



**Au/Al₂O₃/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN
HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI
İNCELENMESİ**

Murat AK

**2020
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Hüseyin TECİMER**

**Au/Al₂O₃/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ**

Murat AK

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Hüseyin TECİMER**

**KARABÜK
OCAK 2020**

Murat AK tarafından hazırlanan “Au/Al₂O₃/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN FREKANSA BAĞLI İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Hüseyin TECİMER
Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/01/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan : Doç. Dr. Serhat Orkun TAN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Hüseyin TECİMER (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Osman ÇİÇEK (KÜ)

İmzası



...../...../2020

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Murat AK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Au/Al₂O₃/n-Si SCHOTTKY DİYOTLARIN HAZIRLANMASI VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ

Murat AK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Hüseyin TECİMER

Ocak 2020, 47 sayfa

Bu çalışmada, Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) Schottky diyotları (SD_s) hazırlandı ve elektriksel karakteristikleri doğru ve ters ön-gerilim altındaki kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) ölçümleri kullanılarak incelendi. Kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) ölçümleri 3kHz-1MHz geniş frekans aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Katkılanan verici atomlarının yoğunluğu (N_D), Fermi enerji seviyesi (E_F), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) ve tüketim tabakasının kalınlığı (W_D) gibi temel diyot parametreleri ters-öngerilim C⁻²-V eğrilerinden elde edildi. Ayrıca yapının direnci (R_i), Nicollian ve Brews tarafından geliştirilen admitans metodu ve arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) düşük-yüksek frekans metodu kullanılarak elde edildi. Elde edilen deneysel sonuçların frekans ve uygulanan gerilime oldukça bağlı olduğu görüldü.

Anahtar Sözcükler : Au/Al₂O₃/n-Si Schottky diyotlar, Frekansa bağı C ve G, Seri direnç, Yüzey durumlarının yoğunluğu.

Bilim Kodu : 90544

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE PREPARATION OF Au/Al₂O₃/n-Si SCHOTTKY DIODES AND THE INVESTIGATION OF THEIR ELECTRICAL PROPERTIES OF AS FUNCTION OF FREQUENCY

Murat AK

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Electrical and Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin TECİMER

January 2020, 47 pages

In this study, Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) Schottky diodes (SD_s) were prepared and their electrical characteristics were analyzed using capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) measurements under direct and inverse pre-voltage. Capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) measurements were carried out in the wide frequency range of 3 kHz-1 MHz at room temperature. The main diode parameters such as density of added donor atoms (N_D), fermi energy level (E_F), potential barrier height (Φ_B), consumption layer thickness (W_D) were obtained from inverse pre-voltage C⁻²-V curves. In addition, resistance of structure (R_i) was obtained using the admittance method developed by Nicollian and Brews and the intensity of the interface states (N_{ss}) using the low-high frequency method. The obtained experimental results were seen to be highly dependent on frequency and applied voltage.

Key Word : Au/Al₂O₃/n-Si Schottky diodes, Frequency dependence of C and G,
Series resistance, Density distribution of surface states.

Science Code : 90544

TEŞEKKÜR

Bu tez alışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yrtlmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında Őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Hüseyin TECİMER'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Numunenin hazırlanması ve deneysel ölçümlerin alınmasında yardımlarını esirgemeyen, Gazi niversitesi ğretim yesi Prof. Dr. Őemsettin ALTINDAL'a ve Bingl niversitesi ğretim yesi Doç. Dr. İkram ORAK'a teşekkür ederim.

Gerek lisans ve yükseklisans eğitimimde tez çalışmam boyunca engin bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyen her türlü bilimsel temeller ışığında beni yönlendiren değerli hocam Prof. Dr. Habibe TECİMER'e teşekkür ederim.

Ayrıca üzerimde sonsuz emekleri bulunan maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Satı Mehmet AK ve annem Őerife AK'a, tez çalışmam esnasında fedakarlıklarıyla desteklerini sağlayan ablam Dilek AKDURAL'a ve yardımlarıyla değerli katkılarından dolayı sevgili Burcu ÇIRAK'a kalbi duygularıyla teŐekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| KABUL..... | ii |
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT..... | vi |
| TEŞEKKÜR..... | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | xiii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | xiv |
| | |
| BÖLÜM 1 | 1 |
| GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM 2 | 5 |
| KURAMSAL TEMELLER | 5 |
| 2.1. METAL/YARIİLETKEN (MS) EKLEM YAPILARI..... | 5 |
| 2.1.1. MS Kontak Türleri..... | 5 |
| 2.1.2. MS Arayüzeyinde Schottky Mott Teorisi..... | 7 |
| 2.2. MIS SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI..... | 13 |
| 2.2.1. İdeal MIS Tipi Schottky Diyotların Yapısı | 14 |
| 2.2.1.1. Yığılım Bölgesi | 17 |
| 2.2.1.2. Tüketim Bölgesi..... | 18 |
| 2.2.1.3. Terslenim Bölgesi | 18 |
| | |
| BÖLÜM 3 | 20 |
| DENEYSEL YÖNTEM..... | 20 |
| 3.1. ALÜMİNYUM OKSİT (Al_2O_3)..... | 20 |
| 3.2. Au/ Al_2O_3 /n-Sİ MIS YAPISININ HAZIRLANMASI..... | 21 |
| 3.3. ÖLÇÜM SİSTEMİ..... | 23 |

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| BÖLÜM 4 | 24 |
| ARAŞTIRMA BULGULARI | 24 |
| 4.1. GİRİŞ..... | 24 |
| 4.2. FREKANS BAĞLI ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER..... | 24 |
| | |
| BÖLÜM 5 | 39 |
| SONUÇLAR | 39 |
| | |
| KAYNAKLAR | 42 |
| | |
| ÖZGEÇMİŞ | 47 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Bir metal-yarıiletken Schottky diyotun kontaklarının şematik görünümü. | 6 |
| Şekil 2.2. Metal/n tipi yarıiletken doğrultucu kontak $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda elektron enerji-band diyagramı. a) Metal ile yarıiletken eklemi birleştirilmeden önceki enerji-band diyagramı, b) Eklemleri birleştirildikten sonraki temel denge durumunun diyagramı. | 7 |
| Şekil 2.3. Metal/n-tipi Schottky engel diyot için. a) Termal denge durumu, b) doğru beslem c) ters beslem. | 11 |
| Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak için doğru beslem uygulandığında akım ve elektron akış istikameti. | 12 |
| Şekil 2.5. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ters beslem uygulanma durumunda akım ve elektron akış istikameti. | 13 |
| Şekil 2.6. Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapının şematik görünümü. | 14 |
| Şekil 2.7. $V=0'$ da ideal MIS/n-tipi yapısının enerji-band diyagramı. (a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken. | 15 |
| Şekil 2.8. MIS kapasitansı eşdeğer devresi | 17 |
| Şekil 2.9. İdeal bir MIS yapının şematik gösterimi. (a) Yığılma, (b) Tüketim, (c) Terslenim. | 19 |
| Şekil 3.1. Omik kontak oluşturmak için kullanılan maske. | 22 |
| Şekil 3.2. Savannah ALD sistemi. | 22 |
| Şekil 3.3. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske örneği. | 23 |
| Şekil 3.4. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si yapısı. | 23 |
| Şekil 4.1. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs frekansa bağlı C-V grafiği. | 25 |
| Şekil 4.2. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs frekansa bağlı G/ω-V grafiği. | 26 |
| Şekil 4.3. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs frekansa bağlı R _i -V grafiği. | 27 |
| Şekil 4.4. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için C-f grafiği. | 28 |
| Şekil 4.5. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için G/ω-f grafiği. | 29 |
| Şekil 4.6. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için R _i -f grafiği. | 29 |
| Şekil 4.7. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için C _m -V ve C _c -V eğrileri. | 31 |
| Şekil 4.8. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için G _m /ω-V ve G _c /ω -V eğrileri. | 31 |
| Şekil 4.9. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için N _{ss} -V eğrisi. | 32 |
| Şekil 4.10. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için elde edilen C ⁻² -V eğrileri. | 35 |
| Şekil 4.11. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için elde edilen N _D -ln(f) eğrisi. | 36 |

Sayfa

Şekil 4.12. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen W_D -ln(f) eğrisi..... 36

Şekil 4.13. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen E_F -ln(f) eğrisi. 37

Şekil 4.14. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen Φ_B -ln(f) eğrisi. 37

Şekil 4.15. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen E_m -ln(f) eğrisi. 38

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|---------------------|
| Çizelge 2.1. Metal/n-tipi ve metal/p-tipi yarıiletken türlerine göre kontak oluşumu... 6 | |
| Çizelge 3.1. Alüminyum oksitin fiziksel özellikleri. 20 | |
| Çizelge 4.1. Au/Al ₂ O ₃ /n-Si (MIS) SDs için temel diyot parametreleri. 35 | |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

| | |
|-------------------------|--|
| \AA | : angstrom |
| Ag | : gümüş |
| Al | : alüminyum |
| Au | : altın |
| Al_2O_3 | : alüminyum oksit |
| B | : bor |
| C | : kapasitans |
| C_{ox} | : yalıtkan tabakanın kapasitansı |
| C_s | : uzay yükü kapasitansı |
| C_c | : düzeltilmiş kapasitans |
| C_m | : ölçülen kapasitans |
| C_i | : yalıtkan tabakanın kapasitansı |
| d_{ox} | : yalıtkan tabaka kalınlığı |
| d_i | : arayüzey tabaka kalınlığı |
| δ | : yalıtkan/oksit tabakasının kalınlığı |
| E_v | : değerlik (valans) bant kenarı enerjisi |
| E_c | : iletkenlik bant kenarı enerjisi |
| E_F | : fermi enerjisi |
| E_{FM} | : metalin fermi enerji seviyesi |
| E_{VAC} | : vakum seviyesi |
| f | : frekans |
| Ge | : germanyum |
| GeAs | : germanyum arsenide |
| eV | : elektronvolt |
| N_{ss} | : arayüzey durum yoğunluğu |
| N_D | : verici katkı atomların yoğunluğu |

| | |
|----------|--|
| P | : fosfor |
| R_s | : seri direnç |
| Si | : silisyum |
| SiO_2 | : silisyum dioksit |
| T | : periyot |
| τ | : tuzakların yaşama ömrü |
| V | : voltaj |
| V_D | : difüzyon voltajı |
| V_F | : doğru polarma voltajı |
| V_R | : ters polarma voltajı |
| V_G | : metal plakaya uygulanan voltaj |
| Φ_B | : potansiyel engel yüksekliği |
| Φ_s | : yarıiletkenin iş fonksiyonu |
| Φ_m | : metalin iş fonksiyonu |
| Φ_n | : iletim bandı enerji seviyesi ile fermi enerji seviyesi arasındaki fark |
| χ_s | : elektron yakınlığı |
| W_D | : tüketim tabakasının kalınlığı |

KISALTMALAR

| | |
|----------------|--|
| MS | : Metal-Semiconductor (Metal-Yarıiletken) |
| SDs | : Schottky Diodes (Schottky Diyotları) |
| SBDs | : Schottky Barrier Diodes (Schottky Engel Diyotları) |
| SBH | : Schottky Barrier Hight (Schottky Engel Yüksekliği) |
| MIS | : Metal-Insulator-Semiconductor (Metal-Yalıtkan-Yarıiletken) |
| MOS | : Metal-Oxide-Semiconductor (Metal-Oksit-Yarıiletken) |
| MPS | : Metal-Polymer-Semiconductor (Metal-Polimer-Yarıiletken) |
| AC | : Alternative current (Alternatif Akım) |
| C-V | : Capacitance-Voltage (Kapasitans-Voltaj) |
| G/ ω -V | : Conductance-Voltage (Kondüktans-Voltaj) |
| ALD | : Atomic Layer Deposition (Atomik Tabaka Biriktirme) |
| TMA | : Tri Methyl Aluminum (Tri Metil Aliminyum) |

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Schottky diyotlar (SDs) fizik ve elektronik alanlarında hem kuramsal hem de deneysel bulgulara dayanan araştırmalar yapmak için önem arz eden konulardan biridir. Bu tür yapılar yarıiletken teknolojisinin ölçülebilir elektriksel büyüklüğünü ortaya koymada önemli bir yer tutarken, yapısına özgü ayırt edici niteliklerinin bilinmesi ve üretiminin kolay olması sebebiyle kullanım alanları giderek artmaktadır. Metal-yarıiletken (MS) kontaklar veya diğer ismiyle bilinen Schottky diyotlar, yüksek frekanslarda uygulanan gerilim düşümü parametreleri ile hızlı yön değiştirmesi ve iletkenliğiyle beraber yalıtkanlık özellikleri arasındaki ani geçişlere tepki verebilen yapılar olarak da adlandırılır. Yani bu diyotları diğer yapılardan ayıran önemli bir özelliği çok hızlı bir şekilde anahtarlama yeteneğine ve minimum seviyede ileri yönde gerilim düşümüne sahip olmasıdır. Bu avantajlar göz önüne alındığında MS kontaklar yarıiletken teknolojisi alanında en çok kullanımı olan kontaklar olarak yerini korumaktadırlar [1-5]. Yaygın kullanımı gereği, MS, arayüzey tabakalı metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) veya metal-polimer-yarıiletken (MPS) ve metal-okisit-yarıiletken (MOS) yapılarla ilgili olarak deneysel ve kuramsal olarak birçok çalışma yürütülmüştür [6-9].

MS yapılar, bir metal ile bir yarıiletken yapının kontak haline getirilmesi ile oluşur. MS yapılar, elektronik teknolojisinde büyük ilgi görmesinden dolayı önemli bir yere sahip olmasıyla birlikte, elektronik aygıtların daha ayrıntılı incelenmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca bu yapılar, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlı olarak doğrutucu kontak ve omik kontak olmak üzere ikiye ayrılır. Bu tür kontakların seçimi SDs üretilmesinde önemli bir yer tutmaktadır [10].

MS yapı kontak edildiğinde arasında oluşun Schottky engel yüksekliği (SBH) metal/yarıiletken (M/S) arasındaki yüklerin ayrışması ile oluşur. SBH, MS yapıların

yüzeylerindeki ısısal değişim farklılıklarına oldukça duyarlıdır. Bununla birlikte bu yapılar, diyotun SBH'ni ve yarıiletken malzemenin elektriksel özelliklerinde oluşan değişimleri kontrol etmede katkı sağlamaktadırlar [11]. Bunlarla eş zamanlı olarak Schottky ve Mott, engel yüksekliğinin oluşum biçimini anlamaya çalışmış ve engel oluşum yapılarına açıklama getirerek destek sağlamıştır. Engel yüksekliğinin hesaplanmasıyla beraber engel şekillerinin oluşumu hakkında çeşitli modeller ve öneriler getirilerek desteklemiştir [12,13].

Engel oluşumu, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları (Φ_m ve Φ_s) arasındaki farktan meydana gelmektedir. Cowley ve Sze, SDs'de kullanılan arayüzey tabakası kullanılması durumlarında gerçekleştirdikleri ilk çalışmalarında, farklı arayüzey tabakalarında oluşan engel şekillerini gözlemlemişlerdir [14]. Bununla birlikte farklı metaller kullanılarak MS yapılar arasında engel yüksekliğinin oluşumuna neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Metalden yarıiletkene doğru görülen engel yüksekliği oluşumunun temel olarak Φ_m ve Φ_s 'e, arayüzey tabakanın varlığına ve kalınlığına, yüzeyinin hazırlanma koşullarına, yarıiletkenin katkı yoğunluğuna, arayüzeydeki engel yoğunluğuna, numunenin sıcaklığına ve uygulanan ön voltaj değerine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir [15].

MIS yapıların elektrik ve dielektriksel özellikleri ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen bunların özellikle iletim mekanizmaları, arayüzey durumları ve metal ile yalıtkan arasında oluşan engelin biçimi hakkında literatürde yeterli sayıda çalışma mevcut değildir [16-19]. MIS yapılar, metal ile yarıiletken tabakaların arasına yalıtkan bir ara tabakanın konulmasıyla doğal ya da yapay bir oksidasyon yöntemi kullanılarak oluşturulur. Kullanılan ara tabakadaki yalıtkan, metal ile yarıiletkeni birbirinden yalıtır ve bu tabakalar arasındaki yük geçişlerini düzenli hale getirir [20].

Yarıiletken çeşidine (p-tipi/n-tipi) bağlı olarak seçilen iş fonksiyonlu metaller doğrultucu kontak olarak MIS yapıların hazırlanmasında kullanılır. Metalin saflığını değiştirmek ve daha yüksek olması için altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al) gibi metaller tercih edilmektedir. Yarıiletken olarak ise yüksek sıcaklık değerlerinde kararlı yapı halinde bulunan ve daha ucuz imal edilme açısından genellikle silisyum

(Si) malzemesi tercih edilir. MIS yapılarda M/S arasına konulan yalıtkan tabakanın kalitesi ve yarıiletken yüzeyi Schottky diyotun performansını, güvenilirliğini ve doğruluğunu önemli ölçüde etkilemekte ve yüksek derecede artırmaktadır. Yarıiletken yapıda Si malzemesinin kullanımının yanı sıra germanyum (Ge), galyum-arsenide (GaAs), yalıtkan olarakta genelde silisyum dioksit (SiO_2) tercih edilmesi örnek gösterilebilir [21].

