltaja göre dağılım eğrisi düşük frekans(1 kHz)-yüksek frekans(1 MHz) ( $C_{LF}$ - $C_{HF}$ ) metoduna göre [10,36,37] aşağıdaki eşitlikten hesaplandı ve sonuçlar Şekil 5.7'da verildi.

$$N_{ss} = \frac{1}{qA} \left[ \left( \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{OX}} \right)^{-1} - \left( \frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{OX}} \right)^{-1} \right] \quad (5.3)$$



Şekil 5.7. Arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişim ( $N_{ss}$ -V) eğrisi

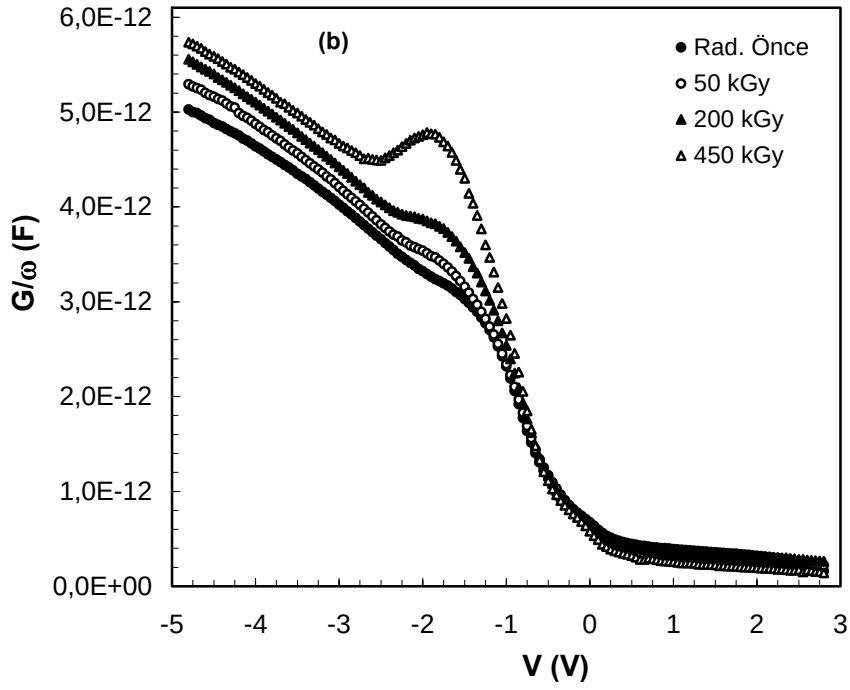
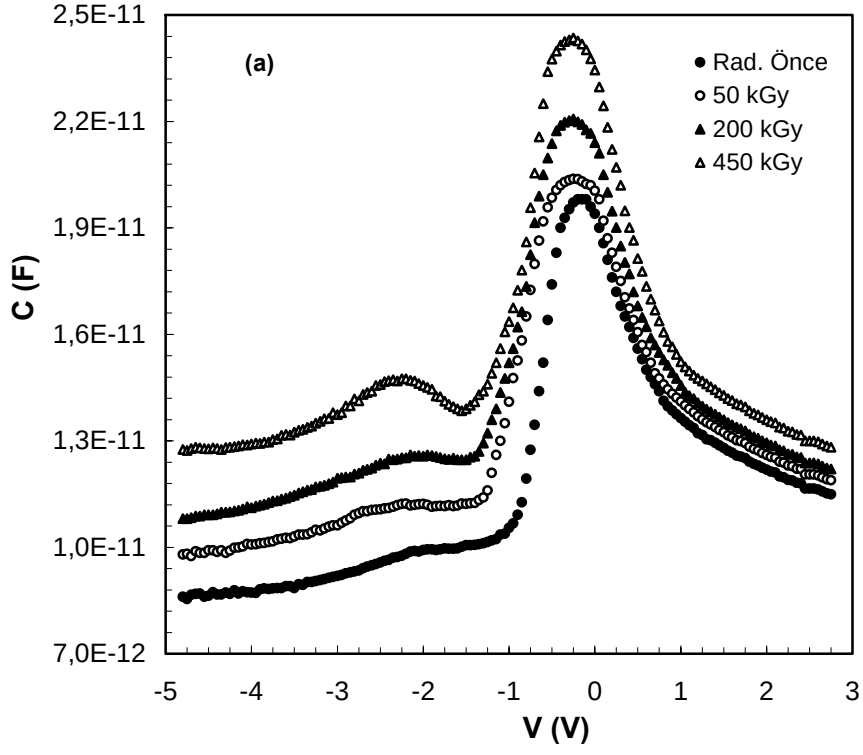
Literatüre göre  $f \geq 500$  kHz için arayüzey durumları a.c. sinyali takip edemez ve  $f \leq 100$  Hz’ de ise arayüzey durumlarının tümü a.c. sinyali takip edebilir. Bu nedenle düşük frekans olarak 1 kHz, yüksek frekans olarak da 1 MHz seçilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi arayüzey durum yoğunluklarının maksimum değeri yaklaşık  $10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  mertebesinde olup bir pikten geçmektedir. Yani arayüzey durumlarının yoğunluğu uygulanan gerilime bağlı olarak değişmektedir. Çünkü arayüzey durumları yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde özel bir dağılım profiline sahiptir. Bu arayüzey durumların mevcut olduğu bölgelerde, büyüklükleri ve yoğunlukları mertebesinde C-V veya  $G/\omega$ -V eğrileri bir pikten geçer.

