

T.C.
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI

METAL/OKSİT TABAKA/SİLİSYUM YARIİLETKEN/METAL
YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED CAN ÖZDEMİR

MAYIS 2019

T.C.
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK A.B.D.

METAL/OKSİT TABAKA/SİLİSYUM YARIİLETKEN/METAL
YAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED CAN ÖZDEMİR

DANIŞMAN

PROF. DR. ABDULMECİT TÜRÜT

MAYIS – 2019

ONAY

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrencisi olan Muhammed Can ÖZDEMİR'in hazırladığı ve jüri önünde savunduğu “*Metal/Oksit tabaka/Silisyum Yarıiletken/Metal Yapıların Elektriksel Özellikleri*” başlıklı tez başarılı kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi

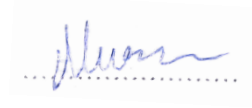
İMZA



Üyeler:

Doç. Dr. Nurcan DOĞAN BİNGÖLBALI

Kurumu: Gebze Teknik Üniversitesi



Dr.Öğr.Üyesi Hasan KÖTEN

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi



Tez Savunma Tarihi: 27.05.2019

BİLDİRİM

Hazırladığım tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi taahhüt ederim.



Muhammed Can Özdemir

Danışmanlığını yaptığım işbu tezin tamamen öğrencinin çalışması olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı taahhüt ederim.



Prof. Dr. Abdülmecitr TÜRÜT

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, üzerimde çok emeği olan Prof. Dr. Abdulmecit TURUT hocama, numunelerin hazırlanması ve ölçümlerin alınması sırasında yardımlarını esirgemeyen Bingöl Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç.Dr. İkrım ORAK ve Arş.Gör.Dr. Ömer SEVGİLİ hocalarıma, Şakir YENİ ağabeyime katkılarından ve yardımlarından dolayı ayrıca azmi ve çalışmalarıyla bana örnek olan babam Prof. Dr. Ayhan Özdemir'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ONAY	ii
BİLDİRİM	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	5
2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar	5
2.1.1. Giriş	5
2.1.2. Potansiyel Fark Altında Doğrultucu Kontaklar	8
2.1.3. Omik Kontaklar	10
2.1.4. Tipik Schottky Bariyerleri.....	11
2.2. Schottky Diyodlarda Akım İletimi ve Termoiyonik Emisyon Teorisi	14
2.3. Gaussian Dağılım Modeli ile İnhomojenliğin Analizi	17
2.3.1. Gaussian Dağılım Modeli.....	18
2.4. Metal Yarıiletken Doğrultucu Kontaklarda Schottky Sığası.....	21
3. DENEYSEL BULGULAR.....	24
3.1. p-tipi Si Kristal Dilimlerinin Temizlenmesi ve Metal Kontaklar İçin Hazır Hale Getirilmesi.....	24
3.2. Kontakların Yapılması	24
3.3. Sıcaklığa Bağlı Akım-Gerilim (I-V) Ölçümler	27
3.4. Frekansa Bağlı Sığa-Gerilim (C-V) Ölçümler	36
3.5. Al/SiO ₂ /p-Si MIS Yapının Dielektrik Özellikleri	49
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	55
KAYNAKÇA	64
ÖZGEÇMİŞ.....	68

KISALTMALAR

A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
AC	Alternatif akım
$^{\circ}C$	Santigrad derece
$C-V$	Kapasite- gerilim
$C-f$	Kapasite-frekans
DC	Doğru akım
E_c	İletkenlik bandının tabanının enerjisi
E_{fm}	Metalin fermi enerji seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
E_v	Valans bandının tavanının enerjisi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_o	Boşluğun dielektrik sabiti
e	Elektronun yükü
$f(E)$	Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonu
Φ_{ap}	Görünen engel yüksekliği
$\overline{\Phi_b}$	Ortalama engel yüksekliği
Φ_b	Engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_{bo}^{hom}	Schottky diyotun homojen engel yüksekliği
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$G-V$	Kondüktans-gerilim
$I-V$	Akım-gerilim
I_0	Satürasyon akımı
J	Akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu

$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
J_0	Ters belsem doyma akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
K	Kelvin
m_n^*	Elektronun etkin kütlesi
m_e	Elektronun kütlesi
n	İdealite faktörü
nm	Nanometre
n_i	Asal yarıiletkenlerde elektron konsantrasyonu
N_d	Donor konsantrasyonu
N_c	Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
W	Uzay yükü bölgesinin genişliği
ρ	Ağırlıklı Gaussian fonksiyonunun deneysel verilerden elde edilen fit parametresi
R_s	Seri direnç
r,f,	Radyo frekans
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
σ_s	Standart sapma
V_d	Difüzyon potansiyeli

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 n-tipi yarıiletken ile iş fonksiyonu yarıiletkenden daha yüksek olan bir metalin; a) kontakdan önceki enerji-band diyagramı, b) kontakdan sonraki durumlarına ait enerji-band diyagramı.....	6
Şekil 2.2 p-tipi yarı iletken ile iş fonksiyonu yarı iletkenden daha düşük olan bir metalin;....	7
Şekil 2.3 Doğru ve ters polarmanın metal-yarıiletken kontağa etkisi.....	8
Şekil 2.4 Omik metal/yarıiletken kontaklar: (a) ($\Phi_m < \Phi_s$) n-tipi bir yarıiletken için, (b) metal/yarıiletken kontağın denge durumu bant diyagramı, (c) ($\Phi_m > \Phi_s$) p tipi yarı iletken için, (d) dengede durumundaki metal/yarıiletken kontağın bant diyagramı	11
Şekil 2.5 Fermi seviyesi, bileşik yarıiletkenlerde arayüz durumları ile sabitlenir: (a) E_F , metal seçimine bakılmaksızın n-tipi GaAs yarıiletkeninde ($E_c - 0,8$) eV yakınında tutturulur; (b) E_F , mükemmel bir omik temas sağlayan n-tipi InAs yarıiletkeninde E_c 'nin üzerine tutturulur	12
Şekil 2.6 Düz beslem altındaki metal yarıiletken Schottky kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji–band diyagramı.....	14
Şekil 2.7 Homojen olmayan Schottky engel yüksekliği için enerji-bant diyagramı.....	18
Şekil 2.8 Metal n-tipi yapılarda doğrultucu kontağın; a)potansiyel dağılımı b) uzay yük yoğunluk dağılımı	21
Şekil 3.1 Buharlaştırma için kullanılan vakumlu metal buharlaştırma ünitesi	25
Şekil 3.2 1 numaralı bölgenin alt kısmına hazırlanmış olan Si dilim sabitlenmiştir. Alt kısmındaki bölgeye ise Al tel parçası konulmuştur. Daha sonra fırın 6×10^{-6} Torr, 48A ayarına getirilip Al parçasının Si dilim üzerine buharlaşması ve kontak oluşması sağlanmıştır.	26
Şekil 3.3 Doğrultucu kontaklar için maske ve maske üzerine konulmuş Si yarıiletken kristal parçaları.....	26
Şekil 3.4 Al/SiO ₂ /p-Si/Al diyoduna ait farklı sıcaklıklardaki Akım-Gerilim eğrileri.	27
Şekil 3.5 Al/SiO ₂ /p-Si/Al MIS diyot yapısına ait farklı sıcaklıklarda hesaplanmış potansiyel engel yüksekliği değerleri grafiği	29
Şekil 3.6 Al/SiO ₂ /p-Si/Al MIS diyot yapısına ait farklı sıcaklıklarda hesaplanmış idealite faktörü değerleri grafiği	30
Şekil 3.7 Al/p-Si/Al Schottky diyot için $\ln(I_0/T^2)$ karşı $\sim (kT)^{-1}$ Richardson grafiği (daireler) ve $\ln(I_0/T^2)$ karşı $(nkT)^{-1}$ modifiye Richardson grafiği (kareler).....	31
Şekil 3.8 Al/p-Si/Al Schottky diyot için $(2kT)^{-1}$ 'in bir fonksiyonu olarak çizilen bariyer yüksekliğinin çift gaussian dağılımının, deneysel verilere uygun çizimi.	32
Şekil 3.9. $(kT)^{-1}$ karşı modifiye Richardson $\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_s^2 / 2k^2 T^2$ çizimi (kareler ile modifiye edilmiş deneysel değerler gösterilmiştir)	33
Şekil 3.10 Akım değerlerine karşı $H(I)$ grafiği	35

Şekil 3.11 Akım değerlerine karşı $dV/d(\ln I)$ grafiği.....	35
Şekil 3.12 Al/SiO ₂ /p-Si/Al diyoduna ait Şekil 3.4’de her bir sıcaklıktaki ters ve ileri beslem akım-Gerilim eğrilerinden Ohm Kanunu kullanılarak hesaplanan direnç değerleri	36
Şekil 3.13 300K ‘lik numune sıcaklığı altında farklı frekanslarda ölçülmüş sıcaklıktaki Kapasitans değerleri.	38
Şekil 3.14. 300K’de farklı frekanslarda ölçülmüş potansiyel farkına karşı kondüktans değerleri.....	39
Şekil 3.15 Farklı frekanslarda potansiyel farkına karşı faz açısı grafiği	40
Şekil 3.16 Uygulanan farklı potansiyel farklarda elde edilmiş C^{-2} değerleri	40
Şekil 3.17 300K’de frekansa engel yüksekliği değerleri (A): C^{-2} -V eğrilerinin yaklaşık -1.0 V ile -3.0 V aralığı için, (B): C^{-2} -V eğrilerinin yaklaşık 0.0 V ile -1.0 V aralığı için çizilmiştir.....	41
Şekil 3.18 300K’de frekansa bağlı serbest taşıyıcı yoğunluğu değerleri (A) : C^{-2} -V eğrilerinin yaklaşık -1.0 V ile -3.0 V aralığı için, (B) : C^{-2} -V eğrilerinin yaklaşık 0.0 V ile -1.0 V aralığı için çizilmiştir.	42
Şekil 3.19 Al/p-Si/Al farklı frekanslardaki gerilime bağlı seri direnç değerleri.	44
Şekil 3.20 Düzeltilmiş farklı frekanslarda C-V grafiği.....	45
Şekil 3.21 Düzeltilmiş farklı frekanslarda yarı-logaritmik G-V grafikleri.....	46
Şekil 3.23 Düzenlenmiş Kapasitans ve normal kapasitans karşılaştırılması Lin-Lin C-V grafiği	47
Şekil 3.23 Düzeltilmiş ve normal kapasitans karşılaştırılması Lin-Lin C-V grafiği.....	47
Şekil 3.24 Frekansa bağlı arayüzey hallerinin dağılımı grafiği.....	48
Şekil 3.25 Dielektrik sabitinin gerilime bağlı farklı frekanslardaki gerçek kısmının grafiği.....	49
Şekil 3.26 Dielektrik sabitinin gerilime bağlı farklı frekanslardaki.....	50
Şekil 3.27 Gerilime bağlı farklı frekanslardaki Loss tanjant değeri.....	51
Şekil 3.28 Gerilime bağlı, 300K ve farklı frekanslarda elektrik modülüs reel kısmı grafiği	52
Şekil 3.29 Gerilime bağlı, 300K ve farklı frekanslarda elektrik modülüs sanal kısmı grafiği 3.0 – 4.0V aralığında	52
Şekil 3.30 300K farklı frekanslarda elektrik modülüs sanal kısım-gerçek kısmı grafiği.....	53
Şekil 3.31 300K ve farklı frekanslarda ac elektriksel iletkenlik grafiği.....	54
Şekil 4.1 İdealite faktörün SiO ₂ tabakasını kalınlığına bağlı değişimi	55

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Al/SiO ₂ /p-Si MIS yapının sıcaklığa bağlı deneysel <i>I-V</i> karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri.	29
Tablo 3.2 : Şekil 3.11 ve Şekil 3.11'deki grafiklerinden hesaplanmış parametrelerin değerleri	35
Tablo 3.3 Şekil 3.11'deki grafikden elde edilen hesaplanmış bazı parametre değerleri	43
Tablo 3.4 Frekansa bağlı <i>C-V</i> ve <i>G-V</i> grafiklerinden hesaplanmış bazı	43

ÖZET

Metal/Oksit tabaka/Silisyum Yarıiletken/Metal

Yapıların Elektriksel Özellikleri

Özdemir, Muhammed Can

Yüksek Lisans Tezi, Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı, Nanobilim ve Nanomühendislik Programı

Danışman: Prof.Dr. Abdülmecit TURUT

Mayıs, 2019. 68 Sayfa.

Deneyssel çalışmada kullanılacak Al/SiO₂/p-Si/Al metal/oksit tabaka/yarıiletken/metal (MOS) veya metal/yakıtkan tabaka/yarıiletken/metal (MIS) yapıların fabrikasyonu için, (100) yönelimli 300 μ m kalınlığında ve 1-10 Ω -cm öz direçli *p*-tipi Si yarıiletkeni taban malzeme olarak kullanılmıştır. Omik kontak ve Schottky doğrultucu kontaklar alüminyum metaliyle oluşturulmuştur. Bu yapıların temel akım-potansiyel farkı (*I*-*V*) elektriksel parametreleri sıcaklığa bağlı 120-320 K aralığında ve frekansa bağlı olarak kapasitans-potansiyel farkı (*C*-*V*) ölçümleri 100-1000 kHz aralığında incelenmiştir. Oda sıcaklığı *I*-*V* grafiğinden potansiyel engel yüksekliği (PEY) $\Phi_b=0,73$ eV ve idealite faktörü *n*, 2,36 olarak bulundu. Sıcaklık artışıyla *I*-*V* grafiğinden hesaplanan idealite faktörü azalmış ve PEY ise lineer bir davranış göstererek artmıştır. Bu, PEY 'in yanal inhomojenliğine ve arayüzey oksit tabakasının varlığına bağlanmıştır. *C*-*V* ölçümlerinden engel yüksekliği, frekans arttıkça artmıştır. Bu artış, artan frekansla arayüzey hal yoğunluğunun azalmasına atfedilmiştir. Akım iletimi ile ilgili olarak termoiyonik emisyon (TE) ve Cheung-Cheung metoduyla seri direç ve shunt direnç (paralel direnç) değerleri bulunmuştur. *I*-*V* ölçümlerinden elde edilen sonuçların ikili Gauss dağılımı verdiği görüldü ve ortalama PEY ve standart sapma değerleri bu dağılımdan belirlenmiştir. Frekansa bağlı ölçümler kullanılarak elde edilmiş *C*²-*V* grafiği ile difüzyon potansiyeli *V*_{DO}, taşıyıcı yoğunluğu *N*_A gibi parametreler hesaplanmıştır. MIS kontağın dielektrik özellikleri ve elektrik iletkenliği *C*-*V* ve *G*-*V* ölçümleri kullanılarak gerekli grafikler çizilmiş ve açıklamalar yapılmıştır. Deneyssel sonuçlara göre, frekans ve potansiyel farkına bağlı olarak kompleks dielektrik sabitinin gerçek ϵ' ve sanal ϵ'' kısımları ve loss tanjant tan(δ), elektrik modülüsün gerçek *M'* ve sanal *M''* kısımları ve ac elektriksel iletkenliğin σ_{ac} değerleri ve grafikleri çizilmiş ve yorumları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Schottky diyotlar, Metal-yarıiletken-oksit tabaka-metal kontaklar, MOS veya MIS yapılar, akım-gerilim karakteristikleri, kapasitans-gerilim karakteristikleri, dielektrik özellikler

ABSTRACT

Electrical Properties of Metal/Oxide layer/Silicon Semiconductor/Metal Structures

Özdemir, Muhammed Can

Master Thesis, Nanoscience and Nanoengineering Department, Nanoscience and Nanoengineering Program

Supervisor: Prof.Dr. Abdülmecit TURUT

May, 2019. 68 Pages.

The *p*-type Si semiconductors with (100) orientation and 300 μm thickness and 1-10 Ohm-cm resistivity are used as substrate to produce Al/SiO₂/*p*-Si/Al metal/oxide layer/semiconductor/metal (MOS) or MIS structures. Ohmic and Schottky contacts are formed with aluminum metal. The *I*-*V* electrical parameters of these structures are measured in the 120-320 K range and the capacitance-potential difference (*C*-*V*) measurements depending on the frequency are made in the 100-1000 kHz range, Potential barrier height (PBH) $\Phi_b=0,73$ eV and ideality factor $n = 2,36$ are calculated from the room temperature *I*-*V* curve. With the increase in temperature, n has decreased and PBH has increased linearly. This is attributed to the lateral inhomogeneity of the PBHs and the presence of the interface oxide layer. The PBH from the *C*-*V* measurements has increased as the frequency increases. This increase has been attributed to the decrease in the interfacial state density with increasing frequency. Thermic emission (TE) and Cheung-Cheung method have been used to find the series resistance and shunt resistance (parallel resistance) values. The results obtained from the *I*-*V* measurements have been found to give dual Gaussian distribution (GD). The mean PBH and standard deviation values were determined from this distribution model. Parameters such as diffusion potential V_{D0} and carrier density N_A have been calculated by using frequency-dependent reverse bias C^{-2} -*V* curves. Dielectric properties and electrical conductivity of MIS structure have been determined from *C*-*V* and *G*-*V* measurements. According to the experimental results, the real ϵ' and imaginary ϵ'' parts of the complex dielectric constant and the loss tangent $\tan(\delta)$, the real M' and imaginary M'' parts of the electrical modulus and the ac electrical conductivity σ_{ac} , depending on the frequency and potential difference have been calculated; and the required explanations on graph have been made.

Keywords: Schottky diyotlar, Metal-semiconductor-Oxide layer-Metal Contacts, MOS veya MIS yapılar, current-voltage characteristics, capacitance-voltage characteristics, dielectric properties

1. GİRİŞ

Shottky diyotlar çoğunluk taşıyıcılara dayalı elektronik cihazlardır. Çoğunluk taşıyıcılara dayalı olması hız açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Bununla beraber düşük kapasitansı sayesinde RC uygulamalarında zaman sabitini oldukça düşürmektedir. Bu sebeple radio frekans uygulamalarında ve diğer güç elektronikği uygulamalarında schottky diyotlar oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Schottky diyotlar pn eklem diyotalara göre, aynı potansiyel farkı altında, çok daha yüksek akım yoğunluğuna sahip olmasından ötürü ileri beslem durumunda, arınma bölgesi boyunca gerilim düşümü oldukça düşüktür. Buna bağlı olarak schottky diyotlar doğrultucu güç elektroniği devreleri için idealdirler. Ayrıca imal etme kolaylığı ve elektronik özelliklerin genel olarak bilinmesi itibarıyla Schottky diyotlar opto-elektronik sanayisinde önemini korumaktadır.

Metal-yarı iletken kontaklar, 1900'lü yıllara kadar radyo dedektörü, sonra radar dedektörü olarak kullanılmış olup mikro dalga diyodu olarak kullanılmaya başlanmaları 1970'lere rast gelmektedir. Bu yapıların teknolojik olarak kullanılmaya başlanmasından çok daha sonra teorik olarak anlaşılmaları gerçekleşmiştir. Schottky, metal-yarıiletken yapıdaki potansiyel engelin kimyasal bir tabakadan ziyade sadece yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığı, Schottky engeli modeliyle 1938'de ortaya koydu (Schottky, 1926). Bethe, 1942'de bu enerji engeli üzerinden taşıyıcıların doğrultuculuk teorisini termoiyonik emisyon (TE) için geliştirdi. Daha sonra Crowel ve Sze, Schottky'nin difüzyon teorisi ile Bethe'nin TE teorisini tek bir TE-difüzyon modelinde birleştirmişlerdir (Cowley & Sze, 1965).