MIS yapılarda sızıntı/kaçak akımının artması cihazın performansını olumsuz etkileyebilir. Bu yüzden bu yapılarda sızıntı akımını en aza indirmek için yalıtkan arayüzey tabakası dielektrik sabiti yüksek malzemelerden seçilir. Sızıntı akımının yapı üzerindeki olumsuzluklarını giderebilmek için geleneksel yalıtkan arayüzey tabakası olarak kullanılan silisyum dioksit (SiO_2) yerine stronsiyum titanat (SrTiO_3), alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum dioksit (TiO_2) ve hafniyum oksit (HfO_2) gibi yüksek dielektrik sabitine sahip malzemeler kullanılmaya başlandı [22]. Sızıntı akımı düşük olan MIS yapılar, hızlı tepki süresine sahip, güç kayıplarının azaldığı ve daha stabil çalışan tümleşik elektronik aygıtların yapılmasına olanak sağlar. Bu yüzden tez çalışmamızda yalıtkan arayüzey tabaka olarak yüksek dielektrik katsayısına sahip Al_2O_3 seçildi.

Al_2O_3 yalıtkan arayüzey tabakasını büyütmek için birçok yöntem vardır [23]. Atomik Katman Depolama (ALD) yöntemi diğer büyütme tekniklerine göre daha avantajlı ve tabaka büyütülürken kontrol edilebilir olması sebebiyle son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [23,24]. Bu yöntemle daha kaliteli tabaka büyütülebilir ve büyütülen tabaka kalınlığı kolayca belirlenebilir. Bu gibi avantajlarından dolayı Al_2O_3 yalıtkan arayüzey tabaka büyütülürken ALD yöntemi tercih edildi.

MIS yapıların temel elektriksel parametreleri, farklı koşullar altında kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω -V) ölçümleri hesaplanarak elde edilir. Bu yapıların elektriksel özellikleri, arayüzey durumları (N_{ss}), seri direnç (R_s) ve M/S arayüzündeki yalıtkan tabakanın etkisi gözlemlenerek incelenmektedir. Bu çalışmada hazırlanan Au/ Al_2O_3 /n-Si (MIS) SDs' ların temel elektriksel parametreleri admitans ölçümleri kullanılarak geniş bir frekans aralığında ve oda sıcaklığında incelendi. Ölçümler seri direnç etkisi dikkate alınarak düzeltildi. C^{-2} -V grafiği kullanılarak

diyotun potansiyel engel yüksekliği (Φ_B), difüzyon potansiyeli (V_D), Fermi enerjisi (E_F) ve tüketim tabakası kalınlığı (W_D) gibi temel diyot parametreleri geniş bir frekans aralığında incelendi. Arayüzey tabaka olarak Al_2O_3 diyot kullanılması, diyotun kalitesini ve performansını önemli ölçüde etkiledi.

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde MS ve MIS diyotların yapısı, avantaj ve dezavantajları, kullanım alanları ve hakkında geniş bir bilgi verildi. İkinci bölümde MS ve MIS diyot yapıların üzerinde duruldu. Üçüncü bölümde $Au/Al_2O_3/n-Si$ (MIS) SDs'lerin hazırlanma süreçleri hakkında bilgi verildi ve ölçüm sistemi tanıtıldı. Al_2O_3 'in temel özellikleri ve kullanılan yöntemler hakkında genel bilgi verildi. Dördüncü bölümde 5nm kalınlıkta hazırlanan $Au/Al_2O_3/n-Si$ (MIS) SDs'nin oda sıcaklığında geniş frekans aralığında alınan kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj ($G/\omega-V$) ölçümleri değerlendirildi. C-V ve $G/\omega-V$ ölçümlerinden elde edilen deneysel sonuçların grafikleri çizilerek frekans ve gerilim etkileri analiz edildi. Beşinci bölümde C-V ve $G/\omega-V$ ölçümleri kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar literatürle kıyaslamalı olarak yorumlandı ve elde edilen deneysel sonuçlar neticesinde yapılabilecek sonraki çalışmalara yol gösterebilecek öneriler sunuldu.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1. METAL/YARIİLETKEN (MS) EKLEM YAPILARI

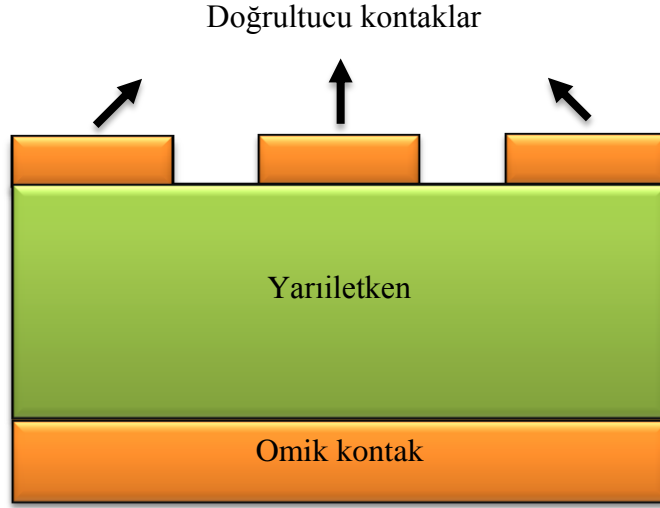
2.1.1. MS Kontak Türleri

Metaller, elektrik ve ısıyı iyi ileten elementler olarak bilinirler. Metallerin genel manada çok kullanılmasının sebebi, diğer metallerle karışımlarının kontrol altına alınması daha kolay, istenilen şekle sokularak dayanıklılık özelliklerinin artırılabilmesidir. Yüksek saflıktaki metaller, omik ve doğrultucu kontaklar oluşturulurken yarıiletken aygıt teorisinde kullanılmaktadır. Yarıiletken malzemesinin p veya n tipi olmasına göre Al veya Au uygun metal elementleri seçilmektedir [25,26].

Metal-yarıiletken (MS) kontakları yarıiletken aygıt teknolojisinin temel taşı oluşturmaktadır. Metal-yarıiletken (MS) kontak yapısı, bir metal ile yarıiletkenin basıncın düşük sıcaklığın yüksek olduğu şartlar altında birleştirilerek kontak edilmesiyle oluşturulmaktadır. Kontak yapısının oluşturulmasından sonra yüklerin ayrışmasından dolayı arayüzey tabakasında metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonlarının arasındaki farktan bir potansiyel engel yüksekliği meydana gelmektedir. Bu engelin oluşumunu ilk olarak Schottky ve Mott açıklamıştır. Metal-yarıiletken Schotky diyotlarında, potansiyel engel yüksekliğinin oluşabileceğini Schottky yorumlamıştır. Metal ile yarıiletken ekleminde oluşan potansiyel engelin metal-yarıiletken iş fonksiyonlarından dolayı meydana geldiğini ise Mott yorumlamıştır [27].

Metal-yarıiletken Schottky diyotların karakteristik özelliklerinin iyi anlaşılabilmesi için, iletken malzeme ve yarıiletken kristallerinin iletim özelliklerinin ayrıntılı şekilde incelenmesi gerekir. Bu karakteristik yapıların ortaya çıkması ise uygun

voltaj ve kristale özgün kontaktların uygulanması ile mümkündür. Kontaktlar iki madde arasına olabildiğince düşük (sıfır denecek kadar az) bir dirençle temas etmelidirler. Kontakın ideal yapıya yakın olması için, kontak olarak kullanılan malzemelerin saf bir şekilde temiz ve pürüzsüz olmaları gerekmektedir [27].



Şekil 2.1. Bir metal-yarıiletken Schottky diyotun kontaktlarının şematik görünümü.

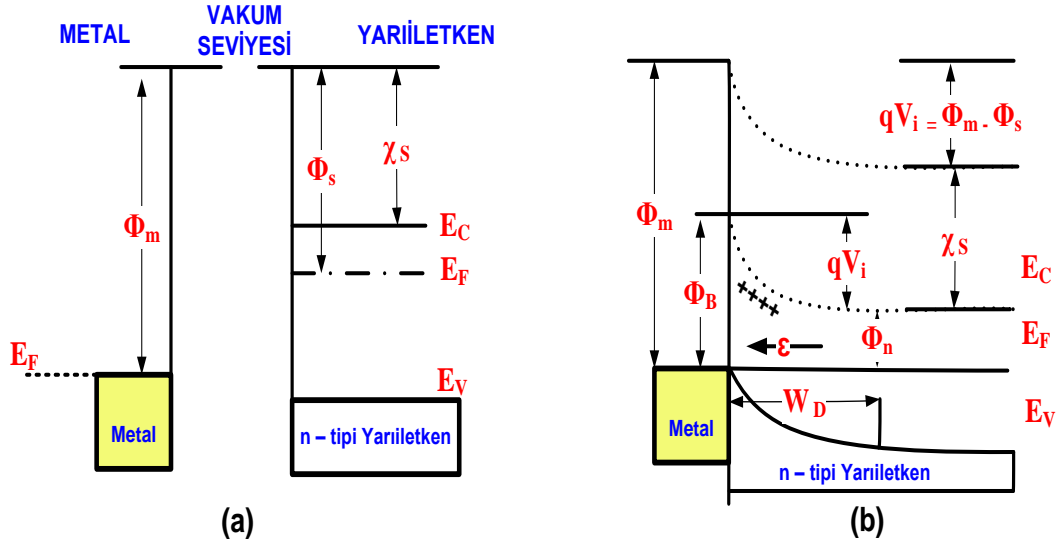
Metal-yarıiletken (MS) kontaktlar, omik ve doğrultucu olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Kontaktların omik mi yoksa doğrultucu mu olduğunu metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki duruma göre belirlenmektedir. Φ_m metalin, Φ_s 'de yarıiletkenin iş fonksiyonları olmak üzere, metal/n-tipi yarıiletken kontaktlarda $\Phi_m > \Phi_s$ olduğu durumda “doğrultucu kontak” ve $\Phi_m < \Phi_s$ olduğu durumda ise “omik kontak” oluşmaktadır. Metal/p-tipi yarıiletken kontak yapılarında ise metal/n-tipi yarıiletken kontak yapısına göre tam tersi bir durum göstermektedir [22]. Bu durumların ikisinde aşağıdaki çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Metal/n-tipi ve metal/p-tipi yarıiletken türlerine göre kontak oluşumu.

| Yarıiletken malzeme türü | Kontak türü | |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| | Doğrultucu kontak | Omik kontak |
| n-tipi | $\Phi_m > \Phi_s$ | $\Phi_m < \Phi_s$ |
| p-tipi | $\Phi_m < \Phi_s$ | $\Phi_m > \Phi_s$ |

2.1.2. MS Arayüzeyinde Schottky Mott Teorisi

Schottky diyotların fiziği oldukça karmaşık yapıdadır. Schottky diyot oluşumu, bir metal ile bir yarıiletkenin kontak edilmesi esnasında metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan oluşan MS arayüzeyinde yüklerin ayrılmasından meydana gelen bir potansiyel engel yüksekliği mevcuttur. Bu durum, metal ile yarıiletken arasında hareketli yüklerden izole edilmiş yüksek direnç içeren bölge meydana getirmektedir [22,28]. Schottky-Mott teorisine göre potansiyel engel, iki maddenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır [29].



Şekil 2.2. Metal/n tipi yarıiletken doğruletücü kontak $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda elektron enerji-band diyagramı. a) Metal ile yarıiletken eklemi birleştirilmeden önceki enerji-band diyagramı, b) Eklemleri birleştirildikten sonraki temel denge durumunun diyagramı.

Şekil 2.2’de temsili olarak ifade edilen temel fiziksel simgeleri aşağıdaki gibi açıklayabiliriz.

Φ_s : Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Φ_m : Metalin iş fonksiyonu

χ_s : Yarıiletkenin electron yakınlığı

Φ_n : Potansiyel engel yüksekliği

Φ_n : n-tipi yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı

- E_V : Valans bandı enerji seviyesi
 E_c : İletkenlik bandı enerji seviyesi
 w : Tüketim tabakası kalınlığı
 E_F : Fermi enerji seviyesi

Fermi Enerjisi: İletkenlerde 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 izinli enerji durumlarının yoğunluğuna, taşıyıcı sayısına, katkı atomlarının yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan seviye Fermi enerjisi olarak tanımlanır. Fermi enerji seviyesi n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandının alt noktasından itibaren ölçülür, p-tipi yarıiletkenler de ise valans bandının üst noktasından itibaren ölçülür.

Vakum seviyesi: Bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı olarak tanımlanır.

Metalin iş fonksiyonu (Φ_m): Bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için uyarmak veya metalden koparıp serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı olarak tanımlanır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu(Φ_s): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı veya Fermi seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için uyarması gereken enerji miktarıdır. Yarıiletkene katılan atomların yoğunluğu ile Fermi enerjisi değiştiğinden dolayı Φ_s 'de buna bağlı olarak değişen temel bir parametredir.

Elektron yakınlığı (χ): Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkı olarak tanımlanan niceliktir.

Metale ilerleyen yarıiletkenin iletkenlik bandı elektronları arka taraflarında pozitif yüklü donör iyonları bırakmaktadır. Bu durumda hareketli yükler yarıiletkenin metale bakan ön alanında azalır. Buna bağlı olarak arayüzeyin yarıiletken tarafında

pozitif yükler oluşmaktadır. Aynı zamanlı olarak metal tarafında da yarıiletkenden metale ilerlemiş elektronlar ince negatif yük tabakası oluştururlar ve bu yapıya negatif uzay yük bölgeside denir. Bu yük tabakalarının genişliği ise tüketim tabakası olarak adlandırılmaktadır. Bu tabaka arayüzeyden Thomas-fermi film (yaklaşık $0,5\text{\AA}$) kadar uzaktadır. Sonucunda metal yapıya doğru doğal bir elektrik alan meydana getirmektedir [30].

Metal-yarıiletken/n-tipi kontaklarda doğrultucu kontak $\Phi_s < \Phi_m$ durum şartını sağlayan Şekil 2.2'de enerji-band diyagramı gösterilmiştir [31]. Şekilde gösterilmekte olan vakum seviyesi, referans olarak alınan Şekil 2.2.a'da metalin tamamen dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi olduğunu göstermektedir. Fermi enerji seviyesinden bir elektronu uyarıp vakum seviyesine geçmesini sağlamak için gerekli olan en küçük enerji miktarı Φ_m metalin iş fonksiyonudur. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m), kristal örüntünün periyodik olarak oluşturulan potansiyeli sebebiyle meydana gelen hacim katkısı ile yüzeyde elde edilen dipol tabakasından dolayı oluşan yüzey katkısına sahiptir. Değişen bir parametre olan yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s' de benzer bir şekilde tanımlanan niceliktir. Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi katkılanan donör veya alıcı atomların miktarına bağlı olarak değişir ve Φ_s' de buna bağlı olarak etkilenmektedir. Yarıiletkenin katkılanmasından etkilenmeyen bağımsız nicelik ise χ_s ile gösterilen elektron yakınlığıdır ve iletkenlik bandının en üst seviyesindeki ve koparılması için gerekli enerjinin az miktarda sarfedileceği bir elektronu uyarıp vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarıdır. Şekil 2.2.a'da Yüzeyin band yapısı yüzey durumlarını içermediğinden yarıiletken gövde (bulk) band yapısı ile aynıdır yani bantlarda herhangi bir bükülme meydana gelmez. Şekil 2.2.b, eklem elde edildikten sonra dengeye ulaşmış durumun enerji-band diyagramını göstermektedir. Metal ve yarıiletken eklemi elde edildiğinde, metalde bulunan elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, yarıiletkenin fermi enerji seviyesi metalin fermi enerji seviyesine eşit olana kadar yarıiletkenden metale doğru geçerler. Sonuçta, yarıiletkenin sınır bölgesine yakın serbest elektron yoğunluğu azaldığı için yarıiletkendeki fermi enerji seviyesi referans olarak Şekil 2.2.b enerji-band diyagramında yasak enerji aralığının ortasına doğru kaymaya başladığını açıkça göstermektedir. Böylelikle iletkenlik band kenarı E_C ile fermi

seviyesi E_F arasındaki fark, azalan bu elektron yoğunluğu ile artar ve termal dengede E_F tamamen sabit kaldığı için iletkenlik ve valans band kenarları Şekil 2.2.b'de ki gibi bükülme meydana gelir [30,32]. Bütün seviyelerdeki bükülme seviyesi iş fonksiyonları arasındaki farka tekabül etmektedir [23].

Bantlardaki orantılı bükülme seviyesi, yarıiletkenin vakum seviyesi ile elektron yakınlığı kontak edilmekle değişmeyeceğinden dolayı oluşur. Metal-yarıiletken eklem yapısının termal denge durumunda, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir sınır olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin daimi olması sağlanır ve bantın bükülme seviyesi, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir. Termal denge durumunda kurulma gerilimi olarak adlandırılan

$$qV_i = \Phi_m - \Phi_s \quad (2.1)$$

ile verilir [29,33]. Burada metale geçecek olan yüklerin karşılaştığı engel yüksekliği qV_i kadardır. Bununla beraber metalden yarıiletkene geçecek olan yüklerin karşılaştığı potansiyel engel yüksekliği, yarıiletken tarafından karşılaşılan potansiyel engel yüksekliği büyüktür ve birbirlerinden farklıdır aşağıdaki gibi verilir.

$$\Phi_B = \Phi_m - \chi_s \quad (2.2)$$

İle verilir [4,13,29]. Şekil 2.2.b'de görüleceği gibi $\Phi_s = \chi_s + \Phi_n$ ve $\Phi_m = qV_i + \Phi_s$ bu eşitlikler dikkate alınırsa Eş. 2.2 ifadesi engel yüksekliği aşağıdaki gibi elde edilir.

