

**ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Al/p-Si METAL-YARIİLETKEN (MS) YAPILARIN HAZIRLANMASI VE
DIELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANS BAĞLI İNCELENMESİ**

Ali KÖMÜRCÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

**ÇANKIRI
2025**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Ali KÖMÜRCÜ tarafından hazırlanan “Al/p-Si Metal-Yarıiletken (MS) Yapıların Hazırlanması ve Dielektrik Özelliklerin Frekansa Bağlı İncelenmesi” adlı tez çalışması 22/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN

Eş Danışman :

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Fizik Anabilim Dalı
Gazi Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Çiğdem YÜKSEKTEPE ATAOL
Fizik Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN
Fizik Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ersoy YILMAZ

Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum “ Al/p-Si Metal-Yarıiletken (MS) Yapıların Hazırlanması ve Dielektrik Özelliklerin Frekansa Bağlı İncelenmesi ” konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan “Bilimsel İntihal Tespit Programıyla tarandığını, “intihal içermediğini” beyan ederim. Çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (22/01/2025).

Ali KÖMÜRCÜ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Al/p-Si METAL-YARIİLETKEN (MS) YAPILARIN HAZIRLANMASI VE
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN FREKANSA BAĞLI İNCELENMESİ

Ali KÖMÜRCÜ

Çankırı Karatekin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci ve ikinci bölümde literatür incelemesi, tezin motivasyonu ve katkısı hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde MS kontaklar ile MIS kontaklar oluşumu genel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde ise Al/p-Si MS yapıları hazırlanarak onların oda sıcaklığında dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp açısı ($\tan\delta$), ac elektrik iletkenlik (σ_{ac}), reel ve imajiner elektrik modülü (M' and M'') gibi dielektrik özelliklerinin 5kHz-1MHz frekans aralığı ve oda sıcaklığında deneysel kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümleri kullanılarak araştırıldı. Deneysel sonuçlar hem elektrik hem de dielektrik parametrelerin güçlü bir şekilde frekansa olduğunu göstermektedir. ϵ' ve ϵ'' artan frekansla azalır. Aynı zamanda, ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) artan frekans artmaktadır. $1/C^2$ -V grafiği kullanılarak; V_0 potansiyeli, engel yüksekliği Φ_B , verici atomların yoğunluğu N_D , tüketim tabakası genişliği W_D ve E_m değeri hesaplandı. Sonuç bölümünde tezin önemi ve sonuçları hakkında bilgi verilmiştir.

2025, 55 sayfa

ANAHTAR KELİMELER: MS yapılar, Dielektrik özellikler, Frekansa bağıllık

ABSTRACT

Master of Science Thesis

PREPARATION OF Al/p-Si METAL-SEMICONDUCTOR (MS) STRUCTURES AND FREQUENCY-DEPENDENT INVESTIGATION OF DIELECTRIC PROPERTIES

Ali KÖMÜRÇÜ

Çankırı Karatekin University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Advisor: Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN

This thesis consists of five chapters. The first and second chapters provide information about the literature review, motivation and contribution of the thesis. In the third chapter, general information about the formation of MS contacts and MIS contacts is given. In the fourth chapter, Al/p-Si MS structures are prepared and their dielectric properties such as dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ''), dielectric loss angle ($\tan\delta$), ac electrical conductivity (σ_{ac}), real and imaginary electrical modulus (M' and M'') are investigated using experimental capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/ω -V) measurements in the frequency range of 5kHz-1MHz and at room temperature. Experimental results show that both electrical and dielectric parameters strongly depend on frequency. ϵ' and ϵ'' decrease with increasing frequency. At the same time, the electrical conductivity ac (σ_{ac}) increases with increasing frequency. Using the $1/C^2$ -V plot; potential V_0 , barrier height Φ_B , density of donor atoms N_D , depletion layer width W_D and E_m were calculated. In the conclusion section, the importance and results of the thesis are presented.

2025, 55 pages

Keywords : MS structures, Dielectric properties, Frequency dependence,

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışma süresince her türlü destek ve yardımlarını gördüğüm, engin tecrübelerinden faydalandığım, bilimsel alanda hiçbir zaman yardım ve desteğini esirgemeyen değerli tez danışman hocam Prof. Dr. Sebahaddin ALPTEKİN'e emekleri, rehberliği, yardımları ve anlayışı için teşekkür ederim.

Ali KÖMÜRCÜ

Çankırı, Ocak 2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
RESİMLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1 GİRİŞ.....	1
2 LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
3 METARYAL VE METOT	7
3.1Metal-Yarıiletken Kontaklar	7
3.2Metal-Yarıiletken (MS) Yapılarda Schottky-Mott Kuramı.....	9
3.2.1 Metal / n-tipi kontak.....	9
3.2.2 Metal/p-tipi yarıiletken	13
3.3Metal- Polimer/Yalıtkan-Yarıiletken (MPS ve MIS) Yapılar.....	15
3.4İdeal MIS Yapıları.....	16
3.5MS yapılarda akım- iletim mekanizmaları.....	19
3.5.1 Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi	19
3.5.2 Difüzyon Teorisi.....	20
3.5.3 Termiyonik Emisyon- Difüzyon (TED) Teorisi	20
3.5.4 Engel Boyunca Tünelleme.....	20
3.5.5 T_0 Etkili Akım İletimi	21
3.6Dielektrik Malzemeler	21
3.6.1 Dielektrik Kutuplanma türleri ve Frekansa Bağlı Kutuplanma.....	23
3.7MS Yapıların Hazırlanması.....	24
3.7.1 Kristal yapının temizlenmesi	24
3.7.2 Al/p-Si Schottky kontağın oluşturulması	24
3.7.3 Frekansa Bağlı Olarak Empedans Ölçer Cihazı	27
4 BULGULAR VE TARTIŞMA	28
4.1Al/p-Si (MS) tipi Schottky kontağın frekansa bağlı C-V ve İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) Karakteristikleri.....	28

4.2 Voltaj ve Frekansa Bağlı Dielektrik, Elektrik Modülü ve AC İletkenlik Analizleri.....	34
4.2.1 Dielektrik Özellikler	34
4.2.2 AC Elektriksel İletkenlik	39
4.2.3 Elektrik Modülü	40
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	44
Bu tez çalışmasında	44
KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



SİMGELER DİZİNİ

V (V)	Diyot/yapı üzerine uygulanan gerilim
V_D (V)	Diyot üzerine düşen gerilim
E_{TAL} (eV)	Diffüzyon potansiyeli
V_F (V)	Diyota uygulanan doğru beslem gerilimi
V_R (V)	Diyota uygulanan ters beslem gerilimi
Φ_B (eV)	Schottky engel yüksekliği
Φ_{B0} (eV)	Sıfır beslem engel yüksekliği
Φ_e (eV)	Etkin engel yüksekliği
n (Birimsiz)	İdealite faktörü
R_s (Ω)	Seri direnç
Φ_m (eV)	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s (eV)	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
E_v (eV)	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
E_c (eV)	İletkenlik band kenarı
χ (eV)	Elektron yakınlığı
E_F (eV)	Fermi enerji seviyesi
E_g (eV)	Yarıiletken yasak enerji aralığı
ϵ_0 (F/m)	Boşluğun elektrik geçirgenliği
ϵ_i (Birimsiz)	Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s (Birimsiz)	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Hz	Frekans birimi (Hertz)
$^{\circ}C$	Santigrad cinsinden sıcaklık
K	Kelvin cinsinden sıcaklık
k (J/K)	Boltzmann sabiti
Å	Angström
Si	Silisyum
E (V/m)	Elektrik alan
$\Delta\Phi$ (eV)	Schottky engel düşmesi
m_e^* (kg)	Elektronun etkin kütlesi
m_h^* (kg)	Değişin etkin kütlesi
m_0 (kg)	Elektronun durgun kütlesi
N_A (cm^{-3})	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu
N_D (cm^{-3})	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_v (cm^{-3})	Valans bandındaki durumların yoğunluğu
N_c (cm^{-3})	İletim bandındaki durumların yoğunluğu
q (C)	Elektrik yükü
A^* (A/cm^2K^2)	Richardson sabiti
A^{**} (A/cm^2K^2)	Etkin Richardson sabiti

$N(E)(\text{cm}^{-3})$	Bantlardaki durumların yoğunluğu
$f(E)$	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
$W_D (\text{cm})$	Tüketim bölgesinin kalınlığı
$\tau (\text{sn})$	Ara-yüzey tuzaklarının ömrü
$n (\text{cm}^{-3})$	Elektron yoğunluğu
$\mu_n (\text{cm}^2/\text{V.s})$	Elektronun mobilitesi
$\mu_h (\text{cm}^2/\text{V.s})$	Değişin mobilitesi
$N_{ss} (\text{eV.cm}^{-2})$	Arayüzey durumların yoğunluğu
$C_o (\text{F})$	Boş kondanstörün sığası
$C_i (\text{F})$	Arayüzey tabakanın sığası
$\tan\delta$ (Birimsiz)	Tanjant kayıp
M^* (Birimsiz)	Kompleks elektrik modulus
M' (Birimsiz)	Elektrik modulusun reel kısmı
M'' (Birimsiz)	Elektrik modulusun imajiner kısmı
$\sigma_{dc} (\text{S/cm})$	dc iletkenlik
$\sigma_{ac} (\text{S/cm})$	ac iletkenlik
Al	Aluminyum
SiO_2	Silikondioksit
Si_3N_4	Silisyum Nitrür
SnO_2	Kalay Oksit
TiO_2	Titanyum Oksit

KISALTMALAR DİZİNİ

p-Si	p-tipi silisyum
SD	Schottky diyot
SBD/SBDs	Schottky engel diyot/diyotları
I-V	Akım-voltaj
C-V	Kapasitans- voltaj
G/ ω -V	İletkenlik- voltaj
BH	Engel Yüksekliği
RR	Doğrultma Oranı
MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MPS	Metal-Polymer-Yarıiletken
MFS	Ferroelektrik yarıiletken
PS	Polistiren
PPY	Polipirol
PVP	Povinil-piroliden
PVA	Polyvinil alkol
TE	Termiyonik Emisyon
TED	Termiyonik Emisyon Difüzyon
TAE	Termiyonik Alan Emisyonu
AE	Alan Emisyonu
AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
LED	Işık yayan diyot
LD	Lazer diyot
OLED	Işık yayan organik diyot

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1 :MS kontağın şematik yapısı.....	7
Şekil 2 MS n-tipi doğrultucu yapının enerji-bant diyagram gösterimi a) Kontak alınmadan önceki durum b) Kontak alındıktan sonraki durum c) Negatif gerilimde altındaki durum d) Pozitif gerilim altındaki durum	11
Şekil 3 MS n-tipi omik kontağın enerji-bant diyagramı a) Kontakta önce b) Kontakta sonra, c) Negatif gerilimde d) Pozitif gerilimde	12
Şekil 4 Metal ve Yarıiletken (p-tipi) doğrultucu yapının enerji-bant gösterimi (a) Kontak alınmadan önce (b) Kontak alındıktan sonra	14
Şekil 5 M/S (p-tipi) doğrultucu yapının $V \neq 0$ iken	14
Şekil 6 MPS/MIS kontak yapısının şematik gösterimi verilmiştir.	16
Şekil 7 Potansiyelin sıfır olduğundaki ideal MIS yapının enerji-bant diyagram gösterimi a) p-tipi yarıiletken için b) n-tipi yarıiletken için	17
Şekil 8 Kontakların oluşturulmasında kullanılan maske.....	25
Şekil 9 Al/p-Si MS yapısı	27
Şekil 10 Al/p-Si Schottky engel diyotun oda sıcaklığında 5kHz-1MHz frekans aralığındaki C-V karakteristikleri	29
Şekil 11 Al/p-Si Schottky engel diyotunun oda sıcaklığında 5kHz-1MHz frekans aralığındaki G/ω -V karakteristikleri.....	29
Şekil 12 Al/p-Si Schottky engel diyotun için sıcaklığında 5 kHz-1 MHz frekans aralığında R_s -V karakteristikleri	31
Şekil 13 Al/p-Si Schottky engel diyotun için sıcaklığında 5kHz-1MHz frekans aralığında C^{-2} -V karakteristikleri	32
Şekil 14 Al/p-Si yapısının 5KHz-1MHz frekans aralığına bağlı ϵ' – V karakteristiği	35
Şekil 15 Al/p-Si yapısının 5KHz-1MHz frekans aralığına bağlı ϵ'' – V karakteristiği	36
Şekil 16 Al/p-Si yapısının 5KHz-1MHz frekans aralığına bağlı $\tan\delta$ – V karakteristiği	36
Şekil 17 Al/ p-Si yapısına ait çeşitli gerilimler için $\epsilon' - \ln(f)$ grafiği	37
Şekil 18 Al/ p-Si yapısına ait çeşitli gerilimler için $\epsilon'' - \ln(f)$ grafiği	38

Şekil 19 Al/p-Si MS Schottky diyotun σ_{ac} - ln f grafiği	40
Şekil 20 Al/p-Si MS Schottky diyotun 5KHz-1MHz frekans aralığındaki M' – V grafiği	41
Şekil 21 Al/p-Si MS Schottky diyotun 5KHz-1MHz frekans aralığındaki M'' – V grafiği	41
Şekil 22 Al/p-Si MS Schottky diyotun farklı voltajlar için M' – ln f grafiği.....	42
Şekil 23 Al/p-Si MS Schottky diyotun farklı voltajlar için M'' – ln f grafiği.....	43



RESİMLER DİZİNİ

Resim 1 Kontak oluşumu için kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi (Unam, Bilkent Üniversitesi).....	26
Resim 2 Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörüdür	27



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1 n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin omik ve doğrultucu kontak durumu	8
Çizelge 2 Al/p-Si MS Schottky diyotun farklı frekans değerlerinde bazı temel elektriksel parametreler.....	33



1 GİRİŞ

Yarı iletken devre elamanları son zamanlarda elektronik devre elemanlarında yaygın bir kullanıma sahiptir (Alsaç 2022). Bu bağlamda Metal-yarıiletken (MS) yapılar zamanla değerinin yükselmesi nedeniyle teknolojik aletlerin imalatında kritik bir yol üstlenmektedir (Reddy et al. 2011, Alptekin et al. 2019a). Metal ve yarıiletken (MS) yapının daha iyi kavranması açısından gerçekleştirilen ve yapılan araştırmalar günümüze önemli katkıda bulunmuştur (Alptekin et al. 2019b, Matsuura 1981, Sahay 1990, Kako 1996). Alman fizikçi Walter Schottky metal-yarıiletken (MS) yapılar üstünde teorik ve deneysel olarak önemli katkıları ve yaptığı çalışmalardan dolayı, MS yapılar “Schottky diyotları” olarak isimlendirilmiştir (Schottky 1938). Sonraki dönemlerde, metal-yarıiletken yapıların doğrultucu özellikleri Schottky, Strömer ve Waibel tarafından MS arayüzündeki engel/bariyer yüksekliğinin geliştirilmiştir (Schottky et al. 1931). Deneysel ile teorik çalışmalarında yüksek bir elektrik olarak direnç gösteren dar ara yüzeydeki tabakanın oluşturduğu husus, metal-yarıiletken kontaklarındaki bariyer/engel yüksekliği için Schottky ve Mott’un önerdiği ilk tasarım olduğu bilinmektedir (Mott 1938, Schottky 1938).

Schottky ve Mott, bariyer yüksekliğini ve biçimini çeşitli yöntemlerle tanımlamışlardır. “(Schottky 1938, Mott 1938)”. Mott’un tanımına göre, metal yarıiletken arasında oluşan potansiyel farkı veya bariyer yüksekliği, metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletken iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki farktan kaynaklanmaktadır (Mott 1938, Rhoderick ve Williams 1988, Sharma 1984). Mott ayrıca, bariyer bölgesi arı yükleri barındırdığından, elektrik alanının sabit olduğunu iddia etmiştir (Mott 1938, Rhoderick ve Williams 1988). Schottky'e göre ise bariyer/engel bölümündeki impüritelerin sabit yoğunluğu elektrik alanın doğrusal olarak yükseldiği ileri sürüldü (Rhoderick ve Williams 1988, Schottky 1939). Bethe 1942 yılında Schottky bariyeri ile geniş kapsamlı araştırma yapmak için Termiyonik Emisyon (TE) kuramını ileri sürmüştür (Bethe 1942). Bu kuram, akım geçişinin bariyer aracılığıyla meydana geldiğini belirtmektedir.

Schottky kontakları, bağlantı bölgesinde daha düzenli bir potansiyel ve akım dağılımı sağlamak amacıyla yarı iletken tabakanın belirli kısımlarda metal buharlaştırılarak

yapılmış düzlemsel yapılardır (Sze 1981). Küçük seri direnç, büyük güç kapasitesi ile düşük sinyal seviyelerinin olması açısından tercih edilmelerinde etkili sebep teşkil etmektedir. Aynı zamanda MS yapılarda tekrardan birleşim ve üretim yapılmadığından verimlilik oldukça yüksektir. Fakat MS yapılar yüzey elemanı olmalarından kaynaklı; yüzey kirlenmesine karşı hassas olmaları, yüksek sıcaklıkta gerçekleşen işlemlere karşı dirençli olmamaları gibi dezavantajları barındırmaktadır. Yüksek sıcaklık, diyotun elektriksel özellikleri üzerinde etkili olmaktadır (Demirezen et al. 2010, Tecimer et al. 2013, Tunç 2010).

MS yapılar 300-600°C civarındaki sıcaklıklarda omik kontağın direncini azaltır bu da MS yapıların doğrultma özelliğini negatif yönde etkiler. Bundan dolayı MS yapıların performanslarını arttırmak için MS yapılara metal-oksit-yarıiletken (MOS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), metal-polimer-yarıiletken (MPS) veya ferroelektrik-yarıiletken (MFS) yapılar çeşitli arayüzeyler eklenerek elde edilmektedir(Sze et al. 2007, Card 1971, Gökçen et al. 2013).

Yalıtkanlar, polimer ve ferroelektrik gibi yapılar son yirmi yıldaki gelişimleri ara yüzey katmanına MS yapıların elektronik ile optoelektronik uygulama alanlarında oldukça önemli hale gelmiştir (Alptekin et al. 2019a). Geleneksel olarak metaller ve yarıiletkenler arasında kullanılan SiO_2 , Si_3N_4 , SnO_2 ve TiO_2 gibi yalıtkan katmanların yerine yapımı kolay, esnek olan ve daha ekonomik olmalarından dolayı katkısız ya da katkılı polimerler tercih edilmelerini sağlamıştır. Ayrıca polimerlere uygun oranlarda metal vb. maddeler eklenerek iletkenlik özellikleri artırılabilir(Sharma et al. 2016, Baraz 2017, Ersöz et al. 2016).

Belli bir iletkenlik ve kapasitans değerinde olan polimerler; ışık yayan diyot (LED), ışık yayan organik diyot (OLED), Schottky engel diyot (SBD), güneş pili ve transistörler gibi araçların üretimlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Baraz 2017, Ersöz et al. 2016, Gümüş et al.. 2015, Gunaydin et al. 2018). MPS'lerin yapımında polistiren (PS), polivinil-alkol (PVA), polipirol (PPY), polivinil-pirrolidon (PVP) gibi polimer yapıları malzemeler kullanılabilir (Gümüş et al. 2015, Demir et al. 2018). Polimer

metaryeller elektronik cihaz üretimine birçok avantaj sağlamaktadır (Crowell et al. 1966).