## 5.2. Radyasyon Sonrası Ölçümler

Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) yapının C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri frekansa bağlı (100 Hz-1 MHz) ölçüldükten sonra yapı üzerinde iyonlaştırıcı radyasyon etkisini incelemek amacıyla yapı sırasıyla 50, 200, ve 450 kGy radyasyon dozlarına tabi tutuldu. Radyasyon kaynağı olarak 2,12 kGy/h doz oranına sahip <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -ışın kaynağı kullanıldı. Bu ölçümler oda sıcaklığında 1 kHz ve 1 MHz frekans değerleri için tekrarlanarak grafik ve sonuçlar kıyaslamalı olarak verildi.

### 5.2.1. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) eğrileri

MIS yapısı, farklı radyasyon dozlarına tabi tutulduktan sonra C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri her defasında farklı frekanslar için tekrar elde edildi. Radyasyona bağlı 1 MHz’de elde edilen C-V ve  $G/\omega$ -V eğrileri radyasyon öncesi eğrileriyle birlikte Şekil 5.8’de verildi. Şekilden görüldüğü gibi, kapasitans ve iletkenlik değerleri artan radyasyon dozuna bağlı olarak artmaktadır. Şekil 5.8’de verilen C-V ve  $G/\omega$ -V eğrileri arasındaki yarılmalarda artan radyasyon dozuna bağlı olarak değişmektedir. Literatürde benzer sonuçlar bir çok yazar tarafından gözlenmiştir [28,29,41-45]. Ayrıca hem C-V hem de  $G/\omega$ -V eğrileri tüm radyasyon değerlerinde yaklaşık -2 ve 0 volt civarında bir pik vermektedir.