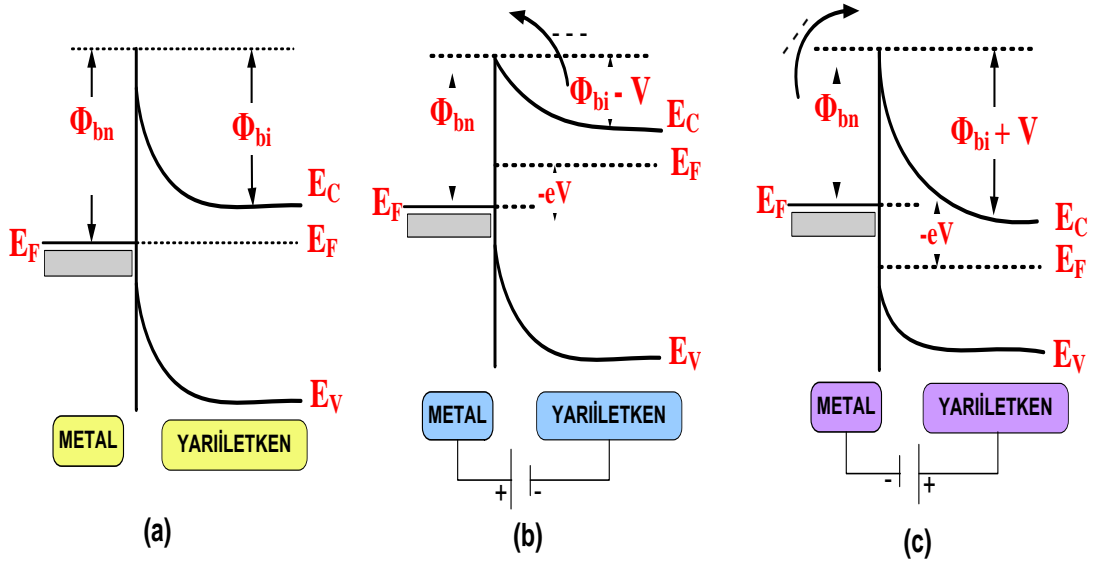
$$\Phi_B = qV_i + \Phi_n \quad (2.3)$$

Burada iletim bandı ile Fermi enerji seviyesi arasındaki farktan meydana gelen Φ_n aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\Phi_n = E_C - E_F \quad (2.4)$$

Fakat E_C sıfır alınmış olursa $\Phi_n = E_F$ olur. Eş. 2.2 birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından da açıklanmıştır [34].

Şekil 2.3’de metal-yarıiletkenin eklem durumu sonrasındaki termal denge, doğru beslem ve ters beslem sırasıyla enerji-band diyagramları verilmektedir.



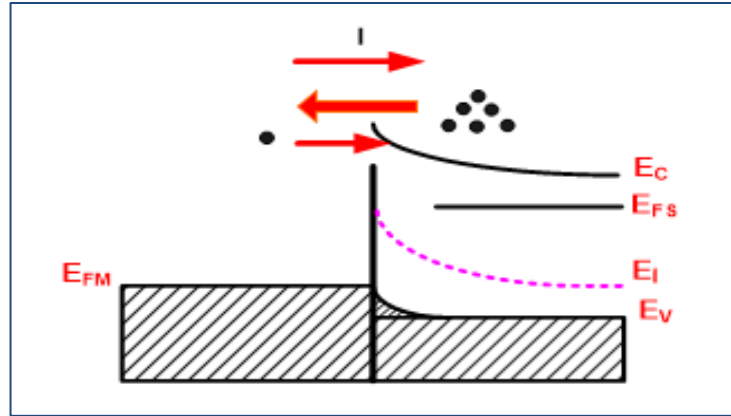
Şekil 2.3. Metal/n-tipi Schottky diyot için. a) Termal denge durumu, b) Doğru beslem c) ters beslem.

Şekil 2.3.a’da termal denge halindeyken metal ile yarıiletken arasında ve bunun tam tersi durumunda da geçerli elektron geçişleri sonucunda, elektronların denge haline gelmesiyle net bir yük akışı olmaz ve akım geçişinin olmadığı termal denge durumu mevcuttur. Minimum seviyede hareketli taşıyıcı içeren yarıiletkenin tüketim tabakası metal ile yarıiletkenin nötral kısmının direnci ile karşılaştırıldığında belirgin bir şekilde çok yüksektir. Bunun sonucunda uygulanan gerilimim tamamı bu tüketim bölgesi üzerine düşmektedir. Termal denge enerji-band diyagramını değiştirecek olan doğru veya ters bir referans gerilimi denge durumunu değişikliğe ugratacaktır [29]. Metal/n-tipi Schottky engel diyotun doğru ve ters beslem durumlarındaki enerji-band diyagramları Şekil 2.3.b ve Şekil 2.3.c’de gösterilmiştir.

Metal uca yarıiletken ucundan daha pozitif ön gerilim verildiğinde ($V=V_F$) termal denge durumunda oluşan yeni potansiyel engel yüksekliği veya qV_i bu V_F kadar azalacak ($q(V_i-V_F)$) ve değişikliğe uğrayacak. Bunun sebebi aradaki engelin azalması ve tüketim bölgesinin (negatif uzay yük bölgesi) küçülmesiyle beraber çoğalan akım geçişiyle açıklanabilir. Metal tarafında bir gerilim düşümü yüksek olmasından dolayı yarıiletken metal arasındaki elektron geçişi artarken, metalden yarıiletkene elektron

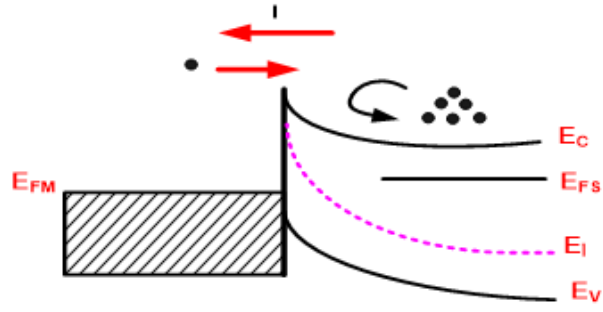
akımı değişmemektedir. Bunun doğrultusunda doğru polarmada azalan engel yüksekliğinden iletme geğilirken (diyotun doğrultma özelliği), bunun tersi olan ters polarmada neredeyse hiç akım geçişi geręekleşmeyecektir.

Metal-yarıiletken (MS) eklemine metal tarafına pozitif ve yarıiletken tarafına negatif diş beslem uygulandığı doğru ön-gerilim durumunda, çoğunluk taşıyıcılar olan elektronların difüzyonu yarıiletkenden metale doğru olurken, elektriksel akım yönü aşığıdaki şekilde görüldüğü üzere bunun tam tersi yönünde olacaktır.



Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak için doğru beslem uygulandığında akım ve elektron akış istikameti [1].

Doğru ön-beslem akımı, uygulanan doğru beslemdeki gerilim (V_F) artışı matematiksel olarak üstel fonksiyon benzer bir şekilde yükselmektedir [33]. Schottky engel diyotun ters beslem altında olması veya yarıiletken ucuna metal ucuna göre daha pozitif bir gerilim verildiğinde ($V = -V_R$) enerji-band diyagramı Şekil 2.2c'deki gibi değişim göstermektedir. Tüketim bölgesindeki potansiyel engel yüksekliğinin değişimi ise $+qV_R$ kadar artmasıdır. Bu durum Termal denge durumu ile kıyaslama yapıldığında, bu durum azınlık bölgesinin büyümesine ve yarıiletkenden metale doğru elektron akımının aşığıdaki şekil üzerinde de analiz edileceği üzere güçlendiğini gözlemlemekteyiz. Elektron akımının metal yarıiletken arasındaki durumu termal denge durumundaki ile aynı kalmıştır. Sonuç olarak ters beslem uygulandığında tüketim bölgesindeki büyüme oranı, doğru besleme göre çok az akımın akmasına denk gelirken neredeyse yok denecek kadar hiç akım akışı olmaz.

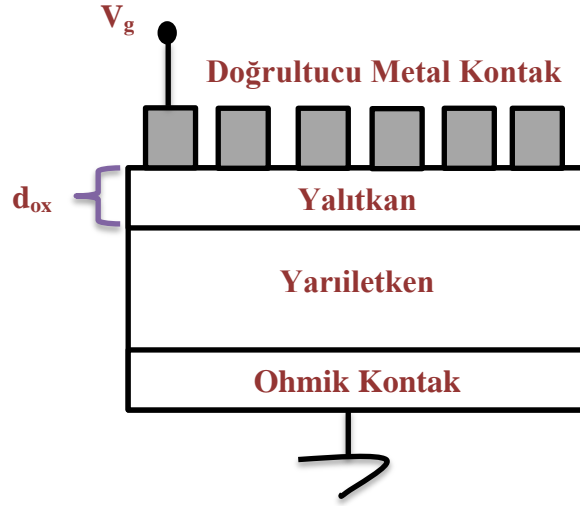


Şekil 2.5. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak için ters beslem uygulanma durumunda akım ve elektron akış istikameti [1].

Termal denge durumunda olmayan Şekil 2.3.b ve 2.3.c' deki durumlarda, elektronların difüze olmaya başladığı bölgenin Fermi enerji seviyesi ile elektronların çıktığı bölgenin Fermi enerji seviyesinden daha yüksek olduğundan tek bir Fermi enerji seviyesinden bahsetmek yanlış olur.

2.2. MIS SCHOTTKY DİYOTLARIN YAPISI

Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapılar, metal ve yarıiletkenin arasına yalıtkan bir tabaka eklenmesiyle kapasitörlere benzerlik gösteren metal yapıyı yarıiletken kısmından ayırmak için yalıtkan tabakayı doğal yolla veya deneysel olarak eklemek gerekir [1,26]. MIS yapı Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Burada yalıtkan tabaka yapısının görevi metal ile yarıiletkeni birbirlerinden ayırması ve bununla beraber metal ile yarıiletken arası yük akışlarını da düzenlemektedir. Bu MIS yapılar J.L.Moll tarafından ilk olarak 1959 yılında oluşturulmuştur [35].



Şekil 2.6. Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapının şematik görünümü.

Schottky engel diyotların veya metal-yarıiletken (MS) eklemlerin üzerine uygulanan V_G gerilimi arayüzey tabakası ve seri direncin yapı içerisinde olmasından dolayı seri direnç ve diyot gerilimi olarak ikiye paylaşılır [1].

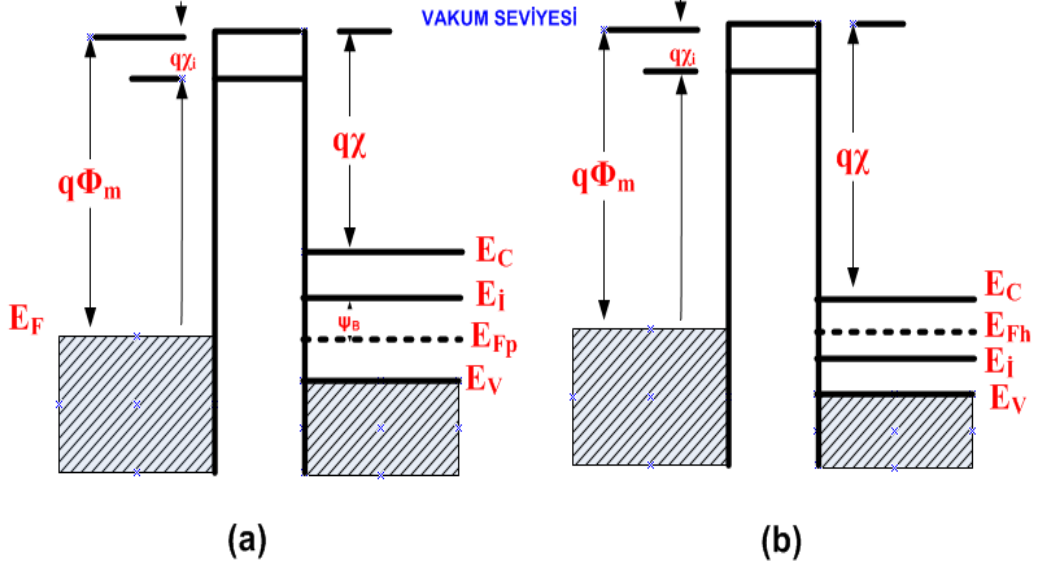
$$V_G = V_D + V_R + V_i \quad (2.5)$$

Yalıtkan yapılardan oluşturulmuş ince filmlerin ve yarıiletkenlerin elektriksel parametrelerinin incelemesinde metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar yaygın şekilde kullanılmaktadır [36]. Terman, silisyum kristali ve üzerinde alüminyum metal elektrotları metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıda kullanmıştır. MIS yapıdaki kapasitörün, yalıtkan ve silisyum arayüzey durumlarını incelemiştir. Dc beslem vererek kondansatördeki kapasitansın frekansa bağlılığını göstermiştir. Deneysel ve kuramsal kapasitans-voltaj (C-V) değerlerini kıyaslayarak arayüzey tuzak yoğunluklarının zaman sabitlerini belirlemiştir [37].

2.2.1. İdeal MIS Tipi Schottky Diyotların Yapısı

İdeal bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi Schottky diyot yapının, $V=0$ Volt durumunda enerji-band diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmiştir. MIS yapının ideal olarak tanımlanabilmesi için seri direnç ve arayüzey durumları yok denecek kadar küçük ve kısa devre direncinin ise $M\Omega$ ' lar mertebesinde olması beklenir [4]. Bu tür

yapılarda diyot sıfır ön-beslemde ($V=0$ V) iletme geçer, ters yönde hiç yük geçişi olmaz ve idealite faktörü 1 olarak alınır.



Şekil 2.7. $V=0$ ' da ideal MIS/n-tipi yapısının enerji-band diyagramı. (a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken [8].

Enerji-band diyagramında Şekil 2.7'de verilen bazı temel fiziksel nicelikler aşağıdaki gibidir.

Φ_m : Metalin iş fonksiyonu

Φ_B : Metal ve yalıtkan arasındaki potansiyel engel yüksekliği

χ : Yarıiletkenin elektron alınganlığı

χ_i : Yalıtkanın elektron alınganlığı

E_V : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

E_C : Eletkenlik bandı enerji seviyesi

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

E_F : Fermi enerji seviyesi

Ψ_B : Fermi enerji seviyesi (E_F) ile (E_i) arasındaki enerji farkıdır [26,29].

İdeal bir MIS yapısına voltaj verildiğinde Φ_m ile Φ_S arasındaki fark sıfırdır ($\Phi_{ms}=\Phi_m-\Phi_S=0$) [38,39]. Bu durum Eş. 2.6 ve Eş. 2.7'de gösterilmiştir.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = 0 \quad (\text{N-tipi}) \quad (2.6)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad (\text{P-tipi}) \quad (2.7)$$

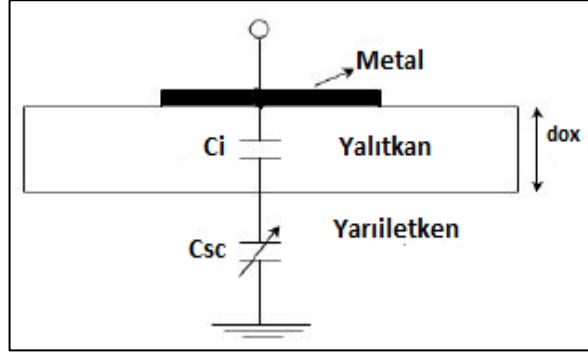
D.C ön-beslem durumunda yalıtkan tabakanın özdirenci sonsuz olduğu kabul edildiğinden dolayı yalıtkan uca doğru taşıyıcıların geçişi olmaz. Yalıtkan yüzeye bitişik olan metal ile yarıiletken yüzeyindeki yüklere herhangi bir çeşit ön-beslem uygulanması durumunda eşit sayıda ancak zıt yönlü oluşacaklardır.

İdeal MIS yapıda serbest hareket eden yüklerin yoğunluğu, yarıiletken tarafında metale oranla kıyaslandığında uygulanan ön-gerilim değerine bağlı olarak daha az seviyede olmaktadır. Termal denge şartı altında potansiyel büyüklüğü ile belirlenen yarıiletkenin arayüzey tabakasında bulunan Q_{sc} uzay yükü bantlarda bükülmeye sebep olur.

Yarıiletken yapıda çoğunluk ve azınlık taşıyıcılar olarak bilinen katkı atomları, uzay yükü bölgesini oluştururken arayüzey tabakada yığılmalarada sebep olmaktadır. 5. sütunda bulunan fosfor (P) atomu, yarıiletken (Si) atomun içerisine belli oranda katkılандığında n-tipi Si elde edilen yapı içerisindeki elektronlar çoğunluk taşıyıcıyı, boşluklar olarak anılan holler azınlık taşıyıcı olarak isimlendirilecektir. Yine benzer şekilde periyodik cetvelin 4. sütununda bulunan Si atomuna, 3. sütunda bulunan Bor (B) gibi atomların belli bir oranda katkılanmasıyla p-tipi Si kristal yapısı elde edilmektedir. Bu oluşturulan yeni kristal yapıda hollerin (boşluk) miktarı çoğaltılmış olduğundan çoğunluk taşıyıcılar holler (boşluklar) olurken, yük akışı yarıiletken diyotlarda sadece elektronlar ile sağlanmayıp boşluklar tarafından da sağlanmaktadır. Sonuçta, çoğunluk taşıyıcı akımı ve azınlık taşıyıcı akımı olarak iki tür olarak adlandırılmaktadır [1,8].