Bir cihazın teknolojik uygulamalarda kullanılabilmesi için, elektriksel özelliklerinin bilinmesi çok önemlidir. Bu durum metal-yarıiletken eklemeler için de geçerlidir ve bu özelliklerden biri, oluşan potansiyel engel yüksekliği (PEY) diğeri, metal-yarıiletken eklemdeki akım geçiş mekanizmasıdır. Akım geçiş mekanizması metal/yarıiletken (MS) eklemde ideallik akım-gerilim (I - V) karakteristiği ile belirlenmektedir. Bir schottky diyodun elektriksel özelliklerinin ve davranışının tam olarak anlaşılabilmesi için farklı numune sıcaklıklarındaki I - V ve

kapasite-gerilim ($C-V$) ölçümlerinin alınıp değerlendirilmesi gerekmektedir (Altındal, Karadeniz, Tuğluoğlu, & Tataroğlu, 2003).

Yukarıda ifade edildiği gibi, MS ve MIS veya MOS yapıların sadece oda sıcaklığında $I-V$ ve $C-V$ ölçümleri bu yapıların elektriksel akım akışı ve diyot parametreleri hakkında bize yeterli bilgiyi vermez. Bu karakteristiklerin ölçüm sıcaklığına bağlı verilerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi, iki kutuplu eklem transistörler (pnp veya npn), MESFET, MOSFET gibi elektronik aygıtlar alanında ayrıcalıklı bir yere sahiptirler. Bundan dolayı, sıcaklık bağımlı $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerinden karakteristik diyot parametrelerinin belirlenmesi elektronik sanayisine büyük bir katkı sağlar. Bu aygıtların kaliteli ve güvenilir olması ve kullanılacak malzemelerle oluşturulacak omik ve doğrultucu kontak yapılarının kalitesine bağlıdır. Zira, teknolojiye kullanılan optoelektronik devre elemanları gibi ticari ürünlerin fabrikasyonunda imal edeceğimiz diyotların optimize edilmesi yadsınmayacak derecede bir boşluğu dolduracaktır.

Gerekli diyot parametrelerinin elde edilmesinde TE akım denklemleri yaygın olarak tercih edilmektedir. Çalışmamızda elektriksel parametrelerin sıcaklıkla olan ilişkilerinden dolayı $Al/SiO_2/p-Si/Al$ metal/oksit tabaka/yarıiletken MOS veya diğer bir adıyla metal/yalıtkan tabaka/yarıiletken MIS yapılar farklı ölçüm sıcaklarında $I-V$ ve farklı frekanslarda $C-V$ ölçümleri yapılmış ve yorumlanmıştır. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalar da (Tuğluoğlu, Karadeniz, Acar, & Kasap, 2004; Hardikar, Karandikar, & Bhonde, 1999; Song, Van Meirhaeghe, Laflère, & Cardon, 1986; Tung R. , 2001; Zhu, ve diğerleri, 2000), metal-yarıiletken eklemlerde oluşan engel yüksekliğindeki homojensizliklerin önemini vurgulamışlardır. Ayrıca yapılan bazı son çalışmalarla, Schottky diyodun PEY ve idealite faktörünün numune sıcaklığına bağlı davranışları, Gaussian dağılım modeli yardımıyla başarılı bir şekilde açıklanmaktadır (Egash, ve diğerleri, 1987; Nicollian & Brews, 1982; Rhoderick & Williams, 1988). $Al/SiO_2/p-Si$ MIS yapının TE teorisine göre diyot parametrelerinin sıcaklıkla değişimi üzerine yapılan deneysel çalışmada, düşük sıcaklıklarda idealite faktörün artmasıyla anormal olarak engel yüksekliğinin azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu anormal davranış metal-yarıiletken ara yüzeyinde bulunan engel yüksekliğinin homojen olmayışından ötürüdür. Bu sebeple $Al/SiO_2/p-Si$ MIS Schottky engel diyotun $I-V$ karakteristiklerinden elde edilen diyot parametrelerinin

sıcaklığa bağıllığı Gauss dağılımıyla incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar teorik olarak beklenen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Metal/yarıiletken (MS) arayüzeyinde ince oksit, yalıtkan tabaka, organik veya inorganik tabaka, bir MOS veya MIS kapasitör veya doğrultucu kontak oluşturmaının yanı sıra, MS doğrultucu kontağın engel yüksekliğini değiştirmek için de kullanılabilir. MS arayüzeyinde ince bir yalıtkan arayüzey tabakası yardımıyla MS kontağın engel yüksekliği şu maksatlara binaen değiştirilir; MS kontağın, mesela Al/*p*-Si kontağın potansiyel engel yüksekliğinden (PEY) daha düşük PEY 'li bir diyot küçük sinyalli sıfır beslem doğrultucu ve mikrodalga karıştırıcı olarak kullanılabilir. Microdalga doğrultucu uygulamalarında, PEY 'li geleneksel MS diyotlar bir *dc* ofset voltajıyla kullanılmalıdır. Yine, geleneksel veya arayüzel tabakasız kontağın PEY'inden daha yüksek potansiyel engel yükseklikli diyotlarda, (metal/yarıiletken/alan etkili transistor)'ün yani MESFET 'in metal doğrultucu kontağı (gate kontağı: SiO₂ tabaka üzerindeki metal kontak) için kullanışlıdır. Özellikle, geleneksel GaAs *n*-tipi kanallı (artış modunda) MESFET'lerde, artan gate-PEY yüksekliği, devrenin gürültüye dayanma miktarının (noise margins) artmasına vesile olacaktır. *n*-tipi InP ve InGaAs yarıiletken FET'lerde, düşük potansiyel engel yükseklikli bir Schottky kontak kabul edilemez büyüklükte sızıntı akımının oluşmasına neden olur. Bundan dolayı, kontak veya gate metali olarak yüksek PEY'li bir Schottky kontak, FET kullanımı için daha uygundur. Yine, beklenen değerinden daha yüksek PEY'li devre elemanları (aygıtlar) yüzey recombantasyonu (tekrar birleşme) ve azınlık taşıyıcı yaşama süresi, taşıyıcı difüzyon sabitlerinin belirlenmesi çalışmalarında kullanılabildikleri gibi, güneş gözeleri ve fotodiyot gibi optik dedektör olarak da kullanım sahaları vardır (Egash, ve diğerleri, 1987; Nicollian & Brews, 1982; Rhoderick & Williams, 1988).

MS, MOS ve MIS yapılarda, deneysel *I-V* karakteristiklerinden hesaplanan ideallik faktörü, PEY ve seri direnç gibi diyot parametreleri ve *C-V* karakteristiklerinden hesaplanan yarıiletken taban malzemenin serbest taşıyıcı yoğunluğu, şimdi sıralayacağımız etkilerden dolayı, beklediğimizden daha farklı çıkabilir. Bunlar; yüksek dirençli omik kontak, MS arayüzeyinde bulunan arayüzey halleri, yüksek doğru (ileri) beslem akım bölgesinde etkin olan ve yarıiletken taban malzemeden kaynaklanan nötral bölge seridirenci, doğru ve ters beslemin düşük akım bölgesinde etkin olan paralel (shunt) direnç. Yukarıda ifade edilen diyot

parametreleri ve bunların beklenilenden farklı çıkmasına neden olan parametreler deneysel sıcaklık bağımlı $I-V$ karakteristiklerinden ve frekans bağımlı $C-V$ karakteristiklerinden hesaplanacaktır.

Bunlardan başka, $Al/SiO_2/p-Si$ MIS yapının deneysel frekans bağımlı $C-V$ ve konduktans-gerilim ($G-V$) verilerinden admittans karakteristikleri, yani, gerçek ve sanal dielektrik sabiti, loss-tanjant, gerçek ve sanal elektriksel modülüs ve ac iletkenlikliği gibi parametreleri de hesaplanmıştır. Frekansa bağlı olarak MIS yapının dielektrik sabiti veya dielektrik özelliklerinin değişimi, esas olarak, elektrik dipol kutuplanmasına, arayüzey kutuplanmasına ve arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımına bağlıdır. Yapıdaki iletkenlik veya iletim (conduction) ve hopping mekanizması hakkında detaylı bilgi edinmek için, voltaj ve frekans bağımlı admittans ölçümlerine ihtiyaç duyulur. Bu tez çalışması içerik olarak, ilk başta, bu çalışmayla ilgili kısa bir literatür bilgisi ve çalışmanın önemi ve amacını içeren bir “Giriş” bölümü; daha sonra ikinci bir ana başlık olarak, metal-yarıiletken (MS) kontak oluşum teorisi, MS kontaklarda akım iletim mekanizması ve Schottky diyot kapasitansı başlıklarından ibaret olan “Materyal ve Yöntem” bölümü; üçüncü ana başlık olarak, $I-V-T$, $C-V-f$, $G-V-f$ ve dielektrik özelliklerin ölçüm, grafik ve hesaplamalarını içine alan “Deneysel Bulgular” ve son olarak Sonuç Tartışma ve gerekli kaynaklar bölümlerinden oluşmaktadır (Çetinkaya, Yıldırım, Durmuş, & Altındal, 2017; Polat, ve diğerleri, 2019).

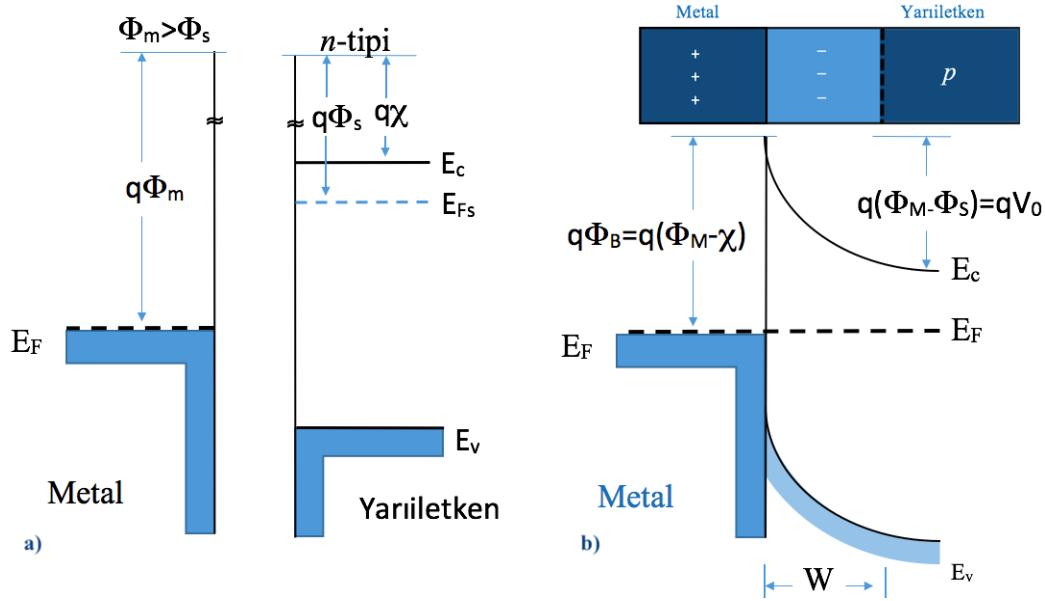
2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

2.1.1. Giriş

Fermi seviyesindeki bir elektronu metalin dışındaki vakum seviyesine götürmek için $q\Phi_m$ kadar bir enerji gerekir. Çok temiz yüzeyler için Φ_m enerjisinin tipik değeri Al için 4,3 eV ve Au için ise 4,8 eV olarak bilinmektedir. Φ_m enerjisi iş fonksiyonu olarak da anılır ve bu enerjiyi azaltmak bazı uygulamalar için istenilen bir durumdur. Metal yüzeyine negatif yük uygulandığı zaman metal içerisinde pozitif yükler oluşur. Bu oluşan pozitif yükler, metale uygulanan bir elektrik alan ile desteklenirse metalin iş fonksiyonunda düşüş gözlemlenir. İş fonksiyonunun bu şekilde düşürülmesi işlemine Schottky etkisi denir.

Metal-yarıiletken kontaklar genellikle, doğrultucu kontak, Schottky engel yükseklikli diyot veya kısaca Schottky kontak olarak adlandırılır. İş fonksiyonu $q\Phi_m$ olan bir metal, iş fonksiyonu $q\Phi_s$ olan bir yarı iletken ile temas ettiğinde, Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelene kadar yük aktarımı gerçekleşir. Örneğin, $\Phi_m > \Phi_s$ olduğunda, yarıiletkenin Fermi seviyesi, temastan önce metalinkinden yüksektir. İki Fermi seviyesini aynı yüksekliğe getirmek için, yarıiletkenin elektrostatik potansiyeli yükseltilmelidir (yani elektron enerjileri düşürülmelidir). Şekil 2.1.a'da *n*-tipi yarı-iletkeninde, birleşme bölgesinin yakınında bir arınma veya tükenim bölgesi (W) oluşur. Arınma bölgesi içindeki dengelenmemiş donör iyonlarına bağlı pozitif yük, metal üzerindeki negatif yük ile eşleşir. Elektrik alanı ve arınma bölgesi içindeki bantların bükülmesi, *p-n* bağlantılarına benzer özellikler taşır.

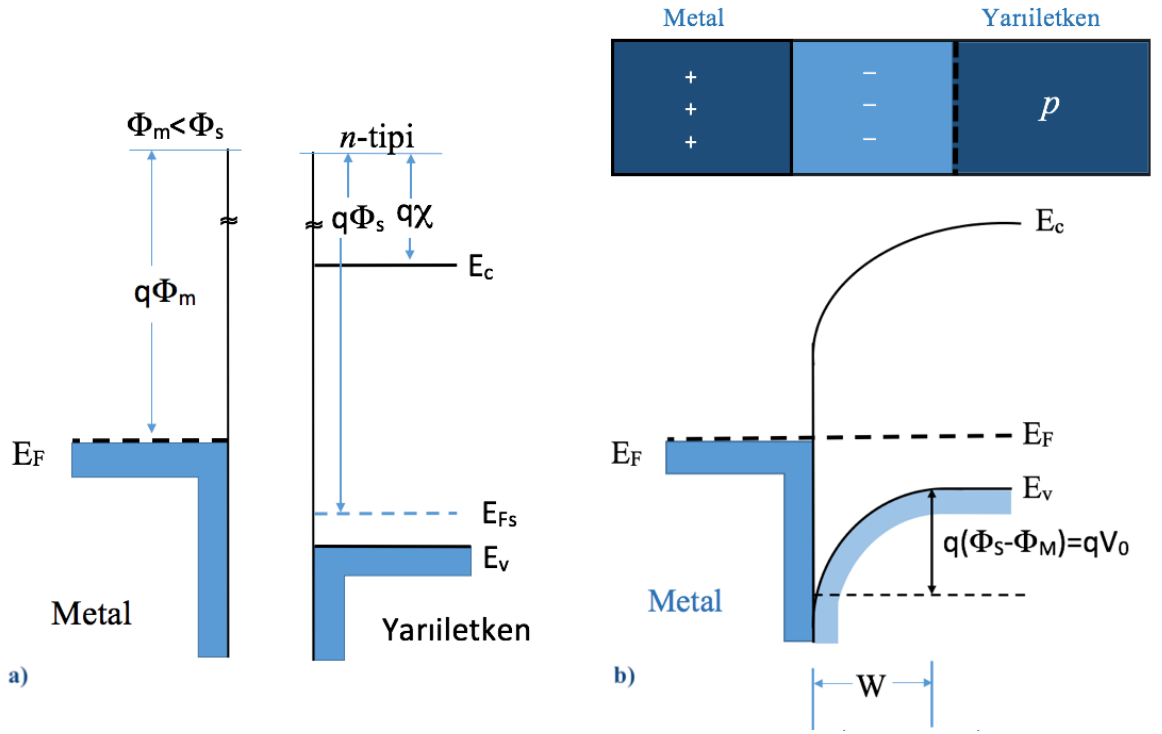


Şekil 2.1 n -tipi yarıiletken ile iş fonksiyonu yarıiletkenden daha yüksek olan bir metalin; **a)** kontakstan önceki enerji-band diyagramı, **b)** kontakstan sonraki durumlarına ait enerji-band diyagramı

Φ_m ve Φ_s arasındaki enerji farkı, termal denge sağlandıktan sonra aşılması gereken bir potansiyel farkı olarak elektronların karşına çıkar, bu engele yani $(\Phi_m - \Phi_s)$ potansiyeline, V_0 denge temas potansiyeli de denir. Bu difüzyon potansiyel engeli V_0 , yarıiletken iletim bandından metale daha fazla net elektron difüzyonunu engeller. Metalden yarı iletkenin iletim bandına elektronların geçmesi için aşılması gereken potansiyel bariyer yüksekliği Φ_B 'dir ve $(\Phi_m - \chi)$ farkına eşittir, burada $q\chi$ (elektron ilgisi olarak adlandırılır) vakum seviyesinden yarı iletken iletim bandı tabanına ölçülür. Denge potansiyeli farkı (V_0), p - n bileşkesinde olduğu gibi, ileri veya ters yönlü voltajın uygulanmasıyla azaltılabilir veya arttırılabilir.

Şekil 2.2; $\Phi_m < \Phi_s$ durumu için, p -tipi yarı iletken üzerinde Schottky bariyerini göstermektedir. Bu durumda, Fermi seviyelerini dengelemek için metal tarafında pozitif bir yük ve yarı iletken tarafında bir negatif yük gerekir. Negatif yük, iyonlaştırılmış alıcıların (N_A) hollerle ile dengelenmemiş olduğu bir tükenim bölgesi (W genişliğinde) tarafından kabul edilir. Yarıiletkenden metale kadar olan potansiyel bariyer V_0 difüzyon potansiyeli $(\Phi_s - \Phi_m)$ ye eşittir ve bu potansiyel bariyeri, engel yüksekliği bölgesine voltaj uygulamasıyla yükseltip alçaltılabilir.

Delikler için bariyeri görselleştirirken'de pozitif yük için elektrostatik potansiyel bariyerin, elektron enerji şemasındaki bariyere zıt olduğu göz önüne alınır.