MS, MIS ve MPS yapılar hazırlanırken yarıiletken madde olarak, ekonomik ve kararlı yapıya sahip olmasından ötürü genellikle silisyum (Si) tercih edilirken, doğrultucu kontak için yarıiletkenin n-tipi için iletken olarak genellikle altın (Au) ve p-tipinine alüminyum (Al) ile gümüş (Ag) gibi yüksek saflıktaki (≥ 0.99) metaller seçilmektedir. Bu yapıların oluşturulmasında metal ve yarıiletkenlerin iş fonksiyonları önemlidir. Doğrultucu kontakların yapım aşamasında yarıiletkenin n-tipi veya p-tipi olmasına bağlı olarak uygun iş fonksiyonu taşıyan metal seçilmesi gerekmektedir. Bir metal ile bir yarıiletken arasına yerleştirilecek polimer veya yalıtkan katman, yalnızca ara yüzeydeki yük aktarımının kontrolünü sağlamakla beraber performansını da arttırmaktadır. Bundan dolayı ara yüzey katmanını seçiminde yüzeyi pasifleştiren, kaçak akımları azaltan, akım iletimini kontrol edebilen ve doğrultucu özelliklere yaklaşabilen dielektrik sabiti büyük malzemelerin tercih edilmesi gerekir(Baraz 2018, Yerişkin et al. 2019).

Bu çalışma ile arayüzey tabakalı metal-yarıiletken (MS) yapıları hazırlanarak onların dielektriksel özellikleri geniş bir frekans aralığında ve MS arayüzeyinde oluşan engelin biçimini hakkında doğru ve detaylı bilgiler elde etmek. Aynı zamanda bu yapıların kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj ($G/(\omega-V)$) karakteristiklerinde geniş bir frekans aralığında incelenmesi gerekmektedir. C-V ve $G/\omega-V$ karakteristiklerinden de yine seri direnç (R_s), katkı atomlarının konsantrasyonu empedans spektroskopisi (kapasitans-gerilim (C-V) ve kondüktans-gerilim ($G/(\omega-V)$) kullanılarak incelenmiştir.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Literatür taraması yapıldığında metal-yarıiletken kontaklar hakkındaki ilk bilimsel çalışmalar Braun 'un çalışmasına kadar uzanır (Braun 1874). 1906 yılında Pickard yarıiletken malzemelerden faydalanarak bağlantı dedektörü yapmış ve patentini almıştır (Pickard 1906). 1907 yılında Pierce, yarıiletkenler üstüne sıçratma yoluyla metal bağlantı kontaklar tasarlamış ve bu yapıların elektriksel karakteristiklerini yayımlamıştır (Pierce 1907).

Wilson 1931 yılında yarıiletkenlerin iletim teorisini katıların bant teorisiyle ilişkilendirerek matematiksel modellemesini yapmış daha sonra bu teoriyi metal-yarıiletken bağlantılı kontaklara uygulamıştır. (Wilson 1931). 1938 yılında ise Schottky metal ile yarıiletken yapıdaki engelin, yarıiletkendeki kararlı uzay yüklerinin sebep olduğunu ileri sürmüştür ve daha sonra bu durum literatüre Schottky engeli olarak girmiştir(Schottky 1938).

Mott 1938'de metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonlarındaki farktan dolayı potansiyel engelin oluştuğunu ve yük fazlalığından olmadığını varsaymıştır (Mott 1938). Daha sonra metal-vakum iletkenlik ile metal-yarıiletken yapılarıdaki iletkenliklerin benzer olduğunu Schottky ve Bethe ileri sürmüşlerdir. Bu durumu Bethe metal-yarıiletken doğrultucular üzerinde de uygulanabilirliğini göstermiştir (Bethe 1942). Daha sonra Schottky'nin difüzyon teorisi ile Bethe'nin termoiyonik teorisi tek bir modelde birleştirildi(Crowell et al. 1966).

Arayüzeyi oksit tabakalı olan Si-Au kontakların arayüzeyin hal yoğunluğunu ve I-V karakteristiklerin idealite faktörüne etkilerini Card ve Rhoderick belirlemişlerdir (Card ve Rhoderick). Daha sonra sıcaklık tayini için metal-yarıiletken yapıların karakteristikleri kullanılmışlardır (Chandra et al. 1986). Schottky kontakların daima ideal şartı sağlamadığı bundan dolayı bir idealite faktörünün olduğu ortaya çıkar. Bu faktörün ortaya çıkması seri direnç etkisidir(Çetinkara 2002).

Metal-yarıiletken yapılar, elektronik ve optoelektronik cihazların üretiminde önemli rolü vardır. Çoklu eklem diyotlar, LED, LD, UV fotodedektörler ve Schottky diyotlar gibi çok geniş uygulama alanına sahip olduğunu söylenebilir(Grondah 1926).

MS kontakların yerini günümüzde ince yalıtkan tabakalı, ferroelektrik ve polimer ara yüzey yapılar (MIS, MFS, MPS) yerini almıştır. Bunların MS yapıların yerini almalarındaki amaç, performans ve maliyet açısından öne çıkmalarıdır. (Karataş et al. 2005, Vural et al. 2010, Yahia et al. 2011, Özavcı et al. 2013).

MIS yapıların karakter yapılarının diyot kalınlığı ile nasıl değiştiğini ve idealite faktörü ile engelin kalınlığı ile ilişkini Tataroğlu ve Altındal incelemiştir (Tataroğlu et al. 2006).

Çetinkaya, Al/ZnO/p-Si/Al ve Au/CuO/p-Si/Al diyotların ara bölgesine iki farklı ince metal-oksit film yerleştirilmiştir. Yerleştirilen metal-oksit filmin diyot üzerine etkisini araştırmıştır. Yapılan ölçümler ile idealite faktörü ve engel yüksekliğinin uyum içerisinde olduğu ve seri direnç değerlerinin birbirinden bağımsız olduğunu tespit etmiştir(Çetinkaya 2011).

Au/(CoSO₄-PVP)/n-Si MPS diyotun elektriksel özellikleri, spin-kaplama teknikleri kullanılarak Tataroğlu ve ark. tarafından araştırılmıştır (Tataroğlu et al. 2020).

Ag/PVA-Ag-Coumarin/n-Si yapısı kullanılarak Attallah et al. tarafından bir Schottky cihazı üretilmiştir ve optik fotodiyot uygulamaları için uygun olduğu görülmüştür (Attallah et al. 2021).

PVP MS yapısı için C/G-V verilerinin incelenmesi, Alptekin ve diğerleri tarafından 4V öngerilim ve 1-500 kHz frekans aralığında araştırılmış. Bu araştırma sonuçları göre, düşük frekanslardaki kapasitans ve iletkenlik değerlerinin öncelikle yalıtım katmanında ve MS arayüzünde bulunan yüzey durumlarından (N_{ss}) etkilendiği sonucu çıkarılabilir (Alptekin et al. 2019a).

Alptekin ve diğeri, Au/PVP/n-Si MPS yapıların, karmaşık dielektrik geçirgenlik, elektrik modülü ve AC iletkenliği, admitans spektroskopisi kullanılarak analiz etmişlerdir. Yapılan araştırma ile manyetik geçirgenlik, mıknatıslanma ve alternatif akım değerlerinin frekans ve voltaj bağımlılığını ortaya koymuştur. MPS yapılarının elektrik iletkenliklerinde iyileştirmeler yaparak MPS'nin kullanımını için yeni fırsatları sunmuştur (Alptekin et al. 2019a).

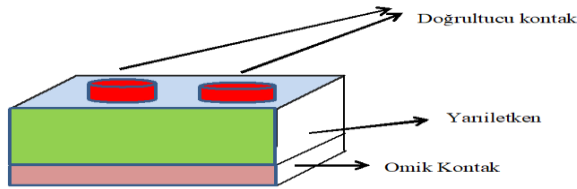
Polivinilpirolidon (PVP) polimer ara katmanlı Au-n-Si yapısı Alptekin ve Altındal tarafından araştırılmıştır. Bu araştırma ile kapasitans/iletkenlik-voltaj-frekans ölçümlerinin verileri incelenmiştir. Polivinilpirolidon ara katmanının dâhil edilmesi cihazın operasyonel verimliliğinde artış olduğunu göstermiştir (Alptekin et al. 2020).

3 METARYAL VE METOT

3.1 Metal-Yarıiletken Kontaklar

Metal ile yarıiletken malzeme temas ettiğinde bu malzemelerin Fermi seviyeleri arasındaki farkı dengeleyebilmek için bantlarda eğilme meydana gelir. Metal ve yarıiletken malzemeler arasında elektron geçişi meydana gelir. Bu elektron geçişleri metal ile yarıiletken malzemelerin Fermi enerji seviyelerinin eşitlendiğinin sağlandığı termal denge oluşumuna kadar sürer (Rhoderick et al. 1988). Böylelikle metal ve yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrılması sayesinde yeni bir yük dağılımı meydana gelir ve bu durum bir potansiyel engelin çıkmasına yol açar. Ara bölgenin, yarıiletken kısmında meydana gelen ve serbest yüklerin bulunmadığı büyük dirençli bir alandır. Elektronların metal ve yarıiletken bağlantısı boyundaki akışı, p-n eklemlerinde gerçekleşen yük transfer sürecine benzerdir. Bu türdeki eklemler metal kontak olarak isimlendirilir (Razeghi 2006). MS kontaklarda metal ve yarıiletken arayüzeyindeki potansiyel engelin oluştuğunu Schottky, eklemdaki potansiyelin metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonundaki farktan kaynakladığı Mott tarafından açıklanmıştır. Schottky ve Mott'un teorisindeki potansiyel engel metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki fark nedeni ile oluşmaktadır (Sharma 1984).

Bir MS kontağı yapıldığında, kullanılan malzemelerin iş fonksiyonlarına göre Schottky (doğrultucu) kontak veya omik kontak olarak ikiye ayrılır. Şekil 1'de MS kontakların yapısı verilmiştir.



Şekil 1 :MS kontağın şematik yapısı.

Bariyer yüksekliği metal ve yarıiletken malzemelerin iş fonksiyonlarının (Φ_M , Φ_S) aralarındaki farka bağlı olarak tarif edilmiştir. Aşağıda verilen Çizelge 1 metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna göre omik ve doğrultucu kontak durumu belirtmektedir

Çizelge 1 n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin omik ve doğrultucu kontak durumu

Yarıiletkenin tipi	İş fonksiyonu	Kontak türü
n-tipi	$\Phi_M > \Phi_S$	Doğrultucu
	$\Phi_M < \Phi_S$	Omik
p-tipi	$\Phi_M > \Phi_S$	Omik
	$\Phi_M < \Phi_S$	Doğrultucu

Metal iş fonksiyonu (Φ_M) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_S) fazla olduğu durumda elektronların hareketi yarıiletkenden metala doğru gerçekleşir. Bu durumda, p- tipi yarıiletken türünde omik, n-tipi yarıiletken için ise doğrultucu kontak türü elde edilir. Yarıiletkendeki elektronların bitmesi durumunda, bulk bölgesinin kontak bölümüne yeteri kadar yük taşıyıcısının sağlanması zorlaşır ve bulk bölgesinde hole fazlalığı oluşur (Werner et al. 1991).

Metal ve yarıiletken kontakların iş fonksiyonlarının eşitliğinde ($\Phi_M = \Phi_S$) ise metal ile yarıiletkenin fermi seviyeleri eşittir. Bu, metal ile yarıiletken arasındaki toplam yük yoğunluğunun arayüzeydeki yük yoğunluğunun eşitliği anlamı çıkmaktadır (Sze at el. 2007).

Metal iş fonksiyonu (Φ_M) yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_S) düşük olduğu durumda metal ile yarıiletken arasında potansiyel bir engel olmayacağı için taşıyıcıların birbirlerine geçişleri kolaylıkla sağlanır. Bu durumda, p-tipi yarıiletken türünde doğrultucu, n-tipi yarıiletken için ise omik kontak türü elde edilir (Werner et al.1991).

3.2 Metal-Yarıiletken (MS) Yapılarda Schottky-Mott Kuramı

Metal-yarıiletken kontakların karakteristik özelliklerini etkileyen birçok unsur olmasına rağmen, bunların içinde en dikkate değer olanı metal-yarıiletken arasında yer alan yüzeyin potansiyel bariyerinin yapısıdır. Metal-yarıiletken arasında yer alan yüzeyin potansiyel bariyerinin oluşumu ile ilgili çok sayıda modeller mevcuttur (Brillson 1982). Metal-yarıiletken kontakların ara yüzeyinde potansiyel bir bariyerin meydana geldiğini ilk defa Schottky belirtmiştir; bu potansiyelin, metal ile yarıiletken arasındaki iş fonksiyonları farkından kaynaklandığını ise Mott ifade etmiştir (Baraz 2018).

3.2.1 Metal / n-tipi kontak

Şekil 2 Metal ve n-tipi yarıiletken yapının kontak edilmeden ve kontak edildikten sonraki $\Phi_m > \Phi_s$ (doğrultucu kontak) için elektron enerji bant diyagramı gösterilmektedir. Şekildeki vakum seviyesi, metalin dışında kalan durgun bir elektronun enerji seviyesini belirtmekte olup Şekil 2a'da başlangıç noktası olarak gösterilmiştir. Φ_m (metalın iş fonksiyonu) bir elektronu fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine gelmesi için olması gereken minimum enerji miktarını ifade etmektedir. Φ_m kristal yapının düzenli potansiyeli nedeniyle meydana gelen hacim katkısı ile yüzeyde oluşma ihtimali olan dipol tabakası sebebiyle ortaya çıkan yüzey katkısına sahiptir. Φ_s 'de (yarıiletkenin iş fonksiyonu) metalin iş fonksiyonuna benzer tanımlanır ve değişkenlik gösteren niceliktir. Bu değişkenliği yarıiletkenin fermi seviyesi, katılanan alıcı ve verici atomların miktarları belirler. Elektron yakınlığı (χ_s) yarıiletkenin katılanma miktarına bağlı olmayan başka bir faktördür. Şekil 2a'da yarıiletken yüzey durumları olmadığından bantlarda bir bükülme olmaz. Şekil 2b'de metal ve yarıiletken kontak yapıldıktan sonraki termal denge durumuna gelmiş enerji/bant diyagramını göstermektedir. Bariyer yüksekliğinin (Φ_B) oluşumu Schottky-Mott teorisinde metal ile yarıiletkenin temasından, bariyer yüksekliği ise metal-yarıiletkenin iş fonksiyonlarındaki farklılıklardan kaynaklanır. Metal ile n-tipi yarıiletken temasında, iletim bandındaki elektronların enerjisi metaldeki elektronların enerjisinden daha büyük enerjiye sahiplerse ($\Phi_m > \Phi_s$), elektron akışı, yarıiletkenin ve metalin Fermi seviyeleri eşit olana kadar devam eder (Uslu 2010). Elektronların hareketi yarıiletkenden metala

doğru gerçekleşmesi sonucu olarak yarıiletkenin bant kenarında elektronların yoğunluğunda azalma gerçekleşir. İletkenlik bant kenarı enerjisi (E_C) ile fermi enerjisi (E_F) arasındaki fark, yarıiletkenin bant kenarındaki elektronların yoğunluğundaki azalma ile artış gösterir. E_F ifadesi termal olarak dengeye geldiğinde ise sabit kalır. Bu durumda ise, iletim bant elektronları metal geçişi meydana gelir ve yarıiletkende iyonize pozitif yükler bırakır. Bunun sonucunda ise yarıiletkenden metala aktarılan elektronlar tükendir. Metalin yüzeyinde toplanan elektronlar metalde negatif ince bir tabaka oluştururlar. Bunun sonucunda yarıiletkenden metala doğru elektrik alanının oluşmasını sağlar (Sze 1981, Rhoderick ve Williams 1988).

Yarıiletken bant aralığı ve metal kontak durumunda valans bandı E_V , iletkenlik bandına E_C 'ye paralel olarak kayar. Bununla beraber elektron yakınlığında değişiklik olmayacağından vakum seviyesinde E_C ile benzer değişiklikler meydana gelir. Bu sayede termal olarak dengede olan metal ile yarıiletken kontakta, bariyer büyüklüğünü ifade etmek için kritik bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin devamlı oluşması sağlanır. Bu durumda bant bükülme miktarı, metal ile yarıiletken malzemelerin iş fonksiyonları arasındaki farkla eşdeğerdir. Bu fark aşağıda verilen bağıntı ile açıklanır (Sharma 1984, Werner et al. 1991).

$$qV_i = \Phi_M - \Phi_S \quad 3.1$$

Yukarıda verilen bağıntıda verilen V_i kontakta oluşan potansiyel farkı gösterir. qV_i ise yarıiletkenden metale geçen elektronların sahip olduğu enerjiyi yani engel/bariyer yüksekliğini ifade eder. Metaldeki engel/bariyer yüksekliği ile yarıiletken tarafındaki görülen engel/bariyer yüksekliği farklıdır. Bu durum,

$$\Phi_B = (\Phi_M - \chi_S) \quad 3.2$$

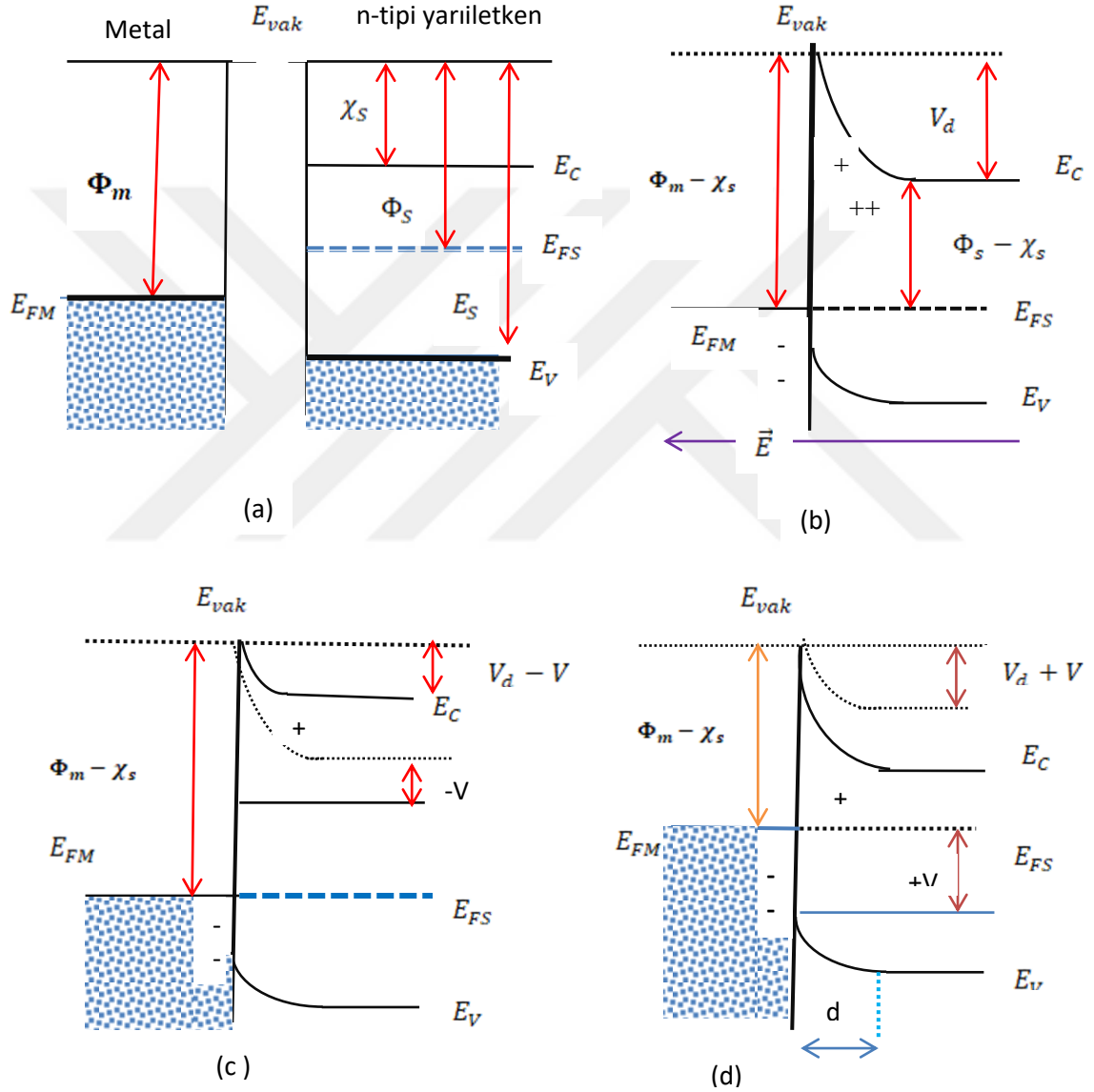
İle ifade edilir (Sze 1981). $\Phi_S = (\Phi_n + \chi_S)$ ve $\Phi_M = (qV_i + \Phi_S)$ olduğundan;

Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2 ifadelerinden, Φ_B ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir:

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

3.3

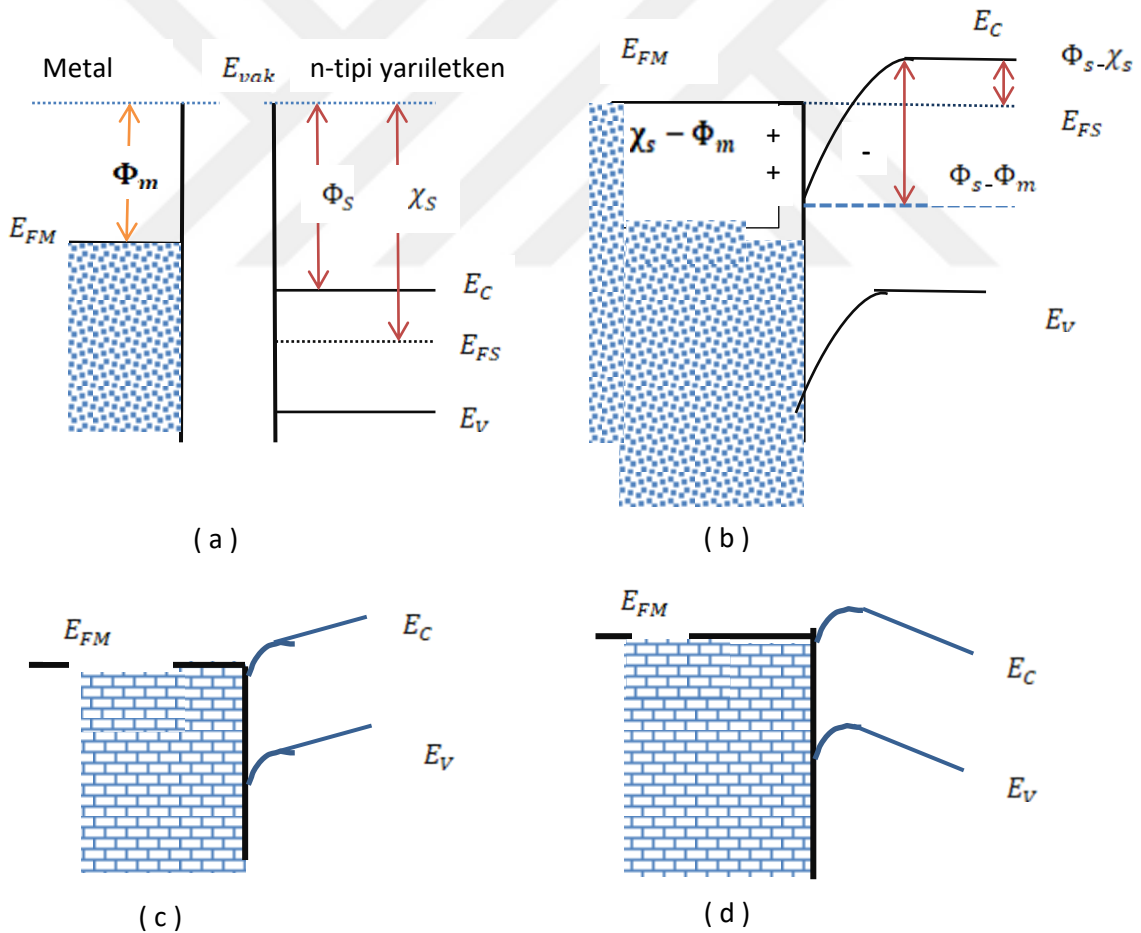
Yukarıda verilen ifadede $\Phi_n = E_C - E_F$ olup, q elektronik yüküdür. Eşitlik 3.2, birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir (Crowell et al. 1966).



Şekil 2 MS n-tipi doğrultucu yapının enerji-bant diyagram gösterimi a) Kontak alınmadan önceki durum b) Kontak alındıktan sonraki durum c) Negatif gerilimde altındaki durum d) Pozitif gerilim altındaki durum

Φ_B değeri birçok durumda potansiyel engeli kT/q 'dan daha büyüktür. Bu potansiyel engeli aşabilen çok az sayıda elektron bu enerjiye sahiptir. Bu durumda yarıiletken yüzeyi hareketli yüklerden yoksunlaşmış oldukça yüksek dirençli bir tükenim bölgesi olmaya başlar (Mott 1938, Schottky 1938).

Termal olarak denge halinde, metal ile yarıiletken arasındaki elektron geçişleri dengelenir ve böyle bir durumda net bir akım oluşmaz. Yarıiletken tüketimi bölgesi az sayıda hareketli yük taşıyıcısı içerdiğinden direnci, metallerin ve yarı iletkenlerin nötr bölgesinin direncine kıyasla çok daha yüksektir. Dolayısıyla dış yüklerin neredeyse tamamı bu alana binmektedir. Uygulanan ileri veya geri öngerilim voltajı, termal dengede enerji bant diyagramını değiştirir. Bu değişikliğe, enerji tüketen bölgedeki potansiyeldeki bir değişiklik ve bandın bükülmesindeki bir değişiklik neden olur.



Şekil 3 MS n-tipi omik kontakın enerji-bant diyagramı a) Kontakdan önce b) Kontakdan sonra, c) Negatif gerilimde d) Pozitif gerilimde

Şekil 3’de gösterilen n-tipi omik kontak $\Phi_m < \Phi_s$ durumu gerçekleştiğinde ortaya çıkar. E_{FS} MS kontakta önce, E_{FM}' den $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar aşağıdadır. Kontak yapıldıktan sonra metalde pozitif yük oluşarak metalden yarıiletkenine doğru harekete geçer ve yük alışverişi tamamlandığında çift kutuplu katman oluşur. Yük alışverişi tamamlandığında $\Phi_s - \Phi_m$ fark kadar yükselir.

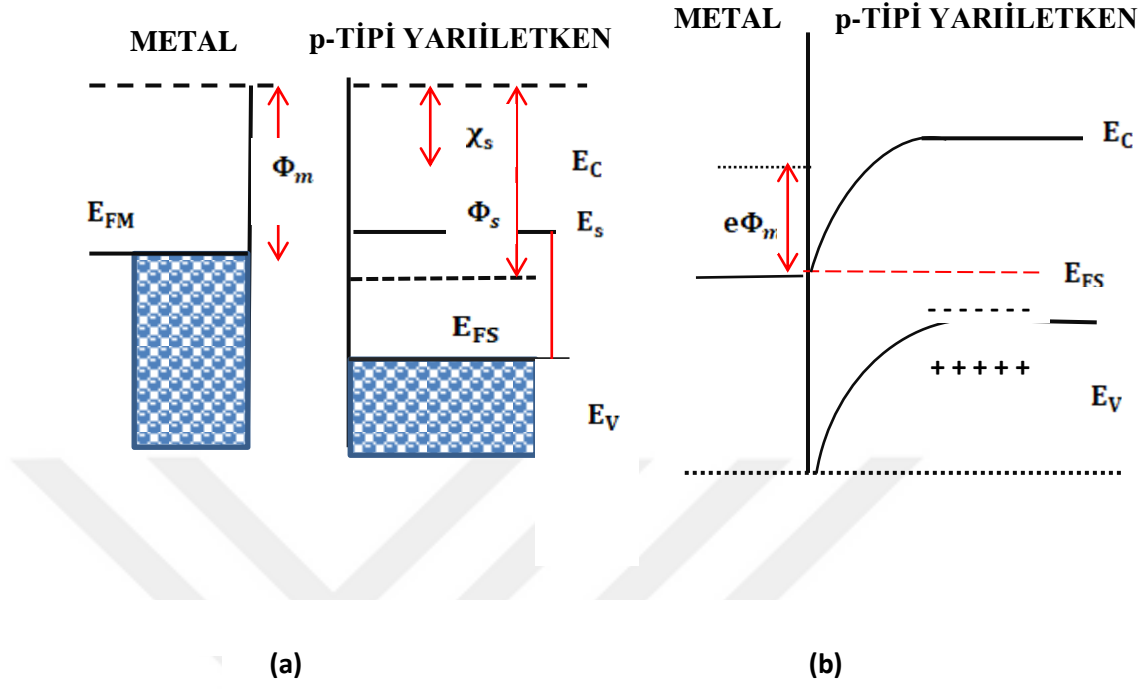
3.2.2 Metal/p-tipi yarıiletken

Şekil 4’te p-tipi yarıiletkenin metal ile kontak durumundaki yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük olduğu durumdaki enerji bant diyagramı gösterilmektedir (Sedef 2002). Yarıiletken ile metal yüzey kontakta önceki durumda herhangi yük olmaz ve bantlar düzdür. Kontak yapıldığında ise metaldeki büyük enerjili elektronların yarıiletken yönünde hareket eder. Metalden yarıiletkenine hareket eden elektronlar boş olan enerji düzeylerine yerleşirler. Yarıiletkenin boş enerji düzeyi kontakta metal kısmına doğru ilerliyormuş gibi görünmesine sebep olur. Bu yük geçişi Fermi seviyelerinin eşitlenmesi sağlanana kadar devam eder. Bu durumun sonucunda metalden yarıiletkenine doğru elektrik alan oluşur ve eklem doğrultucu kontak özelliği sergiler (Yahia et al. 2011).

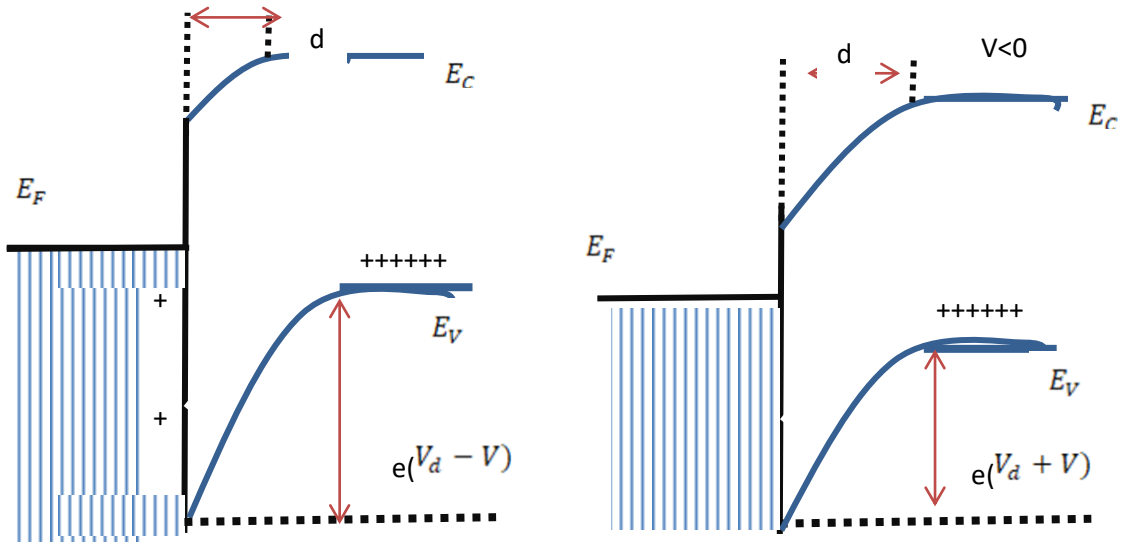
Şekil 4 (a) ‘da görüldüğü gibi kontak yapılmadan önceki durumu göstermekte ve yarıiletkenlerin yüzeylerinde herhangi bir yük yoktur. Şekil 4 (b) ise kontak yapıldıktan sonraki durumu göstermekte olup bu şekilde oluşan kontakta Schottky kontakta olarak adlandırılır (Yahia et al. 2011). Burada oluşan bükülme;

$$qV_d = \Phi_s - \Phi_m \quad 3.4$$

Biçiminde gösterilir. Denklemdaki V_d kontak potansiyelidir.



Şekil 4 Metal ve Yarıiletken (p-tipi) doğrultucu yapının enerji-bant gösterimi (a) Kontakt alınmadan önce (b) Kontakt alındıktan sonra

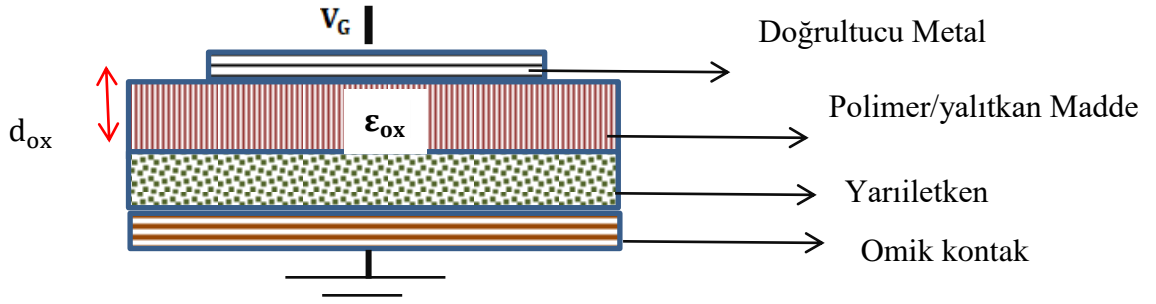


Şekil 5 M/S (p-tipi) doğrultucu yapının $V \neq 0$ iken

Şekil 4 (b) MS kontağın metal kısmına negatif yarıiletken kısmına pozitif olacak bir şekilde gerilim verildiğinde düz beslemde durumun tersi olursa da ters beslem adını alır (Yahia et al. 2011).

3.3 Metal- Polimer/Yalıtkan-Yarıiletken (MPS ve MIS) Yapılar

Elektronik cihazların uygulamaları için, MPS yapıların fiziksel özellikleri ve performanslarının anlaşılması oldukça büyük öneme sahiptir. Geleneksel yapıya sahip olan MS yapıların arayüzeylerinde istenmeyen reaksiyonlar oluşur. İstenmeyen bu reaksiyonlar yarıiletkenin bulk yapısında kusurları meydana getirir ve bariyer yüksekliğinin, yüzey özelliğine ve metal iş fonksiyonuna bağlı olmasını sağlar. Genelde MS yapıların bariyer yüksekliği metal ile Si arasındaki temastan oluşan ısıya bağlıdır. MS yapılarda arayüzeylerdeki istenmeyen reaksiyonların kontrol altında olması oldukça öneme sahiptir. İstenmeyen bu reaksiyonları önüne geçmek için, polimer bir katman kullanılmaya başlanmış ve MPS yapılar oluşturulmuştur. Metal ile yarıiletken arasına yerleştirilen polimer ya da yalıtkan malzemeler büyütülerek cihazların performanslarının artırılması amaç edinilmiştir. MPS yapılar oluşturulurken polimerin ince olması, metallerin polimerin üst yüzeyine geçme ihtimalini ortaya çıkarır ve buradan da yarıiletken ile reaksiyona girmesine neden olabilir. Böyle bir durumun oluşma ihtimali bu yapılar ile üretilen araçların üretimine sınır getirmektedir. Yarı iletkenin yüzeyindeki ince polimer katmanın olması, metal ile yarı iletken arasında olan yüzeyin kusurlarını düzenler ve elektronların geçmesine olanak tanır bu da arayüzey yoğunluğunu azaltır. Kalın polimer tabakanın olduğu durumda elektronların geçişlerinde zorlanmaya neden olur (Werner et al. 1991). Bu polimer tabakanın kalınlığı Angström birimi ile ifade edilir. Metal ve yarı iletkenin arasını bir çok büyütme tekniği kullanılarak yeni polimer tabakalar oluşturulabilir. Bu büyütme tekniklerinden bazıları Sol-jel, elektron-eğirme ve spin kaplama örnek verilebilir.



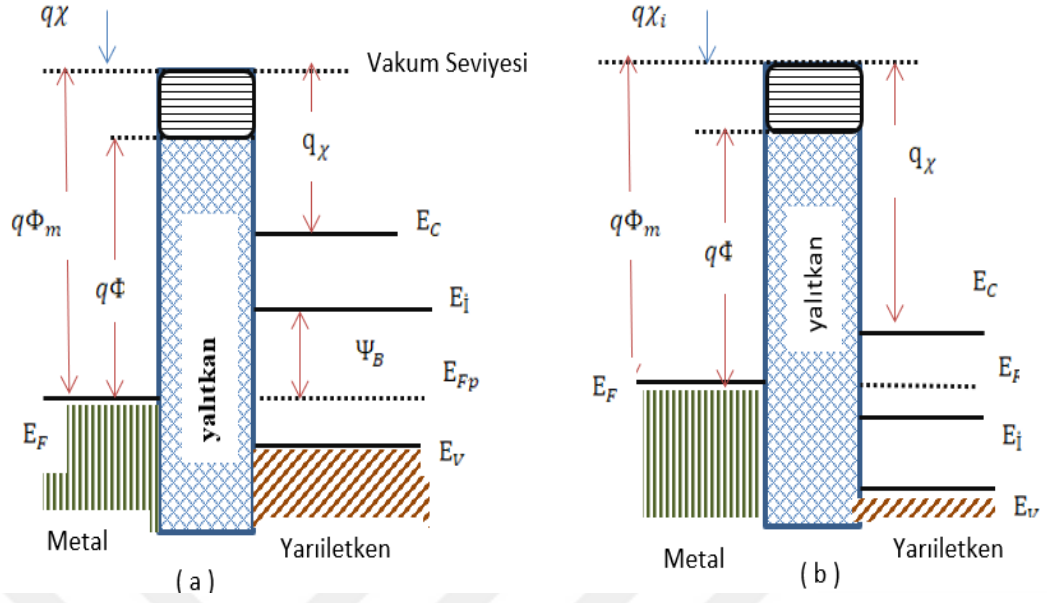
Şekil 6 MPS/MIS kontak yapısının şematik gösterimi verilmiştir.

Şekil 6 gösterildiği gibi MIS kontaklarda metal ile yarıiletken arasına yalıtkan tabaka yerleştirilmesiyle oluşur. Bu yapılar oluşumları açısından paralel plakalı kondansatörlere benzer (Gökçen 2005). Polimer/yalıtkan maddenin kalınlığı d_{ox} , dielektrik sabiti ϵ_{ox} ve metal levhaya uygulanan gerilim V_G ile gösterilmektedir. V_G gerilimi, doğrultucu metal plaka pozitif gerilimle beslenirse pozitif, negatif bir gerilimle beslendiğinde ise negatif olur. Bu yapıya ait özellikler paralel levhalı kondansatördeki gibi yalıtkan ve yarıiletken arayüzey özellikler tarafından belirlenir (Neamen 1997).