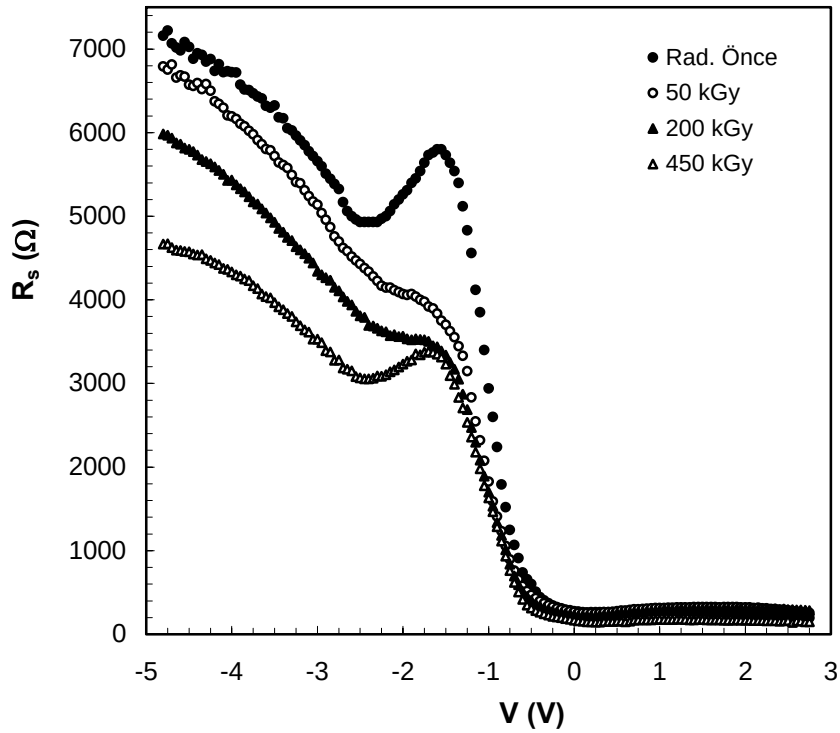


Şekil 5.8. MIS yapı için 1 MHz’ de farklı radyasyon değerleri için a) Kapasitans-voltaj (C-V) ve b) İletkenlik-voltaj ( $G/\omega$ -V) eğrileri

Radyasyon etkisiyle oluşan elektronlardeşiklerden daha hareketlidir. Pozitif yüklüdeşikler nispeten hareketsiz ve oksit içerisinde tuzaklanmış olabilir. Diğerleri, Si-SiO<sub>2</sub> arayüzeyinde hareket edebilirler ve burada arayüzey tuzakların oluşumuna neden olurlar. Radyasyon sonucunda bir taşıyıcı olan arayüzey durumları ya iyonize olmakta ya da tersine nötral olabilmektedirler. Radyasyon yarıiletkenin tükenim bölgesinde elektron-deşik çiftleri üretimine neden olur. Elektronlar arayüzeye doğru,deşikler ise tükenim bölgesindeki mevcut alan altındaki gövdeye doğru hareket ederler. Arayüzey yakınında biriken fazlalık elektronlar kuvvetli tersinim altında yapının kapasitans ve iletkenliğinde bir artışa sebep olurlar [28,29].

### 5.2.2. Radyasyona bağlı seri direnç-voltaj ( $R_s$ -V) eğrileri

Seri direnç değerleri numune radyasyona tabi tutulduktan sonra tekrar hesaplandı ve farklı radyasyon değerleri (50, 200 ve 450 kGy) için 1 MHz’ deki  $R_s$ -V eğrileri Şekil 5.9’de gösterilmiştir.



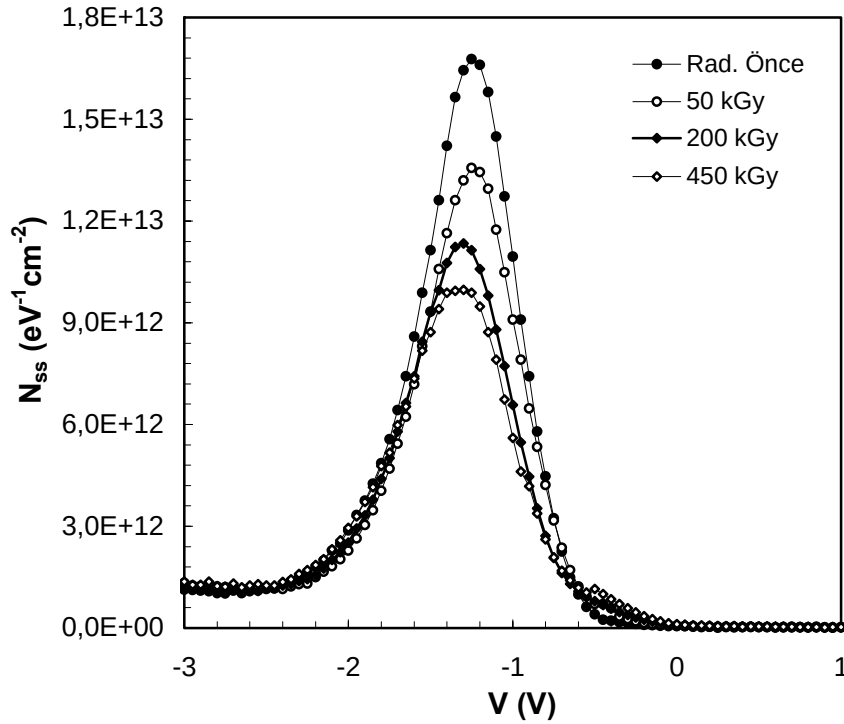
Şekil 5.9. MIS yapının 1MHz’de farklı radyasyon değerleri için seri direnç-voltaj ( $R_s$ -V) eğrileri