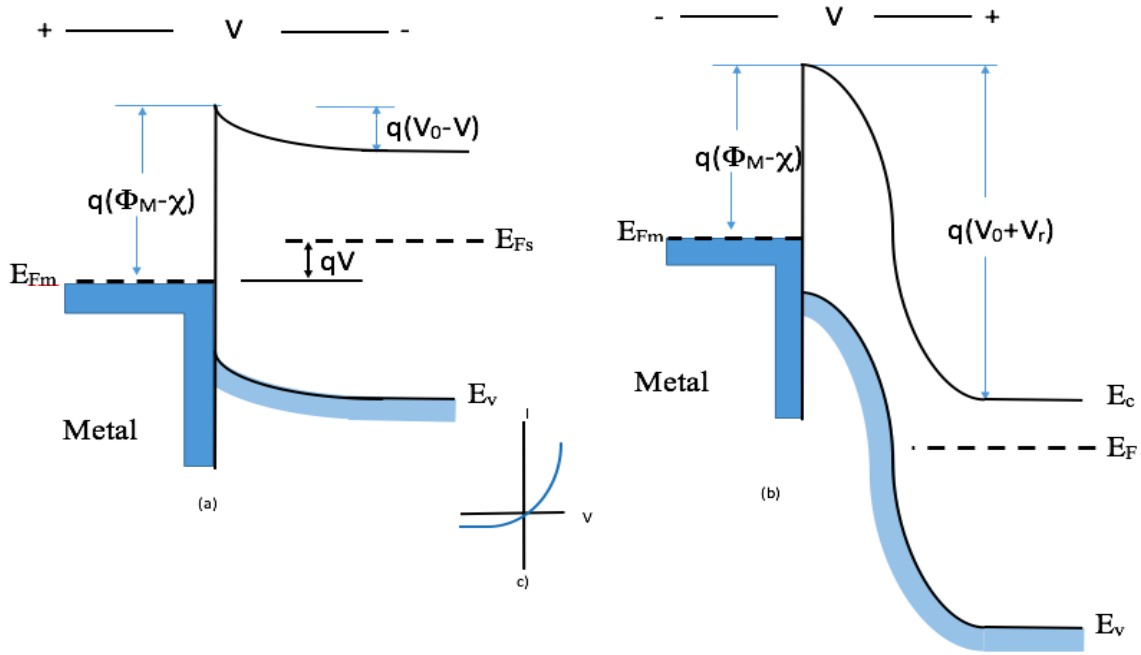


Şekil 2.2 p-tipi yarı iletken ile iş fonksiyonu yarı iletkenden daha düşük olan bir metalin; a) kontakta önceki enerji-band diyagramı, b) kontakta sonraki durumlarına ait enerji-band diyagramı

2.1.2. Potansiyel Fark Altında Doğrultucu Kontaklar

Şekil 2.2.b'deki Schottky bariyerine bir ön gerilim voltajı V uygulandığında, difüzyon potansiyeli V_0 ile $(V_0 - V)$ arasında azalır. Buna bağlı olarak, yarıiletkenin iletim bandındaki elektronlar, metalin yüklerden arınma (deplasyon) bölgesine girer. Bu hareket dolayısıyla metalden yarıiletkene bir akım oluşur. V potansiyel farkı ters yönde uygulanırsa, bariyer V_r kadar artar ve yarıiletkenden metale elektron akışı ihmal edilebilir düzeyde gerçekleşir. Her iki durumda da metalden yarı iletkene giden elektron akışı $(\Phi_m - \chi)$ bariyeri tarafından engellenir. Elde edilen diyot denklemi, Şekil 2.3.c'de de görüleceği üzere p - n jonksiyonunun formuna benzerdir:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$



Şekil 2.3 Doğru ve ters polarmanın metal-yarıiletken kontakta etkisi
a) doğru polarma, **b)** ters polarma, **c)** akım gerilim eğrisi

Bu durumda ters doyumluk akımı I_0 , p - n diyodu için olan eşitlikten farklılık gösterir. Bununla birlikte, doyma akımının, metalden yarı iletkene elektron iletimi için potansiyel engel yüksekliği Φ_B 'nin büyüklüğüne bağlı olması gerekir. Bu

bariyer yüksekliği Şekil 2.3'de gösterilen ideal durum için $(\Phi_m - \chi)$, ön beslem gerilimden etkilenmez. Bu bariyeri aşan metaldeki bir elektronun olasılığı Boltzmann faktörü ile hesaplanır. Böylece I_0 akım ifadesi:

$$I_0 \propto \exp\left(\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.2)$$

Diyot denklemi (2.1), Şekil 2.2'nin metal-*p* tipi yarıiletken kontağına da uygulanır. Bu durumda, doğru beslem voltajı, yarıiletken tarafı metale göre pozitif beslemiş olarak tanımlanır. Bu uygulanan gerilim arttıkça, ileri yönlü akım artar ve potansiyel bariyeri $(V_0 - V)$ 'ye düşürölür ve yarı iletken den metale delikler (holler) akar. Elbette, bir ters beslem voltajı, delik akımı için bariyer potansiyelini arttırır ve akım, ihmal edilebilecek kadar azalır.

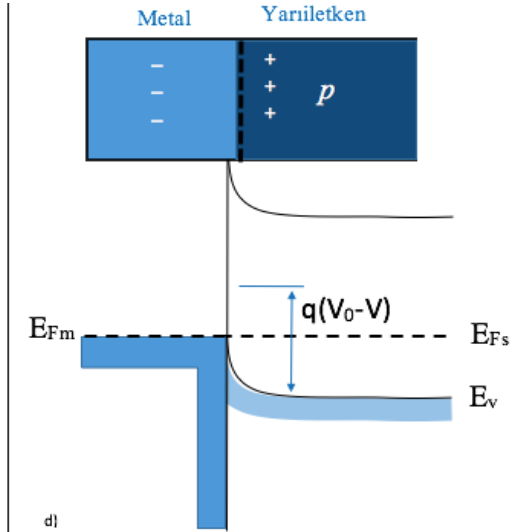
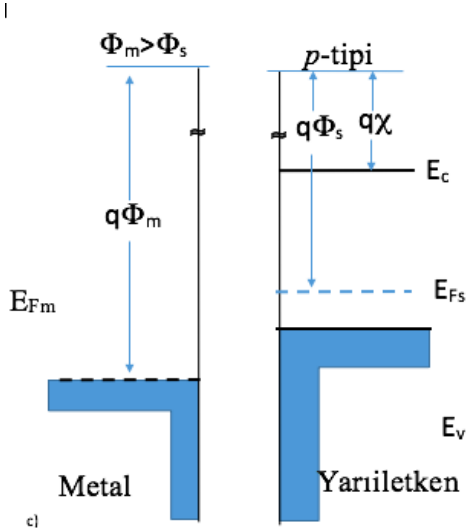
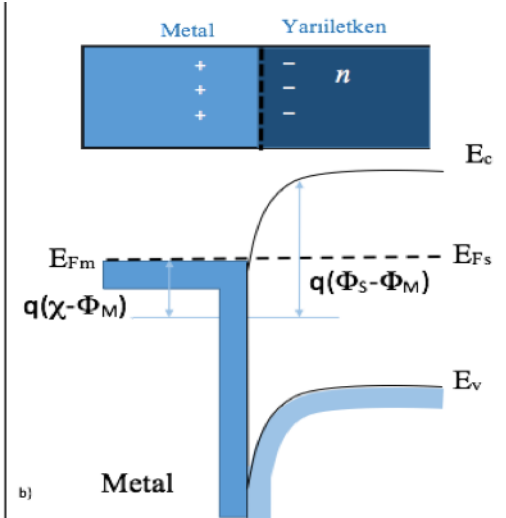
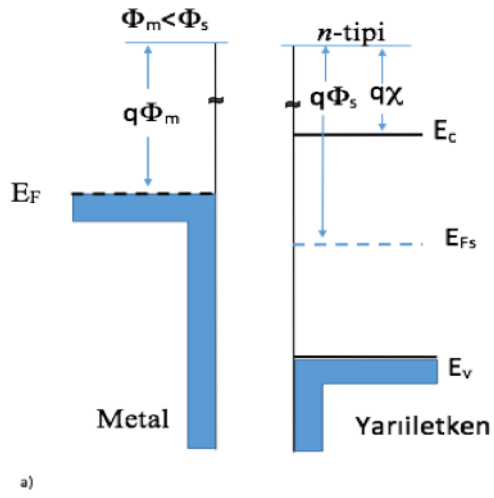
Her iki durumda da Schottky bariyerli diyot, ileri yönde kolay akım akışı ve ters yönde çok az akım akışı sağlamasından dolayı doğrultucu özelliktedir. Ayrıca, her bir durumda ileri akım, yarı iletken den metale çoğunluk taşıyıcıların geçmesi sonucu oluşur.

2.1.3. Omik Kontaklar

Birçok uygulamada, her iki polarizasyonda da doğrusal bir akım-gerilim (I - V) karakteristiği olan metal-yarıiletken omik kontağın var olması istenir. Örneğin, bir p ve n eklemine, pn eklemi oluşturulduktan sonra, tipik entegre devre bağlantısı için hem p ve hem de n tipi yarıiletkenlerin dış yüzeylerine omik kontak yapılmalıdır. Bu kontakların, minimum direnç ve doğrultucu özelliği olmayan, omik özellikte olması önemlidir.

Fermi seviyelerinin aynı yüksekliğe gelmesi için yarı iletkende yüklenen yük, çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlandığında ideal metal-yarı iletken kontaklar omiktir (Şekil 2.4). Örneğin, Şekil 2.4.a'daki $\Phi_m < \Phi_s$ (n -tipi) durumda, elektronlar metalden yarı iletkene geçer yarıiletkenin Fermi seviyesi metalinkiyle aynı hizaya gelir ve böylece denge sağlanmış olur. Bu, yarıiletken elektron enerjilerini (elektrostatik potansiyeli düşürür) dengede metale göre yükseltir (Şekil 2.4.b). Bu durumda, metal ve yarı iletken arasındaki elektron bariyeri küçüktür ve küçük bir voltajla kolayca aşılabılır. Benzer şekilde, p -tipi yarıiletken için $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda, kavşak boyunca kolay delik akışı oluşur (Şekil 2.4.d). Daha önce tartışılan doğrultucu kontaklardan (Schottky kontak) farklı olarak, omik kontak durumlarda yarı iletkende hiçbir tükenim (yüklerden arınma) bölgesi oluşmaz, çünkü Fermi seviyelerini dengede tutmak için gereken elektrostatik potansiyel farkı, yarı iletkende çoğunluk taşıyıcılarının birikmesini gerektirir.

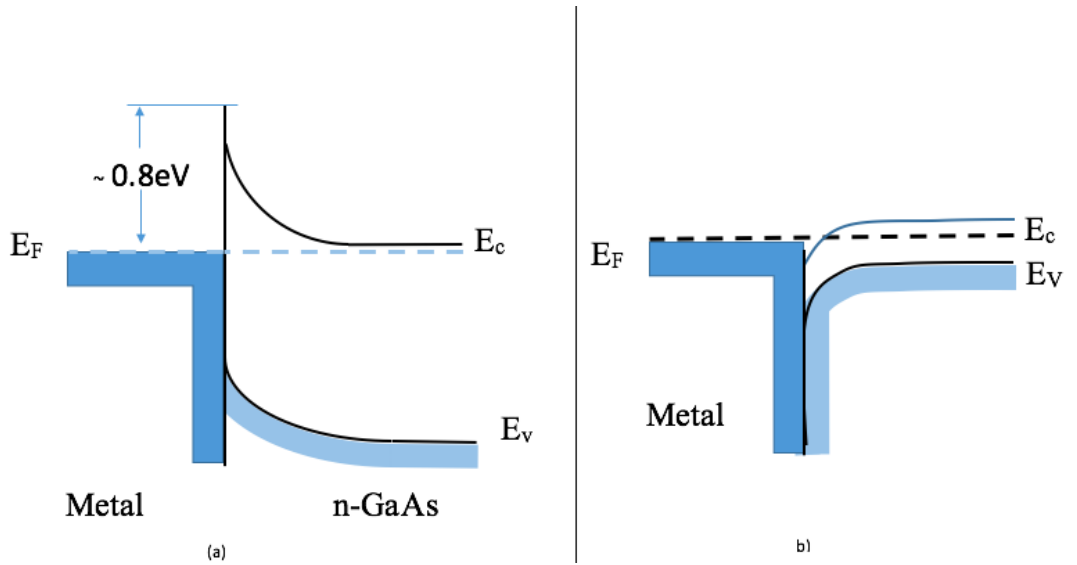
Omik kontakların oluşturulması için pratik bir yöntem, yüksek yoğunluklu çoğunluk taşıyıcıya sahip yarıiletkenlerin kullanılmasıdır. Dolayısıyla, arayüzde bir bariyer mevcutsa, tükenim bölgesi genişliği taşıyıcıların bariyerden geçmesine izin verecek kadar küçüktür. Örneğin, küçük bir Sb yüzdesi içeren Au, n -tipi Si yarıiletkenin yüzeyinde bir n^+ tabakası ve mükemmel bir omik kontak oluşturabilir. Benzer şekilde, p tipi bir yarıiletken malzeme, metal ile kontak halinde bir p^+ yüzey tabakası gerektirir. p -tipi Si üzerinde Al durumunda, metal kontakta alıcı katkı maddesini sağlar. Böylece, gerekli p^+ yüzey tabakası, Si yüzeyine Al kontakta sonra Al/Si kontak yapıya uygulanacak kısa bir ısıtma işlemiyle oluşturulur.



Şekil 2.4 Omik metal/yarıiletken kontaklar: (a) ($\Phi_m < \Phi_s$) n -tipi bir yarıiletken için, (b) metal/yarıiletken kontağın denge durumu bant diyagramı, (c) ($\Phi_m > \Phi_s$) p tipi yarı iletken için, (d) dengede durumundaki metal/yarıiletken kontağın bant diyagramı

2.1.4. Tipik Schottky Bariyerleri

Metal/yarıiletken Schottky kontaklar, doğrultucu kontak olarak adlandırılır. İdeal metal/yarıiletken kontakların incelenmesi, iki farklı malzeme arasındaki eklemnin belirli etkilerini içermez. Bir tek (single) kristal içinde meydana gelen bir $p-n$ eklem diyodundan farklı olarak, bir Schottky bariyer jonksiyonu yarıiletken kristalin bir bağlantı ucunu içerir. Yarı iletken yüzey, tamamlanmamış eksik kovalent bağlar ve diğer etkiler nedeniyle metal/yarı iletken arayüzünde yüklere yol açabilen yüzey yükleri içerir. Ayrıca, yarıiletken kristal ve metal kontak haline getirilirken, ikisi arasında, tipik olarak ne yarı iletken ne de metal olan ince bir arayüzey tabakası oluşabilir. Örneğin, silikon kristaller, atmosfer koşullarında kimyasal olarak temizlenirken veya yarılrken bile, elimizde olmayan silisyumun yüzeyinde istenilmeyen ince (10- 20 Å) bir tabî oksit tabakası oluşabilir. Her ne kadar elektronlar bu ince oksit tabaka boyunca tünelleme ile geçebilseler de kontak boyunca akım iletimi bu istenilmeyen olaydan etkilenir.



Şekil 2.5 Fermi seviyesi, bileşik yarıiletkenlerde arayüz durumları ile sabitlenir: (a) E_F , metal seçimine bakılmaksızın n -tipi GaAs yarıiletkeninde (E_c -0,8) eV yakınında tutturulur; (b) E_F , mükemmel bir omik temas sağlayan n -tipi InAs yarıiletkeninde E_c 'nin üzerine tutturulur

Yüzey durumları (yüzeydeki girilebilir enerji seviyeleri), arayüzey tabakası, metal/yarıiletken fazların mikroskobik kümeleri ve diğer etkiler nedeniyle, iki izole

malzemenin iş fonksiyonlarından beklenen ideale yakın değerlerde potansiyal bariyere sahip metal/yarıiletken kontaklar elde edilmesi zordur. Bu nedenle, ölçülen bariyer yükseklikleri cihaz tasarımında kullanılır. Bileşik yarı iletkenlerde, arayüzey tabakası, kullanılan metalden bağımsız olarak Fermi seviyesini sabit bir pozisyonda sabitleyen yarı iletken bant aralığındaki arayüzey durumları ortaya çıkarmaktadır (Şekil 2.5). Örneğin, *n*-tipi GaAs yarıiletkenin yüzeyinde arayüzey halleri, iletkenlik bandının 0,7-0,9 eV kadar altında E_F 'yi sabitler ve Schottky bariyer yüksekliği, metalin iş fonksiyonu yerine bu sabitleme etkisinden belirlenir.

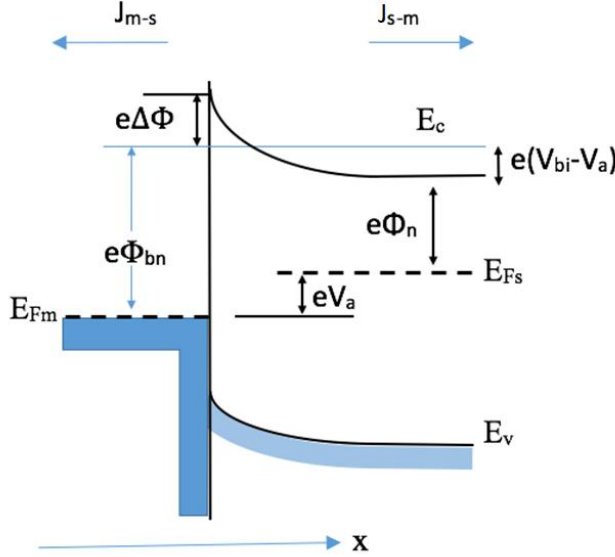
Sonuç olarak *n*-tipi InAs yarıiletkenine omik kontak, yüzeye herhangi bir metalin kontak yapılmasıyla oluşturulabilir. *n*-tipi Si için, iyi Schottky engelleri oluşturmada Au veya Pt gibi çeşitli metaller kullanılabilir. Pt durumunda, ısıtıl işlem, *n*-tipi Si üzerinde $\Phi_B \approx 0,85$ V ile güvenilir bir Schottky bariyeri sağlayan bir platin-silisyum katmanı ile sonuçlanır.

Schottky bariyer diyotların tam çözümü, ileri beslem (forward-doğru beslem) için aşağıda akım denklemi ile yapılabilir:

$$I = ABT^2 \exp\left(\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Burada, B ; birleşme özelliklerinin parametrelerini içeren bir sabittir ve n , denklemdaki ideallik faktörü olarak adlandırılan ve 1 ile 2 arasında değer alan bir niceliktir. Bu ifade, termiyonik emisyon akım denklemidir ve B çarpanı, etkin Richardson sabitine karşılık gelir.