Metal ve yarıiletkenin arayüzeyinde bulunan yalıtkan tabakadan dolayı MIS kapasitansı olarak adlandırılan bir paralel kapasitans (C) oluşmaktadır. Bu durum MS kontakların paralel plakalı kondansatörlerle eşdeğer gösterilmesinin asıl nedenidir. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kapasitansının şematik olarak eşdeğer elektronik

devresi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Uygulanan değişken gerilimlere bağımlı olarak toplam kapasitans yalıtkan tabakanın kapasitansı C_i ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} ’den oluşur.



Şekil 2.8. MIS kapasitansı eşdeğer devresi.

2.2.1.1. Yığılım Bölgesi

Metal plakaya negatif değerde ($V_G < 0$) bir voltaj uygulandığında, negatif gerilimden dolayı meydana gelen bir elektrik alan oluşacaktır. Bu elektrik alan farklı değerdeki yüklerin birbirini çekmesi aynı yüklerin itmesi prensibine dayanarak yarıiletkendeki çoğunluk yük taşıyıcıları yani holleri yarıiletken yapının arayüzeyine doğru çekecektir [40-42]. Bu durum Şekil 2.9.a’da şematik olarak gösterilmiştir.

İdeal bir diyotta yük akışı sağlanmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalırken, taşıyıcı yoğunluğu üstel fonksiyon olarak ($E_F - E_V$) enerji farkına bağlı olduğundan, çoğunluk taşıyıcı olarak anılan hollerin (boşluklar) yarıiletkenin yüzeyine yakın noktalarda yığılım göstermesiyle bükülme gerçekleşecektir. Çoğunluk yük taşıyıcılarının arayüzeyde birikmesinden ötürü “yığılım” meydana gelirken yarıiletkende valans bandı (E_V) Fermi enerji seviyesine yaklaşacaktır. Bunun beraberinde iletkenlik bandı da yukarı istikamette bükülmektedir. Sonucunda arayüzey bölgede yığılım yük yüzey yükü olarak isimlendirilirken C_{sc} sonsuza gider ve $C \rightarrow C_{ox}$ veya C_i olmaktadır [8].

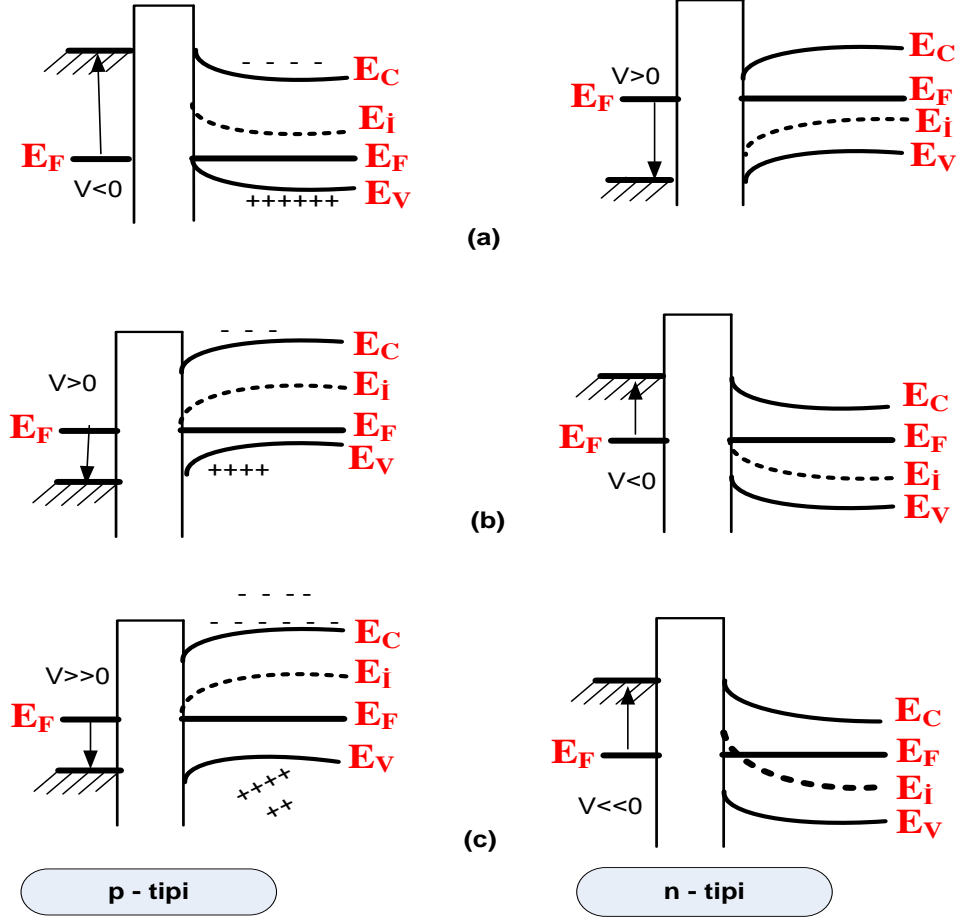
2.2.1.2. Tüketim Bölgesi

Metal plakaya $V_G < 0$ küçük bir negatif veya $V_G > 0$ pozitif ön-beslem verildiğinde, oluşan elektrik alan yarıiletkendeki elektronları yüzeyden uzaklaştırmaya başlayacaktır. Bu durumda yarıiletken yüzeyine yakın yerlerdeki elektron yoğunluğu, yarıiletkenin iç alanındaki elektron yoğunluğundan daha az olmaya başlar ve enerji bantları (E_c ve E_v) aşağı istikamete doğru bükülecektir. Bunun sonrasında yarıiletken ön yüzey bölgelerinde, holler (boşluklar) toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerde, değişen voltaj değerleriyle tüketim tabakasının (W_D) genişliğinde bir bölgede, elektronların azınlıkta olduğu bir “tüketim bölgesi” oluşturulur. Yarıiletken yüzeyine yakın yerlerde elektronların azalmasından (tükenmesi) dolayı bu bölge “tüketim bölgesi” olarak isimlendirilir [40-45]. Şekil 2.9.b’de şematik olarak gösterilmiştir. Enerji bantlarının aşağı yönde bükülmesinin nedeni yarıiletken ile metal arasındaki yük akışlarından meydana gelir. Çoğunluk taşıyıcı elektronlar arayüzey bölgesinde tükenme gösterir.

2.2.1.3. Terslenim Bölgesi

Metale daha büyük bir ön-beslem uygulandığı vakit ($V_G > 0$) yarıiletken yüzeyindeki azınlık taşıyıcı holler (boşluklar) artarken, yarıiletken yüzeyindeki hollerin yoğunluğu ile yarıiletkenin iç bölgesindeki hollerin yoğunluğu kıyaslandığında bantların aşağı doğru bükülmesi gerçekleşecektir ve enerji mertebesi (E_i), Fermi seviyesinin altına geçmeye başlayacaktır. Bu durum sonucunda, yarıiletken yüzeyine yakın yerlerde azınlık taşıyıcılar olan holler (boşluklar) artış gösterirken, hollerin yoğunluğu daha büyük olacağından n-tipi yarıiletken yüzeyin p-tipi yarıiletken gibi davranması ön plana çıkacaktır. Başlangıçta n-tipi yarıiletkende elektronlar çoğunluk gösterirken, bu yüklerin metal tarafa doğru geçmesiyle arkasında pozitif yükler bırakmasına neden olur. Bu durum yarıiletkenin ön yüzeyinde boşlukların çoğunlukta olduğu bir bölge meydana getirmektedir. Bu olay, yarıiletken kısımda yüklerin yer değişiminden dolayı “terslenim” bölgesi olarak isimlendirilir [40-45]. Şekil 2.9.c’de bu durum şematik olarak gösterilmiştir. İdeal bir durumda yükler yarıiletkende ve yalıtıkana yakın olan metal yüzeyinde bulunmaktadır. D.C beslem

altında yalıtkan içerisinde hiçbir yük akışı olmaz. İdeal bir MIS yapı için; yapının yığılma, tüketim ve terslenim durumları sırasıyla Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. İdeal bir MIS yapının şematik gösterimi. (a) Yığılma, (b) Tüketim, (c) Terslenim [40].

BÖLÜM 3

DENEYSEL YÖNTEM

3.1. ALÜMİNYUM OKSİT (Al_2O_3)

Al_2O_3 , suda çözünmeyen, katı, beyaz renkte ve kokusuz bir mineraldir. Alüminyum oksit saflık derecesine göre kahverengi, beyaz ve pembe renktedir. Alüminyum oksit düşük maliyetli, kolay işlenebilir, mekanik özelliklerinin geliştirebilir, yüksek ısı ve ışık yansıtabilir olması gibi önemli özelliklere sahiptir. Neme duyarlı olan alüminyum oksit depolanırken ortamın nemli olmaması gerekir. Al_2O_3 fiziksel özellikleri çizelge 3.1’ de verildi.

Çizelge 3.1. Alüminyum oksitin fiziksel özellikleri [46].

| | |
|---|--|
| Kahverengi Alüminyum Oksit’ in Özgül Ağırlığı | 3,96 gr/cm ³ |
| Beyaz Alüminyum Oksit’ in Özgül Ağırlığı | 3,92 gr/cm ³ |
| Pembe Alüminyum Oksit’ in Özgül Ağırlığı | 3,92 gr/cm ³ |
| Alüminyum Oksit’ in Ortalama Dökme Yoğunluğu | 2,4 gr/cm ³ |
| Alüminyum Oksit’ in Sertliği | 9 (mohs scale) |
| Alüminyum Oksit’ in Kristal Sistemi | Kübik |
| Alüminyum Oksit’ in Kristal Şekli | Köşeli |
| Alüminyum Oksit’ in Kırılması | Dökme Mineralin Preslenmesi Suretiyle |
| Alüminyum Oksit’ in Dayanıklılığı | Yüksek |
| Alüminyum Oksit’ in Serbest Akış Özelliği | %97 Minimum |
| Alüminyum Oksit’ in Akışa Duyarlılığı | Yoktur |
| Alüminyum Oksit’ in Nem Çekme Özelliği | Vardır |
| Alüminyum Oksit’ in Manyetiklik Özelliği | Çok hafif manyetiktir |
| Alüminyum Oksit’ in Elektrik İletimi | 100 microsiemens per meter |
| Alüminyum Oksit’ in Radioaktivite Özelliği | Tespit edilmemiştir |
| Alüminyum Oksit’ in Patolojik Zarar Verme Özelliği | Yoktur |
| Alüminyum Oksit’ in Serbest Slika İçeriği | Yoktur |

3.2. Au/Al₂O₃/n-Si MIS YAPISININ HAZIRLANMASI

Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) Schottky diyotlarının (SDs) hazırlanırken şu aşamalar izlendi.

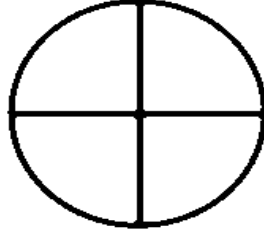
- Kristalin temizlenmesi,
- Omik kontakın oluşturulması
- ALD tekniği ile Al₂O₃ tabakasının oluşturulması
- Doğrultucu kontakların oluşturulması

Yapı üzerindeki kirlilikleri (organik, metalik...) gidermek için kimyasal temizleme işlemi uygulandı. Ayrıca bu işlem üretilen diyotun kalitesini önemli ölçüde etkiler. Temizleme işleminden sonra termal buharlaştırma sistemi kullanılarak omik kontak oluşturuldu. Daha sonra Al₂O₃ arayüzey tabakasını oluşturmak için atomik katman katlama (ADL) yöntemi kullanıldı. Son olarak yine termal buharlaştırma sistemi yardımıyla doğrultucu kontaklar oluşturuldu.

Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) Schottky diyotlar, (111) yüzey yönelimine sahip, 525 µm kalınlıklı ve 1-10 Ω.cm öz dirence sahip bir yüzü parlatılmış tek kristal *n*-tipi Si alttaş kullanılarak üretildi. Si alttaşlar 1x1 cm² boyutlarında kesilerek aşağıda verilen kimyasal çözücü temizleme işlemine tabi tutuldu.

- 2 dakika boyunca Asetonda ultrasonik olarak yıkandı
- 2 dakika boyunca İsopropanol ile ultrasonik olarak yıkandı
- Deiyonize su ile (18MΩ) ile iyice yıkandı
- Azot gazı (N₂) ile kurutuldu.

Si alttaş temizlendikten sonra yarıiletkenin mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Kontakın oluşturulmasında kullanılan maske Şekil 3.1' de verildi. Vakum sistemi ile elde edilen ~6x10⁻⁶ Torr basınç altında üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımı ile oldukça saf altın (Au) (~99,999%) buharlaştırılarak Si yaprağın arka yüzeyine Au tabaka oluşturuldu. Omik kontak 3 dakika boyunca kuru azot akışı altında 550 °C' de tavlanarak Si yaprağın üzerine çöktürülmesi ile elde edildi.



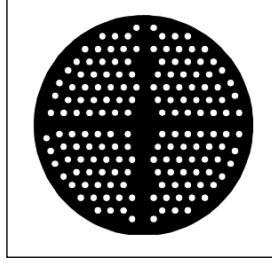
Şekil 3.1. Omik kontak oluşturmak için kullanılan maske.

Silisyum alttaşın parlak yüzeyine atomik tabaka biriktirme tekniği ile Al_2O_3 arayüzey tabakası kaplandı. Al_2O_3 arayüzey tabakası, Savannah ALD reaktörü (Ultratech/ Cambridge Nanotech Inc.) kullanılarak biriktirildi. Arayüzey tabakası, $200^\circ C$ sıcaklığında trimetilalüminyum (TMA) - su (H_2O) / alüminyum - oksijen reaktanları kullanılarak kaplandı. Kalınlık monitörü kullanılarak n-Si alttaş üzerine 5nm kalınlığında Al_2O_3 kaplandı.



Şekil 3.2. Savannah ALD sistemi [47].

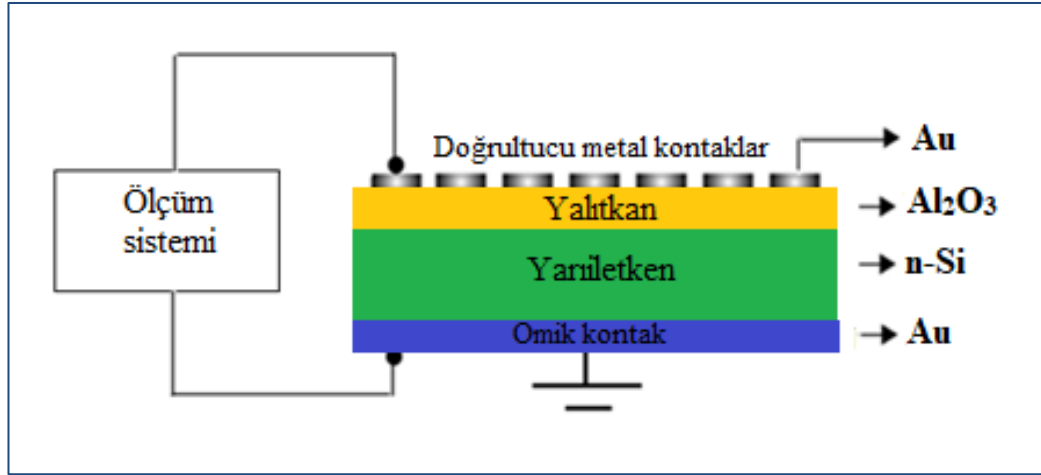
n-tipi Si alttaş üzerine 5 nm kalınlığında Al_2O_3 film büyütüldükten sonra doğrultucu kontaklar oluşturuldu. Au metaller, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak büyütülen Al_2O_3 üzerine buharlaştırıldı. Böylece doğrultucu kontakın oluşturulmasıyla Au/ Al_2O_3 /n-Si şeklinde MIS yapı elde edildi.



Şekil 3.3. Doğrultucu kontak oluşturulurken kullanılan maske örneği.

3.3. ÖLÇÜM SİSTEMİ

Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) yapısının frekansa bağlı admitans ölçümleri (C-G/ω-V) Hewlett Packard 4192A LF Empedans analizörü (5Hz-13MHz) kullanılarak alındı. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs yapısı şematik olarak Şekil 3.4' te verildi.



Şekil 3.4. Au/Al₂O₃/n-Si yapısı.

BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI

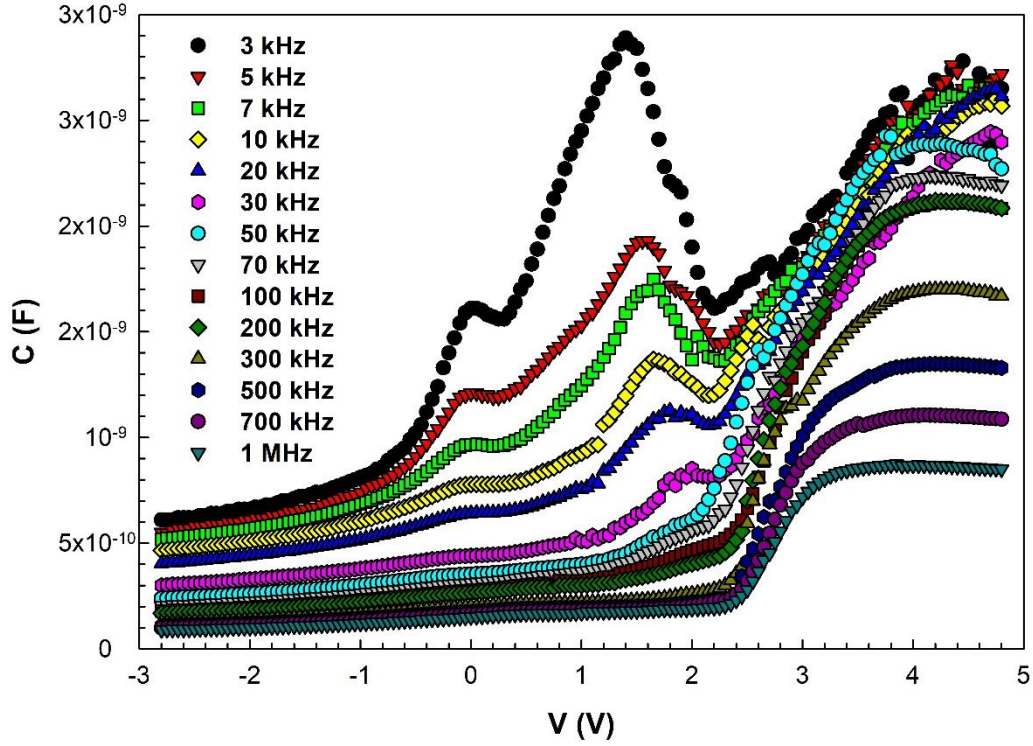
4.1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, birçok Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) Schottky diyotları (SDs) hazırlandı ve bunların elektriksel karakteristikleri benzer davranış gösterdiği için seçilen örnek diyot için kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri farklı frekanslar için ölçüldü ve ilgili grafikler ve çizelgeler elde edildi. C-V ve G/ω-V ölçümleri 3kHz-1MHz frekans aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Frekansa bağlı olarak deneysel C-V ve G/ω-V ölçümlerinden V_D, E_F, ΔΦ_B, W_D ve Φ_B gibi temel diyot parametreleri elde edildi. Elde edilen deneysel sonuçlar mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelendi. Ayrıca metal ile yarıiletken arasında Al₂O₃ yalıtkan tabakanın, seri direncin ve arayüzey durumlarının bu temel elektriksel parametreler üzerine etkisi araştırıldı.

4.2. FREKANS BAĞLI ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER

Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) Schottky diyotlarının (SDs) ters ve doğru ön-gerilim altındaki kapasitans-voltaj (C-V) ve kondüktans-voltaj (G/ω-V) ölçümleri oda sıcaklığında, 3kHz-1MHz frekans aralığında ve -3 V ile +5 V aralığında 0.05 V adımlarla gerçekleştirildi. Elde edilen bu deneysel C-V ve G/ω-V karakteristikleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2' de verildi. Her iki şekilden de görüldüğü gibi hem kapasitans (C) ve hem de kondüktans (G/ω) değerlerinin önemli ölçüde frekansa bağlı olduğu görülmektedir. Şekil 4.1' de ki C-V eğrilerinin her birinde terslenim, tüketim ve yığılma bölgeleri açık olarak görülmektedir. Frekans altındaki C ve G/ω değerlerinde meydana gelen değişimler özellikle tüketim ve yığılma bölgelerinde olmaktadır. Tüketim bölgesinde C-V eğrilerinde meydana gelen yarıma Si ile Al₂O₃ arasında ve

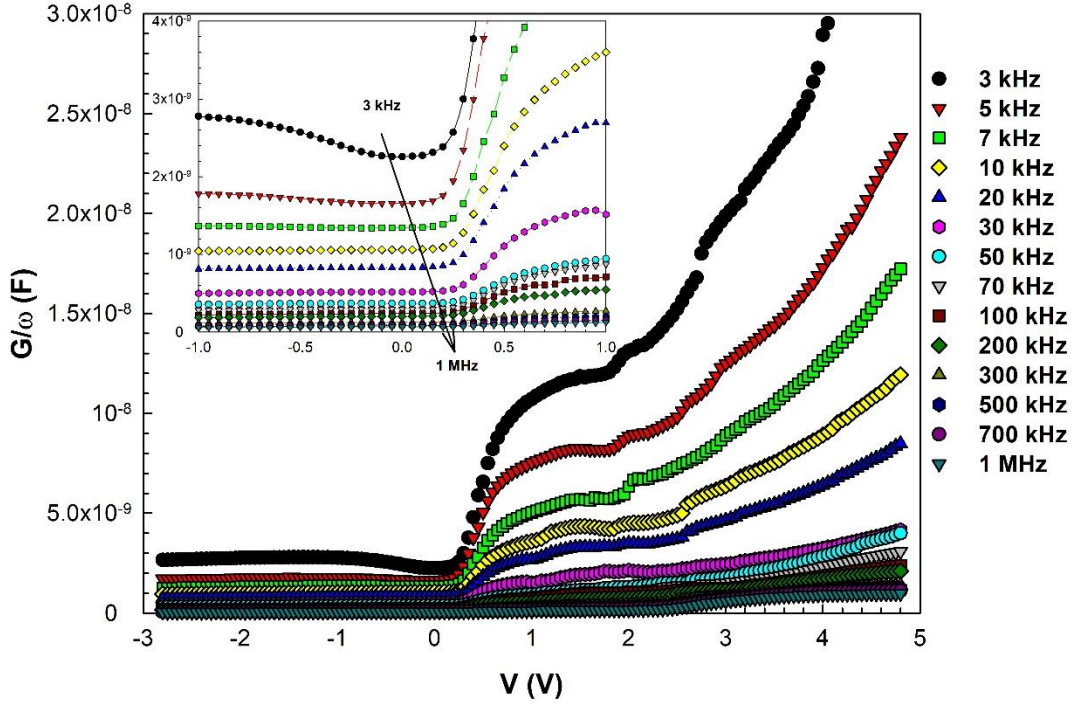
yasak enerji aralığında lokalize olmuş arayüzey durumlarının (N_{ss}) varlığına atfedilebilir [48].



Şekil 4.1. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs frekansa bağlı C-V grafiği.

C ' nin değeri gerilim arttıkça artmakta ve tükenim bölgesinde düşük frekanslarda ($f \leq 30$ kHz) $\sim 1,5$ V' da Al₂O₃ (MIS) yapı arayüzey durumlarının yoğunluk dağılımından dolayı pik vermektedir ve pik yüksekliği frekans arttıkça azalır ve yığılma bölgesine doğru kaymaktadır. Bu beklenmeyen pik yapının seri direncine (R_s) ve M/S arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey durumlarına (N_{ss}) atfedilmiştir. Çünkü metal ile yarıiletken arasında yerleşmiş tuzaklar farklı yaşama ömürlerine (τ) sahip oldukları için ve küçük frekanslarda periyot ($T=1/2\pi f$) bunların ömründen büyük olduğu için bunlar dış AC sinyali takip edebilirler ve C ile G değerlerine ek bir katkı getirirler. Ancak yüksek frekanslarda bu arayüzey durumlarını dış AC sinyali hemen hemen hiç takip edemedikleri için ne C ne de G değerlerine herhangi bir katkı sağlayamazlar. Ayrıca C ve G/ω değerlerinin frekansa oldukça bağlı olup özellikle tükenim ve yığılma bölgesinde frekansın etkisi daha fazla olduğu görülmektedir. Yeterince küçük negatif voltajlarda (terslenim bölgesi) C ve G/ω değerlerinde önemli

bir değişme olmayıp bu bölgede voltajın C ve G/ω değerlerine etkisi hemen hemen hiç yoktur.



Şekil 4.2. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs frekansa bağlı G/ω -V grafiği.

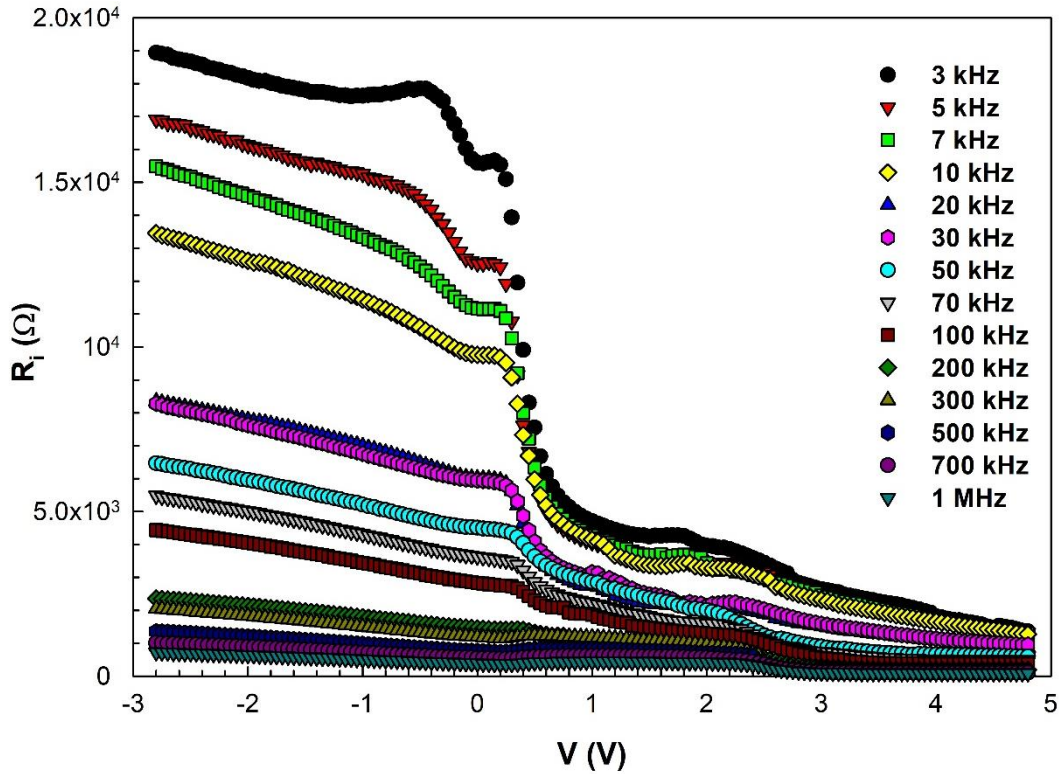
Farklı frekanslarda ve oda sıcaklığında elde edilen deneysel G/ω -V karakteristikleri Şekil 4.2' de verildi. Şekil 4.2' den görüldüğü gibi G/ω değerlerinin C değerleri gibi önemli ölçüde frekansa bağlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, G/ω -V eğrilerinde frekans altında özellikle tüketim ve yığılma bölgesinde C-V eğrilerine paralel bir davranış sergilemektedir. Bu davranış yukarıda açıklandığı gibi tüketim bölgesinde arayüzey durumlarının varlığına ve yığılma bölgesinde ise seri direnç varlığına atfedilebilir.

Metal-yalıtkan-yarıiletken yapılarda seri direnci hesaplamak için birçok yöntemi vardır [49-52]. R_s 'nin gerçek değeri Nicollian ve Brews tarafından geliştirilmiş olan admitans metodu ile güçlü yığılma bölgesinde hesaplanabilmektedir ve bu metot yapının direncinin (R_i) hesaplanmasında kullanılabilir. Bu yüzden, R_i değerleri C-V ölçümleri için Nicollian ve Brews tarafından geliştirilen ve diğer metotlara göre daha doğru, pratik, hızlı ve hassas olarak kabul gören admitans metodu kullanılarak tüm

frekanslar için hem voltaja hem de farklı voltajlar için frekansa bağlı olarak Eş. 4.1 kullanılarak elde edildi [53].

$$R_i = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.1)$$

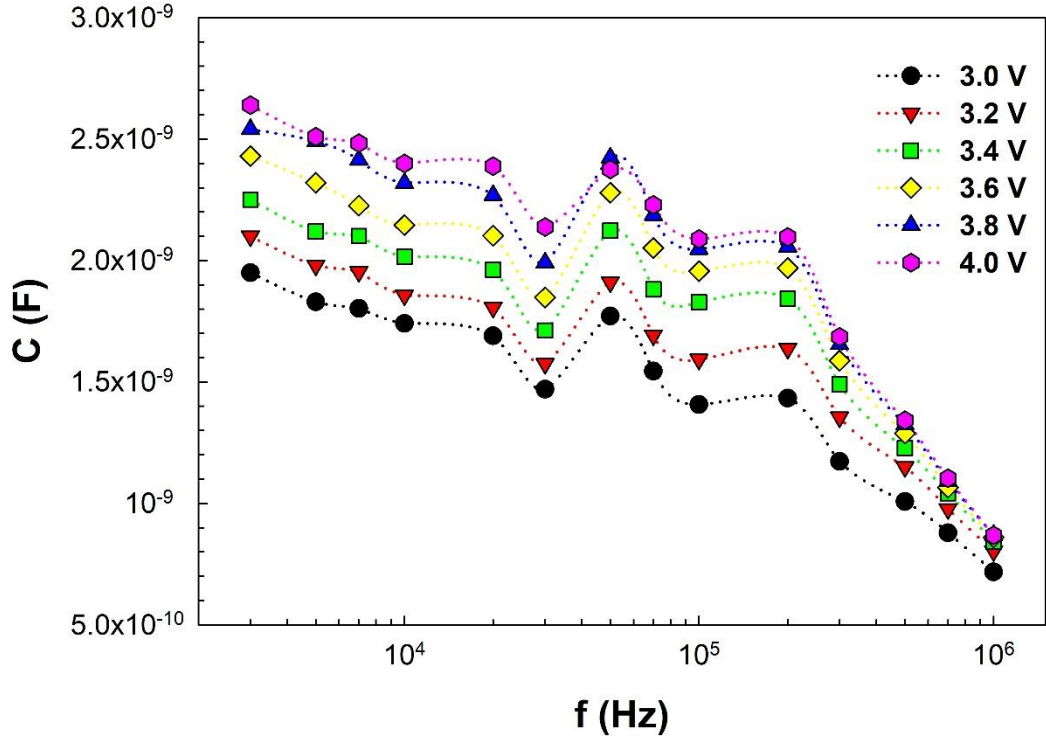
Burada C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla kuvvetli yığılma bölgesindeki kapasitans ve kondüktans değerleridir. Bu yapıların gerçek seri direnç değeri kuvvetli yığılma bölgesindeki C ve G/ω değerlerinden elde edilir. Ancak bu formül voltaja bağlı R_s değerlerini elde etmek içinde kullanılır ve bu yapının iletim mekanizmaları hakkında da bize önemli ipuçları verir. Şekil 4.3' de görüldüğü gibi R_i değerleri, hem frekansa hem de uygulanan gerilime oldukça bağlıdır. Her bir voltajda artan frekansla R_i değerleri azalmaktadır, ancak yüksek voltajlarda ya da yığılma bölgesinde frekansa bağlılık giderek azalmaktadır.



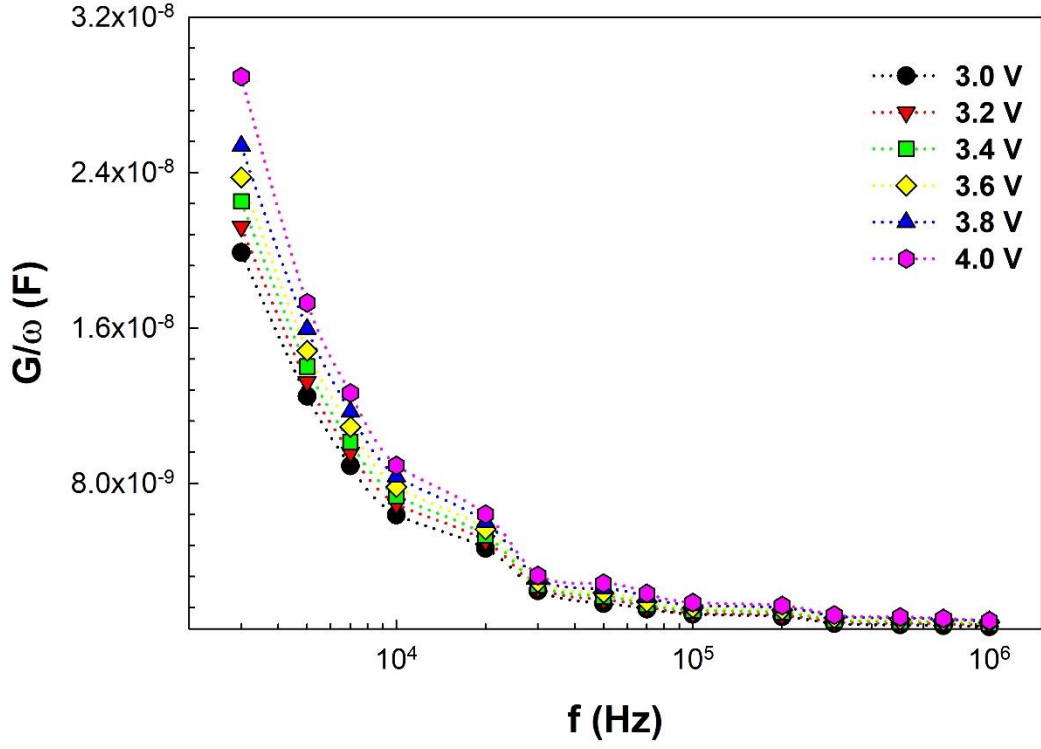
Şekil 4.3. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs frekansa bağlı R_i -V grafiği.