Yüksek frekanslarda C-V ve  $G/\omega$ -V eğrilerine arayüzey durumlarından kaynaklanan bir katkı gelmediğinden dolayı yeterince yüksek gerilim ve frekanslarda ( $f \geq 500$  kHz) ölçülen seri direnç değerleri oldukça güvenilir değerlerdir. Artan radyasyon dozuna bağlı olarak numunenin seri direnci azalmaktadır. 1 MHz’ de radyasyona bağlı elde edilen  $R_s$ -V eğrileri bir pik vermektedir. Çünkü bir elektronik aygıtın seri direnci ileri pozitif gerilimlerde(doğru beslem) gerçek değerine, negatif gerilimlerde(ters beslem) ise sonsuza gider [8,46,47]. Özellikle yığılım bölgesindeki  $R_s$  değerleri radyasyona bağlı daha hızlı değişmektedir.

### 5.2.3. Radyasyona bağlı arayüzey durum yoğunluğu

MIS yapının arayüzey durum yoğunluğu, radyasyonda önce ve sonra düşük-yüksek frekans kapasitans ölçümlerinden faydalanılarak Eş. 5.3’den elde edildi.



Şekil 5.10. MIS yapı için radyasyondan önce ve sonra arayüzey durum yoğunluğunun voltaja bağlı değişim ( $N_{ss}$ -V) eğrileri

Literatüre göre  $f \geq 500$  kHz için arayüzey durumları a.c. sinyali takip edemez ve  $f \leq 100$  Hz' de ise arayüzey durumlarının tümü a.c. sinyali takip edebilir. Arayüzey durum yoğunluğunun radyasyonda önce ve sonra voltaja bağlı değişim ( $N_{ss}-V$ ) eğrileri Şekil 5.10'da verildi. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi arayüzey durum yoğunluğunun maksimum değeri radyasyondan önce yaklaşık  $1,8 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  mertebesinde iken radyasyondan sonra yaklaşık  $1 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  mertebesine düşmüştür. Yani, uygulanan radyasyon dozuna bağlı olarak yapının arayüzey durum yoğunluğu azalmaktadır. Literatürde benzer sonuçlar bir çok yazar tarafından gözlenmiştir [48-51].

## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Hazırlanan metal–yalıtkan–yarıiletken (Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si) yapının kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri frekansa bağlı (100 Hz-1 MHz) yapıldıktan sonra radyasyonun temel yapı karakteristiklerine etkisini incelemek amacıyla yapı sırasıyla 50, 200 ve 450 kGray radyasyona tabi tutularak bu ölçümler farklı frekanslarda (1 kHz, 1 MHz ) tekrar gerçekleştirildi.

Hazırlanan MIS yapının farklı frekanslarda elde edilen C-V ve G/ω-V eğrileri sırasıyla Şekil 5.1.a ve Şekil 5.1.b’de verildi. Kapasitans ve iletkenlik değerleri her iki yapı için artan frekansla azalmaktadır. Bu eğrilerde gözlenen pik ve yarılmaların hem frekansa hem de uygulanan d.c. gerilime bağlılık göstermesinin sebebi arayüzey durumlarına atfedildi [8,34]. Düşük frekans bölgelerinde, arayüzey durumları a.c. sinyali takip edebildiğinden dolayı C-V ve G/ω-V değerlerine ilave bir katkı gelmektedir. Artan frekansla arayüzey durumlarının bu katkıları azalmakta ve yaklaşık  $f \geq 500$  kHz’ den sonra bu etki hemen hemen ortadan kalkmaktadır. Dolayısıyla numunenin gerçek elektriksel parametrelerini hesaplamak için C-V ve G/ω-V ölçümlerinin yüksek frekanslarda ( $f \geq 500$  kHz) yapılması daha güvenilir olacaktır [33,35,36,38]. C-V ve G/ω-V eğrilerinde görülen yarılmaların oluşmasında, hem uygulanan gerilimle yarıiletken yüzeyinde meydana gelen yığılm, tükenim, tersinim bölgelerindeki fiziksel olaylar hem de arayüzey durumları etkilidir. Çünkü arayüzey durumları metal-yarıiletken arayüzeyindeki yasak enerji aralığına dağılmış özel bir dağılıma sahiptirler.