2.2. Schottky Diyodlarda Akım İletimi ve Termoiyonik Emisyon Teorisi



Şekil 2.6 Düz beslem altındaki metal yarıiletken Schottky kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji–band diyagramı

Isısal enerji sebebiyle hedef malzemeden taşıyıcı salınımı olayı termoiyonik emisyon (TE) olarak adlandırılır. TE teorisi metal/yarıiletken Schottky kontaklarda ısı (termal) enerjileri nedeniyle elektronların bir potansiyel engeli üzerinden taşınması işleminin açıklanması için kullanılır. Schottky kontaklarda akımı çoğunluk taşıyıcılar sağlar (Van der Ziel, 1971; Rhoderick & Williams, 1988). Metal *p*-tipi Schottky diyotlar için çoğunluk taşıyıcılar boşluklardır, *n*-tipi için ise elektronlardır. Maxwell-Boltzman yaklaşımının TE teorisine uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için Schottky kontağa ait potansiyel engelinin, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilir. Şekil 2.6’de ki V büyüklüğünde doğru beslem gerilimi uygulanmış Schottky kontağının; $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletkenden metale ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur, $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu x yönünde ve engeli aşabilecek hızda olan elektronların yoğunluğunun bir fonksiyonudur ve:

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} v_x d_n \quad (2.4)$$

Şeklinde ifade edilebilir. TE teorisinde akım ifadesi çıkarılmaya çalışılırsa, yarıiletkeniden metale doğru x eksenine dik elektronların hızları v_x ile $v_x + dv_x$ arasında ise, birim yüzey başına elektron yoğunluğu:

$$dn = N_D \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{1/2 m_n^* v_x^2}{kT} \right) dv_x \quad (2.5)$$

İle ifade edilir. Burada N_D donör yoğunluğu, m_n^* elektron etkin kütlesi, k Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklık. Bu, (2.4) eşitliği yerine yazılırsa:

$$j_{s-m} = eN_D \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \int_{v_{0x}}^{\infty} v_x \exp \left(-\frac{1/2 m_n^* v_x^2}{kT} \right) dv_x \quad (2.6)$$

$$j_{s-m} = eN_D \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{1/2 m_n^* v_x^2}{kT} \right) \quad (2.7)$$

Eşitliği elde edilir. Elektronun eV_D potansiyel engelini aşması için gerekli olan kinetik enerji $\frac{1}{2} m_n^* v_x^2 \geq eV_D$ olarak yazılabilir. Böylece, akım yoğunluğu için;

$$j_{s-m} = eN_D \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{eV_D}{kT} \right) \quad (2.8)$$

Denklemini elde edilir. Elektronun potansiyel engelini aşması için gerekli limit hızı v_{0x} ve donör yoğunluğu:

$$v_{0x} = \left(\frac{2eV_D}{m_n^*} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

$$N_D = N_c \exp \left(-\frac{E_F}{kT} \right) \quad N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.10)$$

İle verilir. Burada h Planck sabitidir. Ayrıca iletkenlik bandının minimumu referans enerji seviyesi olarak alınırsa, metal tarafındaki potansiyel engel yüksekliği:

$$e\Phi_{Bn} = eV_D + E_F \quad (2.11)$$

Ve böylece akım denklemi:

$$j_{s-m} = \frac{4\pi m_n^* k^2 T^2 e}{h^3} \exp\left(-\frac{eV_D + E_F}{kT}\right) \quad (2.12)$$

$$j_{s-m} = \frac{4\pi m_n^* k^2 T^2 e}{h^3} \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.13)$$

Olarak elde edilir. A^* etkin Richardson sabiti:

$$A_n^* = \frac{4\pi m_n^* k^2 e}{h^3} \quad (2.14)$$

Olduğundan, yarıiletken metale akım yoğunluğu denklemi:

$$j_{s-m} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.15)$$

Şeklinde elde edilir. Metal n -tipi yarıiletken Schottky diyodun omik tarafına bir $-V$ voltajı uygulandığında (ileri beslemde), yukarıdaki akım ifadesi $\exp(eV/kT)$ çarpanı ile orantılı olarak artacaktır. Böylece akım denklemi için:

$$j_{s-m} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (2.16)$$

Eşitliğini yazabiliriz. Metalden yarıiletkene doyma akım yoğunluğu (j_0), $V=0$ iken yarıiletken metale doyma akım yoğunluğuna eşit olur. Doğru ve ters beslem veya metalden yarıiletkene artı iletkenden metale net j_n akım yoğunluğu:

$$j_n = A_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.17)$$

Şeklini alır. Burada doyma akım yoğunluğu j_0 :

$$j_0 = A_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.18)$$

Olduğundan net akım aşağıdaki gibi olur.

$$j_n = j_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.19)$$

2.3. Gaussian Dağılım Modeli ile İnhomojenliğin Analizi

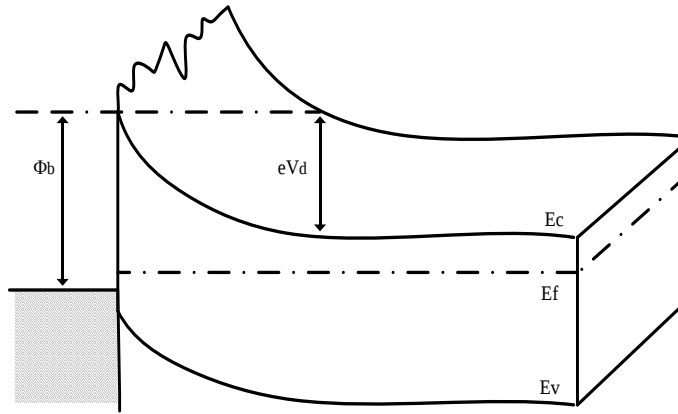
Shottky engel yüksekliğine sahip metal-yarıiletken arayüzeylerde, potansiyel ve elektronik iletimi, elde edilen deneysel sonuçlar doğrultusunda, görülen anormalliklerin temel sebebi olarak Shottky engel yüksekliğindeki inhomojenlikler olduğu kabul edilir.

Son deneysel ve teorik çalışmalar göstermiştir ki; Shottky engel yüksekliği metal yarıiletken arayüzey yapılarına bağlıdır. Bu bağıllık neticesinde metal yarıiletken arayüzeydeki epitaksiyel olmayan engel yüksekliğinin inhomojen olabileceği ortaya çıkmaktadır. Metal yarıiletken arayüzey deneylerinin çoğunluğundan elde edilmiş olan deneysel değerler Shottky engel inhomojenliğinin varlığını kesin olarak göstermektedir. TE difüzyon teorileri gibi iletim denklemleri Shottky engel yüksekliğinin homojenliğiyle ifadesi şeklinde modifiye edilebilir.

Homojen olmayan metal-yarıiletken yapılarda, elektron iletimi, uzay yükü bölgesinin dışında toplanan çoğunluk taşıyıcılarının, metal-yarıiletken arayüzeyini aşmak için, metal-yarıiletken arayüzeyindeki bant köşesinden daha yukarıdaki potansiyel engelini aşmaları gerekir (Tung R. , 1992; Sullivan, Tung, Pinto, & Graham, 1991; Werner & Güttler, 1991).

2.3.1. Gaussian Dağılım Modeli

Shottky kontaklarda engel yüksekliği, deneysel akım-gerilim (I - V) ve kapasite-gerilim (C - V) ölçümlerinden farklı değerlerde elde edilir. Bu farklılık ve idealite faktörünün birden büyük olması; metal-yarıiletken ara yüzeyinin düzgün olmaması ve difüzyon potansiyeli, Schottky engel yüksekliğinin (SEY) farklı uzaysal işimlerine neden olarak inhomojen bir dağılım şeklini alır.



Şekil 2.7 Homojen olmayan Schottky engel yüksekliği için enerji-bant diyagramı

Homojen olmayan yük taşıyıcıların rasgele dağılımı potansiyel değişimlerin ve SEY'lerinin homojenliklerinin bir başka nedeni olabilir. Bu konuda, farklı engel yüksekliğine sahip olan homojen ve homojen olmayan Schottky diyotlar üzerinde değişik çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Ohdomari ve Tu, PtSi/Si ve NiSi/Si gibi farklı diyotların özelliklerini inceleyerek, düşük engelli NiSi/Si ve yüksek engelli PtSi/Si Schottky kontaklara karşılık gelen toplam DC akımın, düşük engelli ve yüksek engelli akımlarının toplanmasıyla, modifiye edilebileceğini açıklamışlardır (Ohdomari & Tu, 1980). Metal-yarıiletken arayüzeyinde SEY'lerin düzensiz olarak değiştiği kabul edilerek birbirinden ayrılmış yüksek ve düşük engellerin yüzey yükü bölgelerinin genişlikleri de farklıdır. Böylece deneysel I - V ve C - V ölçümleri için hem SEY'ğinin sıcaklığa bağlılığı hem de idealite faktörü n 'nin birden büyük olması inhomojenlik modeliyle açıklanabilir. Schottky diyotlardaki ideal durumdan sapmaları açıklayan modellerden birinin; “engelin inhomojenliği modeli” olduğu yukarıda belirtildi. Bu durumdaki davranışlar Gaussian dağılımı (GD) kullanılarak:

$$P(\Phi_b) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Phi_b - \bar{\Phi}_b}{2\sigma_i^2}\right) \quad (2.26)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada $\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}}$, Gaussian engel yüksekliği dağılımının

normalizasyon sabitidir. Düz beslemdeki toplam akım;

$$I(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\Phi_b, V) P(\Phi_b) d\Phi_b \quad (2.27)$$

İle verilir. İntegral alınacak olursa:

$$I(V) = A^* T^2 \exp\left[-\frac{e}{kT} \left(\bar{\Phi}_b - \frac{e\sigma_i^2}{2kT}\right)\right] \exp\left(\frac{eV}{n_{ap} kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)\right] \quad (2.28)$$

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{ap}}{kT}\right) \quad (2.29)$$

eşitliği bulunur. Burada Φ_{ap} ve n_{ap} sırasıyla, sıfır gerilimdeki görünen (apparent) engel yüksekliği ve idealite faktörüdür. İdeal durumda ($n=1$), (Werner, Güttler 1991) tarafından önerilen GD'na göre $\bar{\Phi}_b$, σ_s ve görünen engel yüksekliği Φ_{ap} arasındaki ilişki (Werner & Güttler, 1991):

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_b - \frac{e\sigma_s}{2kT} \quad (2.30)$$

σ_s 'nin sıcaklığa bağıllığı genellikle küçüktür ve bu yüzden ihmal edilebilir:

$$(n^{-1} - 1) = -\rho_1 = -\rho_2 + \frac{e\rho_3}{2kT} \quad (2.31)$$

ile verilir (Biber, 2003). Halbuki, standart sapma ve Schottky engel yüksekliğinin ortalama değerinin Gaussian parametrelerine lineer olarak bağlı olan uygulama gerilimleri oldukları kabul edilir ve bu ifadeler aşağıdaki denklemlerde verildiği şekilde ifade edilir. Bunlarla ilgili olarak verilen:

$$\bar{\Phi}_b = \bar{\Phi}_{b0} + \rho_2 V \quad \text{ve} \quad \sigma_s = \sigma_{s0} + \rho_3 V \quad (2.32)$$

Eşitliklerinde ρ_2 ve ρ_3 , sıcaklığa bağlı olabilen ve engel yüksekliği ve standart sapmanın voltaj değişimlerini tanımlayan voltaj katsayılarıdır. Ayrıca (2.32)'de ki ifadeler birleştirilerek:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2\sigma_s^2}{2kT^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{eq_b}{kT} \quad (2.33)$$

elde edilir.

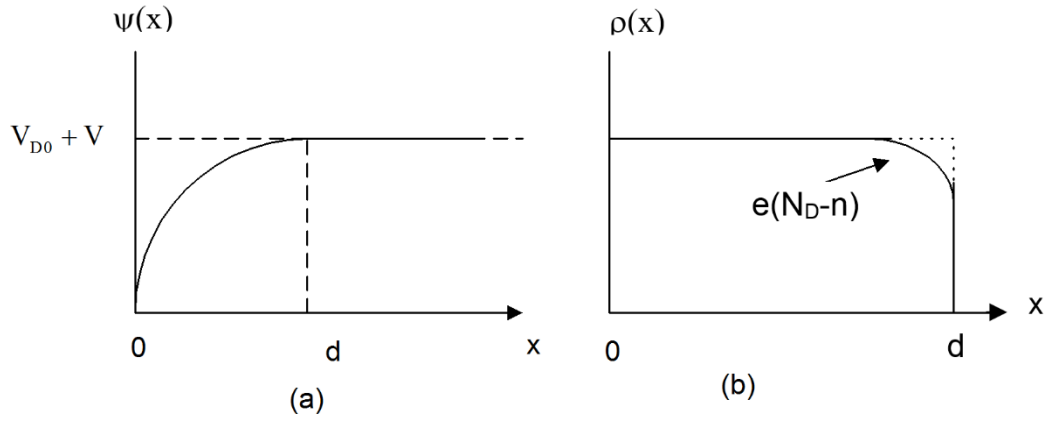
Genellikle numune sıcaklığı düşürüldüğünde diyodun idealite faktörü artar. Bazı metal-yarıiletken arayüzeylerinde elde edilen Schottky engel yüksekliği ve idealite faktörleri, T_0 anormallliği olarak bilinen, ölçülen sıcaklıkla değişimi ifade eder. Bu durum, tek ve bileşik yarıiletkenlerde Schottky engelinin bütün tiplerinde gözlenmiş olan bir olgudur, Bunun için Eşitlik (2.21) ile verilen akım yoğunluğu ifadesini akım cinsinden ve T_0 değerini de katarak aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{k(T+T_0)}\right) \right] \left[\exp\left[\frac{eV_a}{k(T+T_0)}\right] - 1 \right] \quad (2.34)$$

Burada T_0 bir sabittir, İdeal durumda ($n=1$ için) T_0 , 0 değerini göstermektedir. Kısacası, T_0 değeri sıfıra yaklaştıkça diyotlar da ideal duruma yaklaşırlar. Burada $nT \sim T$ grafiği çizilmek suretiyle ideal Schottky kontak davranışından veya TE akım teorisinden sapma tespit edilebilir. Grafiğin analitik yorumundan $n=1+T_0/T$ olduğu ve bu denklemin $y=ax + b$ formunda olmasından faydalanılarak T_0 değerleri hesaplanmaktadır.

2.4. Metal Yarıiletken Doğrultucu Kontaklarda Schottky Sığası

Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklarda arınma (tükenim) bölgesi birbirine zıt yüklenmiş uzay yükleri ve yüzey yükleriyle bir paralel levhalı kondansatör gibi davranır. Ters beslem durumunda, uygulanan potansiyel farkı artırıldığında yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar doğrultucu kontakta uzaklaşırlar. Buna bağlı olarak, artan gerilimden dolayı tükenim (arınma) bölgesinin genişliği artar.



Şekil 2.8 Metal n-tipi yapılarda doğrultucu kantağın; a)potansiyel dağılımı b) uzay yük yoğunluk dağılımı

Arınma veya potansiyel engeli bölgesinin sığası, uygulanan gerilime bağlı olarak yük değişiminden dolayı değişecektir. Bu özelliklerinden dolayıdır ki Schottky diyotları gerilim kontrolü değişken varaktörler olarak kullanılabilirler. Schottky bölgesinin veya arınma kapasitesini bulmak için doğrultucu kantağın potansiyel engeli tabakasındaki potansiyel dağılımının Poisson denklemi:

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.29)$$

Şeklinde ifade edilebilir (Van der Ziel, 1971). Burada ϵ_s yarıiletkenin, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yük yoğunluğudur. Uzay yük yoğunluğu:

$$\rho(x) = e(N_A - N_D) \quad (2.30)$$

olarak yazılabilir (Sze & M., Physics of semiconductor devices 2nd edition, 1981; Sze & Ng, Physics of semiconductor devices, 2007) . Burada N_D n-tipi yarıiletkenin donör yoğunluğu, n yarıiletkenin iletkenlik bandının elektron yoğunluğudur. $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile uzay yükü yoğunluğu $\rho(x)$ 'in konuma göre grafikleri Şekil 2.8'de verilmiştir (Mönch, 2001; Sze, Physics of semiconductor devices). Potansiyel engeli tabakasının difüzyon potansiyelini V_{D0} ve kontağa bağlı potansiyelini $-V$ ile vermek üzere $e(V_{D0} - V) \gg kT$ olduğundan $0 \leq x \leq d$ aralığında holler d uzunluğunda Debye difizyon uzunluğu ile verilen bir bölgede kısmi olarak bulunur olacaktır. Dolayısıyla p -tipi için $N_A \gg N_D$ olduğundan uzay yük yoğunluğu için:

$$\rho(x) \cong eN_A \quad (2.31)$$

Yazılabilir. Bu değer Possion denkleminde kullanılırsa:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{eN_A}{\epsilon_s\epsilon_0} \quad (2.32)$$

Bu son denklemin çözümü şu sınır şartları altında aranabilir:

- 1) $x = 0$ için $\Psi(x)=0$
- 2) $0 \leq x \leq d$ $\Psi(x) = V_{D0} \mp V$
- 3) $x = 0$ $\frac{d\Psi(x)}{dx} = 0$

Denklem (2.32) için, üçüncü sınır şartı göz önünde bulundurularak, integralı alınırsa arınma bölgesi elektrik alanı elde edilebilir:

$$E(x) = -\frac{d\Psi}{dx} = -\frac{eN_A}{\epsilon_s\epsilon_0}(x-d) \quad (2.33)$$

Birinci sınır şartlarında:

$$\Psi(x) = -\frac{eN_A}{\epsilon_s\epsilon_0} \left(\frac{1}{2}x^2 - xd \right) \quad (2.34)$$

Elde edilir. İkinci sınır şartı altında:

$$d = \left[\frac{2\epsilon_s \epsilon_0}{eN_D} (V_{D0} \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

Bulunur. Bu da Schottky bölgesinin genişliğidir. Burada $V < 0$ için kontak ters ve $V > 0$ için kontak doğru beslemededir, p -tipi yarıiletken taban malzemedede birim alan başına düşen yük yoğunluğu:

$$Q = eN_A d \quad (2.36)$$

İle verilir. (2.35) ve (2.36) denklemlerinden yükün uygulanan voltaja göre değişimi:

$$Q = [2\epsilon_s \epsilon_0 eN_A (V_{D0} \pm V)]^{1/2} \quad (2.37)$$

Eşitliliğiyle tanımlanır bulunabilir. Dolayısıyla kapasite:

$$C = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (2.38)$$

Olarak yazıldığında Q ve V değerleri yerine yazılırsa:

$$C = \left[\frac{\epsilon_s \epsilon_0 eN_A}{2(V_{D0} + V)} \right]^{1/2} \quad (2.39)$$

Veya

$$C = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{d} \quad (2.40)$$

Denklemleri bulunabilir. Görülüyor ki arınma bölgesi sığası uygulama potansiyel farkı ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters, akseptör yoğunluğuyla doğru orantılıdır.

3. DENEYSEL BULGULAR

3.1. *p*-tipi Si Kristal Dilimlerinin Temizlenmesi ve Metal Kontaklar İçin Hazır Hale Getirilmesi

Çalışmamız da deneysel karakteristiklerini belirlemeye çalıştığımız Al/SiO₂/*p*-Si MIS diyotları elde etmek için taban malzeme olarak 1-10 Ω-cm öz direçli *p*-Si kullanılmıştır.

Alınacak ölçümlerin dış etkilerden daha az etkilenmesi için, Si kristal dilimlerinin kaplama yapılacak olan yüzeyini her türlü etkiden arındıracak kimyasal temizleme işlemi uygulandı. Kimyasal temizleme işlemi:

1. Si kristal dilimleri, ilk olarak 30 derece asetonda ultrasonik banyoda üç dakika yıkandı.
2. Hemen sonra, izopropanol alkol ile ultrasonik banyoda üç dakika yıkandı.
3. Saf su ile aynı işlem tekrarlandı.
4. Son olarak kuru azot ile numune kurutulduktan sonra işlem tamamlandı.

3.2. Kontakların Yapılması

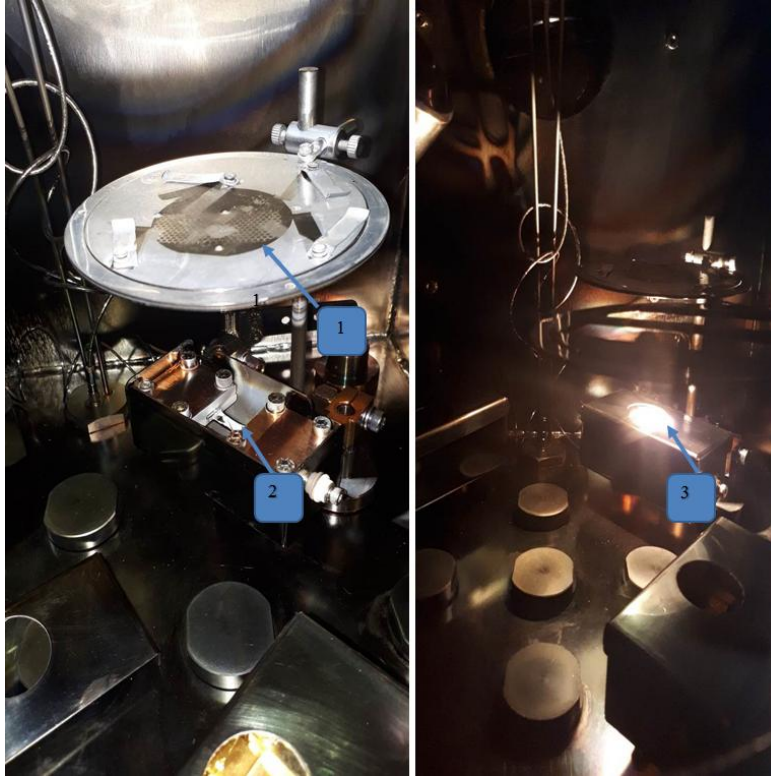
Omik ve doğrultucu kontak yapımında kullanılacak olan alüminyum parçacıkları da aynı şekilde kimyasal olarak temizlendi. Hazırlanan *p*-tipi Si dilim, omik kontak oluşturulması için, vakumlu kaplama ünitesi içindeki yerine konuldu ve birkaç alüminyum parçası tablaya yerleştirildi. 6x10⁻⁶ Torr, 48A altında Si taban malzemenin parlak olmayan arka yüzeyi üzerinde ince Al film tabakası oluşturuldu. Düşük dirençli iyi bir omik kontak elde etmek için, *p*-Si/Al sistem 570 °C'ye ayarlanmış fırın içinde, azot gazı akışı altında, 3 dakika kadar 570 °C'de ısıtılarak tavlandı. Tavlanmadan sonra Si/Al yapı, fırının ön tarafına alınarak oda sıcaklığında azot gazı akışı altında soğumaya bırakıldı. Arka yüzeyi omik kontaklı olan bu Si dilim laboratuvar ortamında iki hafta kadar (15 gün) bekletilerek ön parlak yüzeyi üzerinde doğal SiO₂ tabakasının oluşması sağlandı. Sonra, SiO₂/*p*-Si/Al dilim farklı büyüklükte parçalar halinde kesildi ve bu parçalardan bazıları kaplama ünitesi içine alındı, 6x10⁻⁶ Torr basınçlı vakumlu kaplama ünitesi içinde ve 1,75 mm çaplı

deliklere sahip olan maskeler üzerine konulmuş olan $\text{SiO}_2/\text{p-Si}/\text{Al}$ parçaların SiO_2 üstüne Al nokta kontaklar oluşturuldu.