Polimer tabaka metal ile yarıiletken arasında yük geçişleri ile metal ile yarıiletken birbirlerinden izole eder. Genelde arayüzey tabakası tercih edilen malzemeler; Polivinil Alkol (PVA), Polivinil Klorür (PVC), polivinilpirolidon (PVP), polindol gibi maddeler kullanılır (Tecimer et al.2013, Altuntaş et al. 2009).

3.4 İdeal MIS Yapıları

Bir ideal MIS yapıya gerilim uygulanmadığında enerji-bant diyagramı Şekil 7’de p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler için gösterilmiştir.



Şekil 7 Potansiyelin sıfır olduğundaki ideal MIS yapının enerji-bant diyagram gösterimi
a) p-tipi yarıiletken için b) n-tipi yarıiletken için

Bir ideal MIS yapıya gerilim uygulanmadığında enerji-bant diyagramı Şekil 7’de p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler için gösterilmiştir.

Şekil 7’de verilen ifadeler;

q : Elektrik yükü ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

ϕ_m : Metal elementin iş fonksiyonu

ψ_B : Metal-yarıiletken arasındaki potansiyel engeli

χ : Yarıiletken maddenin elektron alınganlığı

χ_i : Yalıtkan maddenin elektron alınganlığı

E_V : Valans bant enerji seviyesi

E_C : İletkenlik bandı enerji seviyesi

E_i : Saf Fermi enerji seviyesi ($E_i = \frac{E_C - E_V}{2}$)

E_{Fn} : Fermi enerji seviyesi n-tipi yarıiletken için

E_{Fp} : fermi enerji seviyesi p-tipi yarıiletken için

ψ_B : Saf fermi enerji ile fermi enerji arasındaki fark

İletkenler içi mutlak sıcaklık sıfırlandığında, elektronlar tarafından tabandan başlayarak işgal edilen en yüksekteki dolu seviyesinin enerjisine Fermi enerjisi denir. Bu durum yarıiletkenlerde ise iletkenlik ile valans bandı taşıyıcı miktarına göre, yasak enerji aralığındaki göreceli seviyeye Fermi enerjisi denir. Metalin dışındaki hareketsiz elektronun enerji seviyesi ya da bir tane elektron koparmak için gerek duyulan enerjiye Vakum seviyesi olarak bilinir.

Φ_m (metal elementinin iş fonksiyonu): bir tane elektronun metalin Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarılmasında ihtiyaç duyulan en küçük enerji değeridir. Φ_s (yarıiletken elementinin iş fonksiyonu): yarıiletken elementinin Fermi ile vakum seviyesi aralığındaki enerji farkıdır. Φ_s (yarıiletken elementinin iş fonksiyonu) değişken değere sahiptir. Bunun nedenini, Fermi enerjisini katkılanan madde atomlarının yoğunluğunun etkilemesidir. Başka bir değişken olan elektron yakınlığı (χ): bir elektronun vakum seviyesi ile iletkenlik bant arası enerji farkıdır.

İdeal MIS yapının özellikleri tanımlanırken aşağıda verilen özellikler kullanılabilir. (Yücedağ 2007, Ersöz 2015).

Sıfır beslemede Φ_m ile Φ_s arasında bir fark yoktur. Yani $\Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s$ ifadesi sıfıra eşittir (Baraz et al. 2017, Werner et al. 1991).

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s = \Phi_s - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \text{ (n-tipi)} \quad 3.5$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s = \Phi_s - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \text{ (p-tipi)} \quad 3.6$$

Yukarıda verilen Denklem (3.5) n-tipi ve Denklem (3.6) p-tipi yarıiletkeni ifade edilmektedir. E_g , yarıiletkenin yasak enerji aralığı ve ψ_B , fermi enerji seviyesi ile saf enerji seviyesi (E_i) arasındaki enerji farkını gösterir (Baraz et al. 2017, Werner et al. 1991). Yalıtkanın bant aralığı büyük olduğundan, iyi bir dielektriktir. Yalıtkanın kendisinde ve yalıtkan ile yarıiletkenin arasında tuzak ve sabit hareketli iyon

barındırmaz. Yalıtkanın bant aralığının çok büyük olması yalıtkanın iletkenlik bandında olan yük çok küçük kalır. Bundan dolayı da ihmal edilebilir. D.C. doğru gerilimde yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi olmaz yani yalıtkan malzemenin özdirenci sonsuz büyüklüktedir. Fakat herhangi gerilim altında yalıtkanla bitişik haldeki metal yüzeydeki yükler ile yarı iletkende bulunan yük miktarları eşit fakat zıt yönlü olurlar.

Beslemenin sıfır olduğunda metal elementin iş fonksiyonu (Φ_m) ile yarıiletken elementin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki enerji farkı (Φ_{ms}) iş fonksiyonu sıfır değerini alır.

3.5 MS yapılarda akım- iletim mekanizmaları

MS kontaklar dışarıdan bir elektrik alana bırakıldığında akımın iletimini; arayüzeyin durumu, seri direnç, sıcaklık, yarıiletkenin türü, metal ile yarıiletken arasındaki polimer gibi etmenlerden etkilenir. Bundan dolayı akım-iletim mekanizmaların bilinmesi MS yapıların elektriksel özelliklerin daha iyi anlaşılması açısından oldukça önemlidir. MS, MIS ve MPS yapılarda akım-iletim mekanizmaları; Termiyonik Emisyon Teorisi (TE), Difüzyon Teorisi, Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED), Kuantum Mekaniksel Tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TAE), Alan Emisyonu (AE) ve Çok Katlı Tünelleme), Uzay Yük Bölgesinde Rekombinasyon, Deşik Enjeksiyonu ve T_0 Etkili Akım İletimi olarak sıralanabilir (Uslu 2010, Neamen 1997, Tüzün 2005).

3.5.1 Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi

TE sıcak olan yüzeylerden elektron salınması olayıdır. MS yapılarda TE teorisi, yeteri kadar ısısal enerji kazanan taşıyıcıların potansiyel bariyeri geçmesidir. Bu geçiş yarıiletkenden metala veya metalden yarı iletkenine doğru olabilir. Schottky diyotlar akımı çoğunlukla taşıyıcılar sağlar. Metal ile n-tipi oluşturulan Schottky diyotlarda elektronlar, metal ile p-tipi oluşturulan Schottky diyotlarda boşluklar akım oluşumu sağlar. Bu teoriyi Bethe açıklanmıştır (Sze 1981, Tüzün 2005, Gürkan 2010). Bu teinin varsayımları;

- Potansiyel bariyerin büyüklüğü, kT/q enerjisinden daha fazladır.
- Schottky alanında taşıyıcılar çarpışmamaktadır.
- Hayali kuvvetler önemsiz olup, bariyerin şekli biçimi önemsiz olup akım bariyer büyüklüğüne zayıf bir şekilde bağlıdır.

3.5.2 Difüzyon Teorisi

Yoğunluğu oldukça büyük bölgeden düşük yoğunluklu bölgeye olan yük geçişleri difüzyon olarak isimlendirilir. Schottky'ye göre bu teorilerin varsayımları aşağıdaki gibidir (Sze 1981, Taşcıoğlu 2012, Demircioğlu 2010, Yıldız 2008).

- Potansiyel bariyerin büyüklüğü, kT/q enerji değerinden daha fazladır.
- Tüketim alanında taşıyıcıların çarpışma olasılıkları vardır.
- $X=0$ ve $X=W$ 'deki taşıyıcıların kontrasyonu ısıl degede olup akım etkilemez.
- Yarıiletken maddedeki safsızlık oranı dejenere değildir.
- Bölgedeki akım difüzyon ve sürüklenme ile sınır getirilmiştir.

3.5.3 Termiyonik Emisyon- Difüzyon (TED) Teorisi

Termiyonik emisyon kuramı ile difüzyon kuramını bir araya getirip geliştiren Crowel ve Sze'dir (Sze 1981). TED teorisi ara yüzey kenarında olan V_r yeniden birleşme hızı üstüne kurulmuştur. Metal ile yarıiletken kontakın gövde bölümüne verilen gerilimle metal tarafına doğru elektron akışı sağlanır. Bir kısım taşıyıcı optik fonon geri saçılma ile kuantum mekanik yasımlar nedeniyle akım değerinde azalma gerçekleşir. Bunun nedenini Sze, çeşitlenme hızındaki azalmaya bağlamıştır.

3.5.4 Engel Boyunca Tünelleme

MS yapılı diyotlarda elektronlar TE dışında kuantum mekaniksel tünellemeyle bariyeri geçebilir. Engel içindeki tünelleme, düşük sıcaklık veya yüksek katkılı yarıiletkenlerde etkili akım iletim mekanizması olur. Yüksek katkı ve düşük sıcaklıkta bariyer genişliği

kısalır ve bariyerden düşük enerjili elektronların bariyer içinde yoğunlaşma ihtimalini artırır. Tünelleme alan emisyonu (AE) ve termiyonik alan emisyonu (TAE) olarak ikiye ayrılır. Çok fazla katkılanmış dejenere ($N_d > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletken durumunda tünelleme doğru, düşük katkıda ise tünelleme ters beslemde gerçekleşir (Padavoni et al.1966). Çok fazla katkılanmış yarıiletkenin düşük sıcaklık durumunda beslem yönündeki akım, yarıiletkendeki fermi enerjisine yakın elektronların tünellemesiyle artış gerçekleşir. Bu duruma AE adı verilir. Eğer sıcaklık artarsa elektronlar daha yüksek enerjiye uyarılır ve engel içinde tünelleme olasılıkları artar ve doğru beslem yönünde olan akımda artış olur. Bu duruma ise TAE adı verilir.

3.5.5 T_0 Etkili Akım İletimi

İdealite faktörünün $n > 1$ olması arayüzden kaynaklanıyorsa n (idealite faktörü) sıcaklıktan bağımsız olması gerekir. Eğer $n > 1$ olması TAE'den veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımdan kaynaklanır ise n sıcaklığa bağlıdır. Schottky diyotlarda İdealite faktörü genelde sıcaklığa bağlı olarak değişir

3.6 Dielektrik Malzemeler

Dielektrik maddeler, serbest yük taşıyıcısı olmayan ve büyük dirençli yalıtkan malzemeleri ifade eder. Elektrik alanda bu malzemelerde yük merkezlerindeki kaymalardan kaynaklı kutuplanma oluşur. Elektrik alan kalkması durumunda ise yükler tekrar eski konumlarına döner. İletkenlerden farklı olarak, kaçak akımı önlemek, akımı kontrol altında tutmak ve elektronik gürültünün engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Dielektriksel özellikleri ifade eden parametre ϵ (dielektrik sabiti)dir. Dielektrik sabiti elektrik alan frekansı ile ortam sıcaklığına bağlı değişiklik gösterir.

Kapasitörler ise iki iletken levha arasındaki boşluğun veya bu boşluğun dielektrik malzeme ile doldurulmasıyla elde edilir. Kapasitörlerin dielektrik malzeme ile doldurulması kapasitansı değiştirir. Kapasitörlerin genel görevi elektrik alanı depolamak ve serbest bırakmaktır. Düzgün iletken iki levhanın paralel yerleştirilmesi ile paralel

levha kapasitörleri oluşturulur. Bu kapasitörlerde kapasitansın asıl belirleyicisi iki levha arasındaki boşluktur ve bu boşluk artıkça kapasitans değeri yükselir. Bunun yanında levhaların yüzey alanları ile doğru orantılı olarak artış gösterir.

Boş levha kapasitörü için kapasitans ifadesini veren bağıntı şu şekildedir:

$$C_o = \frac{Q}{V_o} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad 3.7$$

Bu ifadede;

- C_o , boş levha kondansatörün kapasitansı,
- Q , levhalar arasında bulunan toplam yük miktarı,
- V_o , iki levha arasındaki potansiyel fark,
- ϵ_0 , boşluktaki elektriksel geçirgenlik (boşluk ve serbest uzaydaki elektrik alanın oranı),
- A , kondansatör levhasının alanı,
- d , iki levha arasında oluşan mesafe veya levhaların arasındaki tabakanın kalınlığı

Dielektrikli kapasitörlerde iletken levhalar arasına elektriği iletmeyen malzemeler konulur (ϵ'). Levhalar arasında kullanılan bu malzemeler yalıtıcıdır ve elektrik alanında polarizasyona sebep olmasıyla kapasitans değerini artırır. Dielektrik sabitinin artması kapasitans değerini artırır.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon' Q}{V_o} = \epsilon' C_o = \frac{\epsilon' \epsilon_0 A}{d} \quad 3.8$$

Bu kapasitörler; sinyal işleme, güç düzeltme, enerji depolama ve elektrik devreleri iyileştirmek gibi birçok alanda kullanılır.

3.6.1 Dielektrik Kutuplanma türleri ve Frekansa Bağlı Kutuplanma

Dielektrik yani yalıtkan malzemeler elektrik alanda dipol moment oluşturmasına kutuplanma denir. Dipol momentlerin düzenlemesi olayı da kutuplanma olarak adlandırılır. Atom ve moleküllerden oluşan dielektrik malzemeleri elektrik alan altında kutuplanma olayı gözlemlenir. Bu durum dielektrik malzemede bulunan yüklerin elektrik alan etkisinde yer değiştirdiğini gösterir. Genel olarak dielektrik malzemedeki yüklerin yer değiştirmesi; elektronik, iyonik ve oryantasyon kutuplanması olarak karşımıza çıkar.

Elektronik kutuplanma: dielektrik malzemedeki elektronların elektrik alan etkisi ile yer değiştirmesi olayı ile ortaya çıkar.

İyonik kutuplanma: dielektrik malzemedeki iyonların elektrik alan etkisi ile yer değiştirmesi olayı ile ortaya çıkar ve malzemenin uçlarında kutuplanma oluşur.

Oryantasyon kutuplanma: moleküler yapıdaki dielektrik malzemelerde görülür. Elektrik alan etkisiyle moleküller belirli bir yönde toplanır ve sonucunda kutuplanır.

Dielektrik malzemenin elektrik alan etkisinde frekansına göre nasıl değiştiğini ise frekansa bağlı kutuplanma olarak adlandırılır. Bu kutuplanmayı dielektrik malzemenin molekül yapısı ve uygulanan elektrik alanın frekansı etkiler. Frekansa bağlı kutuplanma, elektromanyetik alanlarda, mikrodalga teknolojisi ve radyo frekanslı devrelerde oldukça öneme sahiptir. Dielektrik sabitinin frekansta nasıl etkilendiğini bilmek, enerji kayıplarını kontrol altına alınması ve bazı uygulamalarda performans artmasına yardımcı olabilir (Bain et al. 2017).

3.7 MS Yapıların Hazırlanması

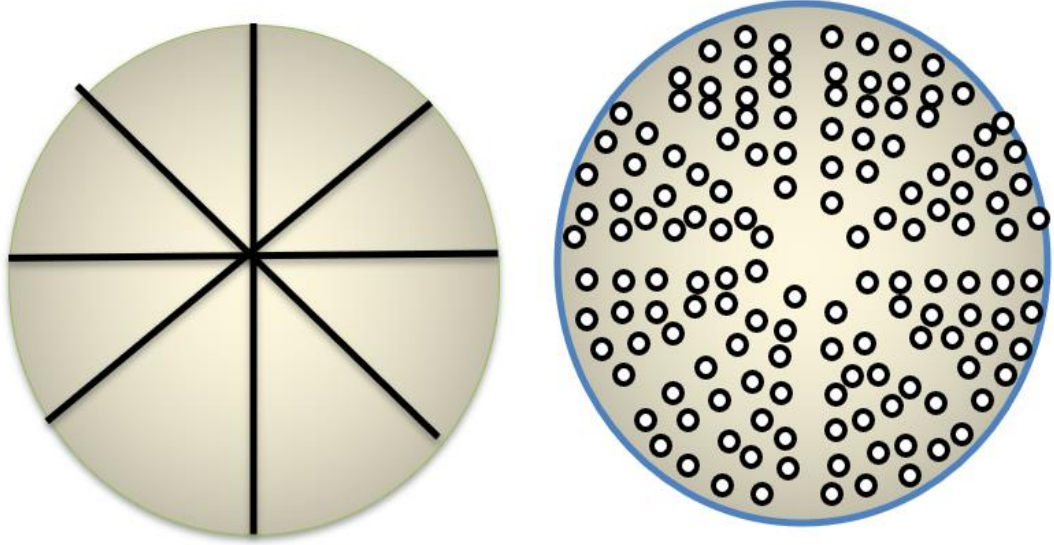
3.7.1 Kristal yapının temizlenmesi

İdeale yakın MS tipi Schottky diyot hazırlayabilmek için yarıiletken yüzeyinin çok iyi temizlenmesi gerekir. Mekanik ve kimyasal temizleme işlemi ile yarıiletken çok sayıda yüzey kusurlarından arındırılmış olur. Yarıiletken yüzeyin temizlenme ve numune büyütme işlemleri sırasında laboratuvar ortamındaki organik kirleticilerden dolayı yüzeyde yabancı maddeler mevcut olabilir. Bu sebeple temizleme işleminde çok titiz davranılmalıdır (Özdemir et al. 2020).

3.7.2 Al/p-Si Schottky kontağın oluşturulması

MS yapıların oluşturulmasında buharlaştırma veya çığlama gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Buharlaştırma yöntemi deneysel çalışmalarda pratik, kullanışlı olması nedeniyle daha fazla tercih edilmektedir (Balcı et al. 2024).

Bu çalışmada Schottky omik ve doğrultucu oluşturulmasında buharlaştırma yöntemi seçilmiştir. Omik kontak oluşumu için temizleme işlemi yapılan p-Si yarıiletkenin üstüne Şekil 8' de gösterildiği gibi bakır maske yerleştirilip parlak olmayan yüzeyi aşağıda kalacak biçimde vakum ortamına yerleştirildi. Daha sonra fanus kapatılıp vakumlama için iç basınç 10^{-6} Torr seviyesine getirildi. Flamanlardan birinin üstünden 35 A akım geçişi sağlanarak %99,999'luk saflıktaki kimyasal temizlenmiş Al parçacıklarının buharlaştırılması gerçekleştirildi. Buharlaşma sırasında ortaya çıkabilecek yabancı maddelerin kristalin yüzeyini kirletmesinin önüne geçmek cam perde ile kapatıldı. Daha sonra cam perde ile kapatılarak kristalin parlak olmayan yüzeyi ~ 1500 Å kalınlığındaki Al ile kaplanması gerçekleştirildi



Şekil 8 Kontakların oluşturulmasında kullanılan maske

Daha sonra Al tabaka tavlama işlemi ile omik kontak özelliği kazandırıldı. Kuartz tüp, dirençten geçen akım sayesinde ısıtılıp ortam sıcaklığı kontrolü sağlandı. Kuartz tüpündeki numunenin bulunduğu bölgeye yerleştirilen kromel-alumelthermo-çiftiyle sıcaklık kontrol edilip 500 °C sabit kalması sağlandı. Tavlama işlemi sırasında ortama gönderilen N₂ gazının akış hızı akış ölçer ile ölçümü yapıldı. Bölgede oluşan su buharının alınması için oksitlemede kullanılan gazlar Resim 1’ de gösterildiği gibi nem tutucudan geçirilip oksidasyon fırınına gönderimi yapıldı. N₂ gazı ortamdan 50 dk süre ile yaklaşık 2 lt/dk hızında geçirilmesi sağlanıp büyümesi gerçekleştirilen Al tabaka omik kontak özelliğe kavuşturuldu.