Farklı ters beslem gerilimleri için kapasitans ve iletkenliğin frekansa bağlı değişimini gösteren C-f ve G/ω-f eğrileri sırasıyla Şekil 5.2.a ve Şekil 5.2.b’de verildi. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, kapasitans ve iletkenlik değerleri her gerilim değerinde artan frekansla sistematik bir şekilde azalmaktadır. Bu sonuç C-V ve G/ω-V karakteristiklerinin frekansa kuvvetlice bağlı olduğunu göstermektedir.

Hazırlanan MIS yapının C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümlerinin kuvvetli yığılım bölgesindeki sonuçları kullanılarak elde edilen seri direnç değerlerinin gerilim ve frekansa bağlı eğrileri sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de verildi. Şekil 5.3’de görüldüğü gibi gerilime bağlı seri direnç değerleri her frekansta bir pik değerinden geçmekte ve artan frekanslarda bu pik sola doğru kaymaktadır. Bu sonuç arayüzey durumlarının yasak enerji aralığında özel bir dağılıma sahip ve yeteri kadar büyük mertebede olduğunu göstermektedir. Şekil 5.4’de ise tüm frekanslar için kuvvetli yığılım bölgesinde hesaplanan seri direnç değerlerinin her gerilim değerinde artan frekansla azaldığı ve dolayısıyla seri direncin frekansa bağlı olduğu gözlemlendi. Düşük frekanslarda arayüzey durumlarının katkısından dolayı seri direnç gerçek değerinden oldukça yüksek çıkmaktadır. Çünkü yüksek frekanslarda çizilen C-V eğrilerinin süresi( $1/\omega$ ), taşıyıcının yaşam süresinden( $\tau$ ) küçükse arayüzey durumlarındaki taşıyıcı a.c. sinyali takip edemez. Ancak seri direncin azalan frekansla artması, arayüzey durumlarının düşük frekanslarda daha rahatlıkla a.c. sinyali takip edebilmesinden kaynaklanmaktadır. Benzer sonuçlar literatürde birçok araştırmacı tarafından da gözlemlenmiştir [8,39,46,47].

Şekil 5.6’de MIS yapı için Şekil 5.1’den elde edilen paralel iletkenlik( $G_p/\omega$ -f) karakteristikleri her gerilim değerinde bir pik vermektedir. Bu piklerin genişliği ise yüzey potansiyellerin dalgalanmalarına atfedilebilir [25,40].

Şekil 5.7’de düşük frekans( $C_{LF}$ )-yüksek frekans( $C_{HF}$ ) tekniğiyle hesaplanan arayüzey durumlarının voltaja bağlı dağılım grafiği verilmiştir. Yaklaşık -1 Volt civarında grafik keskin bir pik vermektedir. Bu bize arayüzey durumlarının -1 Volt civarında yoğunlaştıklarını göstermektedir. Yaklaşık  $10^{13} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  civarında bir yoğunluğa sahip arayüzey durumları MIS yapının bir çok fiziksel karakteristiğini önemli ölçüde etkilemektedir [8,33,34,36,38].

Hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) yapının C-V ve  $G/\omega$ -V ölçümleri radyasyondan önce frekansa bağlı incelendikten sonra aynı numune farklı dozlarda radyasyona tabi tutularak aynı ölçümler tekrarlanarak radyasyondan önce elde edilen değerleriyle

karşılaştırıldı. Uygulanan d.c. gerilim ve a.c. sinyalin frekansından sonra numunenin karakteristiklerinin radyasyona bağlı olarak da değiştiği gözlenmiştir.

Radyasyondan sonra 1 MHz' de elde edilen C-V ve G/ $\omega$ -V eğrileri radyasyondan önceki eğrileriyle birlikte Şekil 5.8.a ve Şekil 5.8.b'de verildi. Şekilden de görüldüğü gibi artan radyasyon miktarına bağlı olarak kapasitans ve iletkenlik değerleri artmaktadır. Radyasyon sonucunda bazı arayüzey durumları ya iyonize olmakta yada tersine nötral olabilmektedir [28,29,41-51]. Aynı olay yarıiletken yüzeyinde de gerçekleşeceğinden net etki bu iki etkinin toplamı olacaktır. Düşük frekanslar taşıyıcı ömürlerinden daha uzun bir periyoda sahip olduklarından, hem arayüzey durumlarının etkisi hem de yarıiletken taşıyıcıların etkisi düşük frekanslarda görülecektir. Yeterince yüksek frekanslarda ise arayüzey durumlarının etkisi gözlenmeyecektir.