Böylece, SiO_2 üzerinde $2,41 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ yüzeyli Al nokta kontakların oluşturulmasıyla $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ yapı, yani, metal/oksit tabaka/yarıiletken/metal (MOS veya MIS) yapı imal edilmiş oldu. MIS: metal/yalıtkan tabaka/yarıiletken/metal olarak tanımlanır. AVO metreyle yapılan numune davranış testinde, MIS veya MOS yapının bir diyot davranışı gösterdiği görülmüştür. Diyot veya diğer bir isimle metal-yarıiletken Schottky diyot davranışı akım-gerilim (I - V) ölçümleriyle de doğrulanmıştır. Bu yapıların numune sıcaklığına (ölçüm sıcaklığı) bağlı I - V ölçümleri ve farklı frekanslarda kapasitans-gerilim (C - V) ölçümleri yapıldı. Buharlaştırma yöntemiyle kontak yapılacak olan alüminyum parçası da aynı şekilde hazırlanan Si dilim vakumlu kaplama ünitesi içindeki yerine konuldu ve Aliminyum parçası tablaya yerleştirildi. 6×10^{-6} Torr, 48A altında alüminyum buharlaştırılıp Si taban malzeme üzerinde ince Al filmi oluşturuldu.



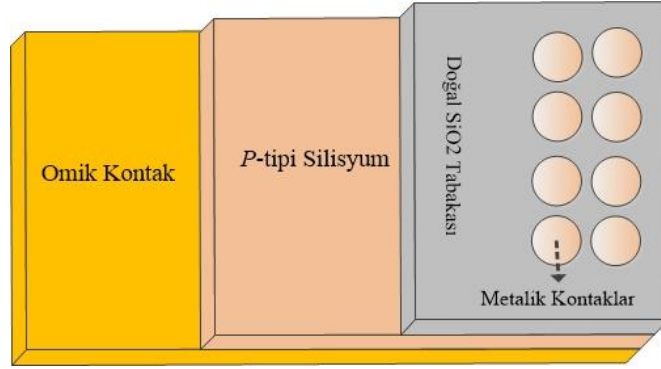
Şekil 3.1 Buharlaştırma için kullanılan vakumlu metal buharlaştırma ünitesi



Şekil 3.2 1 numaralı bölgenin alt kısmına hazırlanmış olan Si dilim sabitlenmiştir. Alt kısmındaki bölgeye ise Al tel parçası konulmuştur. Daha sonra fırın 6×10^{-6} Torr, 48A ayarına getirilip Al parçasının Si dilim üzerine buharlaşması ve kontak oluşması sağlanmıştır.

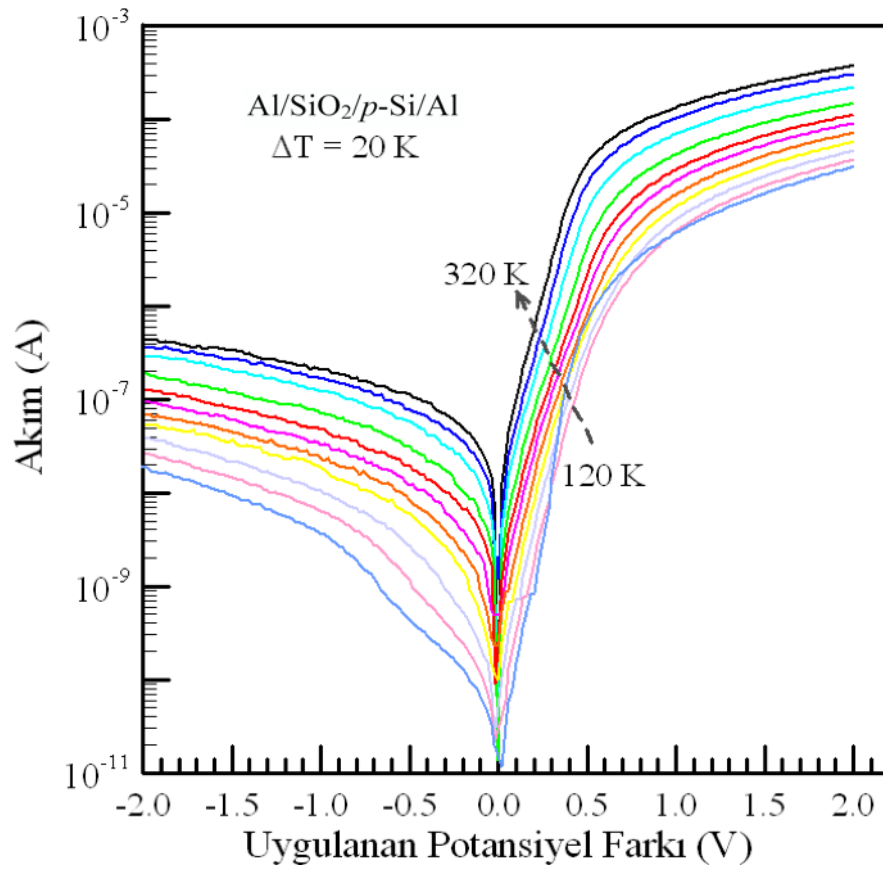


Şekil 3.3 Doğrultucu kontaklar için maske ve maske üzerine konulmuş Si yarıiletken kristal parçaları



Şekil 3.3.b Doğal SiO₂ Tabakası p-Si ile metalik *kontaklar*

3.3. Sıcaklığa Bağlı Akım-Gerilim (*I-V*) Ölçümler



Şekil 3.4 Al/SiO₂/p-Si/Al diyoduna ait farklı sıcaklıklardaki Akım-Gerilim eğrileri.

Al/SiO₂/p-Si MIS yapılar elde edildikten sonra, ölçüm sıcaklığına bağlı I - V karakteristikleri 120 K'den 320 K'e kadar 20 K arttırılarak ölçüldü (Şekil 3.4). TE teorisine bağlı olarak ideal olmayan bir diyodun Akım-Gerilim (I - V) karakteristiği, aşağıdaki şekilde verilir:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (3.1)$$

Denklemdeki I_0 doyma akımının değeri de

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (3.2)$$

Olarak ifade edilir. 3.1 ve 3.2 eşitliklerinden n potansiyel engel yüksekliği Φ_{b0} (I - V) aşağıdaki şekilde verilir:

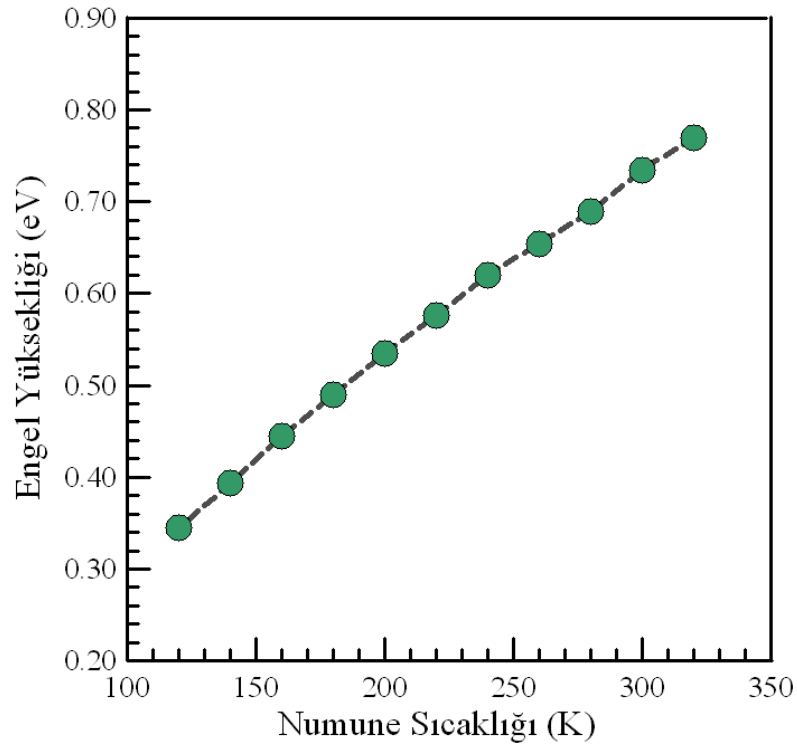
$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{\ln(I)} \quad (3.3)$$

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (3.4)$$

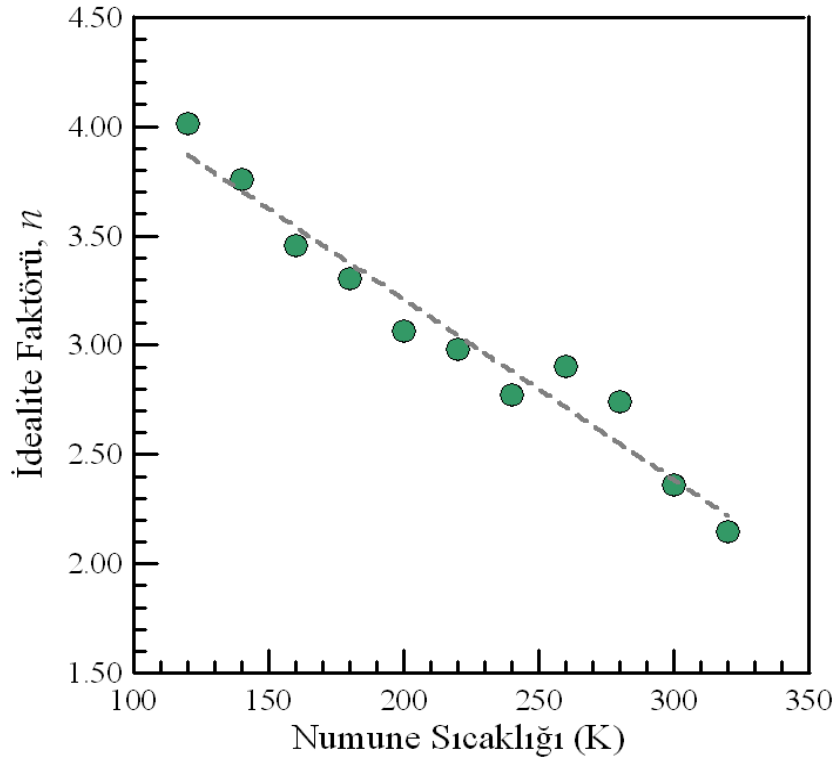
İdealite faktaörü deneysel I - V eğrilerinin TE akım modelinden sapmasının bir ölçüsüdür. İdeal bir kontak için n değeri yaklaşık olarak bire eşittir. Herbir numune sıcaklığı için, 3.3 ve 3.4 eşitlikleri kullanılarak idealite faktörü n ve potansiyel engel yüksekliği (PEY) Φ_{b0} (I - V) değerleri Şekil 3.4'den haesaplandı ve bu değerler Tablo 3.1'de ve ayrıca, idealite faktörü ve engel yükseliği değerinin sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.1 Al/SiO₂/p-Si MIS yapının sıcaklığa bağlı deneysel *I-V* karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri.

T(K)	Φ_{b0} (eV)	n	I_0 (A)	$\ln(I_0/T^2)$	$(kT)^{-1}$ (eV) ⁻¹	$(nkT)^{-1}$ (eV) ⁻¹	$(2kT)^{-1}$ (eV) ⁻¹
320	0,77	2,15	2,10x10 ⁻⁹	-29,26	36,23	16,88	18,12
300	0,73	2,36	1,06x10 ⁻⁹	-29,77	38,65	16,37	19,32
280	0,69	2,74	7,78x10 ⁻⁹	-29,94	41,41	15,1	20,71
260	0,65	2,91	3,6x10 ⁻⁹	-30,56	44,59	15,35	22,30
240	0,62	2,77	1,75x10 ⁻⁹	-31,35	48,31	17,43	24,16
220	0,58	2,98	9,63x10 ⁻¹⁰	-31,74	52,7	17,67	26,35
200	0,54	3,07	3,90x10 ⁻¹⁰	-32,39	57,97	18,91	28,99
180	0,49	3,30	3,73x10 ⁻¹⁰	-32,89	64,41	19,5	32,21
160	0,45	3,45	1,81x10 ⁻¹⁰	-33,64	72,46	20,98	36,23
140	0,40	3,76	3,75x10 ⁻¹¹	-33,94	82,82	22,02	41,41
120	0,35	4,01	2,62x10 ⁻¹²	-34,66	96,62	24,07	48,31



Şekil 3.5 Al/SiO₂/p-Si/Al MIS diyot yapısına ait farklı sıcaklıklarda hesaplanmış potansiyel engel yüksekliği değerleri grafiği

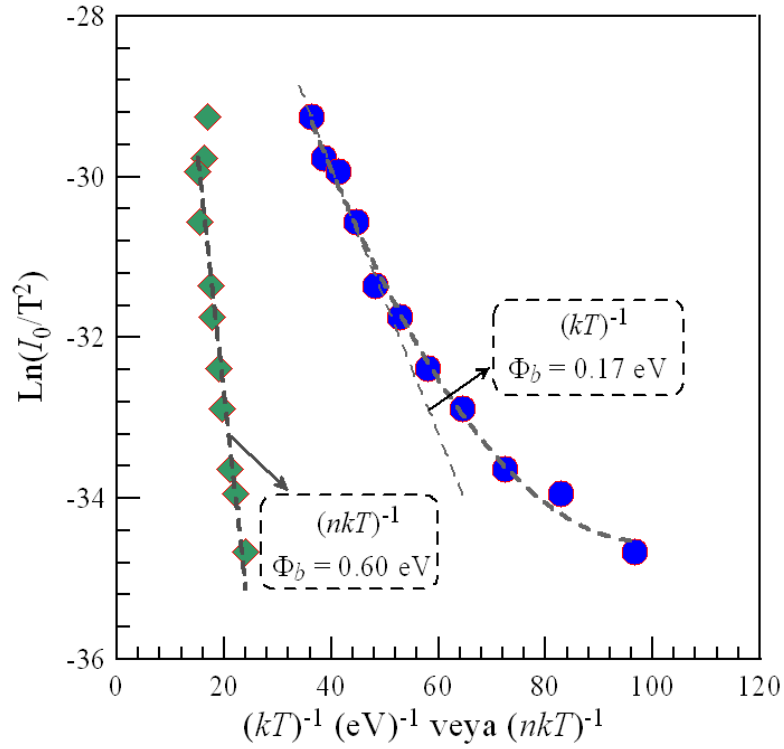


Şekil 3.6 Al/SiO₂/p-Si/Al MIS diyot yapısına ait farklı sıcaklıklarda hesaplanmış idealite faktörü değerleri grafiği

Şekil 3.4’de her bir sıcaklıktaki ileri beslem I - V eğrisinin $V=0$ karşılık gelen saturasyon akımı Richardson eğrilerini çizmek için kullanılmıştır. Richardson eğrileri için denklem (3.2) ‘den:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\Phi_{b0}}{nkT} \quad (3.5)$$

Eşitliği yazılabilir. (3.5) eşitliğine göre, Richardson eğrileri olarak adlandırılan $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ ve $(nkT)^{-1}$ grafikleri Şekil 3.7’de verilmiştir. Bu grafikte ilgili parametreler Tablo 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.7 Al/p-Si/Al Schottky diyot için $\ln(I_0/T^2)$ karşı $\sim (kT)^{-1}$ Richardson grafiği (daireler) ve $\ln(I_0/T^2)$ karşı $(nkT)^{-1}$ modifiye Richardson grafiği (kareler)

TE akım teorisine bağlı olarak, geleneksel klasik Richardson eğrisi olan $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ veya $(nkT)^{-1}$ grafiği potansiyel engel yüksekliğini (PEY) ve taban malzeme olarak kullanılan *p*-tipi silisyumun Richardson sabitini vermelidir. Şekil 3.7’de *I-V* eğrileri, 20 K ‘lik basamaklarla 320 K ‘den 120 K’e kadar azalmaktadır. Bu eğrinin lineer kısmına yapılan fitten 0,17 eV’luk bir PEY değeri elde edilmiştir. Bu sıcaklık aralığında lineer olan modifiye $\ln(I_0/T^2) \sim (nkT)^{-1}$ grafiği de 0,60 eV’luk bir PEY değeri vermiştir.