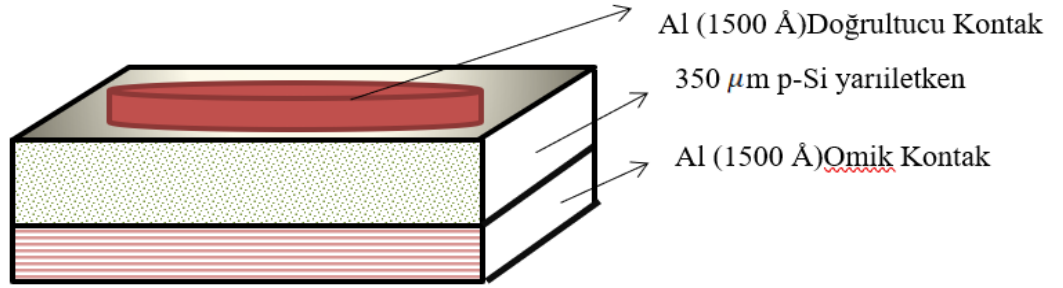
Resim 1’deki vakum buharlaştırma sistemi ile omik ve doğrultucu kontakın oluşturuldu.



Resim 1 Kontak oluşumu için kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi (Unam, Bilkent Üniversitesi)

MS yapısı, p-tipi silikon (100) alttaş üzerinde 300 mm kalınlığında olup substrat olarak 1-10 Ω .cm direncinde üretimi yapılmıştır. Üretim için ilk olarak, p-Si alttaş metanola batırılıp 18M Ω .cm dirençle iyonize olmuş su içerisinde durulandı. Durulama işleminden sonra sıcak bir H₂O, NH₄OH ve H₂O₂ (65:13:13 h/h) çözeltisi içinde kazınması yapılmıştır. Daha sonra tekrar iyonize su ile durulama işlemi yapılarak azot gazı ile kurutulması sağlanmıştır. Temizleme işleminden sonra 1500 Å kalınlık ve % 99.995 saflıktaki Al, metal buharlaştırma sisteminde 10⁻⁶ Torr basınçta p-Si alttaşın arkasına buharlaştırılması sağlanmıştır. Öz direnci düşüklüğünün devamı için 500 °C'de 10 dakika boyunca, Al kaplı p-Si alttaş N₂ atmosferi altında sinterlenme işlemi yapıldı (Alptekin et al. 2019b).

Omik temas işleminden sonra, yüksek vakumla metal buharlaştırma sisteminde p-Si alttaş üstüne 2 mm çaplı yüksek saflıktaki Al kontaklar oluşturuldu. Böylece Şekil 9'da verilen Al/p-Si MS yapısı elde edildi.



Şekil 9 Al/p-Si MS yapısı

3.7.3 Frekansa Bağlı Olarak Empedans Ölçer Cihazı

Frekansa bağlı olarak $C-V$ ve $G/\omega-V$ ölçüm işlemleri HP4192A LF empedans analizörü kullanımı ile yapılmıştır. Ölçümlerin tamamı 5 kHz-1000 kHz (=1MHz) frekans bandında ve (-3V,6V) Volt arasında oda sıcaklığında empedans analizörü (5 Hz-13 MHz) ve mikrobilgisayar dönüştürücü kartı ile gerçekleştirilmiştir. Resim 2 de ölçüm sisteminin gösterimi verilmiştir



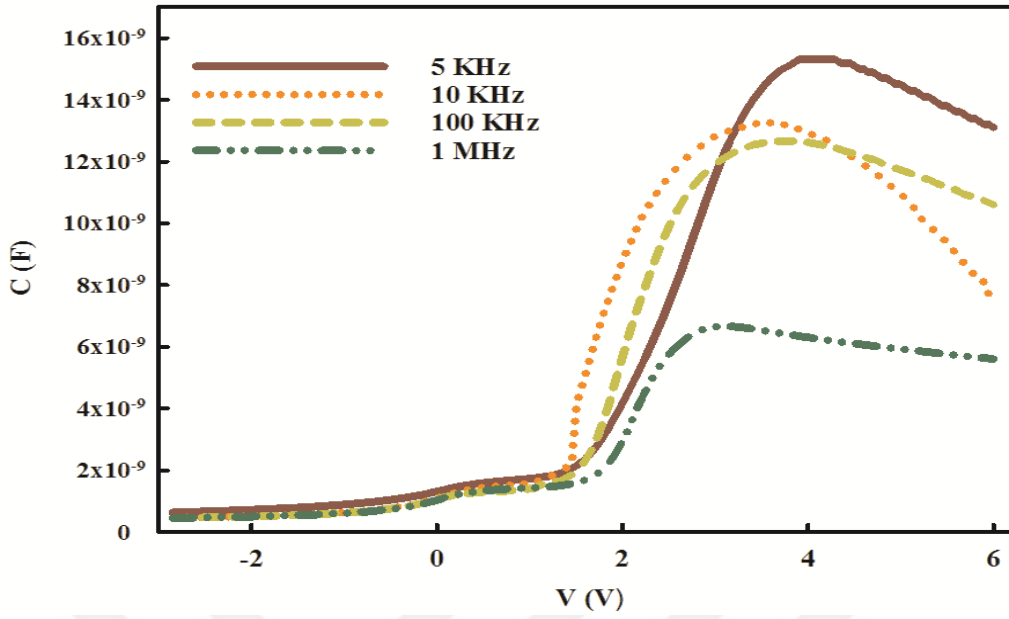
Resim 2 Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörüdür

4 BULGULAR VE TARTIŞMA

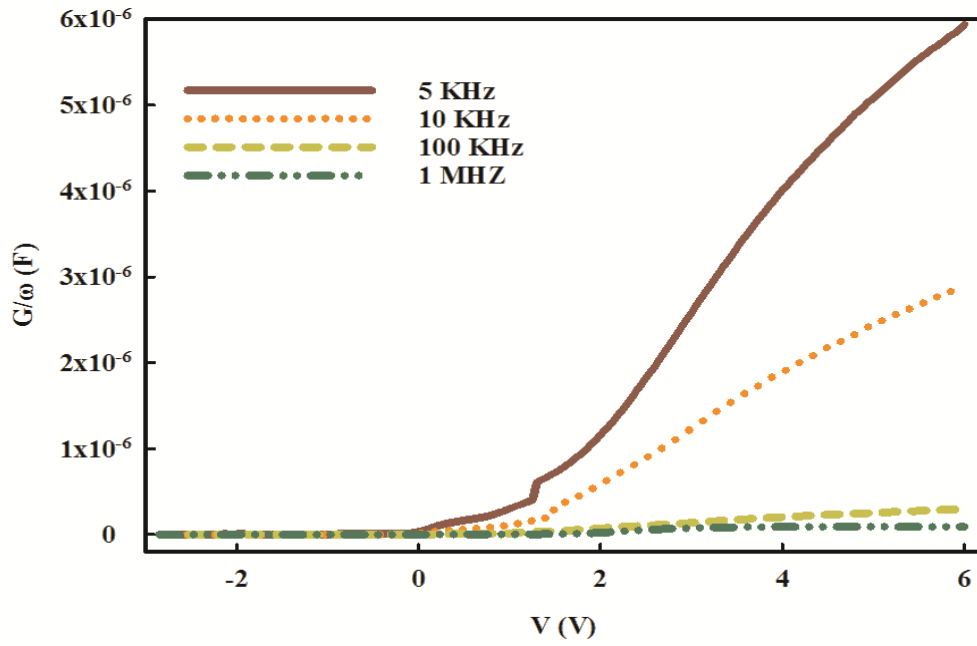
4.1 Al/p-Si (MS) tipi Schottky kontağın frekansa bağlı C-V ve İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) Karakteristikleri

Schottky engel diyotu (MS) ile MIS, MPS gibi diyotları tamamen birbirinden farklı özellik gösterirler (Altındal et al. 2011). Metal ile yarıiletkenin arasına arayüzey konulması C-V ve (G/ω -V) karakteristiklerini büyük oranda değiştirir. Şekil 10 ve Şekil 11 oda sıcaklığında Al/p-Si (MS) Schottky engel diyotlarının deneysel C-V ve G/ω -V karakteristiklerini göstermektedir. Şekil 10'da MS tipi Schottky engel diyotun verilen frekans aralıklarındaki C-V eğrileri terslenim, tükenim ve yığılma bölgelerini göstermektedir.

Şekil 10 incelendiğinde C değeri uygulanan voltajla artmış ve yaklaşık 3V-4V aralığında pik verdiği görülmüştür. Pozitif voltaj bölgesinde C'nin verdiği bu pik frekans artmasıyla azalmaktadır. Aynı zamanda pik bölgesi artan frekansla negatif voltaj yönüne doğru kayması görülmektedir. Çünkü metal ile yarıiletken yüzey arasında oluşabilecek arayüzey durumları söz konusudur ve arayüzey durumları uygulanan AC sinyali düşük frekanslarda takip edebilirken yüksek frekanslarda bu takibi yapamazlar. Bu nedenle düşük frekanslarda (C_m ve G_m) arayüzeyden katkı ile (C_{ex} ve G_{ex}) ilave kapasitans- kondüktans etkisi söz konusudur. Şekil 4.1'de pozitif bir voltajdaki C-V eğrilerindeki pikin nedeni (N_{SS}) yoğunluk dağılımı ile R_s ve yüzey kutuplaşması etkiler (Altındal et al. 2011).



Şekil 10 Al/p-Si Schottky engel diyotun oda sıcaklığında 5kHz-1MHz frekans aralığındaki C-V karakteristikleri



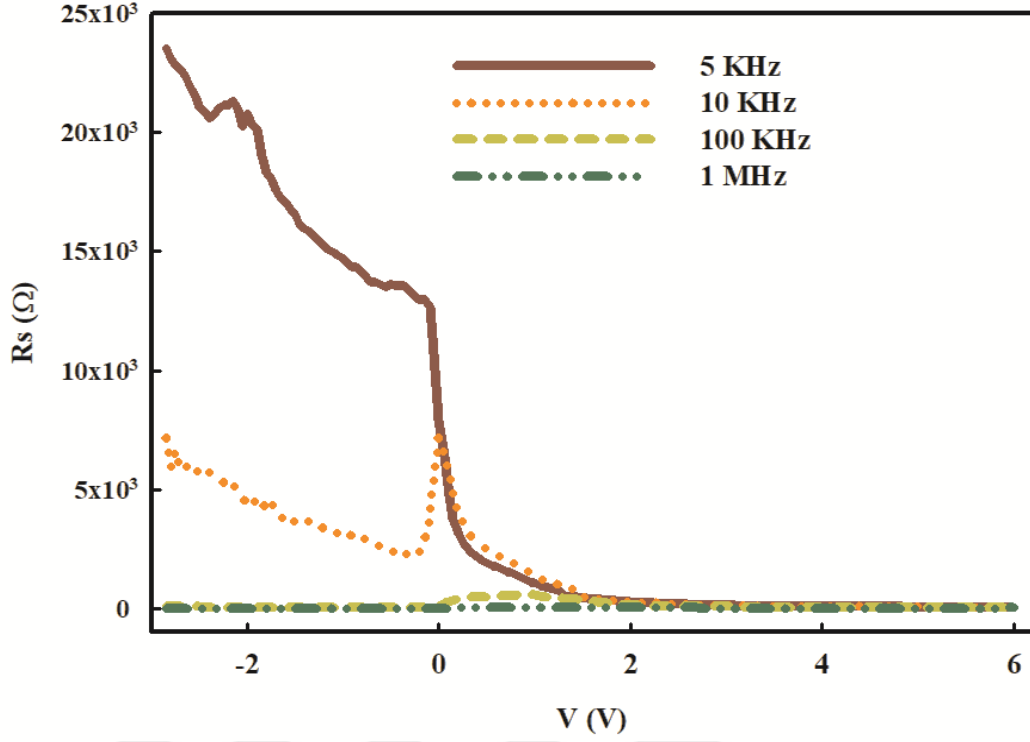
Şekil 11 Al/p-Si Schottky engel diyotunun oda sıcaklığında 5kHz-1MHz frekans aralığındaki G/ω -V karakteristikleri

Pozitif voltaj altında C-V pikleri için birçok teorik ve deneysel yapılmış çalışmalar mevcuttur. Yücedağ 2009, Wu et al. 1989, Chattopadhyay et al. 1992, Bati et al. 2000, Werner et al. 1988). Şekil 10 tekrar bakıldığında pik değeri ile kapasitans hızla düşmekte iken Şekil 11’de ise aynı pozitif voltaj değerlerinde G/ω hızla artış gösterip ve C’nin son pozitif voltaj değerinde maksimum değerini almaktadır. Bu nedenle pozitif voltajda piklerin oluşması ve kapasitansın azalması elektrotlardaki yüklerin azalmasına bağlanır (Altındal et al. 2011). Yakın dönemde bu pik oluşumunun nedenini N_{ss} ve R_s bağlı olarak açıklanmıştır (Yahia et al 2011, Altındal et al. 2011).

Schottky engel diyotları için R_s önemli bir parametreye sahiptir. Bu nedenle C ve G/ω voltaja bağlı karakteristiklerinde davranışını direk etkilemektedir. R_s ’ gerçek değerinin elde edilmesinde Nicollian ve Brews tarafından geliştirilen admitans metodu kullanılmıştır (Nicollian et al. 1982). Bu metotta R_s değeri yığılım bölgesindeki yüksek frekans değerinde ölçülen kapasitans (C_m) ve iletkenlik (G_m) değerlerinden yararlanılarak elde edilebilir (Sze et al. 2007). Öngerilim voltajına göre R_s değerleri ölçümleri alınan C ve G verilerinden fayda sağlanarak aşağıdaki eşitlikten elde edildi;

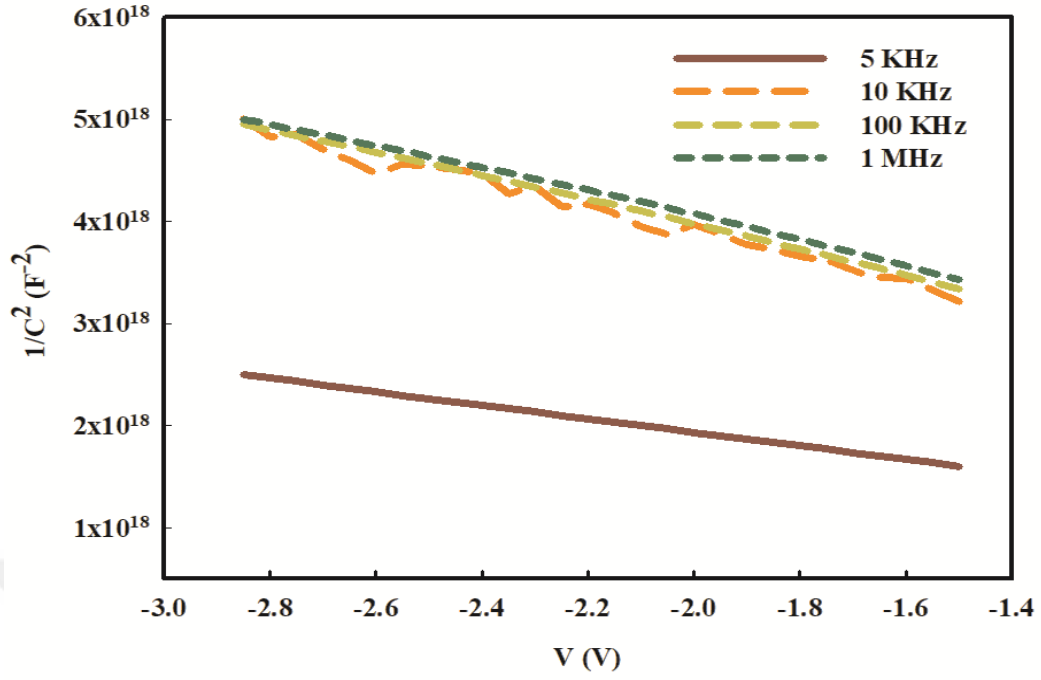
$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad 4.1$$

Frekans ve voltaja bağlı R_s değerleri C_m ile G_m/ω değerleri kullanılarak hesaplanıp Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 12’de görüldüğü gibi her voltajda ve artan frekansla R_s değeri azalmaktadır. Fakat voltajın yükselmesi ile frekansa bağlılık giderek azalmaktadır. R_s -V eğrisinde -2V ve 0V arasında bütün frekans değerlerinde yaklaşık iki pik vermiştir. Piklerin değerleri artan frekansla azalma göstermekte ve pik pozisyonları uygulanan voltajla düzenlenerek pozitif bölgeye doğru kaymaktadır (Nicollian 2002). Şekil 12’de R_s değerinin voltaja ve frekansa bağlılığı gösterilmektedir.



Şekil 12 Al/p-Si Schottky engel diyotun için sıcaklığında 5 kHz-1 MHz frekans aralığında R_s -V karakteristikleri

Ters ön gerilimde ölçülen kapasitans değerleri kullanılarak Al/p-Si MS yapısının oda sıcaklığında 5KHz-1MHz frekans aralığında C^{-2} -V grafiği Şekil 13 verilmiştir. Şekil 13’de görüleceği gibi C^{-2} -V karakteristik eğrileri geniş bir ön gerilim voltajı altında doğru çizgi vermektedir. Bu durum admitans ölçümlerinin yeteri ve yüksek frekansta yapıldığının göstergesidir. 5KHz-1MHz arasındaki her frekans değeri için C^{-2} -V karakteristiğinin voltaj eksenini kestiği noktadaki voltaj değerine eşittir (Maheshwari 2007, Nicollian et al. 1982).



Şekil 13 Al/p-Si Schottky engel diyotun için sıcaklığında 5kHz-1MHz frekans aralığında C^{-2} -V karakteristikleri

Al/p-i MS yapısının bazı hesaplanan temel elektriksel parametreleri Çizelge 2’de verildi. Şekil 13’de 5 kHz-1 MHz aralığında C^{-2} -V grafiğın lineer bölgelerin kesişim ve eğimlerinden aşağıdaki eşitliklerden yararlanılarak elde edildi. MS yapının C^{-2} -V ilişkisi Eşitlik 4.2 ile verilir (Sze 1981).

$$C^{-2} = \frac{2(V_R + V_0)}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_D} \quad 4.2$$

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_V}{N_D}\right) \quad 4.3$$

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_D}{q N_D}} \quad 4.4$$

$$E_m = \sqrt{\frac{2q N_D V_0}{\epsilon_s \epsilon_0}} \quad 4.5$$

$$\Phi_B(C - V) = V_0 + \frac{kT}{q} + E_F = V_D + E_F \quad 4.6$$

Bu eşitliklerde verilen ifadeler; (E_F) fermi enerjisi, W_D tüketim tabaka kalınlığı, E_m MS eklemde maksimum elektrik alan, $\Phi_B = (C - V)$ MS eklemde potansiyel engel yüksekliği, ($V_D = V_0 - kT/q$) V_D Difüzyon potansiyeli, N_D katkı atomların yoğunluğu ve N_V valans bandındaki izinli enerji durumunun yoğunluğunu göstermektedir (Chattopadhyay et al. 1986). Yukarıda verilen eşitliklerden çıkan sonuçlar Çizelge 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2 Al/p-Si MS Schottky diyotun farklı frekans değerlerinde bazı temel elektriksel parametreler.

f (kHz)	V_0 (eV)	$N_D \times 10^{16}$ (cm^{-3})	E_f (eV)	Φ_B (eV)	$W_D \times 10^{-5}$ (cm)	R_s (Ω)	$E_m \times 10^4$ (kV/cm)	$\Delta\Phi_B$ (eV)	C_2
5	0,92	1,84	0,183	1,100	2,50	1052,72	7,22	0,0323	0,664
10	1,25	1,01	0,198	1,446	4,02	1394,96	6,23	0,0276	0,365
100	1,33	1,01	0,198	1,529	4,15	568,93	6,43	0,0280	0,365
1000	1,64	1,10	0,196	1,827	4,40	25,63	7,44	0,0301	0,398

Çizelge 2 incelendiğinde Al/p-Si Schottky diyotu için; V_0 , $\Phi_B = (C - V)$, W_d , ve E_m değerleri 5 KHz’de sırasıyla 0,92 eV, 1,100 eV, 2,5E-05, 7,22E+04 iken 1 MHz’de 1,64 eV, 1,827 eV, 4,40E-05, 7,44E+04 olarak hesaplandı. Fakat N_D , E_f değerleri $C^{-2} - V$ eğrileri her frekans değeriyle paralel ve eğimleri de sabit olduğu için frekansla fazla bir değişim olmadığı görülmektedir. Düşük frekanslarda genellikle $C^{-2} - V$ grafikleri doğrusallıktan sapma eğilimi gösterebilir. Bu eğilimin neden olan durum arayüzey durumları ile arayüzey durumlarındaki yüklerin yer değiştirmeleridir.