Şekil 5.9'de görüldüğü gibi artan radyasyon dozuna bağlı olarak numunenin seri direnci azalmaktadır. 1 MHz' de radyasyona bağlı elde edilen seri direnç değerleri bir pik vermektedir. Benzer sonuçlar literatürde gözlenmiştir [38,39].

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi radyasyonda önce ve sonra düşük-yüksek frekans kapasitans ölçümlerinden elde edilen arayüzey durum yoğunluğunu yapıya uygulanan radyasyon dozuna bağlı olarak azalmakta ve keskin bir pik vermektedir [46-51].

Hazırlanan Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si yapısı için yapılan tüm deneysel ölçümler ve hesaplamalar göstermiştir ki bu ve benzeri kontak yapısına sahip aygıtlar için arayüzey durumlarının etkisi azımsanamayacak kadar büyüktür. Hiçbir zaman %100 saflıkta bir malzeme ve arayüzey durumsuz kontak oluşturulamayacağından bu tür aygıtlar seçilirken kullanım alanına göre özellikleri belirlenerek, arayüzey durumlarının burada incelenen voltaj, frekans ve radyasyona bağlılığı göz önünde bulundurulmalıdır. Aksi taktirde elde edilen sonuçların doğruluğundan ve güvenilirliğinden emin olunamaz. Ayrıca, bir MIS yapının elektriksel özelliklerini oldukça etkileyen diğer iki parametre olan yalıtkan oksit tabakası ve seri direncin

birkaç farklı yöntemle doğru olarak belirlenmesinde büyük yarar vardır. Örnek numuneler hazırlanırken pratikte hiçbir zaman seri direnci sıfır yapmak mümkün değildir. Ayrıca, gerek doğal olarak gerekse yapay olarak oluşturulan yalıtkan tabaka her zaman homojen yapılamayabilir ve dolayısıyla yalıtkan tabaka kalınlığı bölgeden bölgeye farklılık gösterebilir. Bu homojensizlikleri kaldırmak, arayüzey durum yoğunluklarını ve seri direnci azaltmak için yarıiletken kristallerin son derece temiz bir ortamda hazırlanması, kontakların yüksek vakum ortamında ( $10^{-8}$  Torr) oluşturulması ve numunenin alanının küçük tutulmasının önemi oldukça fazladır.

## KAYNAKLAR

1. Rhoderick, E. H. and Williams R. H., "Metal-Semiconductor Contacts 2<sup>nd</sup> ed.", **Oxford University Press**, Oxford, 257 (1988).
2. Fonash, S. J., "The role of the interfacial Layer in Metal-Semiconductor Solar Cells", **J. Appl. Phys.**, 46: 1286-1289 (1975).
3. Sing, A., Reinhard, K. C., Anderson, W. A., "Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions", **J. Appl. Phys.**, 68(7): 3475-3479 (1990).
4. Chattopadhyay, P., Daw, A. N., "On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor diode", **Solid State Electron.**, 29(5): 555-560 (1986).
5. Yu, A.Y.C., Snow, E. H., "Surface Effects on Metal-Silicon Contacts", **J. Appl. Phys.**, 39: 3008 (1968).
6. Depas, M., Van Meirhaegh, R. L., Laflere, W. H. and Cardon, F., "Electrical characteristics of Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation", **Solid State Electron.**, 37: 433-441 (1994).
7. Card, H. C., Rhoderick, E.H., "Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes", **J.Phys.D: Appl. Phys.**, 4:1589-1601 (1971).
8. Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices 2<sup>nd</sup> ed.", **John Wiley & Sons**, New York, 362-390 (1981).
9. Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu N., and Tataroğlu, A., "The role of interface states and series resistance on the I-V and C-V characteristics in Al/SnO<sub>2</sub> p-Si Schottky diodes", **Solid State Electron.**, 47(10): 1847-1854 (2003).
10. Goetzberger, A., Klausmann, E. and Schulz, M. J., "Interface states on semiconductor/insulator surfaces", **CRC Critical Reviews in Solid State Sciences**, 6(1): 226-233 (1976).
11. Crowell, C. R. and Sze, S. M., "Surface states and barrier height of metal semiconductor systems", **J. Appl. Phys.**, 36: 3212-3220 ( 1965).
12. Tung, R. T., "Electron transport at metal-semiconductor interfaces:General theory", **Phys. Rev. B.**, 45: 13509 (1992).
13. Rhoderick, E. H., "Metal-Semiconductor Contacts", **IEE Proc.**, 29 (1): 1-14 (1982).