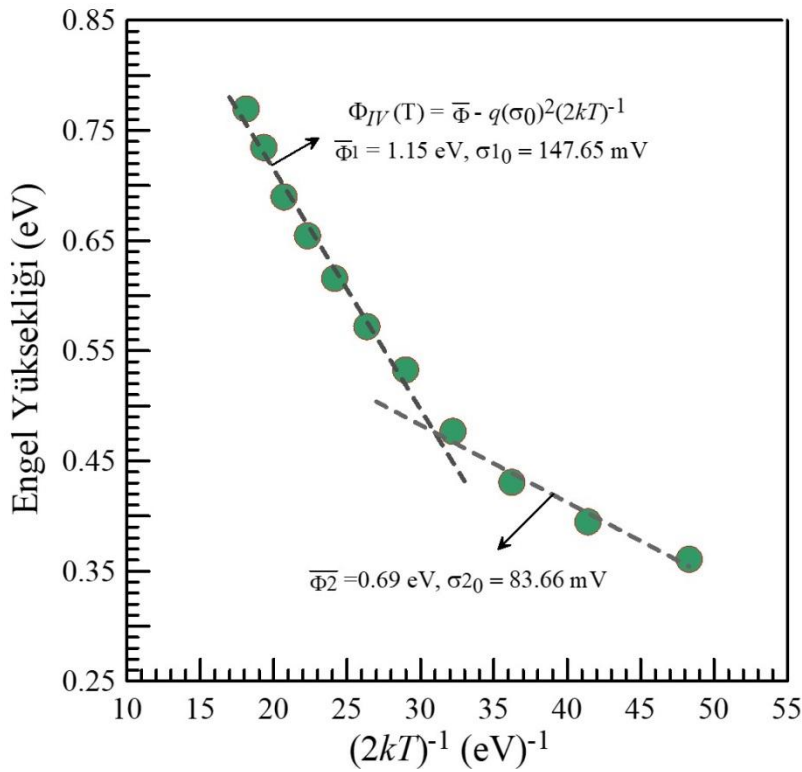
$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi} - \frac{q\sigma_0^2}{2kT} \quad (3.6)$$

Deneyssel $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ grafiği Gaussian dağılımı kullanılarak lineer hale getirilebilir. Bunun için, (3.6) eşitliği kullanılabilir (Chand & Kumar, 1997). Bu eşitliğe göre, aşağıda verilen $\Phi_{ap} \sim (2kT)^{-1}$ grafiğinin lineer bir davranış göstermesi, engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olarak Gaussian dağılım modeline uyarak azalması gerektiği söylenebilir (Osvold, 2006). Bu durumda Gaussian dağılımına

göre modifiye edilmiş inhomojenlik TE modeli kullanılarak diyot parametrelerinin beklenen değerleri hesaplanabilir. Bu modele göre; denklem (3.6) 'dan ve denklem (3.1) ve (3.5) 'den aşağıdaki eşitlikler yazarak gerekli grafikleri çizip hesaplamaları yapabiliriz (Chand & Kumar, 1997; Osvald, 2006; Song, Van Meirhaeghe, Laflère, & Cardon, 1986; Werner & Güttler, 1991; Karatas S, Altındal S, Turut A, 2017):

$$I(V) = I_0 \exp \left(\frac{qV}{n_{ap} kT} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{qV}{kT} \right) \right] \quad (3.7)$$

$$\ln \left(\frac{I_0}{T^2} \right) - \left(\frac{q^2 \sigma_s^2}{2k^2 T^2} \right) = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}}{kT} \quad (3.8)$$

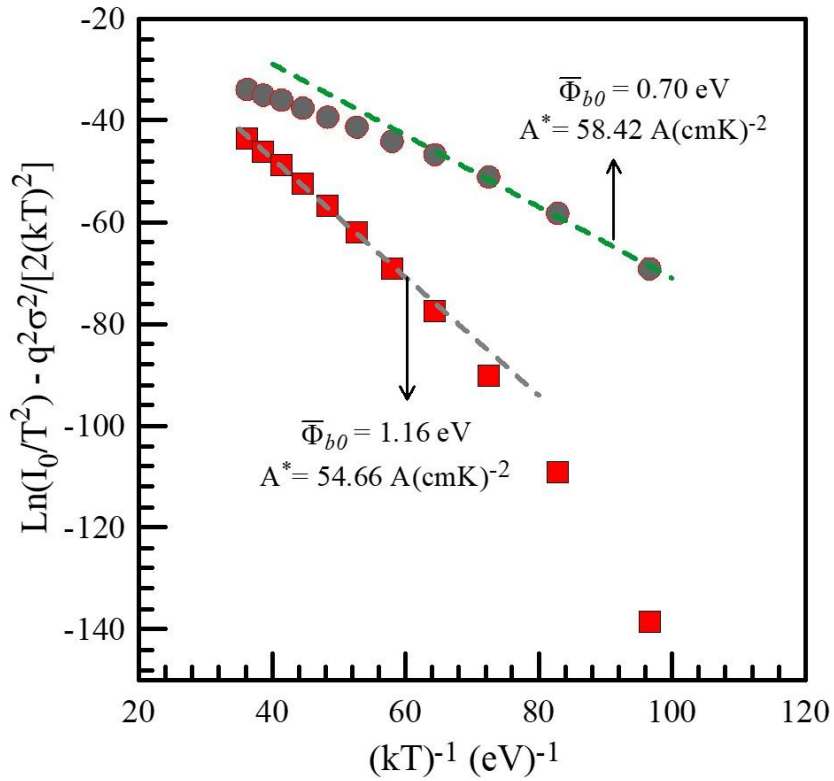


Şekil 3.8 Al/p-Si/Al Schottky diyot için $(2kT)^{-1}$ 'in bir fonksiyonu olarak çizilen bariyer yüksekliğinin çift gaussian dağılımının, deneysel verilere uygun çizimi.

Bu model ara yüzeyde bulunan bariyer yüksekliğindeki uzaysal inhomojenliğe dayanmaktadır. Hesaplamış olduğumuz bariyer yüksekliği değerlerinin Gaussian dağılımına göre değer aldığını varsayarsak, ortalama değer $\bar{\Phi}_b$ ve standart sapma σ_s şeklinde ifade edilebilir. Şekil 3.7 'de her bir sıcaklıktaki ileri beslem I - V eğrisinden

elde ettiğimiz $\Phi_{ap} = \Phi_{b0}$ değerleri kullanılarak denklem (3.6)'ya göre çizilen $\Phi_{ap} \sim (2kT)^{-1}$ grafiğini çizdik (Şekil 3.8). Şimdi, ortalama bariyer yüksekliği $\bar{\Phi}$ değerini ve standart sapmayı σ_0 hesaplayabiliriz.

Şekil 3.9'da grafik denklem (3.4) için deneysel sonuçları göstermektedir. Şekil 3.8 grafiğinde, biri düşük sıcaklık bölgesinde ve diğeri yüksek sıcaklık bölgesinde olmak üzere iki lineer bölge, yani, iki adet Gaussian dağılımı bulunmaktadır. Bu iki bölge iki farklı $\bar{\Phi}$ ve σ_0 değeri vermektedir. Bu değerler; yüksek sıcaklık bölgesinde $\bar{\Phi}1 = 1,15$ eV, $\sigma_1 = 147,65$ mV ve düşük sıcaklık bölgesinde $\bar{\Phi}2 = 0,69$ eV, $\sigma_0 = 83,66$ mV olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.9. $(kT)^{-1}$ karşı modifiye Richardson $\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma_s^2/2k^2T^2$ çizimi (kareler ile modifiye edilmiş deneysel değerler gösterilmiştir)

Denklem (3.8)'e göre, modifiye edilmiş deneysel değerlerle $[\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma_s^2/2k^2T^2] \sim (kT)^{-1}$ Şekil 3.9 ile çizimi verilmiştir (yüksek sıcaklık bölgesi kareler ile ve alçak sıcaklık bölgesi dataları yuvarlaklar ile gösterilmiştir). Bu grafiği çizmek için, Tablo 3.1'de verilen her bir sıcaklıktaki deneysel olarak elde edilmiş ileri beslem I_0 doyma

akım değerleri, ayrıca, Şekil 3.8 de iki bölge için elde edilen σ_{10} ve σ_{20} değerleri denklem (3.8)'de kullanılmıştır. Şekil 3.9 da yüksek sıcaklık bölgesinde ortalama veya homojen PEY için $\bar{\Phi}1 = 1,16$ eV düşük sıcaklık bölgesi için $\bar{\Phi}2 = 0,70$ eV, hesaplanmıştır. Bu değerler Şekil 3.8 de $\Phi_{ap} \sim (2kT)^{-1}$ grafiğinden elde edilen değerlere çok yakındır.

Shottky diyotların elektriksel karakteristiğini etkileyen önemli bir diğer faktör de ölçüm sırasında yarıiletken malzemenin seri direncinden gelen katkıdır. Paoli, Barnes (Paoli, 1976) ve Cheung ve Cheung (Cheung & Cheung, 1986) tarafından denklem (3.1) kullanılarak geliştirilen denklem (3.8) kullanılarak seri direnç değeri hesaplanabilir:

$$I = I_0 \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] \quad (3.8)$$

Bu denklemde IR_s değeri seri direnç üzerindeki gerilim düşmesidir. Bu denklemde aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

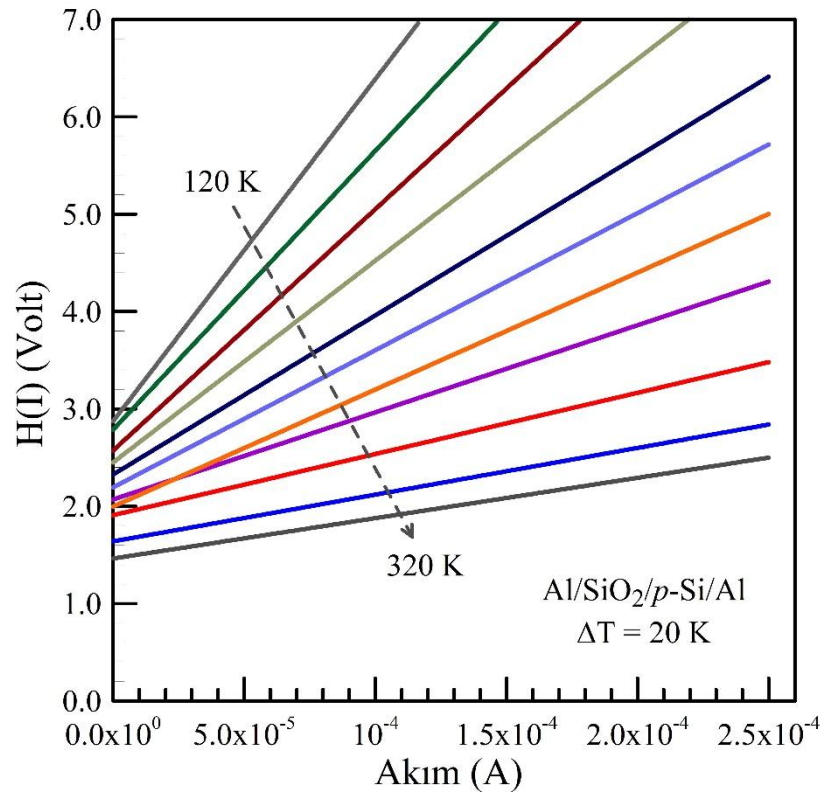
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (3.9)$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (3.10)$$

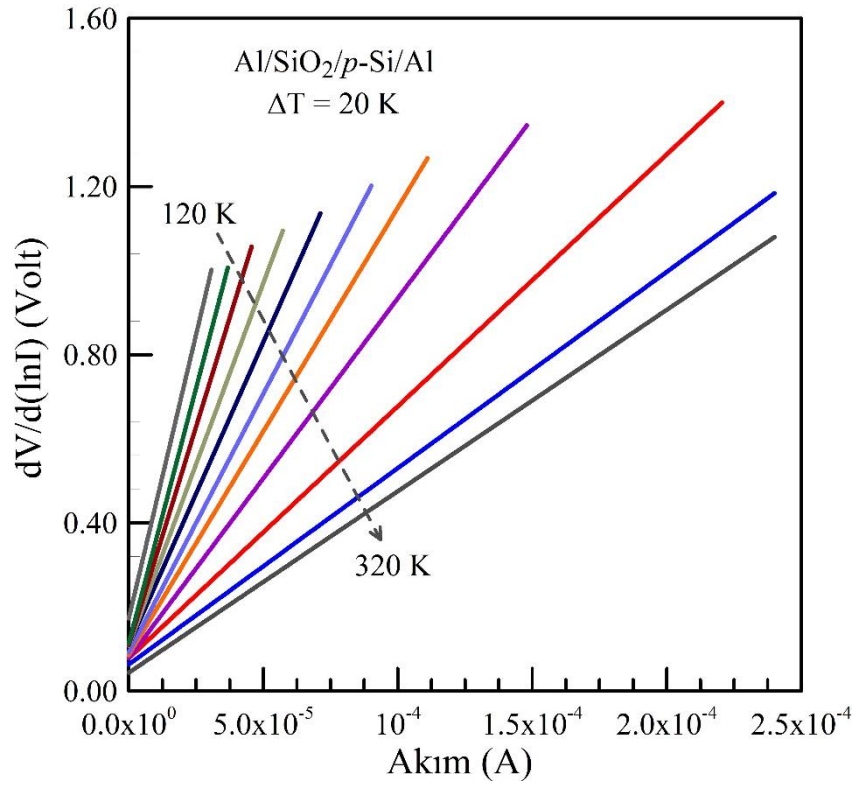
Buradan da $H(I)$ değeri:

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.11)$$

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11, sırasıyla, Al/SiO₂/p-Si/Al için her bir sıcaklıktaki $dV/d(\ln I) \sim I$ ve $H(I) \sim I$ grafiklerini gösterir. Eşitlik 3.9'a göre çizilen Şekil 3.10'daki doğruların eğimleri seri direnci, grafiğin düşey eksen kesişim noktası da (nkT/q) değerini verir. Eşitlik 3.10'a göre çizilen Şekil 3.11'deki $H(I) \sim I$ grafiklerin eğimleri seri direnci ve düşey eksen kesişim noktaları da PEY değerlerini verir. Elde edilen değerler Tablo 3.2'de verilmiştir.



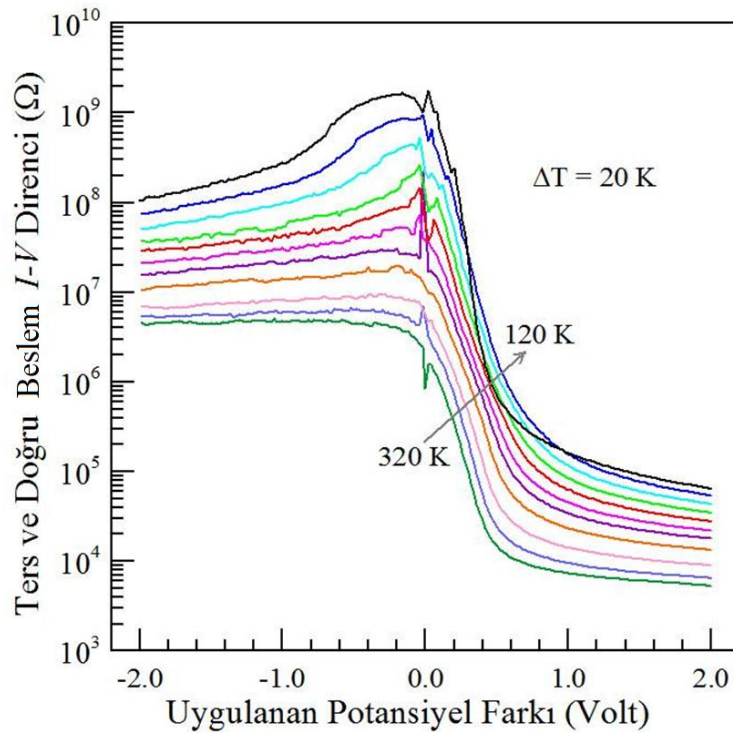
Şekil 3.10 Akım değerlerine karşı $H(I)$ grafiği



Şekil 3.11 Akım değerlerine karşı $dV/d(\ln I)$ grafiği

Tablo 3.2 : Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’deki grafiklerinden hesaplanmış parametrelerin değerleri

T (K)	n (dV/dln(I))	$R_s(k\Omega)$ (dV/dln(I))	$\Phi_b(eV)$ H(I)	$R_s(k\Omega)$ H(I)
120	16,73	26,97	0,17	30,16
140	9,37	24,27	0,30	28,65
160	7,95	20,75	0,32	24,81
180	6,98	17,23	0,35	20,73
200	6,32	17,29	0,37	16,35
220	4,85	14,42	0,50	16,35
240	4,13	12,30	0,55	12,03
260	3,46	10,64	0,60	8,96
280	3,23	8,57	0,63	6,29
300	2,45	5,99	0,70	4,80
320	1,59	4,67	0,92	4,15



Şekil 3.12 Al/SiO₂/p-Si/Al diyoduna ait Şekil 3.4’de her bir sıcaklıktaki ters ve ileri beslem akım-Gerilim eğrilerinden Ohm Kanunu kullanılarak hesaplanan direnç değerleri

3.4. Frekansa Bağlı Sığa-Gerilim (C-V) Ölçümler

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 'de, sırasıyla, oda sıcaklığında farklı frekanslarda ölçülen ($\sim 300\text{K}$) kapasitans-uygulanan potansiyel farkı (C-V) ve kondüktans-uygulanan potansiyel farkı (G-V) karakteristikleri verilmiştir. Uygulanan potansiyel farkı -4 ve 10 Volt aralığındadır. 0,0 ile -4,0 Volt aralığı, negatif gerilim veya ters beslem altında yapılan ölçümleri, 0,0 ile +10 Volt aralığı, pozitif gerilim veya ileri beslem altında yapılan ölçümler olarak adlandırılır. Şekil 3.15 frekansa bağlı olarak potansiyel farkına karşı faz açısı grafiğini gösterir.

Kapasitans ve uygulanan gerilim arasındaki ilişki İkinci Bölüm'de elde edilen aşağıdaki eşitlikle verilebilir (Mönch, 2001; Sze, Physics of semiconductor devices):

$$C = \left[\frac{q\epsilon_s\epsilon_0 N_A}{2(V_{D0} + V)} \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

Bu eşitlikten:

$$C^{-2} = \frac{2(V_{D0} + V)}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_A} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13) eşitliğinde bulunan difüzyon potansiyeli V_{D0} durumda, $C^{-2} = 0$ durumunda C^{-2} -V grafiğinin doğrusal kısmının V eksenini kestiği nokta ve p-Si'un serbest taşıyıcı yoğunluğu N_A ise C^{-2} -V grafiğinin doğrusal kısmının eğiminden hesaplanabilir ve denklemi aşağıdaki gibi verilir:

$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 (d(C^{-2})/dV)} \quad (3.14)$$

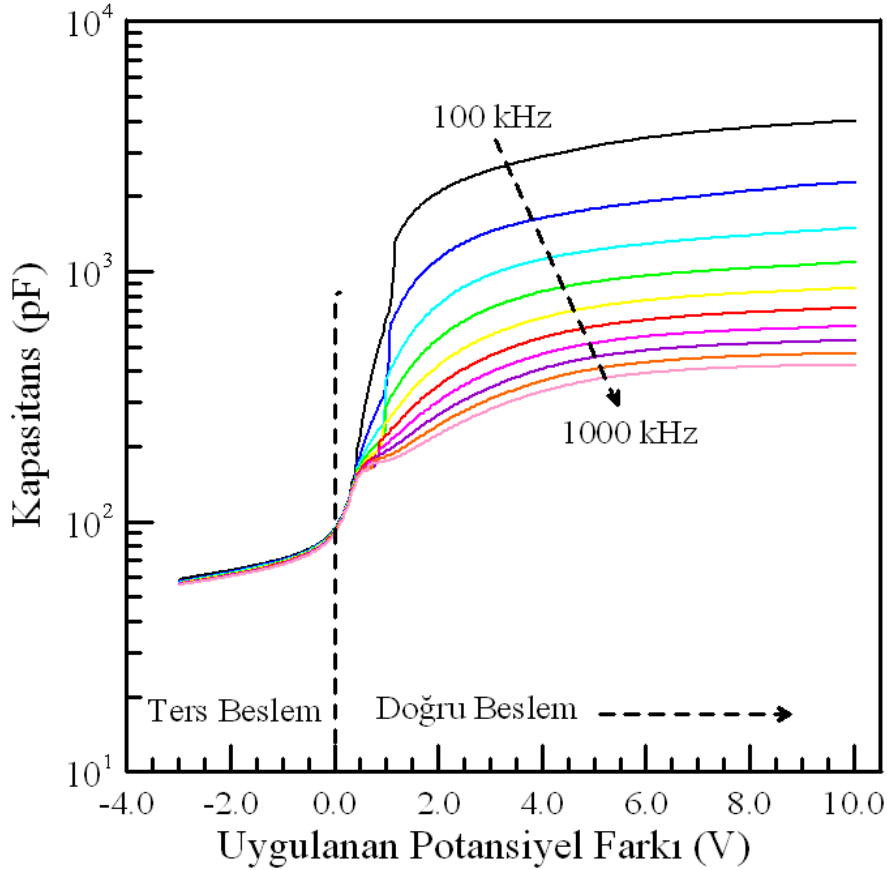
Difüzyon potansiyeli V_{D0} , p-tipi yarı iletkenin valans bandındaki hollerin metale geçerken maruz kaldıkları bariyerdir. Ayrıca bariyer yüksekliği Φ_{CV} şu şekilde hesaplanabilir:

$$q\Phi_{CV} = qV_{D0} + qV_p \quad (3.15)$$

Burdaki V_p , nötral bölgede Fermi seviyesi ile valans bandının tepesi (maximumu) arasındaki potansiyel farktır. Elde ettiğimiz deneysel N_A değerlerini kullanarak V_p değeri de aşağıda verilen eşitlikte hesaplanabilir:

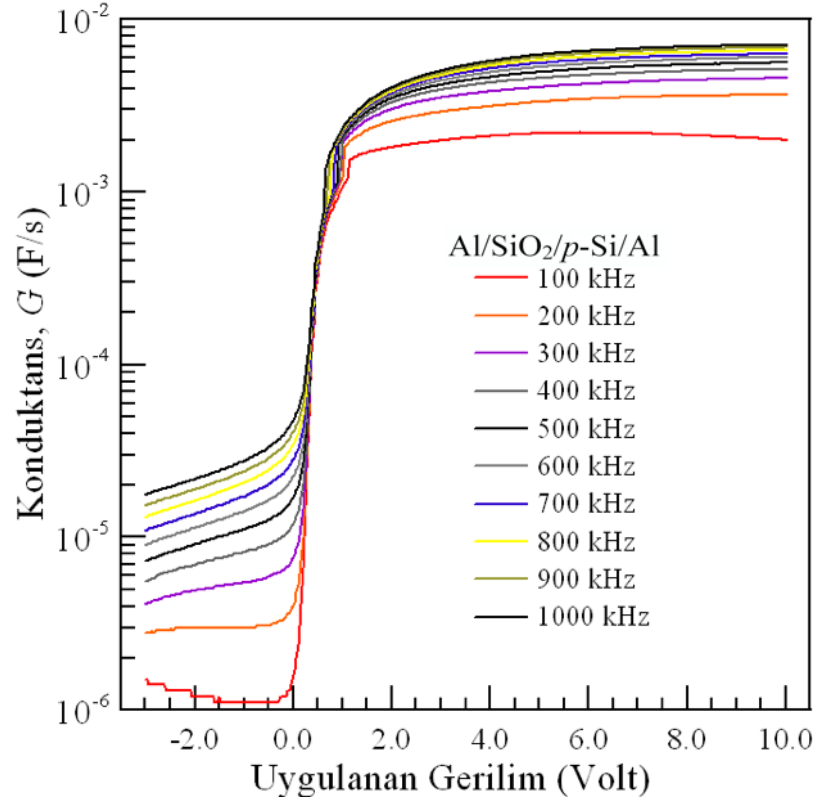
$$qV_p = kT \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (3.16)$$

Al/SiO₂/p-Si/Al diyoduna ait olan deneysel doğru ve ters beslem 300 K ve farklı frekanslardaki, C-V ve G-V grafikleri, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de verilmiştir. Uygulanan potansiyel farkı -3,0 Volt ile +10,0 Volt aralığındadır. Kapasitans grafiğinden de görülebileceği üzere, diyet ters beslem tükenim (arınma) ve doğru beslem birikim (accumulation) davranışı göstermektedir.