Arayüzey durumlarının nedenleri çoğunlukla; yarıiletkenin yüzeyindeki düzensizlikler, yüzey temizliği, laboratuvarındaki kirlilik ve yarıiletken yüzeyindeki doymamış bağlardan kaynaklanma olasılığı vardır (Altindal et al. 2012).

4.2 Voltaj ve Frekansa Bağlı Dielektrik, Elektrik Modülü ve AC İletkenlik Analizleri

4.2.1 Dielektrik Özellikler

Deneysel olarak oda sıcaklığında ölçülen kapasitans ve iletkenlik verilerinden yararlanılarak 5KHz-1MHz frekans aralığında, reel dielektrik sabiti (ϵ'), sanal dielektrik kaybı (ϵ'') ve dielektrik tanjant kayıpları hesaplanmıştır. Karmaşık dielektrik geçirgenliği, Eşitlik 4.7'deki gibi tanımlanır:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon'' \quad 4.7$$

Dielektrik sabiti/kaybı; uygulanan frekans, elektrik alan, alternatif voltaj, N_{SS} ve bu parametrelerin dağılımı ve yaşam süresi (τ) gibi parametrelerden etkilenir. Dielektrik sabiti (ϵ'), farklı frekanslarda, tüketim bölgesinde ölçülen veriler kullanılarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Chelkowski 1980).

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad 4.8$$

Eşitlik 4.8'de verilen C_0 kapasitörün yalıtkan olmadan önceki değeri olup $C_0 = \epsilon_0 (A/d_{ox})$ ile ifade edilmektedir. A ise doğrultucu kontağın alanı olup, d_{ox} arayüzey bulunan tabakanın kalınlığını ve ϵ_0 boş uzayın dielektrik sabitidir.

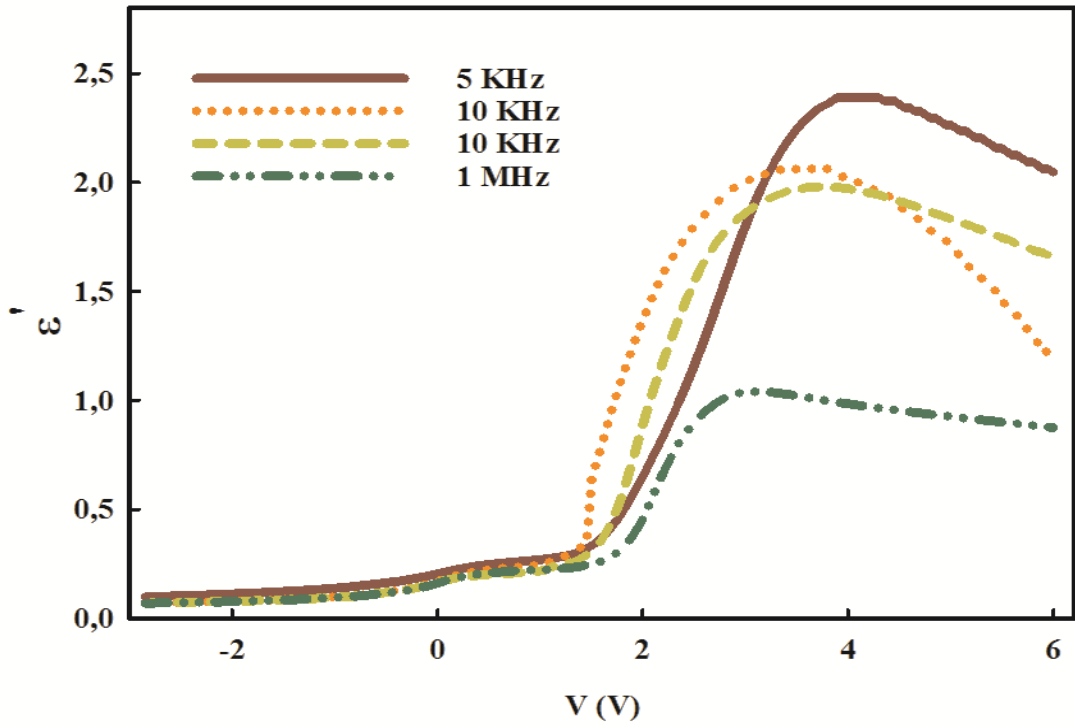
Uygulanan dış bir elektrik alanda malzemedeki kayıp olan enerji miktarı, dielektrik kaybı ile ölçülmektedir. Bu dielektrik kaybı (ϵ''), farklı frekanslarda ölçülen değerler alınarak Eşitlik 4.9 kullanılarak hesaplanır:

$$\epsilon'' = \frac{G_m}{C_0 \omega} = \frac{G_m d_{ox}}{\omega A \epsilon_0} \quad 4.9$$

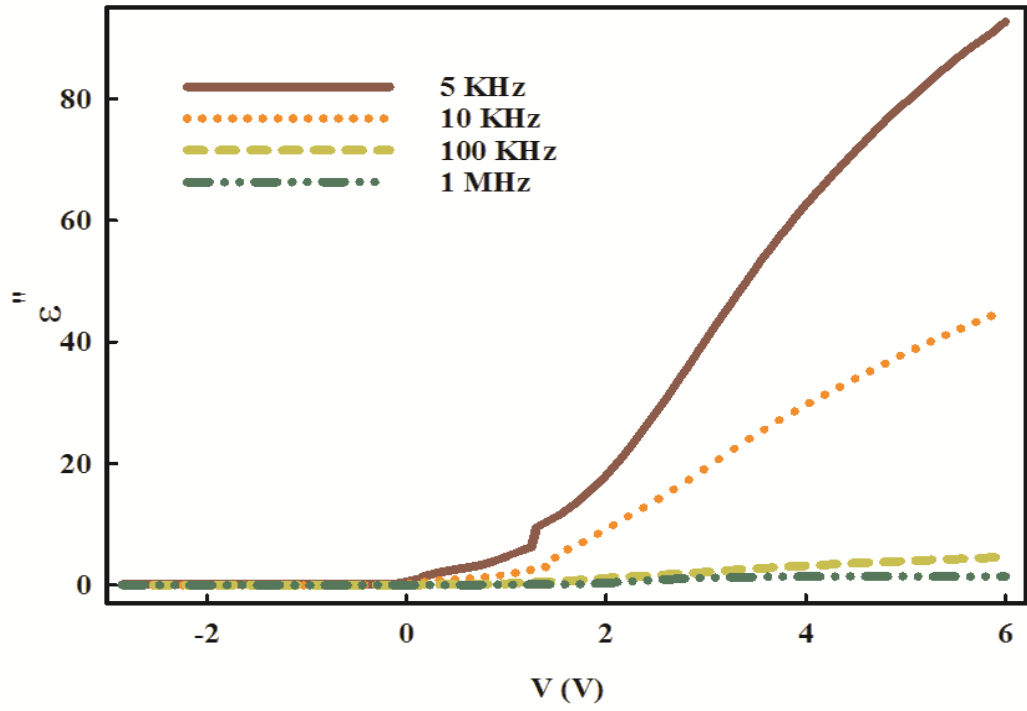
Burada G_m ; MS yapının iletkenliği, ω ; açısıl frekanstır. Dielektrik kayıp ise ($\tan\delta$) ile ifade edilir ve Eşitlik 4.10'daki gibi ϵ' ve ϵ'' oranı ile ifade edilir (Tataroğlu 2006).

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad 4.10$$

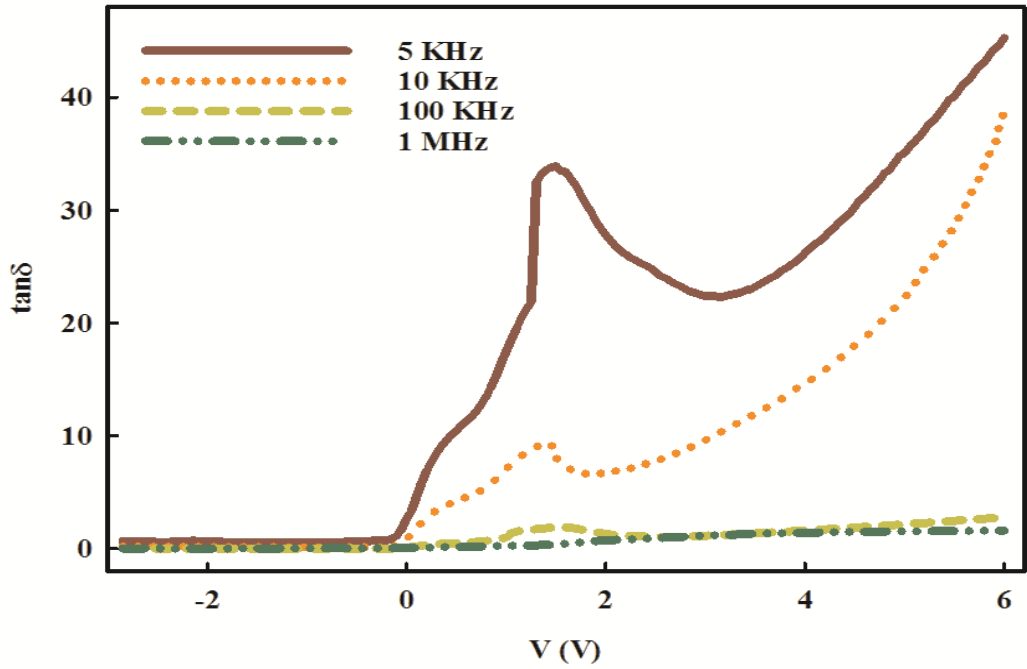
Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ ifadelerinin belirli frekanslarda uygulanan voltaja bağlı değişimleri verilmiştir.



Şekil 14 Al/p-Si yapısının 5KHz-1MHz frekans aralığına bağlı ϵ' - V karakteristiği



Şekil 15 Al/p-Si yapısının 5KHz-1MHz frekans aralığına bağlı $\epsilon'' - V$ karakteristiği

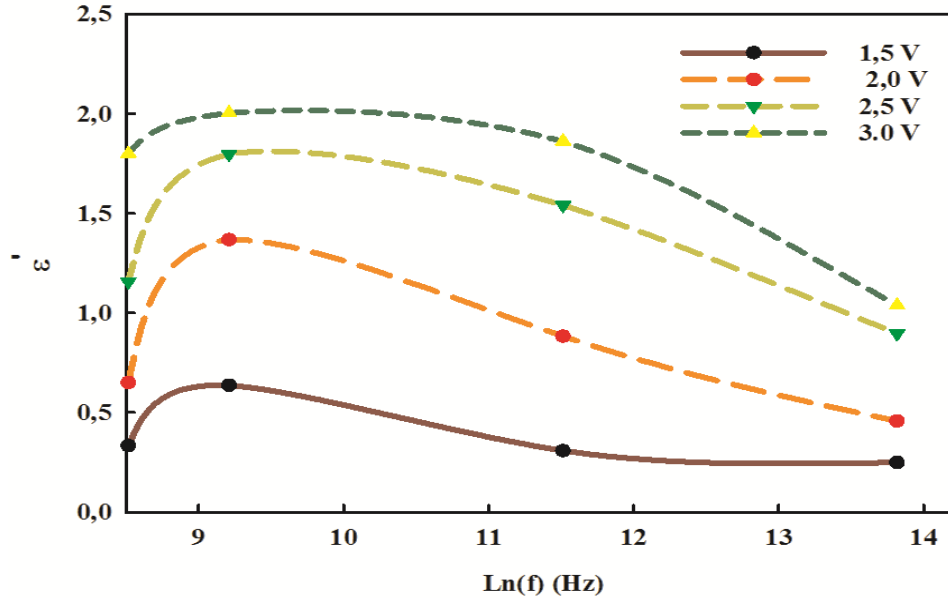


Şekil 16 Al/p-Si yapısının 5KHz-1MHz frekans aralığına bağlı $\tan\delta - V$ karakteristiği

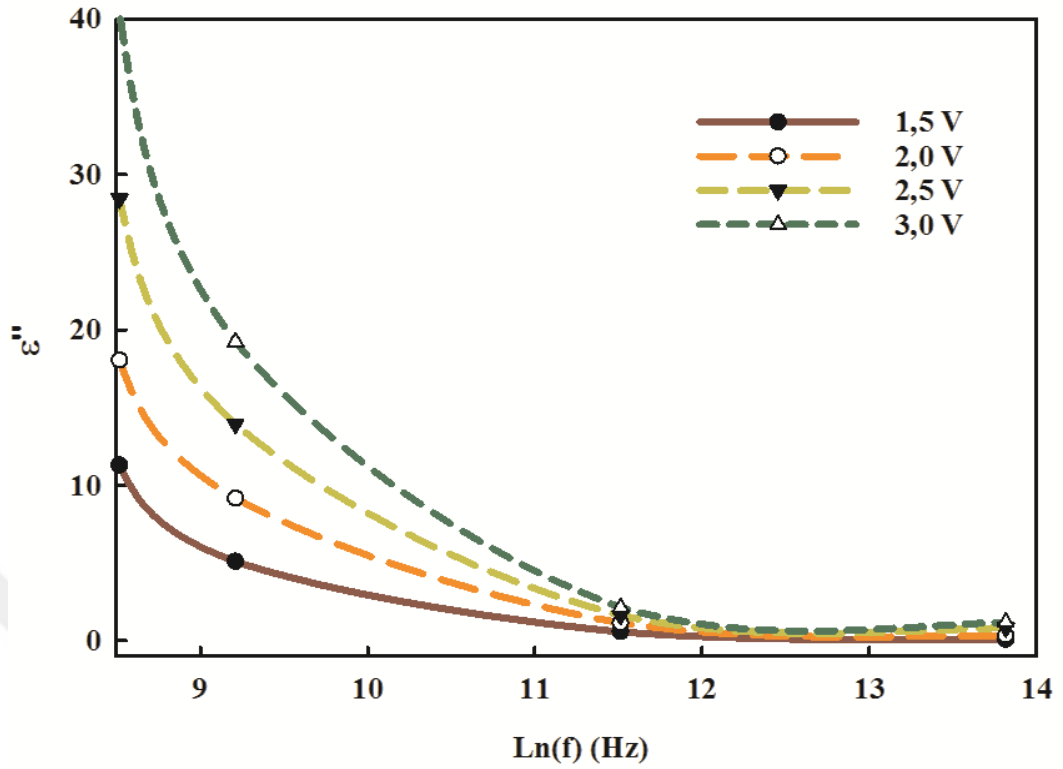
Şekil 14 ve Şekil 15'deki $\epsilon' - V$ ve $\epsilon'' - V$ grafikleri belirli frekans aralığı ve voltaj altında $C-V$ ve $G/\omega-V$ eğrileri ile benzer davranışlar göstermektedir. Şekil 14'deki $\epsilon' - V$ eğrisindeki ilk pik, N_{ss} dağılımından, ikinci pikler R_s neden olur. $\epsilon' - V$ eğrileri incelendiğinde negatif ve pozitif gerilimlerde artan frekansla dielektrik sabiti azalma göstermektedir. Bu azalma artan frekansla azalan polarizasyona atfedilir ve yüksek frekans üstünde elektronlar dış elektrik alanı takip edemez (Konofaos et al.1997).

Şekil 15 ve Şekil 16'daki ϵ'' ve $\tan\delta$ eğrileri ise negatif ve pozitif voltaj bölgesinde, verilen voltaj ve frekansa duyarlı olduğu görülmektedir. Artan frekans değeri ile dielektrik kayıp azalır ve kayıp açısı artmaktadır. Orta gerilim bölgesinde ise yaklaşık olarak sabit değer vermektedir. $\epsilon''-V$ ve $\tan\delta-V$ eğrilerinin yığılım ve terslenim bölgesinde bir frekans dispersiyon göstermesi, arayüzey durumu ile tersinim yüklerin yüksek frekans ve düşük frekansta gösterdiği tepki süreleri farkından kaynaklanmaktadır (Nicollion et al.2002,Tataroğlu et al. 2005, Yücedağ et al. 2007).

Şekil 17 ve Şekil 18'de Al/ p-Si yapısına ait çeşitli gerilimler için $\epsilon' - \ln(f)$ ve $\epsilon'' - \ln(f)$ grafikleri



Şekil 17 Al/ p-Si yapısına ait çeşitli gerilimler için $\epsilon' - \ln(f)$ grafiği



Şekil 18 Al/ p-Si yapısına ait çeşitli gerilimler için $\epsilon''- \ln(f)$ grafiği

Şekil 17 ve Şekil 18'de görüldüğü gibi tüm voltaj bölgesi için ϵ' ve ϵ'' değerleri frekanslardaki artışla beraber üstel olarak azalmaktadır. Dipoller, elektrik alan altında, düşük ve orta frekanslarda, alan değişiminden önce hizaya gelmeleri için gerekli olan zaman vardır fakat büyük frekanslarda dipoller elektrik alan takibi yapamazlar ve bir arayüzey kutuplaştırma mekanizmasının olmaması ile C, ϵ' ve ϵ'' ye ilave bir katkıda olamaz (Altındal et al. 2016). (Şekil 17 ve Şekil 18'e bakıldığında, artan gerilimle ϵ' ve ϵ'' değerlerinde artma gözlemlenir. Sonuç olarak ϵ' ve ϵ'' değerlerinde benzer eğilime sebep olan tuzaklarda yük depolama açısından frekansın azalması ile C ve G değerlerindeki yükselme durumları açıklamayı mümkün kılar. Düşük ve orta frekanslarda ϵ' ve ϵ'' ifadelerindeki değişimlere Maxwell–Wagner tipi polarizasyon denir (Maxwell 1873).

4.2.2 AC Elektriksel İletkenlik

Malzemenin polarizasyon tipi ile etkili iletkenlik mekanizmasını anlaşılabilmesi için AC iletkenlik ölçümleri yapılmalıdır. Karmaşık elektriksel-iletkenlik (σ^*), onun reel ve sanal kısımları olarak aşağıdaki Eşitlik 4.11 ile verilir “(Bilkan 2016, Sevgili et al. 2020, Badali et al. 2018)”.