14. Grove, A. S., Deal, B. E., Snow, E. H., Sah, C. T., "Investigation of thermally oxidized silicon surfaces metal-oxide-semiconductor structures", ***Solid-State Electronics***, 8(2): 145-163 (1965).
15. Sah, C. H., "Origin of interface states and oxide charges generated by ionizing radiation", ***IEEE Trans. Nucl. Sci.***, Ns-23(6): 1563-1568 (1976).
16. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 2<sup>nd</sup> ed.", **Mc Graw-Hill**, New York, 420-450, 517-523 (1997).
17. Grove, A. S., "Physics and Technology of Semiconductor Devices", **John Wiley & Sons**, New York, 91-106, 334-357 (1967).
18. Cooke, M. J., "Semiconductor Devices", **Prentice Hall**, New York, 294-308 (1990).
19. Ghandhi, S. K., "VLSI Fabrication Principles", **John Wiley & Sons**, New York, 401-405 (1983).
20. Nicollian, E. H. and Brews, J. R., "MOS Physics and Technology", **John Wiley & Sons**, New York, 40-175, 222-226, 423-439 (1982).
21. Schroder, D. K., "Semiconductor Material and Device Characterization 2<sup>nd</sup> ed.", **John Wiley & Sons**, New York, 337-379 (1998).
22. Hofstein, S. R. and Warfield, G., "Physical limitations on the frequency response of a semiconductor surface inversion layer", ***Solid-State Electronics***, 8(3): 321-341 (1965).
23. 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).
24. Ulrich, B. and 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).
25. Haddara, S. H. and El-Sayed, M., "Conductance technique in MOSFETs: study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes", ***Solid-State Electronics***, 31(8): 1289-1298 (1988).
26. Nicollian, E. H. and Goetzberger, A., "MOS conductance technique for measuring surface states parameters", ***Appl. Phys. Lett.***, 7: 216-219 (1965).
27. Ma, T. P. and Dressendorfer, P. V., "Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits", **John Wiley & Sons**, New York, 87-231 (1989).



28. Chauhan, R. K. and Chakrabarti, P., "Effect of ionizing radiation on MOS capacitors", *Microelectronic Journal*, 33: 197-203 (2002).
29. Benedetto, J. M. and Boesch Jr, H. E., "MOSFET and MOS capacitor responses to ionizing radiation" *IEEE Trans. Elect. Nucl. Sci.*, NS-31(6): 1461-1466 (1984).
30. Larin, F., "Radiation Effects in Semiconductor Devices", *John Wiley & Sons*, New York, 8-16 (1968).
31. Ishikawa, Y., Kosugi, M. et al., "Capacitance-voltage study of single-crystalline Si dots on ultrathin buried SiO<sub>2</sub> formed by nanometer-scale local oxidation", *Thin Solid Films*, 369: 69-72 (2000).
32. Depas, M., Van Meirhaeghe, R. L., Lafere, W. H. and Cardon, F., "Electrical characteristics of Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si tunnel diodes with an oxide layer grown by rapid thermal oxidation", *Solid-State Electronics*, 37(3): 433-441 (1994).
33. Hung, K. K. and Cheng, Y. C., "Determination of Si-SiO<sub>2</sub> interface trap properties of p-MOS structures with very thin oxides by conductance measurement", *Appl. Surf. Sci.*, 30: 114-119 (1987).
34. Singh, R. J. and Srivastava, R. S., "Investigations of interface-state density in Si MOS structures", *Solid-State Electronics*, 25(3): 227-232 (1982).
35. Berglund, C. N., "Surface states at steam-grown silicon-silicon dioxide interfaces", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Ed-13(10): 701-705 (1966).
36. Nicollian, E. H., Goetzberger, A. and Lopez, A. D., "Expedient method of obtaining interface state properties from MIS conductance measurements", *Solid-State Electronics*, 12(12): 937-944 (1969).
37. Kelberlau, U. and Kassing, R., "Theory of nonequilibrium properties of MIS capacitors including charge exchange of interface states with both bands" *Solid-State Electronics*, 22(1): 37-45 (1979).
38. Nicollian, E. H. and Goetzberger, A., "The Si-SiO<sub>2</sub> interface electrical properties as determined by the MIS conductance technique", *Bell Syst. Tech. J.*, 46: 1055-1133 (1967).
39. Iniewski, K., Balasinski, A., Majkusiak, B. et al., "Series resistance in a MOS capacitor with a thin gate oxide", *Solid-State Electronics*, 32(2): 137-140 (1989).