C , G/ω ve R_i değerlerinin farklı voltaj değerleri için frekansa bağlı değişimleri sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6' da verildi. Şekil 4.4-6' da görüldüğü gibi C , G/ω ve R_i

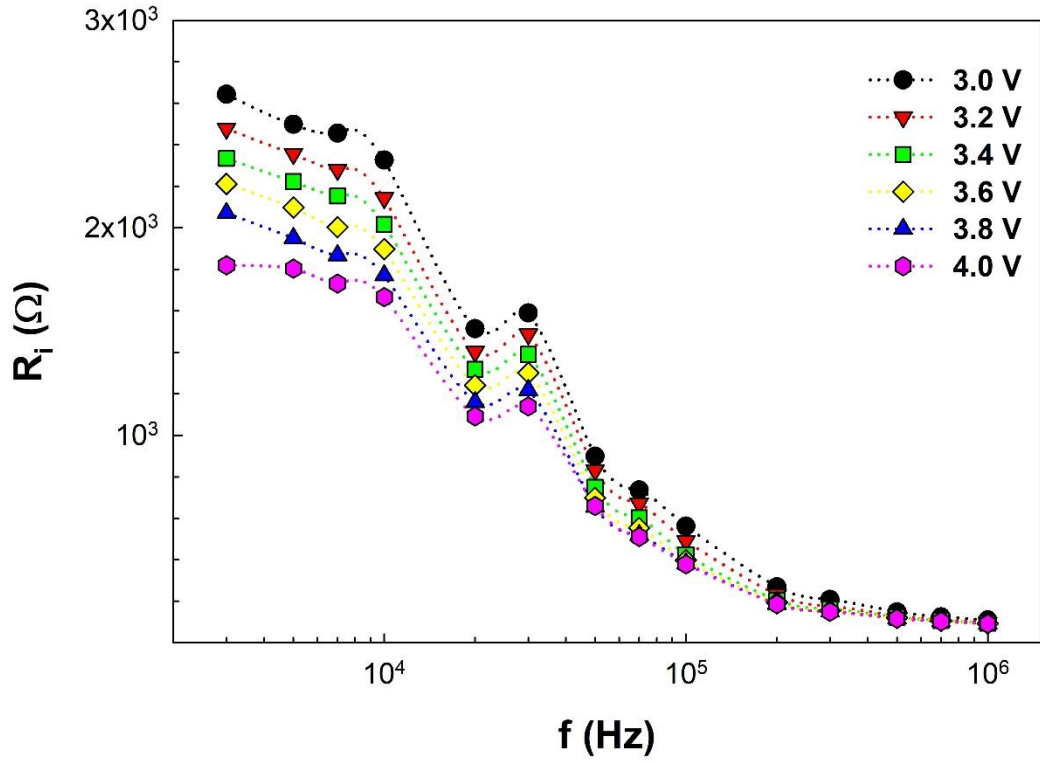
değerlerinin frekans ile değiştiği görülmektedir. Düşük frekanslarda C , G/ω ve R_i değerlerindeki değişim her voltaj için oldukça fazladır. Kapasitans, kondüktans ve direnç değerlerindeki değişim artan frekansla azalmaktadır. Ayrıca voltaj arttıkça kapasitans ve kondüktans değerleri artarken yapının direnci azalmaktadır.



Şekil 4.4. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için C-f grafiği.



Şekil 4.5. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için G/ω -f grafiği.



Şekil 4.6. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için R_1 -f grafiği.

Düzeltilmiş admittans ifadesinin sanal ve gerçel kısmını ($Y_c = G_{ca} + j\omega C_c$) elde etmek için ölçülen kapasitans (C_m) ve kondüktans (G_m/ω) değerleri kullanılarak düzeltilmiş kapasitans (C_c) ve iletkenlik (G_c/ω) değerleri sırasıyla Eş. 4.2 ve Eş. 4.3 kullanılarak 1 MHz frekans için elde edilerek sırasıyla Şekil 4.7 ve 4.8' de verildi [53].

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

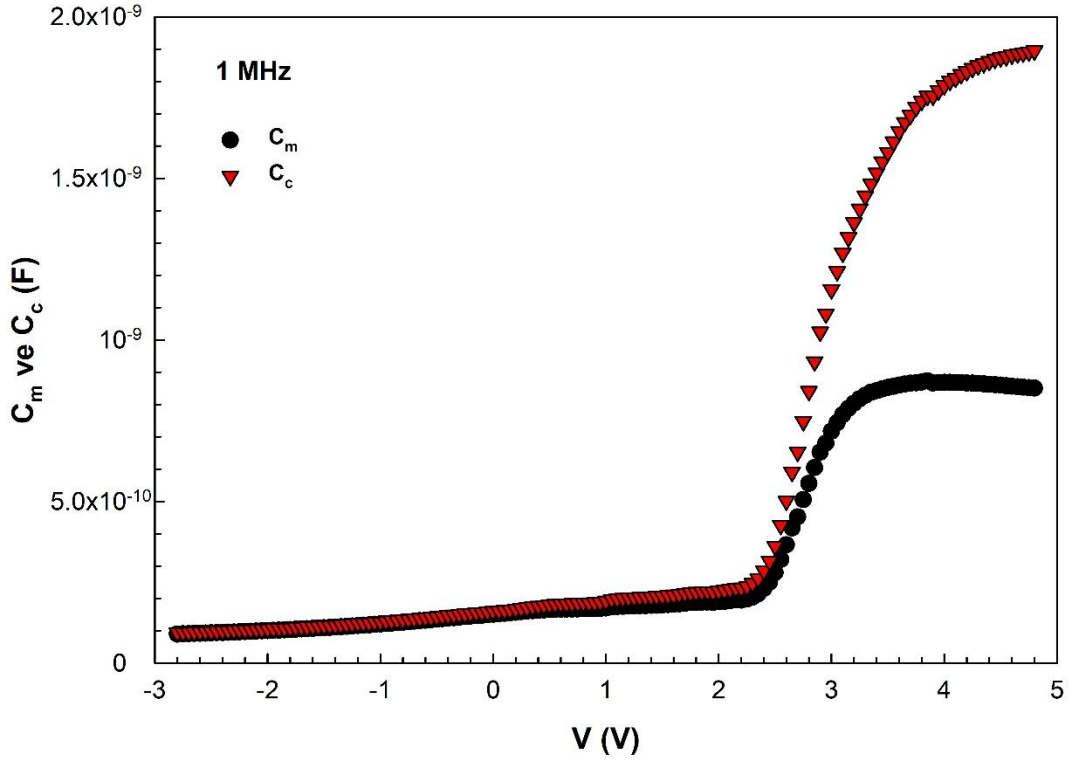
$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.3)$$

Burada,

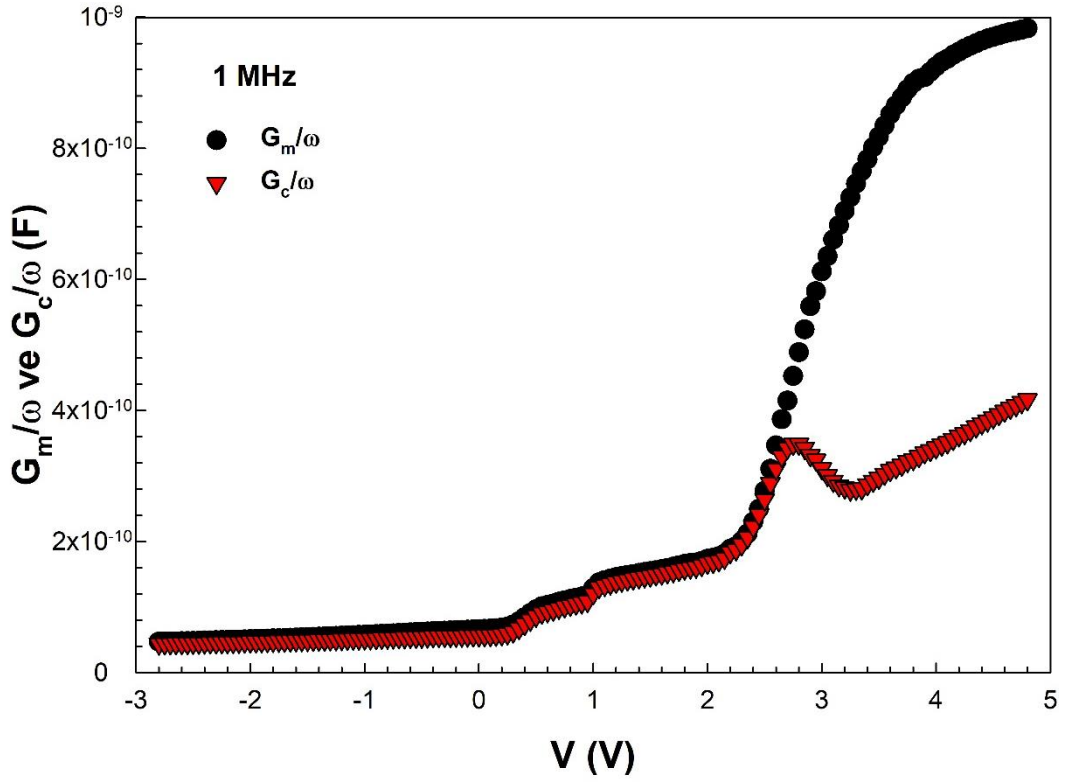
$$a = G_m - (G_m^2 + (\omega C_m)^2) R_s \quad (4.4)$$

eşitliği ile verilen bir parametredir.

Şekil 4.7' de görüldüğü gibi düzeltilmiş kapasitans değerleri özellikle yığılma bölgesinde artan voltaja bağlı olarak artmakta olduğu görülmektedir. Düzeltilmiş iletkenlik değerleri (Şekil 4.8) ise artan voltaja bağlı olarak azalmakta ve tüketim bölgesinde düzgün bir pik vermektedir. G_c/ω -V eğrilerinde tüketim bölgesinde gözlenen bu pikler yasak enerji aralığındaki arayüzey durumlarının özel bir bölgede yoğunlaşmasından kaynaklanmaktadır. Hem C_c -V hem de G_c/ω -V eğrilerindeki bu davranış, bize R_s etkisinin çok önemli olduğu ve mutlaka bu R_s değerinin etkisi dikkate alınarak ölçülen C_m -V ve G_m/ω -V eğrilerinin düzeltilmesini gerektirmektedir. Bu yapılmadığı takdirde elde edilen parametrelerin doğruluğu ve güvenilirliği tartışılır.



Şekil 4.7. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için C_m -V ve C_c -V eğrileri.



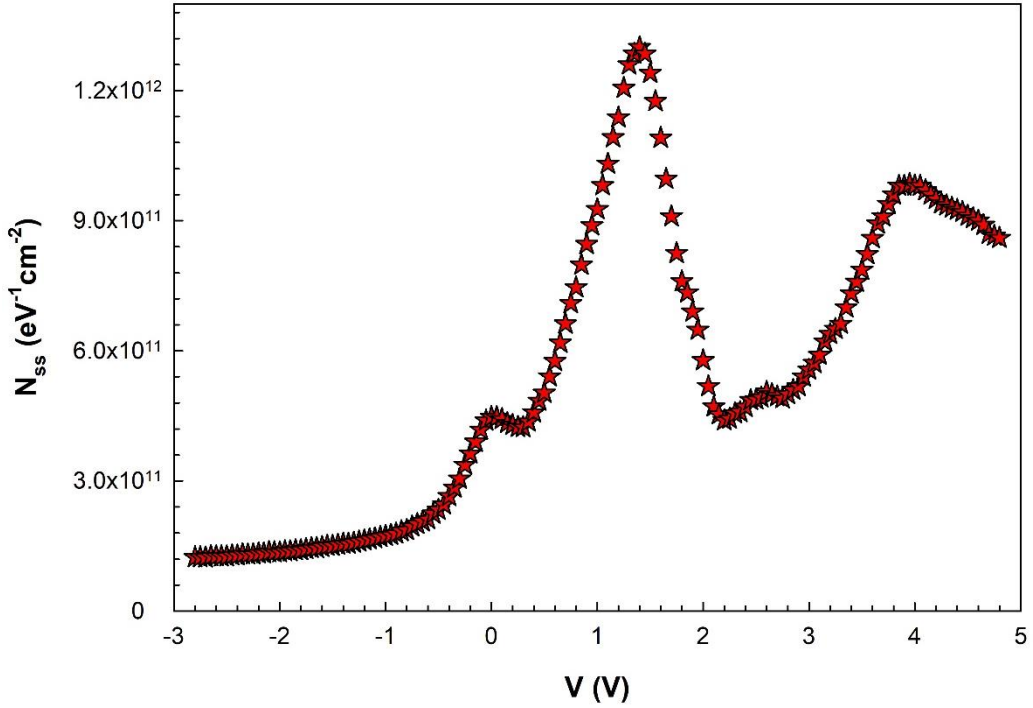
Şekil 4.8. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için G_m/ω -V ve G_c/ω -V eğrileri.

Hazırlanan yapıların performansını seri direnç gibi arayüzey durumları oldukça etkilediği için bunların enerjiye veya voltaja bağlı dağılım profillerini elde etmek son derece önemlidir. Bu çalışmada arayüzey durumlarının dağılım profili gerilime bağlı olarak düşük-yüksek (C_{LF} - C_{HF}) kapasitans metodu kullanılarak elde edildi. C_{LF} - C_{HF} kapasitans metodunun avantajı, arayüzey tabakasının, yarıiletken alt-taşın ve arayüzeyin birçok özelliğinin kolayca belirlenmesine izin vermesidir.

Frekanstan kaynaklanan arayüzey durumlarının voltaja bağlı dağılım profili 3kHz ve 1 MHz frekanstaki C değerleri kullanılarak Eş. 4.5' den elde edildi ve Şekil 4.9' da verildi [53,54].

$$qAN_{ss} = \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} \right] \quad (4.5)$$

Burada C_{ox} , C_{LF} ve C_{HF} parametreleri sırasıyla arayüzey tabakanın kapasitansı, düşük frekans ve yüksek frekans voltaja bağlı ölçülen kapasitans değerleridir.



Şekil 4.9. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için N_{ss} - V eğrisi.

Şekil 4.9' da görüldüğü gibi, N_{ss} - V eğrisi yaklaşık 1.4 V civarında net bir pik vermektedir. Ayrıca N_{ss} değerlerinin artan voltajla artmaktadır.

C^{-2} - V eğrileri tüm frekans değerleri için elde edildi ve Şekil 4.10' da verildi. Şekil 4.10' da görüldüğü gibi, C^{-2} - V eğrileri tüm frekans değerleri için geniş bir voltaj aralığında lineer bir davranış göstermektedir. Bu lineer bölgede; metal-yarıiletken (MS) Schottky diyotları veya arayüzey tabakalı Schottky diyotları için C^{-2} ile V arasındaki ilişki Eş. 4.6' daki gibi ifade edilebilir [55,56]:

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_o A^2 N_D} (V_o + V_R) \quad (4.6)$$

Burada A doğrultucu kontak alanıdır, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. N_D verici katkı atomlarının (P) yoğunluğu, V_R uygulanan ters ön-gerilimi ve V_o ise C^{-2} - V eğrisinin voltaj eksenine extrapole edilmesiyle elde edilen kurulma (built-in) voltajıdır. V_o ile V_D difüzyon potansiyeli arasındaki ilişki,

$$V_o = V_D - \frac{kT}{q} \quad (4.7)$$

eşitliği ile verilir. Burada kT/q terimi eV cinsinden termal enerjidir. Böylece frekans şiddetleri için potansiyel engel yüksekliği değerleri Eş.4.8' den yararlanılarak elde edilerek Çizelge 4.1 ve Şekil 4.21' de verildi.

$$\Phi_B(C - V) = V_D + E_F - \Delta\Phi_B \quad (4.8)$$

Burada E_F yarıiletkenin Fermi enerji seviyesidir ($E_F = \frac{kT}{q} \ln(N_c / N_D)$). $\Delta\Phi_B$ hayali kuvveti engel düşmesi olup Eş.4.9' dan elde edilebilir [55,56]:

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

Burada E_m parametresi elektrik alanıdır ve Eş.4.10' dan elde edilebilir.