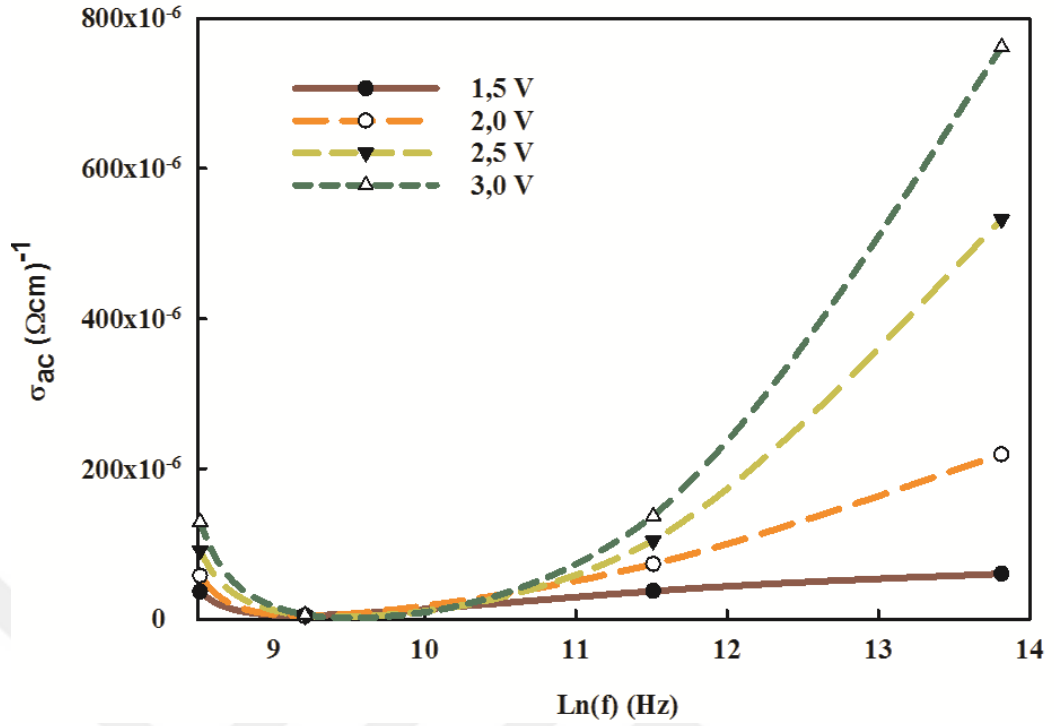
$$\sigma^* = \sigma' + j\sigma'' = \omega\varepsilon_0\varepsilon'' + j\omega\varepsilon_0\varepsilon' \quad 4.11$$

Eşitlikteki σ' , σ'' karmaşık iletkenliğin gerçel ve sanal bileşenleri olup, AC elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) σ^* 'nin gerçel kısmıdır. Burada " σ_{ac} " dielektrik kaybın ve frekansın göstergesi olmaktadır.

$$\sigma_{ac} = \varepsilon_0\varepsilon''\omega \quad 4.12$$

Al/p-Si MS Schottky diyotun σ_{ac} - ln f grafiği Şekil 19' da gösterilmektedir.

Şekil 19'a bakıldığında gibi frekansın artışı ile σ_{ac} ifadesi de artmaktadır. Bu yük taşıyıcılarındaki sıçratma iletkenliği ile ifade edilir. Düşük ve orta frekanslarda iletkenliğin hemen hemen sabit olması ve frekansın yüksek seviyelere çıkmasıyla üstel olarak artması iki tane farklı iletim mekanizmasının varlığının göstergesidir. Bu iletim mekanizmaları DC ve AC dir. DC düşük ve orta frekanslardaki iletkenlik, AC ise yüksek frekanslardaki iletkenlik olarak tanımlanır.



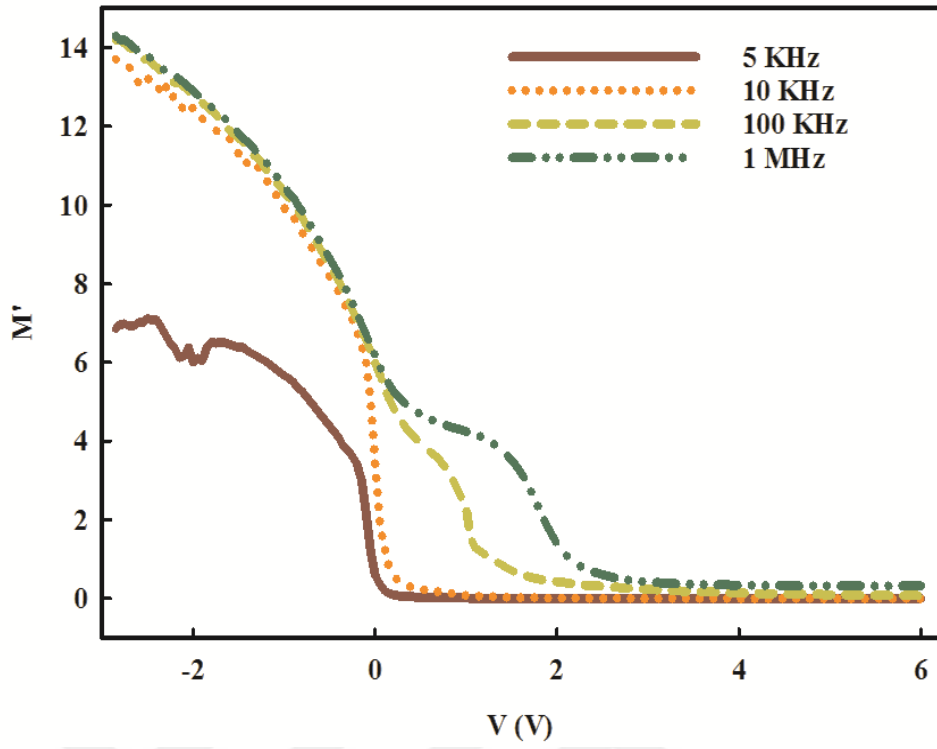
Şekil 19 Al/p-Si MS Schottky diyotun σ_{ac} - ln f grafiği

4.2.3 Elektrik Modülü

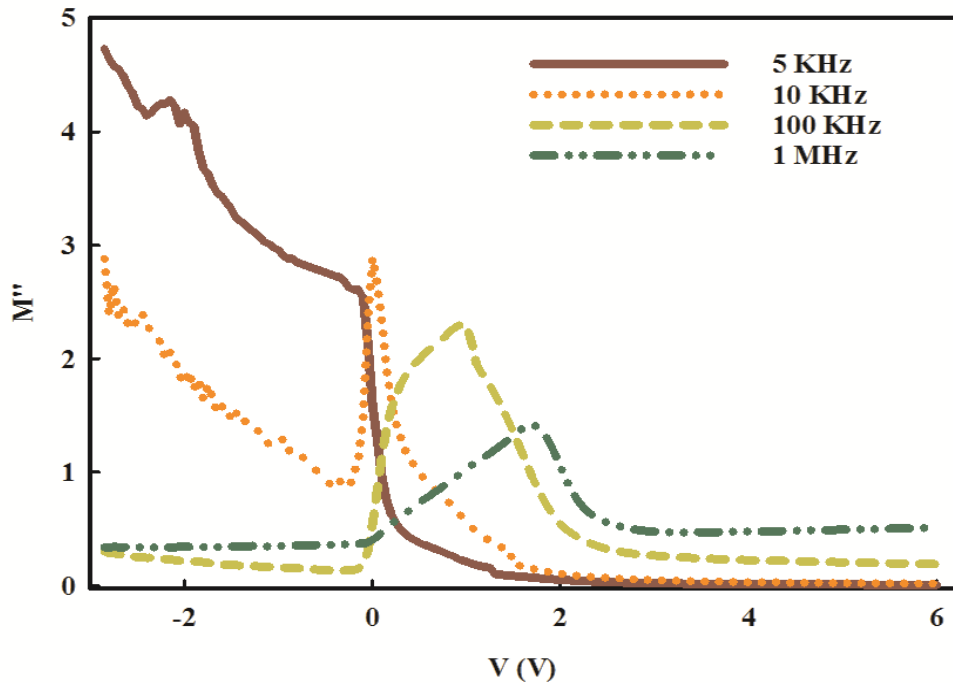
Elektrik alanın dielektrik malzemenin içinde durulmasına elektrik modülü olarak tanımlayabiliriz. Bir anlamda dielektrik durulma süreçleri hakkında bilgi edinmek için kullanılır. Karmaşık elektrik modülü (M^*) Eşitlik 4.13'teki gibi ifade edilebilir (El-Falaky et al.2012, Uluşan et al. 2018).

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + j M'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad 4.13$$

Bu eşitlikte M' ve M'' karmaşık elektrik modülün sırasıyla gerçel ve sanal bileşenlerini ifade etmektedir. Şekil 20-21 5KHz-1MHz frekans aralığında voltaj değişen M' ve M'' grafiklerini göstermektedir.



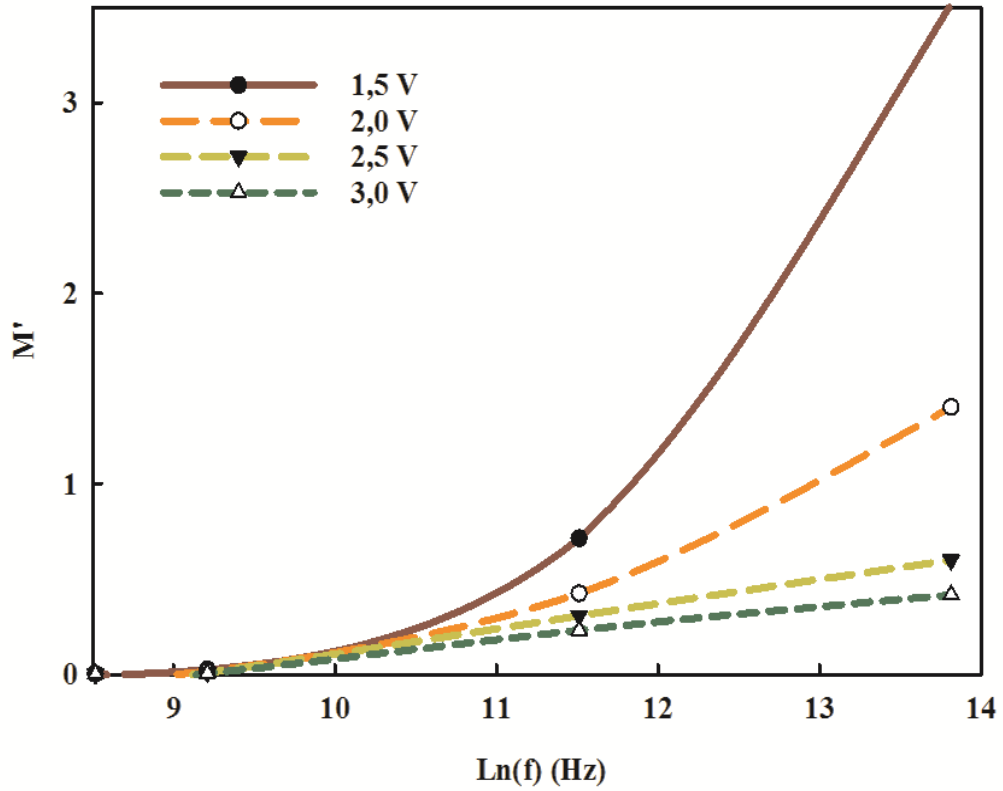
Şekil 20 Al/p-Si MS Schottky diyotun 5KHz-1MHz frekans aralığındaki M' – V grafiği



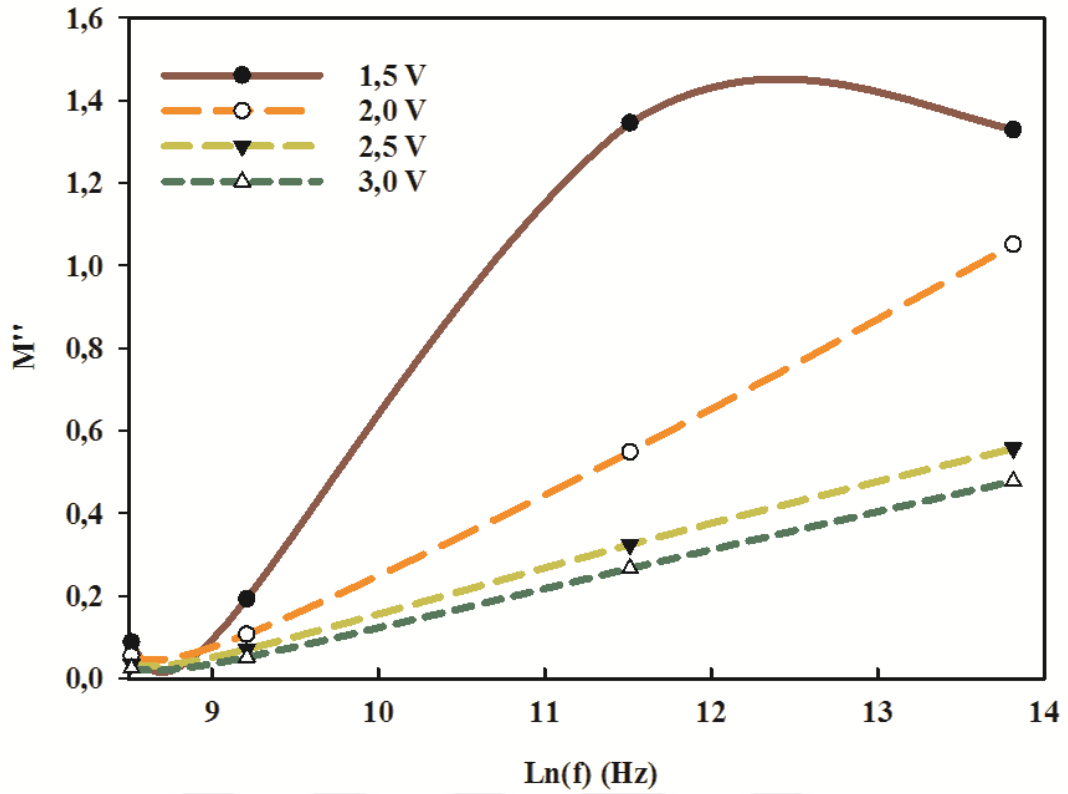
Şekil 21 Al/p-Si MS Schottky diyotun 5KHz-1MHz frekans aralığındaki M'' – V grafiği

Şekil 20-21’de gösterildiği gibi M' ve M'' değerleri frekansın yükselmesiyle artan bir davranış sergilemektedir. Diğer taraftan Şekil 21’de gösterildiği gibi M'' eğrilerinde bir pik oluşmaktadır. Bu durumun nedeni arayüzey durumlarına bağlanmaktadır.

Şekil 22 ve 23’te farklı pozitif DC voltajlar için M' - $\ln(f)$ ve M'' - $\ln(f)$ grafikleri 15KHz-1 MHz frekans aralığında grafikleri verilmiştir.



Şekil 22 Al/p-Si MS Schottky diyotun farklı voltajlar için M' – $\ln f$ grafiği



Şekil 23 Al/p-Si MS Schottky diyotun farklı voltajlar için $M'' - \ln f$ grafiği

Şekil 22 ve 23'teki grafikte gösterildiği gibi, her gerilim değeri için frekans arttıkça M' ve M'' ifadeleri de artmaktadır. Bu artışın nedeni indüklenmiş bir elektrik alan varlığı yük taşıyıcı hareketliliğini kontrol altında tutan geri çağırıcı kuvvetin eksiliği olabileceğinden kaynaklanmaktadır (Dubey et al. 2011). Yine şekillere bakıldığında düşük frekanslarda M' ve M'' ifadeleri de sıfıra yakındır. Bu durum elektrot polarizasyonunun etkisinin çok az olduğunu ve taşıyıcıların uzun menzilli hareketliliğine bağlı bir durum ihtimalini göstermektedir. Şekil 23'deki $M'' - \ln(f)$ grafiği 1.5V ile 3V arasında bir pik görülmekte ve bu pik öngerilim voltajlarında kaybolmaktadır. Oluşan bu pik gevşeme sürecinin sonucu olan arayüzey durumları ile dipol polarizasyonun kaynaklanabilmektedir. Bu durum maksimum dielektrik ($\omega\tau = 1$) olduğunda meydana gelir. Aynı zamanda oluşan pikler kısa veya uzun menziller arasındaki yük taşıyıcı hareketindeki geçişleri temsil etmektedir (Tanrıku et al. 2021, Wang et al. 2010). Bundan dolayı bu grafikteki gözlemlenen pik malzemedeki gevşeme karşılık gelmektedir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında klasik metal-yarıiletken (MS) Schottky diyotları hazırlanmıştır. Kristal yapının üstündeki organik, metalde oluşacak kirlenmeyi temizlemek ve yüzeyde oluşabilecek pürüzleşmeyi kaldırmak için p-Si tabaka ultrasonik ortamda kimyasal temizlenmesi yapıldı. Daha sonra kristal yüzeyde oluşabilecek oksitlenmeyi önlemek için azot ile kurutulup vakum ortamına alındı. Vakum ortamında buharlaştırma sistemiyle yaklaşık olarak 10^{-6} Torr iç basınç p-Si yarıiletkenin arka yüzeyi %99.995 saflıkta ve 1500 Å kalınlığında Al kaplanması sağlandı. Özdirenci düşük omik kontak elde etmek için numune nitrojen ortamında 500 ° C'de tavlandı. Daha sonra p-Si yarıiletkenin ön yüzeyine 1500 Å kalınlığındaki doğrultu kontaklar yine yüksek vakum ve buharlaştırma sisteminde oluşturuldu. Böylece Al/p-si MS yapılar elde edilmiştir. Al/p-Si MS yapıların üretilirken bor katkılı (p tipi), 100 yönelimli, yaklaşık 300 µm kalınlıklı ve 0.4 Ωcm özdirençli tek kristal Silisyum (Si) yarıiletkeni kullanılmıştır.

Bu çalışmada Al/p-Si (MS) tipi Schottky kontakın frekansa bağlı C-V ve İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) Karakteristikleri için 5 KHz -1 MHz frekans aralığında ve 2V-6V gerilim aralığında N_{ss} ve R_s etkisi dikkate alınarak incelendi. C değerinin uygulanan voltajla arttığı ve yaklaşık olarak 3V-4V aralığında pik oluşturduğu ve bu pik değerinin frekansın artmasıyla azaldığı gözlenmiştir. Aynı pozitif voltaj değerlerinde G/ω hızla artmakta ve C'nin son pozitif voltaj değerinde maksimum değerini aldığı görülmüştür. Bu durum elektrotlardaki yüklerin azalmasına bağlanır ve yakın dönemde bu pik oluşumunun nedenini N_{ss} ve R_s bağlı olarak açıklanmıştır (Altındal et al. 2011, Vural et al. 2012). Schottky engel diyotları için R_s önemli bir parametreye sahip olup C ve G/ω voltaja bağlı karakteristiklerini direk etkilediği anlaşılmıştır. R_s ' gerçek değerinin elde edilmesinde Nicollian ve Brews tarafından geliştirilen admitans metodu kullanılmıştır (Nicollian et al. 1982). R_s değerinin her voltajda artan frekansla azaldığı görülmüş ve voltajın yükselmesiyle frekansa bağlılığın azaldığı gözlemlenmiştir. Al/p-i MS yapının temel elektriksel parametreleri V_0 , N_D , E_F , W_d , E_m , ve Φ_B değerleri ise 5 kHz-1 MHz aralığında C^{-2} -V grafiğinin lineer bölgelerin kesişim ve eğimlerinden yararlanılarak elde edilip bu değerler çizel 4.1 verilmiştir. N_D , E_F değerleri $C^{-2} - V$ eğrileri her frekans değeriyle paralel ve eğimleri de sabit oluşu için frekansla birlikte fazla bir değişim

olmadığı görülmektedir. Düşük frekanslarda genellikle $C^{-2} - V$ grafikleri lineerlikten sapma gösterebilir. Bunun nedeni arayüzey durumları ile arayüzey durumlarındaki yüklerin yer değiştirmeleridir.