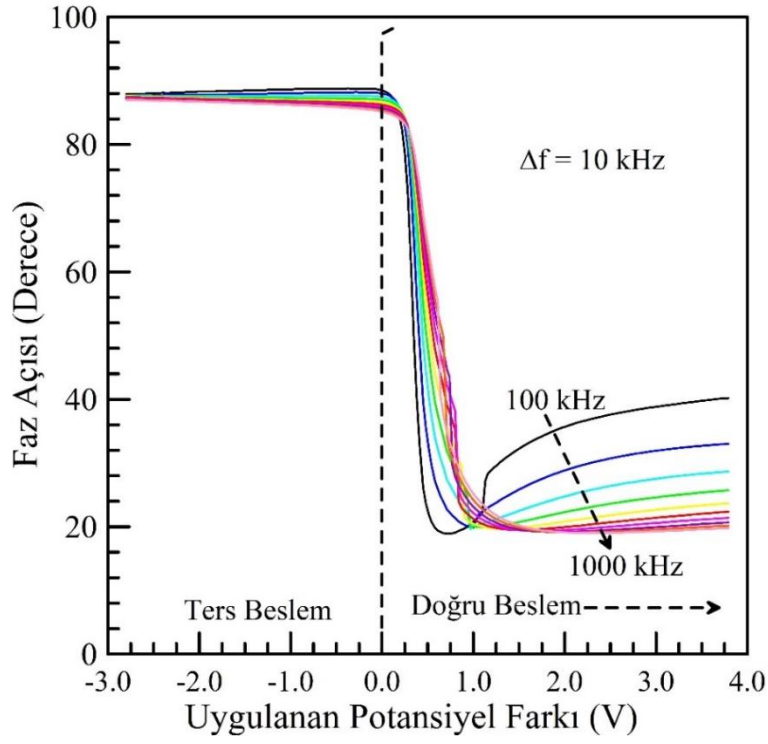


Şekil 3.13 300K ‘lık numune sıcaklığı altında farklı frekanslarda ölçülmüş sıcaklıktaki Kapasitans değerleri.

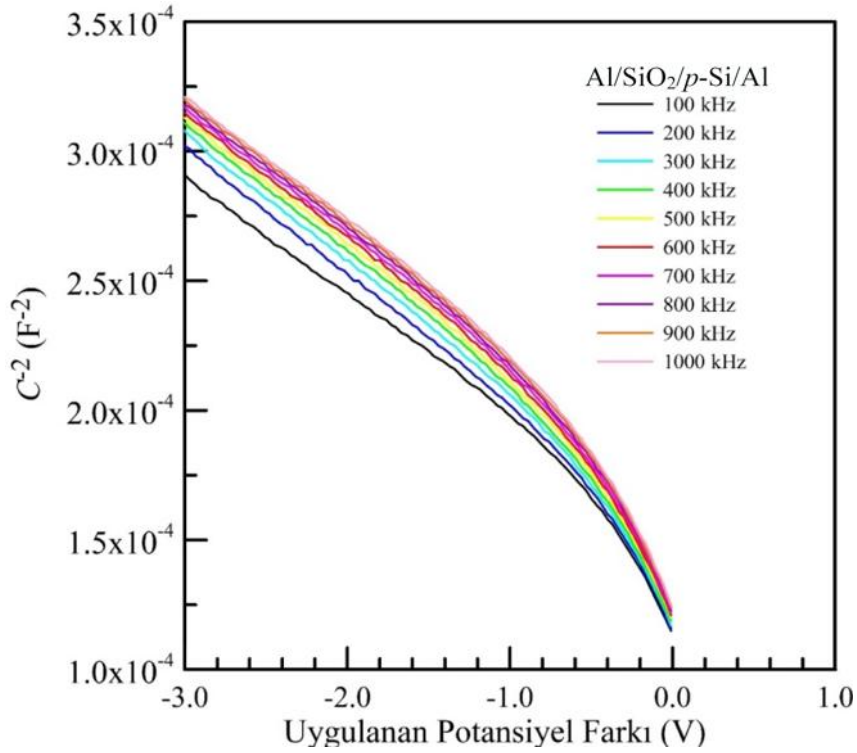
Al/SiO₂/p-Si MIS yapının farklı frekanslardaki ters beslem C^{-2} -V grafiği Şekil 3.16'da verilmiştir. Bu grafikten hesaplanan PEY Φ_{CV} ve serbest taşıyıcı yoğunluğu N_A gibi parametreler ve Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 gösterilmiştir. Şekil 3.13'de grafik haline getirilmiş ve Tablo 3.3 'de tablolanmıştır. Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 'de, farklı frekanslara bağlı C-V ve G-V eğrilerinin doyum bölgeleri (birikim- accumulation) dikkate alınarak p-Si taban malzeme üzerindeki doğal oksit SiO₂ tabakanın kalınlığı ve kapasitans değeri C_{ox} hesaplanabilir. Ayrıca, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de her bir frekanstaki C-V ve G-V grafiklerinin verilerinden seri direnç ve dielektrik sabiti, elektrik modülüs ve ac iletkenliği gibi parametreler hesaplanabilir. Bu parametrelerden bazıları Tablo 3.4 'de verilmiştir.



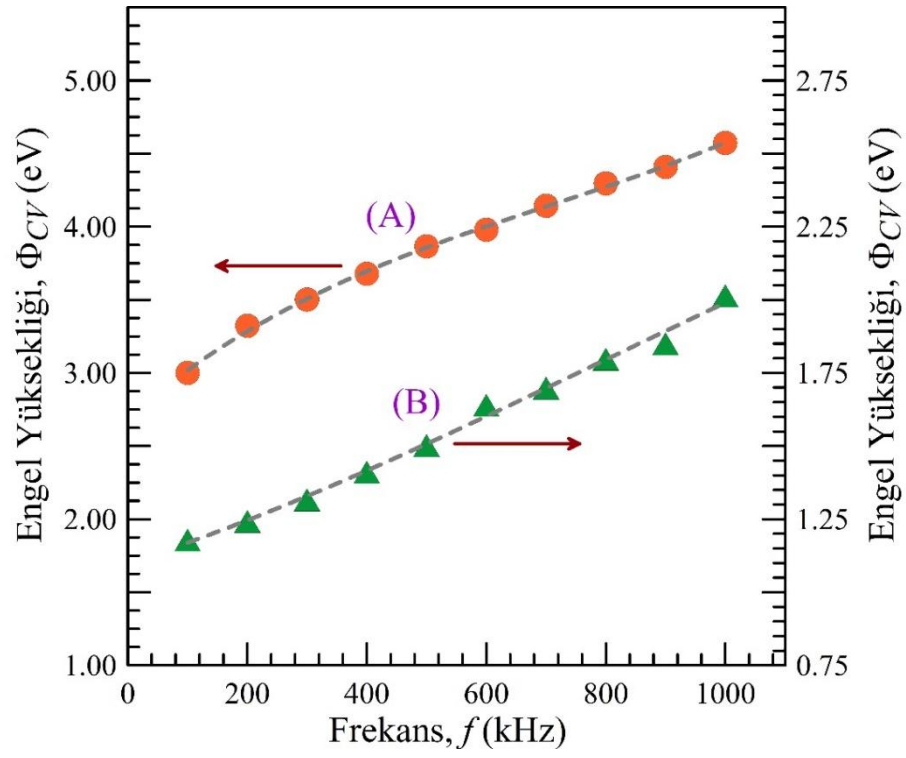
Şekil 3.14. 300K'de farklı frekanslarda ölçülmüş potansiyel farkına karşı kondüktans değerleri



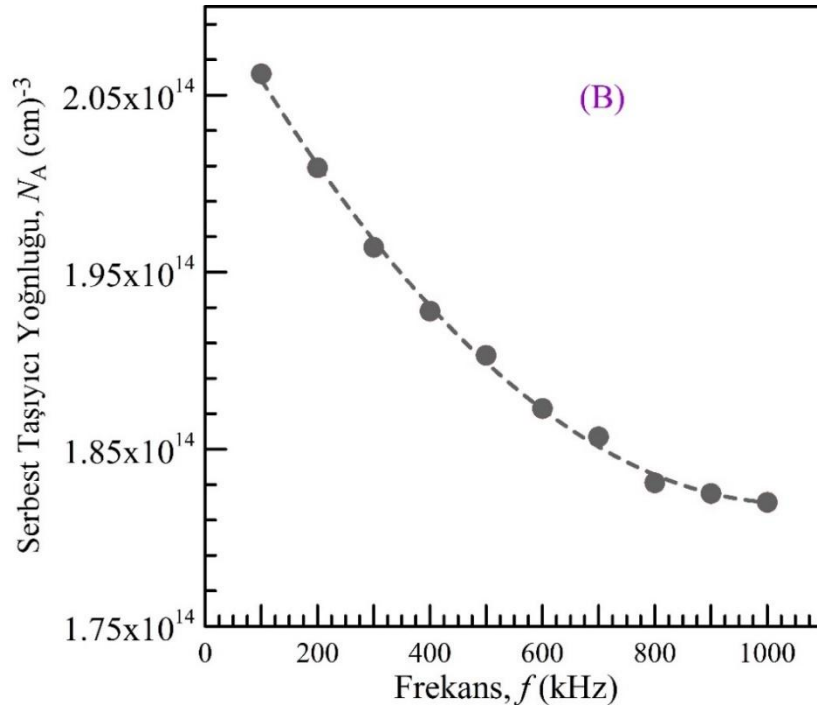
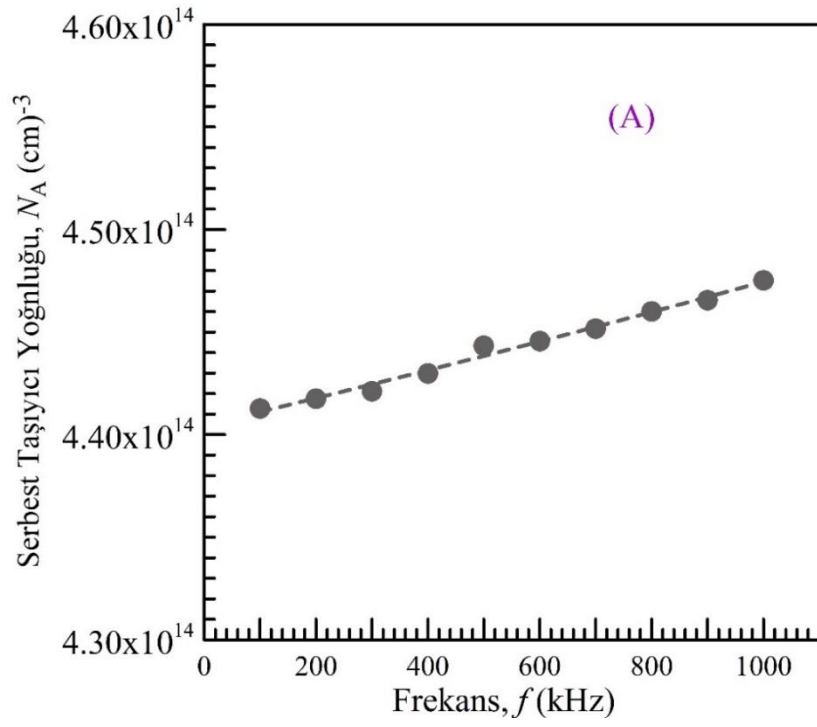
Şekil 3.15 Farklı frekanslarda potansiyel farkına karşı faz açısı grafiği



Şekil 3.16 Uygulanan farklı potansiyel farklarda elde edilmiş C^{-2} değerleri



Şekil 3.17 300K’de frekansa engel yüksekliği değerleri (A): C^2 -V eğrilerinin yaklaşık -1.0 V ile -3.0 V aralığı için, (B): C^2 -V eğrilerinin yaklaşık 0.0 V ile -1.0 V aralığı için çizilmiştir.



Şekil 3.18 300K'de frekansa bağlı serbest taşıyıcı yoğunluğu değerleri (A) : C^2 -V eğrilerinin yaklaşık -1.0 V ile -3.0 V aralığı için, (B) : C^2 -V eğrilerinin yaklaşık 0.0 V ile -1.0 V aralığı için çizilmiştir.

Tablo 3.3 Şekil 3.16'deki grafikden hesaplanmış bazı parametre değerleri

f (kHz)	$q\Phi_{CV}$ (eV)	$N_A \times 10^{14}$ (cm) ⁻³	w (μm)	V_0 (Volt)	V_p (Volt)
100	3	4,40	3,11	3,63	0,06
200	3,32	4,42	3,09	3,19	0,14
300	3,50	4,41	3,13	3,29	0,22
400	3,68	4,42	3,17	3,38	0,31
500	3,87	4,47	3,12	3,48	0,40
600	4,00	4,44	3,22	3,50	0,49
700	4,14	4,45	3,25	3,56	0,59
800	4,30	4,47	3,27	3,62	0,68
900	4,41	4,46	3,28	3,64	0,78
1000	4,57	4,49	3,29	3,70	0,88

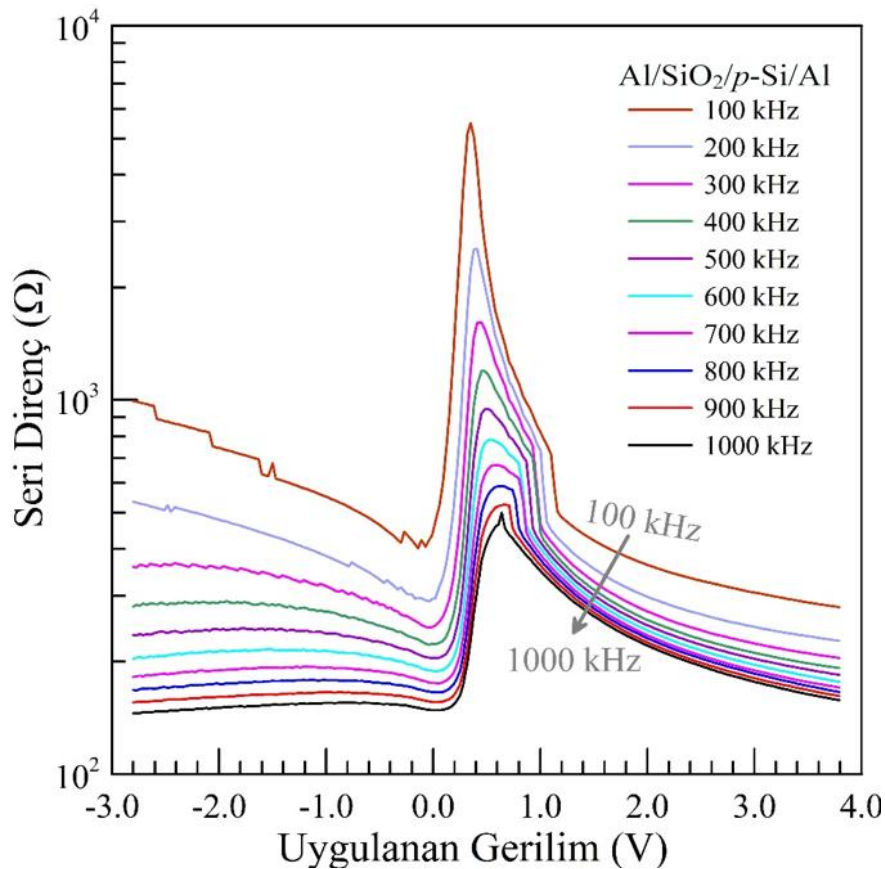
Tablo 3.4 Frekansa bağlı C-V ve G-V grafiklerinden hesaplanmış bazı parametrelerin değerleri

f (kHz)	C_{ox} (pF)	$G_{ox} \times 10^{-3}$ (F/s)	d (Å)	$R_{s,CV}$ (Ω)
100	3990	2,10	2,13	194,45
200	2230	3,64	3,82	172,50
300	1480	4,60	5,71	159,00
400	1071	5,70	7,95	143,50
500	855	5,60	10,00	145,17
600	712	6,00	11,96	138,87
700	600	6,32	13,92	134,74
800	528	6,86	16,13	126,74
900	460	6,80	18,50	128,30
1000	425	7,10	20,00	124,71

Diyot parametrelerini beklenen değere yakın bir şekilde elde etmek için, doyum bölgesindeki seri direnç R_{ss} değerini deneysel $C-V$ ve $G-V$ eğrilerinin doyum bölgesindeki deneysel kondüktans ve kapasitans değerlerini kullanarak elde edebiliriz. Nicollian ve Goetzberg tekniği kullanılarak (Pakma, Tozlu, Kavasoglu, Kavasoglu, & Ozden, 2011) her bir frekansta $C-V$ ve $G-V$ grafiklerinden yığılma bölgesindeki sabit seridirenç değerleri aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir (Nicollian & Goetzberger, 1967; Sze & M., 1981).

$$R_{ss} = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2}, \quad (3.16)$$

bu denklemde G_{ma} ve C_{ma} Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’de ileri beslemde herbir frekansda yığılma bölgesindeki deneysel kondüktans ve kapasitans değerleridir. Hesaplanan yığılma bölgesi sabit direnç değerleri Tablo 3.4 ‘de verilmiştir.



Şekil 3.19 Al/p-Si/Al farklı frekanslardaki gerilime bağlı seri direnç değerleri.