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_D}{\epsilon_s \epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

İletim bandındaki izinli durumların yoğunluğu (N_c), elektronun etkin kütlesi m_e^* , elektronun serbest kütlesi m_o ve sıcaklık T cinsinden Eş. 4.11' den elde edilebilir.

$$N_c = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_e^*/m_o)^{3/2} \quad \text{ve} \quad (m_e^*/m_o) = 0,98 \quad (4.11)$$

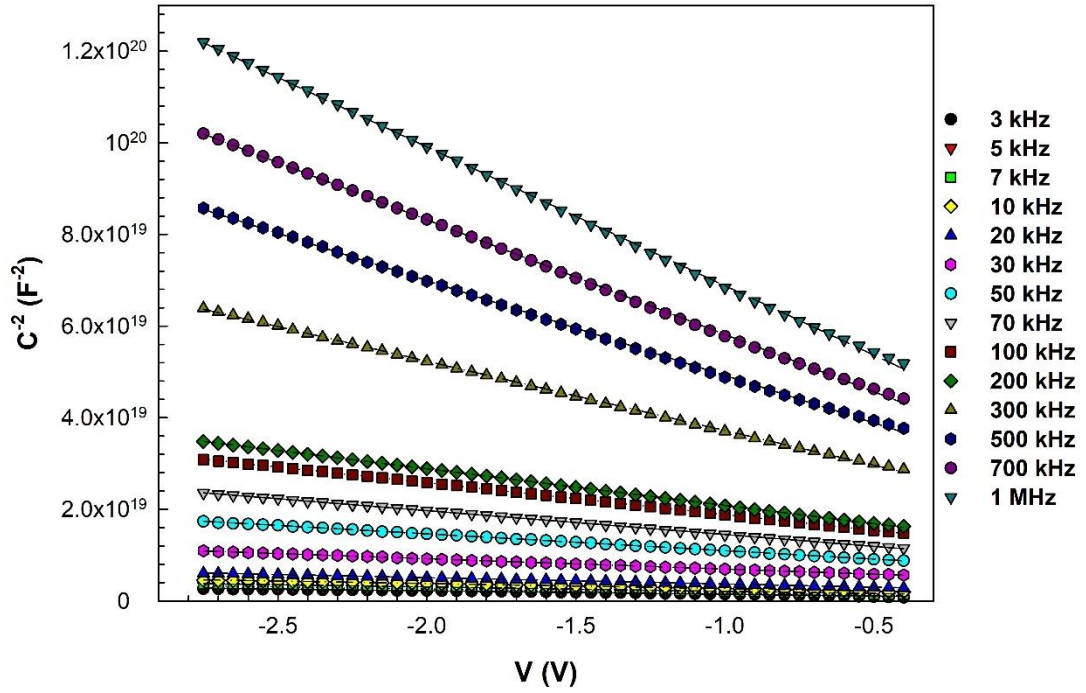
V_o değerleri birden büyük olduğunda, bu eşitliklere düzeltme faktörünün (C_2) eklenmesi ve bu nedenle yukarıda verilen eşitliklerde V_o ifadeleri yerine $C_2 V_o$ ifadesinin kullanılması gerekir [12]. C_2 değerleri, Eş. 4.12' den hesaplanabilir ve burada N'_D ($= 4.31 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) teorik verici katkı atomlarının yoğunluğudur.

$$C_2 = \frac{N_D}{N'_D} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + qd_i N_{ss}} \quad (4.12)$$

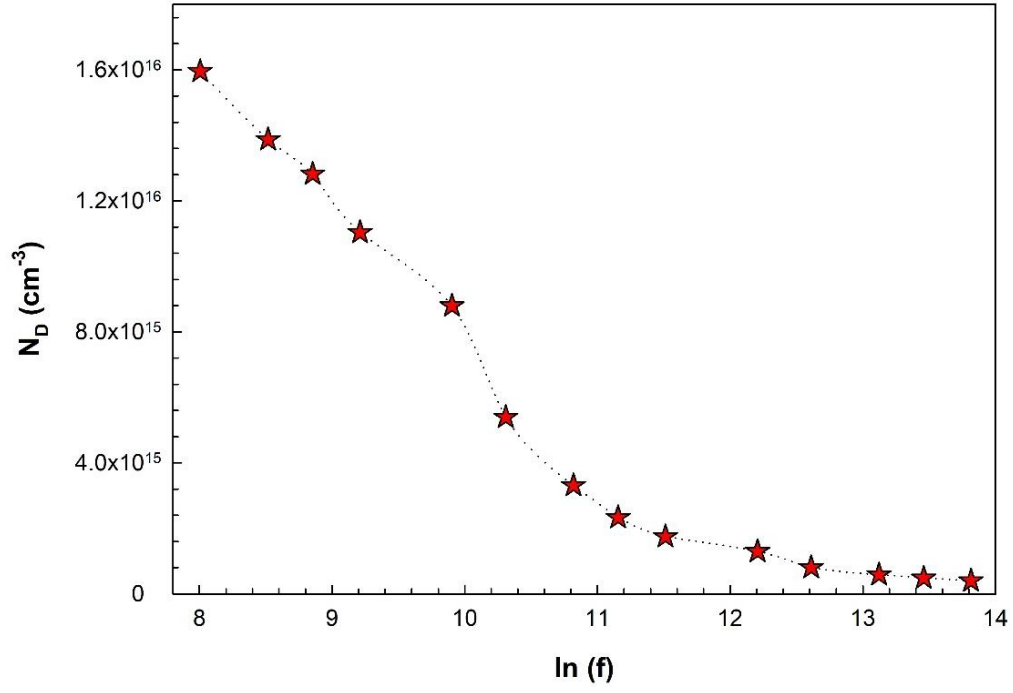
Tüm frekans değerleri için C^2 -V eğrilerinden elde edilen V_D , N_D , E_F , W_D ve Φ_B değerleri elde edilerek Çizelge 4.1' de verildi. Çizelge 4.1' den görüldüğü gibi, elde edilen bu değerler frekansa oldukça bağımlılık göstermektedir. Elde edilen deneysel V_D , E_F , W_D ve Φ_B değerleri artan frekansla artarken, N_D değerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca elde edilen temel diyot parametreleri Şekil 11-15' te verildi.

Çizelge 4.1. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için temel diyot parametreleri.

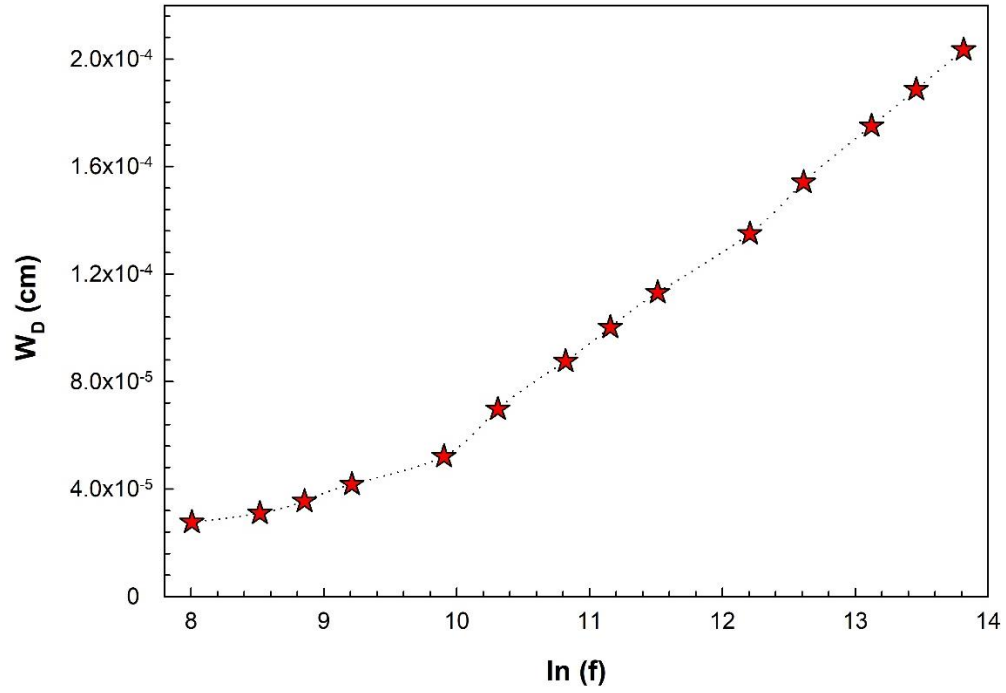
| Frekans (kHz) | V_D (eV) | N_D (cm ⁻³) | E_F (eV) | Em (V/cm) | W_D (cm) | Φ_B (eV) | c_2 |
|---------------|------------|---------------------------|------------|----------------------|------------------------|---------------|-------|
| 3 | 0.959 | 1.59x10 ¹⁶ | 0.169 | 6.76x10 ⁴ | 2.76x10 ⁻⁵ | 0.418 | 0.370 |
| 5 | 1.046 | 1.38x10 ¹⁶ | 0.173 | 6.89x10 ⁴ | 3.11x10 ⁻⁵ | 0.451 | 0.322 |
| 7 | 1.260 | 1.28x10 ¹⁶ | 0.175 | 6.97x10 ⁴ | 3.55x10 ⁻⁵ | 0.531 | 0.297 |
| 10 | 1.498 | 1.10x10 ¹⁶ | 0.179 | 7.06x10 ⁴ | 4.17x10 ⁻⁵ | 0.620 | 0.256 |
| 20 | 1.858 | 8.79x10 ¹⁵ | 0.184 | 7.03x10 ⁴ | 5.22x10 ⁻⁵ | 0.756 | 0.204 |
| 30 | 2.035 | 5.39x10 ¹⁵ | 0.197 | 5.76x10 ⁴ | 6.97x10 ⁻⁵ | 0.826 | 0.125 |
| 50 | 1.968 | 3.30x10 ¹⁵ | 0.209 | 4.44x10 ⁴ | 8.76x10 ⁻⁵ | 0.805 | 0.077 |
| 70 | 1.819 | 2.33x10 ¹⁵ | 0.217 | 3.58x10 ⁴ | 1.00x10 ⁻⁴ | 0.754 | 0.054 |
| 100 | 1.742 | 1.75x10 ¹⁵ | 0.225 | 3.04x10 ⁴ | 1.13x10 ⁻⁴ | 0.728 | 0.041 |
| 200 | 1.629 | 1.30x10 ¹⁵ | 0.232 | 2.41x10 ⁴ | 1.35x10 ⁻⁴ | 0.689 | 0.030 |
| 300 | 1.489 | 8.04x10 ¹⁴ | 0.244 | 1.90x10 ⁴ | 1.54 x10 ⁻⁴ | 0.641 | 0.019 |
| 500 | 1.402 | 5.86x10 ¹⁴ | 0.252 | 1.57x10 ⁴ | 1.75 x10 ⁻⁴ | 0.612 | 0.014 |
| 700 | 1.349 | 4.86x10 ¹⁴ | 0.257 | 1.40x10 ⁴ | 1.89 x10 ⁻⁴ | 0.594 | 0.011 |
| 1000 | 1.296 | 4.01x10 ¹⁴ | 0.262 | 1.25x10 ⁴ | 2.03x10 ⁻⁴ | 0.576 | 0.009 |



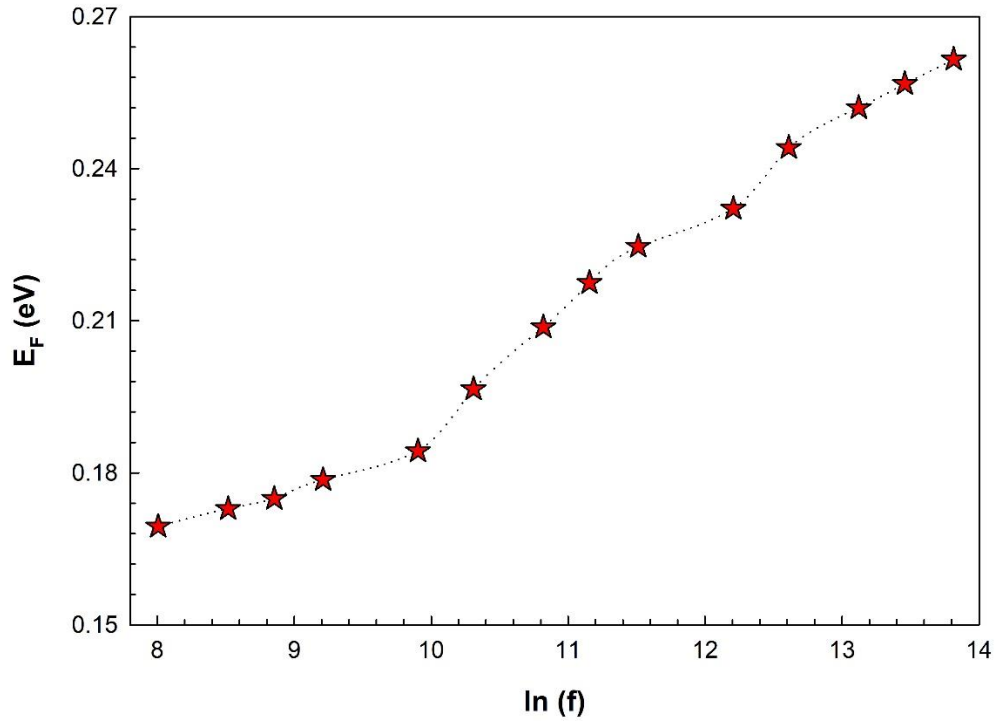
Şekil 4.10. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen C^{-2} - V eğrileri.



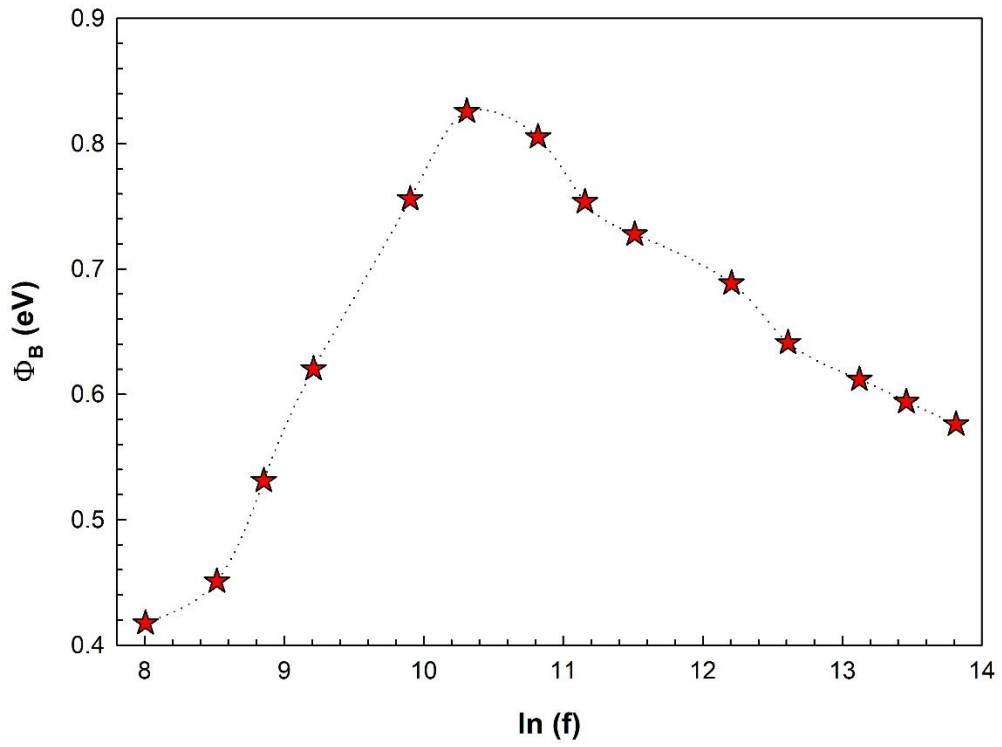
Şekil 4.11. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen N_D - $\ln(f)$ eğrisi.



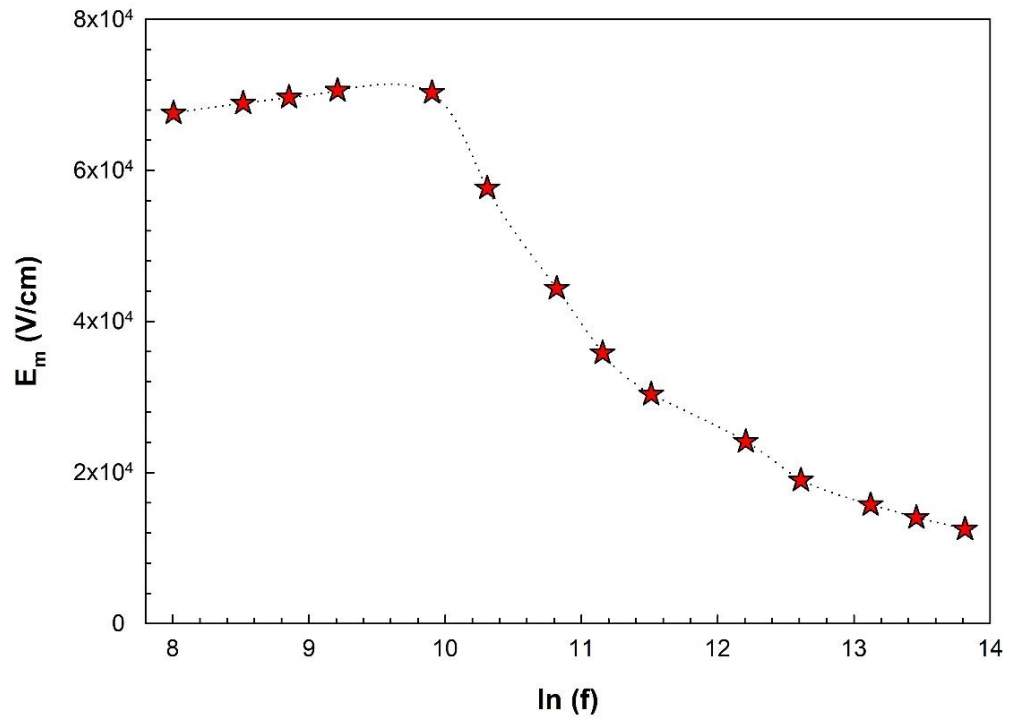
Şekil 4.12. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen W_D - $\ln(f)$ eğrisi.