40. Kar, S. and Dahlke, W. E., "Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO<sub>2</sub> films on nondegenerate Si", ***Solid-State Electronics***, 15: 221-237 (1972).
41. Candelori, A., Paccagnella, A., Cammarata, M., Ghidini, G., Ceschia, M., "Electron irradiation effect on thin MOS capacitors", ***J. Non-Crys. Solids***, 245: 238-244 (1999).
42. Zainninger, K. H. and Holmes-Siedle, A. G., "A survey of radiation effect in metal-insulator-semiconductor devices", ***RCA Review***, 208-239 (1967).
43. Winokur, P. S., Schwank, J. R., McWhorter, P. J. et al., "Correlating the radiation response of MOS capacitors and transistors", ***IEEE Trans. Nucl. Sci.***, NS-31(6): 1453-1460 (1984).
44. Silva Jr, E. F. da, Nishioka, Y. and Ma, T. P., "Radiation response of MOS capacitors containing fluorinated oxides", ***IEEE Trans. Nucl. Sci.***, NS-34(6): 1190-1195 (1987).
45. Feteha, M. Y., Soliman, M., Gomaa, N. G., Ashry, M., "Metal-insulator-semiconductor solar cell under gamma irradiation", ***Renewable Energy***, 26: 113-120 (2002).
46. Konofaos, N., McClean, I. P., Thomas, C. B., "Characterisation of the interface states between amorphous diamond-like carbon films and (100) silicon", ***Phys. Stat. Sol. (a)***, 161: 111-123 (1997).
47. Witczak, S. C., Suehle, J. S. and Gaitan, M., "An experimental comparison of measurement techniques to extract Si-SiO<sub>2</sub> interface trap density", ***Solid-State Electronics***, 35(3): 345-355 (1992).
48. M. R. Chin, T. P. Ma, "Gate-width dependence of radiation-induced interface traps in metal/SiO<sub>2</sub>/Si devices", ***Appl. Phys. Lett.***, 42(10): 883-885 (1983).
49. Winokur, P. S., McGarrity, J. M., Boesch Jr, H. E. "Dependence of interface-state buildup on hole generation and transport in irradiated MOS capacitors", ***IEEE Trans. Elect. Nucl. Sci.***, NS-23(6): 1580-1585 (1976).
50. Ma, T. P., "Generation and transformation of interface traps in MOS structures", ***Microelectronic Eng.***, 22(1-4): 197-200 (1993).
51. Harold, E. and Boesch Jr, H. E., "Interface-state generation in thick SiO<sub>2</sub> layers", ***IEEE Trans. Nucl. Sci.***, NS-29(6): 1446-1458 (1982).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TATAROĞLU, Banu  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 26.02.1975 Ankara  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (312) 2126230  
e-mail : [banutataroglu@mynet.com](mailto:banutataroglu@mynet.com)

### Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi                   | Mezuniyet tarihi |
|--------|---------------------------------|------------------|
| Lisans | Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü | 1996             |
| Lise   | Ankara Lisesi                   | 1992             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer                    | Görev    |
|-----------|------------------------|----------|
| 1996-2006 | Milli Eğitim Bakanlığı | Öğretmen |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Tataroğlu B., Altındal Ş., Tataroğlu A., “The C-V-f and G/ω-V-f characteristics of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) structures”, *Microelectronic Engineering*, 2006 (Basımda).

### Hobiler

Bilgisayar, Kitap okuma