Arayüzey durumlarının nedenleri çoğunlukla; yarıiletkenin yüzeyindeki düzensizlikler, yüzey temizliği, laboratuvardaki kirlilik ve yarıiletken yüzeyindeki doymamış bağlardan kaynaklanma olasılığı vardır (Altındal et al. 2012, Jain ve Radhakrishna 1987).

Bu çalışmada Al/p-Si (MS) tipi Schottky kontakın dielektrik özellikleri ϵ' , ϵ'' , M' ve M'' gibi değerleri -3V ve 6V aralığında voltaja, 5 kHz ve 1MHz frekans aralığında frekans bağıllığını incelemek için C-V ve G/ω -V ölçümleri kullanılmıştır. Elde edilen veriler ve grafiklerde voltaj ve frekansın değişiminin tüm bu faktörleri etkilediğini göstermektedir. Artan frekansla, M' ve M'' değerleri yükselirken ϵ' ve ϵ'' değerleri azalmaktadır.

MS yapıların elektriksel ve dielektrik özelliklerinin geniş bir frekans ve voltaj aralığında incelenmesi, bu özelliklerin daha iyi anlaşılması ve daha güvenilir sonuçlar elde edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Hazırlanan MS yapılarında meydana gelen istenmeyen arayüzey durumlarını en aza indirmek için yapıların imalat aşamasındaki adımların temiz ve steril laboratuvar ortamında dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Alptekin S, Tataroğlu A, Altındal Ő, 2019a "Dielectric, modulus and conductivity studies of Au/PVP/n-Si (MPS) structure in the wide range of frequency and voltage at room temperature" *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Volume 30 pp 6853–6859.
- Alptekin S, Altındal Ő, 2019b "A comparative study on current/capacitance: voltage characteristics of Au/n-Si (MS) structures with and without PVP interlayer" *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Volume 30 pp 6491–6499.
- Alptekin, S. and Şemsettin, A. 2020. Electrical characteristics of Au/PVP/n-Si structures using admittance measurements between 1 and 500 kHz. 31(16): 13337–13343.
- Alsaç, A. A. 2022. Arayüzey tabakalı metal-yarıiletken (MS) yapıların hazırlanması ve elektriksel özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi sayfa 97, Ankara.
- Altındal S., Uslu H. 2011. The origin of anomalous peak and negative capacitance in the forward bias capacitance-voltage characteristics of Au/PVA/n-Si structures. *Journal of Applied Physics*, 109, 074503.
- Altındal Yerişkin, S., BalbaŐı, M., & Tataroğlu, A. 2016. Frequency and voltage dependence of dielectric properties, complex electric modulus, and electrical conductivity in Au/7% graphene doped-PVA/n-Si (MPS) structures. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(33).
- Altuntaş H., Altındal Ő., Ozcelik S., & Shtrikman H. 2009a. Electrical characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes with and without SiO₂ insulator layer at room temperature. *Vacuum*, 83(7), 1060-1065.
- Altuntaş H., Altındal Ő., Shtrikman H., & Özçelik S. 2009b. A detailed study of current–voltage characteristics in Au/SiO₂/n-GaAs in wide temperature range. *Microelectronics Reliability*, 49(8), 904-911.
- Attallah, M. A., Elrasasi, T. Y., Shash, N. M., El-Shaarawy, M. G., El-Tantawy, F. and El-Shamy, A. G. 2021. New hybrid nanocomposite based on (pva-ag-coumarin)

- for highly sensitive photodiode device. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 126: 105653.
- Badali Y, Altındal Ş and Uslu I. 2018 Dielectric Properties, Electrical Modulus and Current Transport Mechanisms of Au/ZnO/n-Si Structures. *Progress in Natural Science-Materials International*, 28(3): 325-331.
- Bain, A. K., & Chand, P. 2017. *Ferroelectrics: Principles and applications*. John Wiley & Sons.
- Balcı, E., Vahid, AF, Avar, B., & Altındal, Ş., 2024. 2 kHz ile 1 MHz arasında Al/DLC/p-Si yapılarının dielektrik, elektrik modülü, ac iletkenliği (σ_{ac}) frekans ve voltaj bağımlılığının ayrıntılı bir incelemesi. *Fizik B: Yoğun Madde*, cilt 695.
- Baraz, N., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh, Y., Ersöz, G., Orak, I., Altındal, Ş., ... & Akbari, H. 2017. Electric and dielectric properties of Au/ZnS-PVA/n-Si (MPS) structures in the frequency range of 10–200 kHz. *Journal of Electronic Materials*, 46, 4276-4286.
- Baraz N, 2018. “Al/ (ZnS-PVA) / p-Si (MPS)Yapılarının hazırlanması ve Elektriksel ile Dielektrik Özelliklerinin Geniş Frekans ve Sıcaklık aralığında İncelenmesi,” Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye.
- Bati, B., Nuhoğlu, C., Sağlam, M., Ayyıldız, E., Türüt, A. 2000. On the forward bias excess capacitance at the intimate and MIS Schottky barrier diodes with perfect or imperfect ohmic back contact. *Physica Scripta*, 61, 209.
- Bethe, H. A. 1942. *Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers*. MIT Radiation Laboratory Report.
- Bilkan C., Azizian-Kalandaragh Y., Altındal Ş. and Roya S.H. 2016. Frequency and Voltage Dependence Dielectric Properties, AC Electrical Conductivity and Electric Modulus Profiles in Al/Co₃O₄-PVA/p-Si Structures. *Physica B-Condensed Matter*, 500: 154-160.
- Braun F. 1874. Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle. *Annual Review of Physical Chemistry*, 53: 556.
- Brillson, L.J. 1982. “The Surface and Properties of Metal-Semiconductor Interfaces”, *Surf. Sci. Reports.*, 2: 123-326
- Card H. C., Rhoderick E. H., 1971. “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 4, no. 10, pp. 1589–1601.

- Chandra, M.M., Parsad, M.J., 1986. Simple Interface Layer Model For The Nonideal Characteristics of The Schottky Diodes. *Phy D.App Phys.*, 19(1): 89-93.
- Chattopadhyay, P., Daw, A.N. 1986. On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor (MIS) diode. *Solid State Electronics*, 29, 555-560.
- Chattopadhyay P., Raychaudhuri B. 1992. Origin of the anomalous peak in the forward capacitance-voltage plot of a Schottky barrier diode. *Solid State Electronics*, 35, 875.
- Chelkowski A., 1980. *Dielectric Physics*, Elsevier, Amsterdam, 313.
- Crowell, C.R. and Sze, S.M., 1966. "Current Transport in Metal Semiconductor Barriers," *Solid State Electron.*, 9: 1035.
- Çetinkara, H. A. 2002. Doğal oksitli yarıiletkenlerden yapılan Schottky diyotların farklı metotlarla incelenmesi ve karakteristik parametrelerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Çetinkaya, S., 2011. Al/ZnO/p-Si ve Au/CuO/p-Si Schottky yapıların farklı metotlarla elde edilmesi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 82 sayfa, Hatay.
- Demircioğlu M., 2010. Sn/p-Si metal-yarıiletken yapıların oda sıcaklığında akım-voltaj ve kapasitans-voltaj karakteristiklerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, 47 sayfa, Kahramanmaraş.
- Demirezen S, Altındal Ş, 2010. "On the temperature dependent profile of interface states and series resistance characteristics in (Ni/Au)/ Al_{0.22} Ga_{0.78} N/AlN/GaN hetero structures," *Phys. B Condens. Matter*, vol. 405, no. 4, pp. 1130–1138.
- Dubey, A. K., Singh, P., Singh, S., Kumar, D., & Parkash, O. 2011. Charge compensation, electrical and dielectric behavior of lanthanum doped CaCu₃Ti₄O₁₂. *Journal of alloys and compounds*, 509(9), 3899-3906.
- El-Falaky, G. E., Guirguis, O. W., & Abd El-Aal, N. S. 2012. AC conductivity and relaxation dynamics in zinc–borate glasses. *Progress in Natural Science: Materials International*, 22(2), 86-93.
- Ersöz, G. 2015. Organik arayüzeyli Schottky diyotların hazırlanması, elektriksel ve dielektrik özelliklerinin geniş bir frekans aralığında incelenmesi, Yüksek lisans tezi, 60 sayfa, Düzce.

- Ersöz G, Yücedağ I, Azizian-Kalandaragh Y, Orak I, and Altındal Ş, 2016.
“Investigation of Electrical Characteristics in Al/CdS-PVA/p-Si (MPS) Structures Using Impedance Spectroscopy Method,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 63, no. 7, pp. 2948–2955.
- Ersöz Demir G, Yücedağ İ, Azizian-Kalandaragh Y, and Altındal Ş, 2018.
“Temperature and Interfacial Layer Effects on the Electrical and Dielectric Properties of Al/(CdS-PVA)/p-Si (MPS) Structures,” J. Electron. Mater., vol. 47, no. 11, pp. 6600–6606.
- Gökçen, M. 2005. MOS yapılarında kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik voltaj (G/ω -V) karakteristiklerinin frekans ve radyasyona bağlı incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 60 sayfa, Ankara.
- Gökçen M and Tunç T, 2013. “Enhancement of Dielectric Characteristics of Polyvinyl Alcohol (PVA) Interfacial Layer in Au/PVA/n-Si Structures by Bi_2O_3 Disperse,” Int. J. Appl. Ceram. Technol., vol. 10, pp. E64–E69.
- Grondah, L. O. 1926. Phys. Rev. 27 813.
- Gümüş A, Ersöz G, Yücedağ İ, Bayrakdar S, and Altındal Ş, 2015. “Comparative study of the temperature-dependent dielectric properties of Au/PPy/n-Si (MPS)-type chottky barrier diodes,” J. Korean Phys. Soc., vol. 67, no. 5, pp. 889–895.
- Gunaydin A, Ersöz Demir G, Yücedağ İ, and Çoşut B, 2018. “The Preparation of Transparent Organic Field Effect Transistor Using a Novel EDOT Functional Styrene Copolymer Insulator With a PEDOT : PSS Gate Electrode,” Macromol. Res., vol. 26, no. 2, pp. 164–172.
- Gürkan Aydın S. 2010. Al/PNp ClPhPPy/p tipi-Si Kontakın Elektronik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Kako, 1996. “Photoluminescence Intensity,” vol. 87, pp. 87–92.
- Kar, S., & Narasimhan, R. L. 1987. Characteristics of the Si-SiO₂ interface states in thin (70–230 Å) oxide structures. Journal of applied physics, 61(12), 5353-5359.
- Karataş, S., and Altındal, S. 2005. Analysis of I-V characteristics on Au/n-type GaAs Schottky structures in wide temperature range. Materials Science and Engineering: B, 122, 133-139.

- Konofaos, N., McClean, I. P., & Thomas, C. B. 1997. Characterisation of the Interface States between Amorphous Diamond-Like Carbon Films and (100) Silicon. *physica status solidi (a)*, 161(1), 111-123.
- Maheshwari P, 2007. *Electronic Components & Processes*. New Age International Publishers: New Delhi, India.
- Matsuura H, Nishino S, and Matsunami H, 1981. "Surface Band Bending Effects on Photoluminescence Intensity in n-InP Schottky and MIS Diodes Fundamental Properties of MIS Solar Cells Using Mg-p Si System," *Japanese J. Appl. Phys.* Koushi Ando al *Jpn. J. Appl. Phys*, vol. 20.
- Maxwell, J. C. 1873. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, London, 444 p.
- Mott N. F, 1938. "Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor," *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 34, no. 04, p. 568.
- Neamen DA, 1997. *Semiconductor physics and devices 2nd ed*, Mc Graw-Hill, 420-450, 517-523, New York.
- Nicollian, E. H., & Goetzberger, A. 1991. MOS conductance technique for measuring surface state parameters. In *Semiconductor Devices: Pioneering Papers* pp. 558-561.
- Nicollian, E. H., & Brews, J. R. 2002. *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology*. John Wiley & Sons.
- Özdemir, M. C., Sevgili, Ö., Orak, İ., & Türüt, A. 2020. Arayüzey Doğal Oksit Tabakalı Al/p-Si/Al Yapıların Dielektrik Karakteristiklerine Ölçüm Frekansının Etkileri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(1), 91-100.
- Ozavcı, E., Demirezen, S., Aydemir, U., and Altındal, ğ. 2013. A detailed study on current-voltage characteristics of Au/n-GaAs in wide temperature range. *Sensors and Actuators A*, 194, 1, 259-268.
- Padavoni F.A., Stratton R., 1966. Field and thermionic-field emission in Schottky barriers, *Solid-State Electronics*, vol. 9, pp. 695-707.
- Pierce, G. W., 1907. Understanding metal and semiconductor structures, *Phys. Rev.* 25, 31.
- Pickard, G.W., 1906. US patent no. 836531.

- Razeghi, M. 2006. Fundamentals of solid state engineering (p. 30). New York: Springer.
- Reddy D. S., Reddy M. B., Reddy N. N. K., and Reddy V. R., 2011. Schottky Barrier Parameters of Pd/Ti Contacts on N-Type InP Revealed from I-V-T And C-V-T Measurements, *J. Mod. Phys.*, vol. 02, no. 03, pp. 113–123.
- Rhoderick, E. H. and Williams R. H. 1988. *Metal-Semiconductor Contacts* 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, 257-264.
- Rhoderick, E. H., & Williams, R. H. 1988. *Metal-semiconductor contacts* (Vol. 129). Oxford: Clarendon press.
- Sahay P P and Srivastava R S, 1990. Characterization of interface states at Ni/n-Si Schottky barriers from I – V characteristics, *Cryst. Res. Technol.*, vol. 25, no. 12, pp. 1461–1467.
- Sedef, G., 2002. Polipirol- Poliamid / Metal Eklemlerinin Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, sayfa 10-11, Tokat.
- Sevgili Ö, Azizian-Kalandaragh Y, and Altındal Ş. 2020. Frequency and Voltage Dependence of Electrical and Dielectric Properties in Metal-Interfacial Layer-Semiconductor (MIS) Type Structures. *Physica B-Condensed Matter*, 587.
- Schottky W, Strömer R and Waibel F. 1931. On the Rectifying Action of Cuprous Oxide in Contact with Other Metals. *Hochfrequenztechnik*, 37: 165.
- Schottky W., 1938. Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht-und Spitzengleichrichter. *Zeitschrift für Physik*, 113(5–6): 367–414.
- Sharmaand S. Tripathi K, 2016. “Frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/Al₂O₃/PVA:n-ZnSe Schottky barrier diodes,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 41, pp. 155–161.
- Sharma L, 1984. “Physics of Schottky Barrier Junctions,” *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications*. New York, USA: Springer.
- Sze S.M., 1981. *Metal-Semiconductor Contacts, Physics of Semiconductor Devices* 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 250-270.
- Sze S.M., Ng Kwok K., 2007. *Physics of Semiconductor Devices* 3rd ed., John Wiley & Sons, New Jersey, p. 362-390.

- Tanrikulu, E. E., & Yerişkin, S. A. 2021. On the changes in the dielectric, electric modulus, and ac electrical-conductivity in the Al/(C29H32O17)/p-Si (MPS) structures in wide range of frequency and voltage. *Physica B: Condensed Matter*, 623, 413345.
- Taşçıoğlu, İ. 2012. Au/PVA:Zn/n-Si (MPS) Schottky Engel Diyodun Elektriksel Özelliklerinin Sıcaklık ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, sayfa 8-49, Ankara.
- Tataroğlu, Altındal, Ş. And Yashar, Azizian-Kalandaragh. 2020. Electrical and photoresponse properties of coso4-pvp interlayer based MPS diodes. 31(14): 11665–11672.
- Tataroğlu A. 2006. Electrical and dielectric properties of MIS Schottky diodes at low temperatures. *Microelectronic engineering*, 83(11-12), 2551-2557.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., & Bülbül, M. M. 2005. Temperature and frequency dependent electrical and dielectric properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) structure. *Microelectronic engineering*, 81(1), 140-149.
- Tataroğlu, A., & Altındal, Ş. 2006. Characterization of current–voltage (I–V) and capacitance–voltage–frequency (C–V–f) features of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic engineering*, 83(3), 582-588.
- Tecimer H, Türüt A, Uslu H, Altındal Ş and. Uslu I, 2013. “Temperature dependent current-transport mechanism in Au/(Zn-doped) PVA/n- GaAs Schottky barrier diodes (SBDs),” *Sensors Actuators, A Phys.*,vol. 199, pp. 194–20.
- Tunç, T., Uslu, İ., Dökme, İ., Altındal, Ş., & Uslu, H. 2010. Frequency and temperature dependence of dielectric properties of Au/polyvinyl alcohol (Co, Ni-doped)/n-Si Schottky diodes. *International Journal of Polymeric Materials*, 59(10), 739-756.
- Tüzün, Ö. 2005. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Yapıdaki Gözenekli Silisyum Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristikleri. Yüksek Lisans, Muğla Üniversitesi, sayfa 131, Muğla.
- Uluşan, A. B., & Tataroğlu, A. D. E. M. 2018. Frequency-Dependent Dielectric Parameters of Au/TiO₂/n-Si (MIS) Structure. *Silicon*, 10, 2071-2077.

- Uslu H., 2010. Au/(Co, Zn-Katkılı) Polivinil Alkol/n-Si Schottky Engel Diyotlarının Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma güdetine Bağlı İncelenmesi, Doktora Tezi, Ankara.
- Vural, Ö., Safak, Y., Altındal, S., and Turut, A. 2010. Current-voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range. *Current Applied Physics*, 10, 3, 761-765.
- Vural, Ö., Safak, Y., Turut, A., Altındal, S. 2012. Temperature dependent negative capacitance behavior of Al/rhodamine-101/n-GaAs Schottky barrier diodes and Rs effects on the C-V and G/ω-V characteristics. *Journal of Alloys and Compounds*, 513, 107-111.
- Wang, F. M., Chen, M. W., & Lai, Q. B. 2010. Metallic contacts to nitrogen and boron doped diamond-like carbon films. *Thin Solid Films*, 518(12), 3332-3336.
- Werner, J. H., & Güttler, H. H. 1991. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of applied physics*, 69(3), 1522-1533.
- Werner, J., Levi, A.F.J., Tung, R.T., Anzlowar, M., Pinto, M. 1988. Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts. *Physical Review Letters*, 60, 53.
- Wilson, A.H., *The Theory of Electronic Semiconductors*, Proc. R. SOC. Lond. Ser: A, 133-458, 1931.
- Wu, X., Yang, E.S. 1989. Interface capacitance in metal semiconductor junctions. *Journal of Applied Physics*, 65, 3560.
- Yahia, I. S., Farag A. A., Yakuphanoglu, and F., Farooq, W. A. 2011. Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt. *Synthetic Metals*, 161, 9-10, 881-887.
- Yerişkin, S.A., Demir, G.E. and Yücedag, İ., 2019. On the Frequency-Voltage Dependence Profile of Complex Dielectric, Complex Electric Modulus and Electrical Conductivity in Al/ZnO/p-GaAs Type Structure at Room Temperature. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*.14(8), 1126-1132.
- Yıldız, D. E., 2008. Al/SiO₂/p-Si (MY) yapıların akım-iletim mekanizması ve elektriksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, sayfa 88-89, Ankara.

Yücedağ, İ., 2007. Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarda elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, sayfa 3-52, 81-90, Ankara.

Yücedağ, İ., Altındal, Ş., & Tataroğlu, A. 2007. On the profile of frequency dependent series resistance and dielectric constant in MIS structure. *Microelectronic engineering*, 84(1), 180-186.

Yücedağ, İ. 2009. On the anomalous peak at low and moderate frequency C-V curves of Al/SiO₂/p-Si structure at the forward bias region. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 3, 612-615.