Şekil 4.13. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen E_F - $\ln(f)$ eğrisi.



Şekil 4.14. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen Φ_B - $\ln(f)$ eğrisi.



Şekil 4.15. Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs için elde edilen E_m - $\ln(f)$ eğrisi.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) Schottky diyotlarının kapasitans-voltaj ve kondüktans-voltaj ölçümleri Hawlett Packard 4192A LF Empedans Analiz metresi kullanılarak -3V ile 5V aralığında 3kHz-1 MHz frekans aralığında 50 mV' luk bir dış ac uyarma sinyali altında alındı. Tez çalışmasında özellikle frekans ile diyotun direnci ve arayüzey durumlarının yoğunluğu gibi temel diyot parametreleri üzerine etkisi incelendi.

Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- C-V ve G/ω-V eğrileri tipik MS/MIS karakteristiğinde olduğu gibi terslenim, tüketim ve yığılma bölgelerinden oluşmaktadır.
- Kapasitans eğrileri artan frekansla artmaktadır ve tüketim bölgesinde arayüzey durumlarının yoğunluğundan dolayı pik verdiği görülmektedir. Düşük frekanslarda ($f \leq 30\text{kHz}$) görülen pik değerleri, literatürde anomalous peak bilinir ve seri direnç, arayüzey durumları ve arayüzey tabakasına atfedilir. Yüksek frekanslarda N_{ss} uygulanan dış ac sinyalini takip edemediği için kapasitans değerlerine çok az ya da hiçbir katkı getirmez. Bu yüzden yüksek frekanslarda C değerleri ideale yaklaşır.
- C-V ve G/ω-V değerlerinin frekansa ve gerilime oldukça bağlı olduğu, özellikle yığılma bölgesinde daha fazla etkili olduğu görüldü. Fakat ters gerilimde bu değerlerde önemli ölçüde değişme olmayıp voltajın etkisinin çok az olduğu gözlemlendi.
- R_i değerleri, C-G/ω-V ölçümlerinden Nicollian ve Brews' in admitans metodu kullanılarak tüm frekans değerleri için elde edildi. Au/Al₂O₃/n-Si

(MIS) Schottky diyotlarının R_i değerleri artan voltaj ve frekans ile azaldığı görüldü. Ayrıca yüksek frekanslarda direncin voltajdan bağımsız olduğu görüldü.

- Yüksek frekanslarda arayüzey durumları ac sinyalini takip edemediğı için C ve G/ω değerlerine bir katkıda bulunmaz. Bu yüzden, daha güvenilir direnç (R_i) değeri elde etmek için yüksek frekanslardaki C ve G/ω değerleri kullanılması gerekir. Bu yüzden düzeltilmiş kapasitans (C_c), iletkenlik (G_c/ω) eğrileri 1MHz frekansta hesaplandı. Elde edilen grafiklerden de görüldüğü gibi C_c değeri özellikle yığılma bölgesinde artarken, G_c/ω değeri ise bir pik vermektedir. C_c - G_c/ω değerlerindeki bu davranış R_s değerinin çok önemli bir faktör olduğunu ve hesaplamalarda dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir.
- Tüm frekanslar için Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) SDs C^{-2} -V eğrisilerinin ters gerilimde lineer bir davranış sergilediğı görüldü.
- C^{-2} -V eğrilerden elde edilen (V_D , E_F , $\Delta\Phi_B$, W_D ve Φ_B gibi) temel diyot parametrelerinin frekansa bağlı olarak önemli ölçüde değiştiiği görüldü.
- C-V eğrilerinde tüketim bölgesinde görülen yarılmalar M/S arasında ve yasak enerji aralığında lokalize olmuş N_{ss} ' lerin varlığına ve özel bir dağılımına atfedildi.
- Düşük ve yüksek frekans altındaki kapasitans eğrilerinin farkından, arayüzey durumlarının voltaja bağlı değişimi elde edildi. Elde edilen N_{ss} değerlerinin artan frekansla ile üstel olarak artmakta olduğu gözlemlendi.

Sonuç olarak, hazırlanan Au/Al₂O₃/n-Si (MIS) Schottky diyotlarının temel diyot parametrelerinin frekansa oldukça bağlı olduğu ve metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabaka, seri direnç ve arayüzey durumlarından önemli ölçüde etkilendiğı görüldü. Bu yüzden, yapılan tüm hesaplamalarda yapının direnci, arayüzey tabakanın

kalınlığı ve arayüzey durumlarının etkisi dikkate alınmalıdır. Bu yapılmadığı takdirde, elde edilen sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği tartışılır.

Frekansa bağlı admitans ölçümlerinden elde edilen sonuçlar ışığında bu ve benzeri konularda çalışacak olan araştırmacılara yol göstermesi açısından verilebilecek öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Al_2O_3 arayüzey tabakalı Schottky diyotların son derece temiz laboratuvar ortamlarında hazırlanması
- Hazırlanan bu yapılar hakkında daha kapsamlı araştırma yapmak amacıyla radyasyona, aydınlatma şiddetine ve sıcaklığa bağlı ölçümlerinin incelenmesi.
- Diyotun elektriksel karakteristikleri incelenmeden önce yapısal ve benzeri analizlerin yapılması.
- Dış etkenlerin tüm ölçümler üzerindeki etkisini azaltmak için diyot ölçümlerinin dış ortamdan etkilenmemesi için kriyostat veya benzeri bir düzenek içinde gerçekleştirilmesi.
- Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarda arayüzey yalıtkan olarak Al_2O_3 kullanılması durumunda farklı kalınlıklarda tabakalar kullanılarak analizlerin yapılması.
- Katkı malzemesi eklenmesi ile yapının elektriksel parametrelerinde oluşan değişikliklerin gözlemlenmesi.

KAYNAKLAR

1. Tan, O. S., "ZnO arayüzey tabakalı Schottky engel diyotlarının hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin aydınlatma şiddetine bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-9 (2016).
2. Kaya, A., "Al/SiO₂/p-Si (MIS) yapıların elektrik karakteristiklerinin frekansa bağlı incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-3 (2010).
3. Tecimer, H., Tan S. O. ve Altındal Ş., "Frequency-dependent admittance analysis of the metal–semiconductor structure with an interlayer of Zn-doped organic polymer nanocomposites", **IEEE Transactions on Electron Devices**, 65 (1): 231-236 (2018).
4. Rhoderick, E. H. and Williams R. H., "Metal Semiconductor Contacts", **Oxford Press**, 20-264 (1988).
5. Aydemir, U., "Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin I-V, C-V ve DLTS metodu ile incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-3 (2009).
6. Tecimer, H., "On the frequency–voltage dependent electrical and dielectric profiles of the Al/(Zn-PVA)/p-Si structures", **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 29 (23): 20141–20145 (2018).
7. Tecimer, H., "Au/(Zn-Katkılı) Polivinil Alkol/n-GaAs yapıların hazırlanması ve akım-iletim mekanizmalarının geniş bir sıcaklık aralığında incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-5 (2014).
8. Uslu, H., "Au/(Co, Zn-Katkılı) Polivinil Alkol/n-Si Schottky engel diyotların hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin aydınlatma şiddetine bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-4 (2010).
9. Tan S. O., "Identification of the frequency- and voltage-dependent dielectric characterization of metal-Zn/PVA-semiconductor structures", **IEEE Transactions on Nanotechnology**, 18: 432-436 (2019).
10. Bilkan, Ç., Zeyrek, S., San S. E. and Altındal, Ş., "A compare of electrical characteristics in Al/p-Si (MS) and Al/C₂₀H₁₂/p-Si (MPS) type diodes using current–voltage (I–V) and capacitance–voltage (C–V) measurements", **Materials Science in Semiconductor Processing**, 32: 137-144 (2015).
11. Welker, H., "Walter Schottky ", **Physics Today**, 29 (6): 63 (1976).

12. Sze, S. M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.", *John Wiley & Sons*, New York, 362-390 (1981).
13. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.", *Mc Graw-Hill*, New York, 420-450, 517-523 (1997).
14. Cowley, A. M., Sze, S.M., "Surface state and barrier height of metal semiconductor systems", *J. Appl. Phys.*, 36 (10): 3212-3221 (1965).
15. Aydemir, U., "Au/PVA:Zn/n-Si (MPS) yapıların hazırlanması ve temel elektriksel özelliklerinin ışık altında incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-4 (2014).
16. Tan, S. O., Uslu Tecimer, H., Çiçek, O., Tecimer, H., Orak, İ. and Altındal Ş., "Electrical characterizations of Au/ZnO/n-GaAs Schottky diodes under distinct illuminations intensities", *J Mater Sci: Mater Electron*, 27, 8340-8347 (2016).
17. Çiçek, O., Uslu Tecimer, H., Tan, S. O., Tecimer, H., Altındal, Ş. and Uslu, İ., "Evaluation of electrical and photovoltaic behaviours as comparative of Au/n-GaAs (MS) diodes with and without pure and graphane (Gr)-doped polyvinyl alcohol (PVA) interfacial layer under dark and illuminated conditions", *Composites Part B*, 98, 260-268 (2016).
18. Tecimer, H., Altındal, Ş., Aksu, S., Atasoy, Y. and Bacaksız, E., "İnterpretation of barrier height inhomogeneities in Au/In₂S₃/SnO₂/(In-Ga) structures at low temperatures", *J Mater Sci: Mater Electron*, 28, 7501-7508 (2017).
19. Çiçek, O., Uslu Tecimer, H., Tan, S. O., Tecimer, H., Orak, İ. and Altındal, Ş., "Synthesis and characterization of pure and graphene (Gr)-doped organic/polymer nanocomposites to investigate the electrical and photoconductivity properties of Au/n-GaAs structures", *Composites Part B*, 113, 14-23 (2017).
20. Gökçen, M., "MOS yapılarında kapasitans-voltaj (C-V) iletkenlik-voltaj (G/ω-V) karakteristiklerinin frekans ve radyasyona bağlı incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-2 (2003).
21. Gökçen, M., "Au/SiO₂/n-GaAs (MOY) yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi ", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-4 (2008).
22. Kaplan, K., "Atomik katman biriktirme yöntemi ile büyütülmüş Al₂O₃ ince filmlerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çankırı, 1-34 (2018).
23. Güçlü, Ç. Ş., "Arayüzeyleri farklı kalınlıklarda imal edilmiş Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In Schottky diyotların dielektriksel özelliklerinin ve Ac elektriksel iletkenliklerinin frekansa ve sıcaklığa bağlılıkları", Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-30 (2018).

24. Uğur, A., Ay, N., "Atomik katman biriktirme (ALD) cihazları ve çeşitlerindeki gelişmeler", *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), 590-605, (2018).
25. Altındal, S., "Al - SiO_x - pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 52-74 (1993).
26. Parlaktürk, F., "Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/n-Si (MFIS) yapıların hazırlanması, elektriksel ve dielektrik özelliklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 8-63 (2007).
27. Bilkan, Ç., "Perilensiz ve Perilenli Al/p-Si Schottky engel diyotlarının elektriksel özelliklerinin oda sıcaklığında karşılaştırılması", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-37 (2013).
28. Song, Y. P., Van Meirhaeghe, R. L., Laflere, W. H., Cardon, F., "On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage-temperature and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers", *Solid-State Electron.*, 29:633-638 (1986).
29. Sharma, B.L., "Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions Their Applications", *Plenum Press*, New York and London, 1-118 (1984).
30. Kanbur, H., "Yalıtkan tabakalı Al/p-Si Schottky diyotlarda elektriksel karakteristiklerin sıcaklığa bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 24-26 (2008).
31. Yacobi, B. G., "Applications of semiconductors", Semiconductor Materials An Introduction to Basic Principles, *Kluwer Academic Publishers*, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 116-117 (2003).
32. Sharma, B.L., "Physics of Schottky barrier junctions", Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications, *Plenum Press*, New York and London, 1-56 (1984).
33. Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., "Surfaces, interfaces, and Schottky barriers", Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed., *Clarendon Press*, Oxford, 1-257 (1988).
34. Wilson, A.H., "The Theory of Electronic Semiconductors", *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, 1333: 458-463 (1931).
35. Moll J.L., Tarui Y., "A new solid state memory resistor", *IEEE Trans. Electron Devices*, 10nd ed., 338-341 (1963).

36. Park C.H., Won M.S., Oh Y.H., Son Y.G., “An xps study and electrical properties of Pb_{1.1}Zr_{0.53}Ti_{0.47}O₃/PbO/Si (MFIS) structures according to the substrate temperature of the PbO buffer layer”, *Appl. Surface Science*, 252:1988-1997 (2005).
37. Terman L. M., “An investigation of surface states at a silicon-silicon dioxide interface employing metal-oxide-silicon diodes” , *Solid-State Electronics*, 5(5): 259-285 (1962).
38. Cooke M. J., “Semiconductor Devices”, *Prentice Hall*, New York, 294-308 (1990).
39. Grove A. S., “Physics and Technology of Semiconductor Devices”, *John Wiley & Sons*, New York, 91-106: 334-357 (1967).
40. Eroğlu, G. A., “Au/SiO₂/n-Si (MIS) yapının elektriksel ve dielektrik karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-34 (2011).
41. Tataroğlu, B., “MIS yapıların frekans ve radyasyona bağlı temel elektriksel parametreleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-23 (2006).
42. Yücedağ, İ., “Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapılarında elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-39 (2007).
43. Sönmez, Z., “Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (Al/SiO₂/p-Si) yapıların elektrik ve dielektrik özelliklerinin frekans ve potansiyele bağlı incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-41 (2012).
44. Akın, B., “Au/ZnO/n-GaAs (MIS) Schottky engel diyotların (SBDs) elektriksel karakteristiklerinin frekans ve voltaja bağlı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-36 (2015).
45. Sevgili, Ö., “Au/n-4H-SiC (MS) Schottky diyotların hazırlanması ve elektriksel karakteristiklerinin frekansa bağlı incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-29 (2013).
46. İnternet: Saykar Kumlama Mühendisliği, “Alüminyum Oksit Özellikleri”, <http://www.aluminyumoksit.com/aluminyum+oksit+ozellikleri.html> (2019).
47. İnternet: Veeco, “Advanced Capabilities for Advanced Research”, <http://www.cambridgenanotechald.com/products/Savannah-ald.shtml> (2019).
48. Şahingöz, R., Kanbur, H., Voigt, M., Soykan, C. “The determination of interface states and series resistance profile of Al/polymer/PEDOT-PSS/ITO

- heterojunction diode by I-V and C-V methods”, *Synthetic Metals*, 158:727-731 (2008).
49. Rhoderick, E.H., Williams R.H., “Metal Semiconductor Contacts”, *Oxford Press*, 257-264 (1988).
 50. Altındal, Ş., Tataroglu, A., Dökme, İ., “Density of interface states, excess capacitance and series resistance in the metal-insulator-semiconductor (MIS) solar cells”, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 85:345-358 (2005).
 51. Sato, K., Yasamura, Y., “Study of forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance”, *J. Appl. Phys.*, 58(9): 3655-3658 (1985).
 52. Norde, H., “A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance”, *J. Appl. Phys.*, 50(7): 5052-5053 (1979).
 53. Nicollian, E.H., Brews, J.R., “MOS Physics and Technology”, *John Wiley & Sons*, New York, 40-175, 222-226, 423-439 (1982).
 54. Çakar, M., Onganer, Y., Türüt, A., “The nonpolymeric organic compound (pyronine-B)/p-type silicon/Sn contact barrier devices”, *Synthetic Metals*, 126:213-218 (2002).
 55. Sze, S.M., K. Ng Kwok, “Physics of Semiconductor Devices 3rd ed.”, *John Wiley & Sons*, New Jersey, 362-390 (2007).
 56. Sing, A., Reinhart, 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):3475-3484 (1990).

ÖZGEÇMİŞ

Murat AK 1992 yılında Kastamonu'da Avşargüney Köyünde doğdu; ilk öğrenimini İstanbul'da, orta öğrenimini Gebze' de tamamladı. Darıca Denizyıldızları Anadolu Meslek Lisesi Elektrik Elektronik Bölümü Bakım ve Onarım Dalından mezun oldu. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2016 yılında iyi derece ile mezun oldu ve bir yandan 2014 yılında başlamış olduğu yandal Biyomedikal Mühendisliğinde bununla beraber tamamladı. 2018 yılında Özelsin Koleji Eğitim Merkezi'nde Bilişim Teknolojileri ve Yazılım Öğretmeni olarak göreve başladı. 2018 yılında Özelsin Koleji'nde bir süre çalıştıktan sonra mühendislik alanında Meditel ve AveA Sağlık firmalarında proje bazlı olarak Biyomedikal Mühendisliği olarak görev yaptı. 2016 yılında KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programını tamamladı.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Beylikbağı Mahallesi Vatan Caddesi 303. Sokak No:14 Daire:6 Fonoğlu
İnşaat Gebze /KOCAELİ
Tel : (534) 775 86 29
E-posta : muratak105@gmail.com