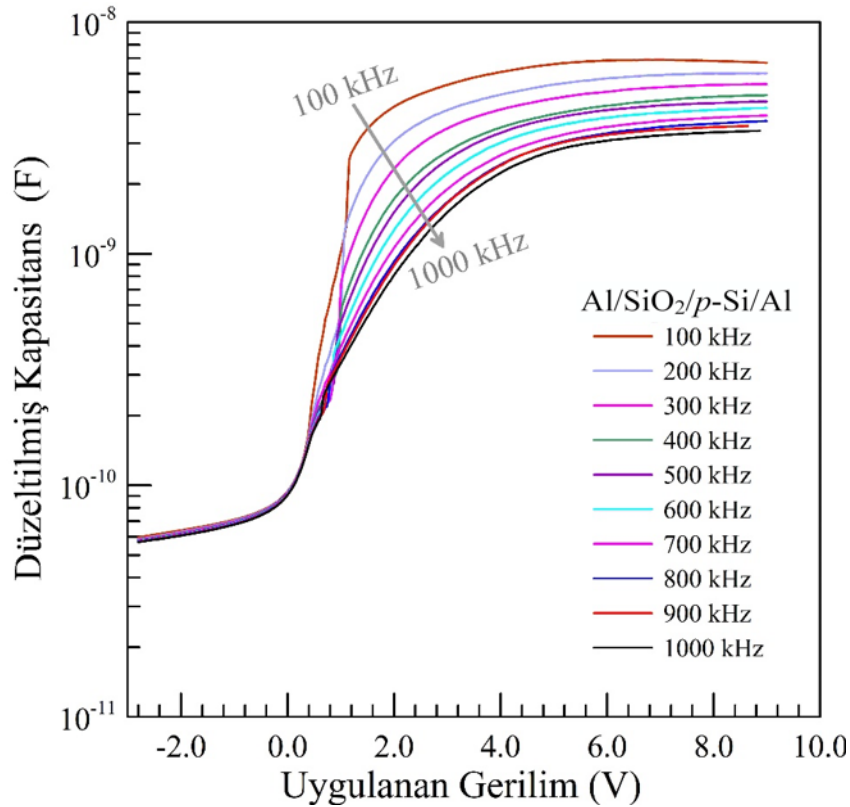
Düzeltilmiş C_c ve G_c değerleri için aşağıdaki denklemler kullanılabilir (Nicollian & Goetzberger, 1967).

$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (3.17)$$

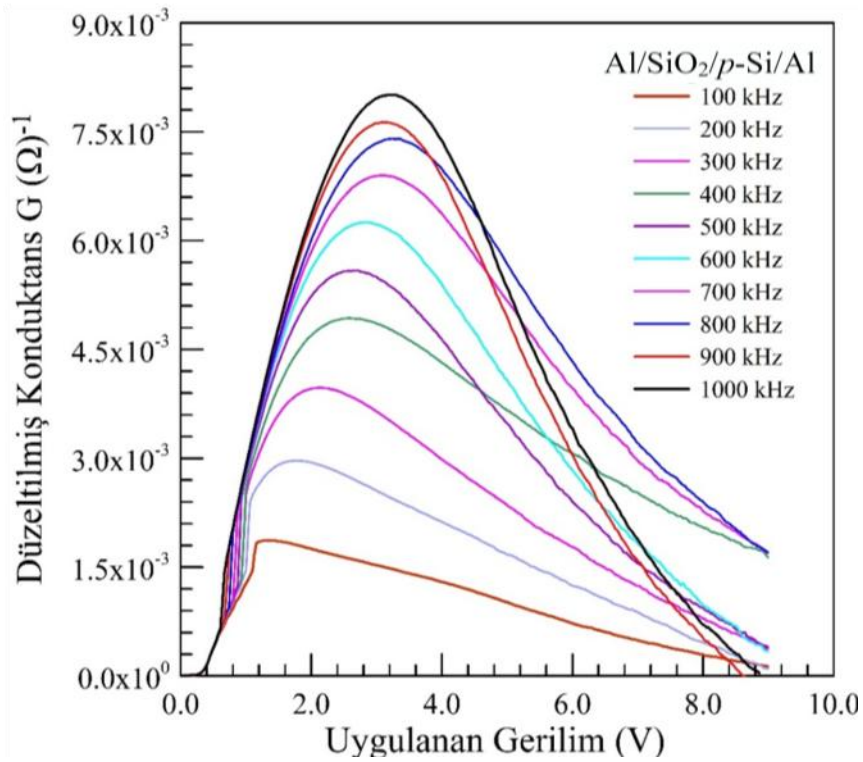
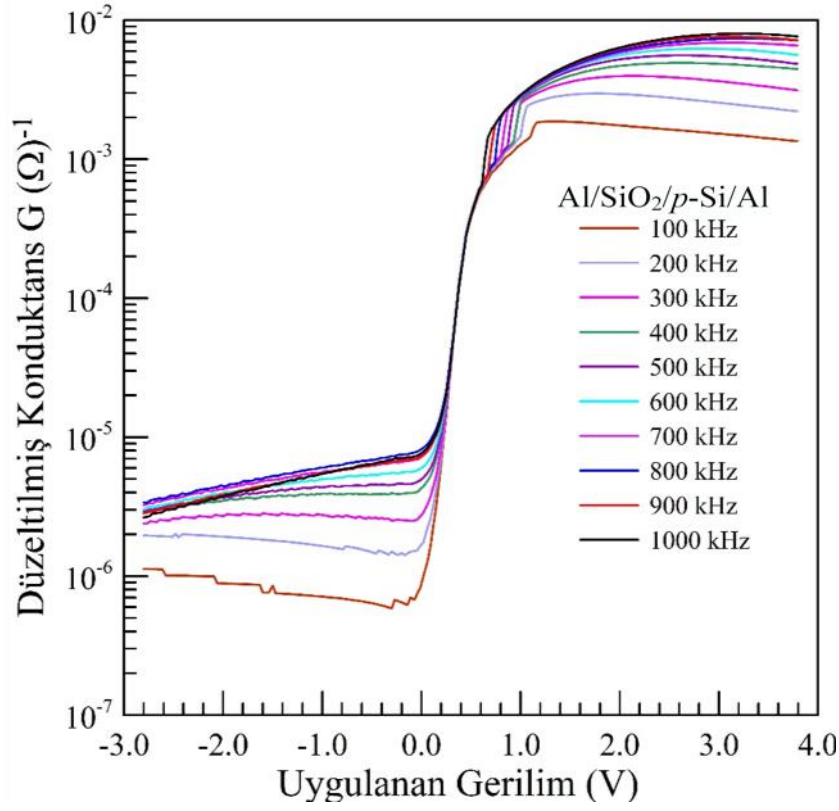
$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (3.18)$$

$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_{ss} \quad (3.19)$$

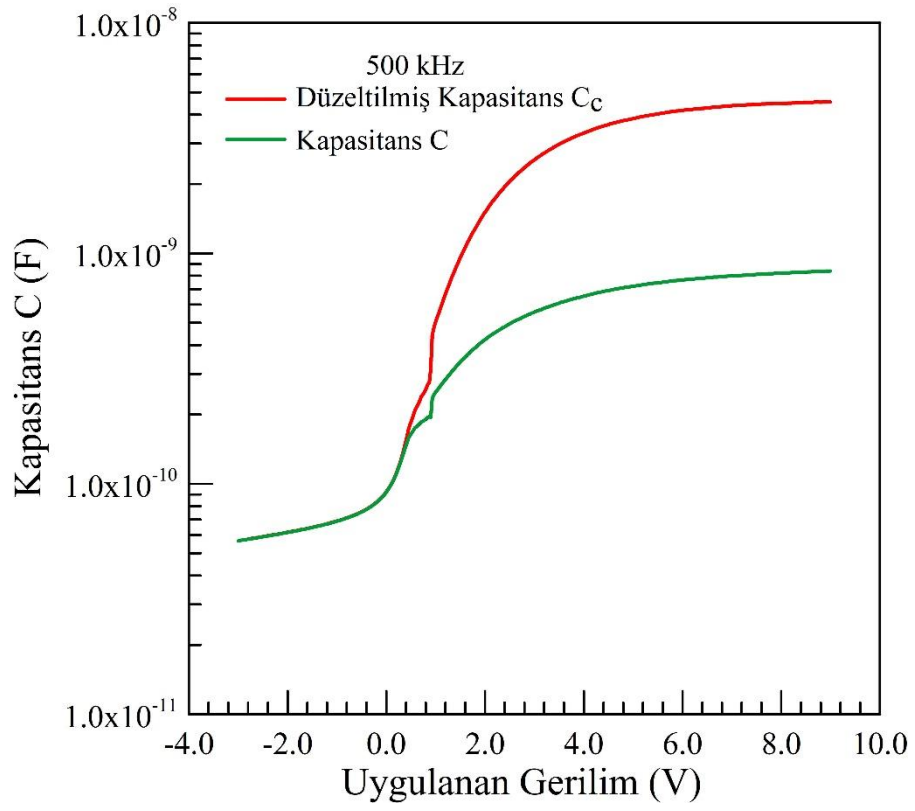
Eşitlik 3.17 ve 3.18 ‘den düzeltilmiş olan C_c -V ve G_c -V grafikleri, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmiştir. Hesaplama yapılırken, denklem (3.19) ‘da herbir frekans için yığılma bölgesi sabit direnç R_{ss} değerleri kullanılmıştır.



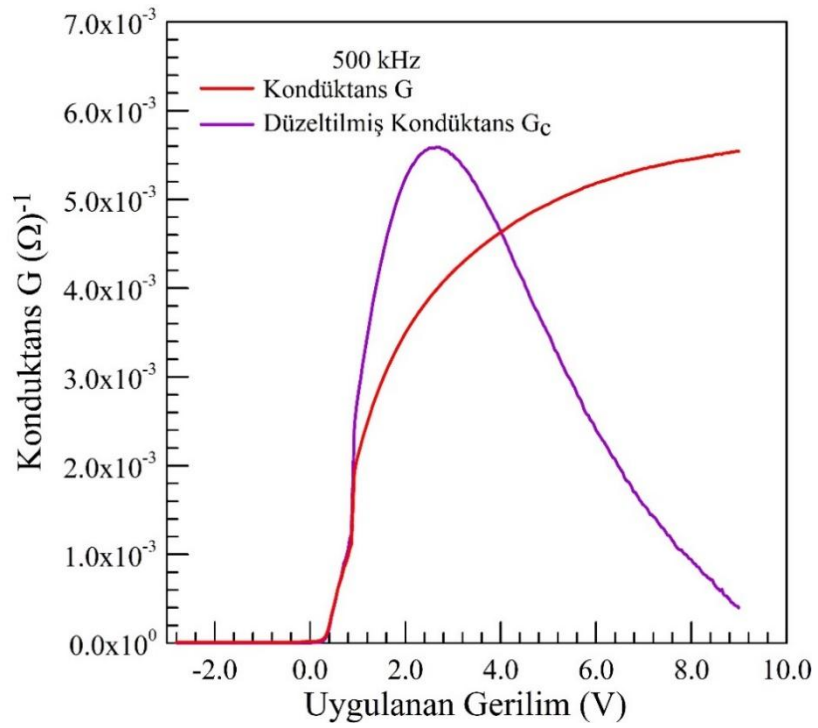
Şekil 3.20 Düzeltilmiş farklı frekanlarda C-V grafiği.



Şekil 3.21 Düzeltilmiş farklı frekanslarda yarı-logaritmik G-V grafikleri



Şekil 3.23 Düzenlenmiş Kapasitans ve normal kapasitans karşılaştırılması Lin-Lin C-V grafiği



Şekil 3.23 Düzeltilmiş ve normal kapasitans karşılaştırılması Lin-Lin C-V grafiği

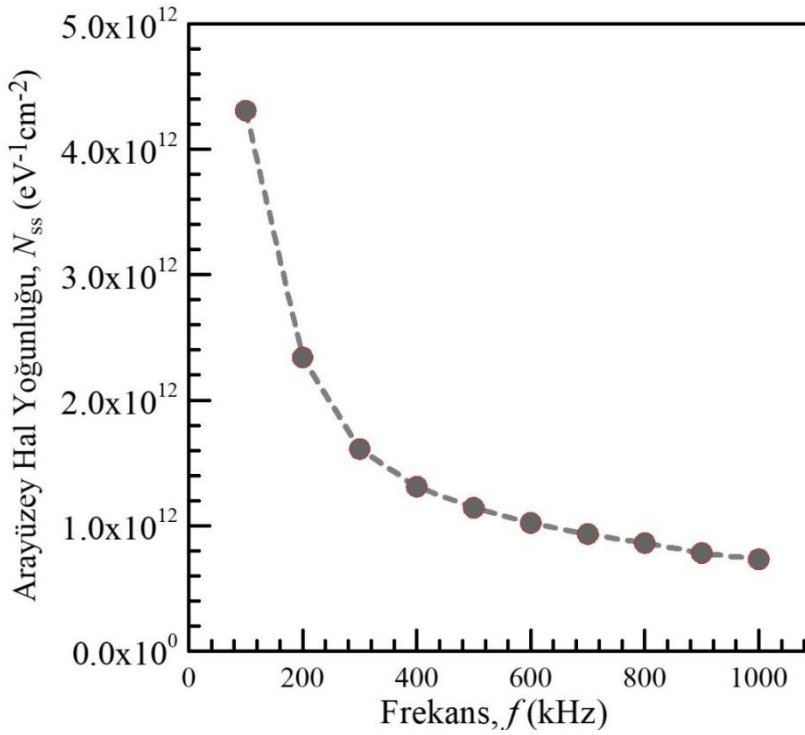
Arayüzey durum yoğunluğunun frekansa bağlı dağılımı aşağıda verilen denkleme göre C-V ve G-V karakteristiklerinden hesaplanmış ve Şekil 3.24 ‘de verilmiştir (Hill & Coleman, 1980).

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{\frac{G_{c,max}}{w}}{\left(\frac{G_{c,max}}{wC_{2ox}}\right)^2 + \left(1 - \frac{C_{max}}{C_{2ox}}\right)^2} \quad (3.19a)$$

Bu ifadede C_{2ox}

$$C_{2ox} = C_{max} \left[1 + \frac{G_{max}^2}{(wC_{max})^2} \right] \quad (3.19b)$$

İle verilir (Nicollian & Goetzberger, 1967). $G_{c,max}$ niceliği Şekil 3.25 ‘de herbir frekanstaki maksimum kondüktans değerleridir. C_{max} ve G_{max} nicelikleri, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de doğru beslem bölgesindeki herbir frekansa karşılık gelen değerlerdir.



Şekil 3.24 Frekansa bağlı arayüzey hallerinin dağılımı grafiği

3.5. Al/SiO₂/p-Si MIS Yapının Dielektrik Özellikleri

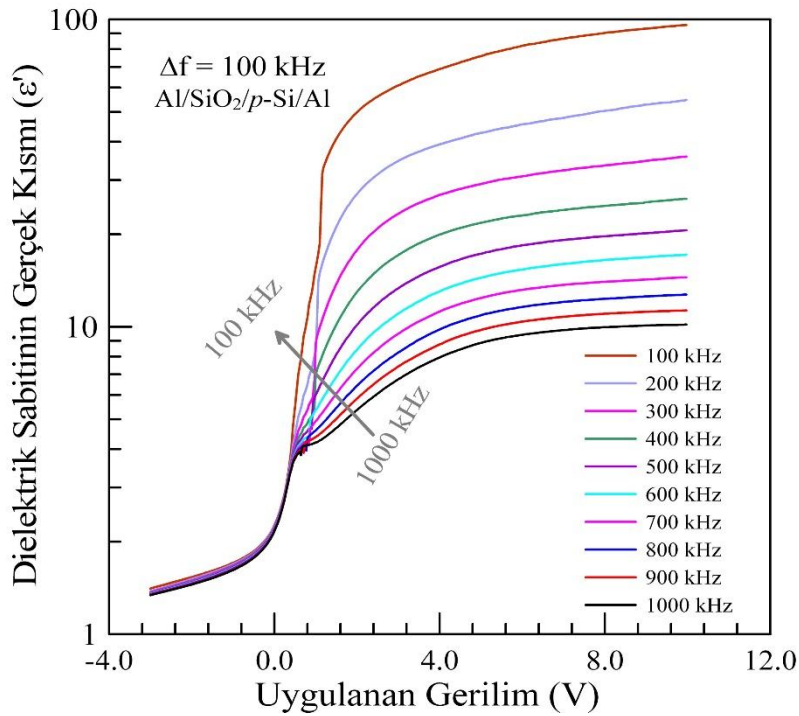
Frekansa bağlı olan ε' , ε'' , σ_{ac} , $\tan(\delta)$, M' , M'' parametreleri Al/SiO₂/p-Si MIS diyodu için 100-1000 kHz aralığındaki deneysel kondüktans değerleri dikkate alınarak hesaplanabilir. Kompleks dielektrik sabiti :

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (3.20)$$

ε' , ε'' değerleri; dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımlarıdır ve i imajiner $\sqrt{-1}$ 'dir. Kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı için

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} = \frac{Cd_i}{\varepsilon_0 A} \quad (3.21)$$

Eşitliği yazılabilir, Eşitlik 3.21'deki C_0 değeri boş kapasitörün sığasını, A doğrultucu kontak alanını (cm²) d_i , arayüzey tabakası SiO₂ 'nin kalınlığını, ε_0 serbest uzay dielektrik sabitini ($\varepsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm) ifade etmektedir.



Şekil 3.25 Dielektrik sabitinin gerilime bağlı farklı frekanslardaki gerçek kısmının grafiği

Doğru beslem (ileri beslem) mevcut yığılma bölgesindeki en yüksek kapasitans değeri arayüzey tabakası kapasitansına eşittir ($C_{ox} = C_i = \epsilon' \epsilon_0 A / d_i$).

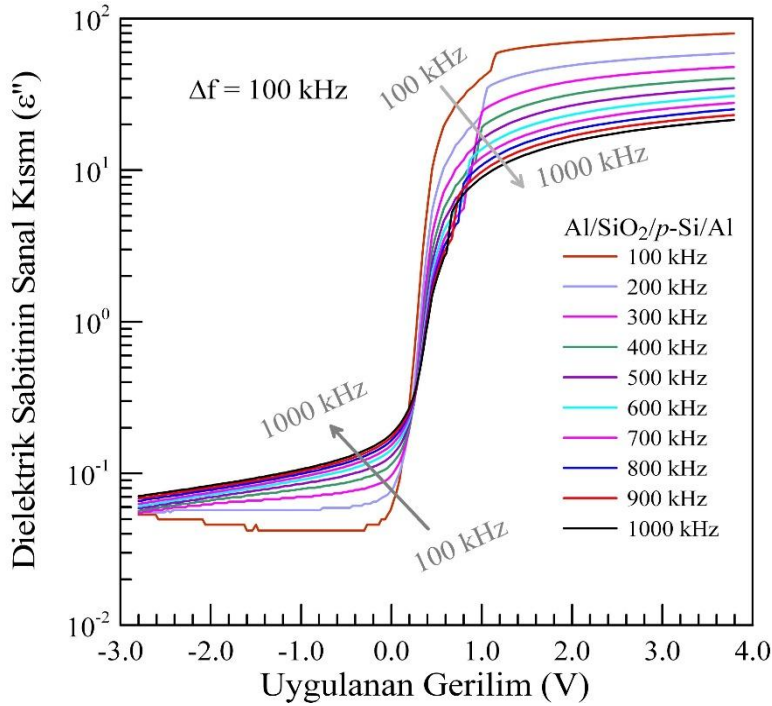
Herbir frekastaki $C-V$ ve $G-V$ grafiklerinin yığılma bölgesindeki yığılma C_{ox} ve G_{ox} değerleri kullanılarak arayüzey tabakası SiO_2 'nin kalınlığı hesaplanabilir. Farklı frekanslarda, kompleks dielektrik sabitinin imajiner kısmı.

$$\epsilon'' = \frac{G_{ox}}{\omega C_i} = \frac{G d_i}{\epsilon_0 \omega A} \quad (3.22)$$

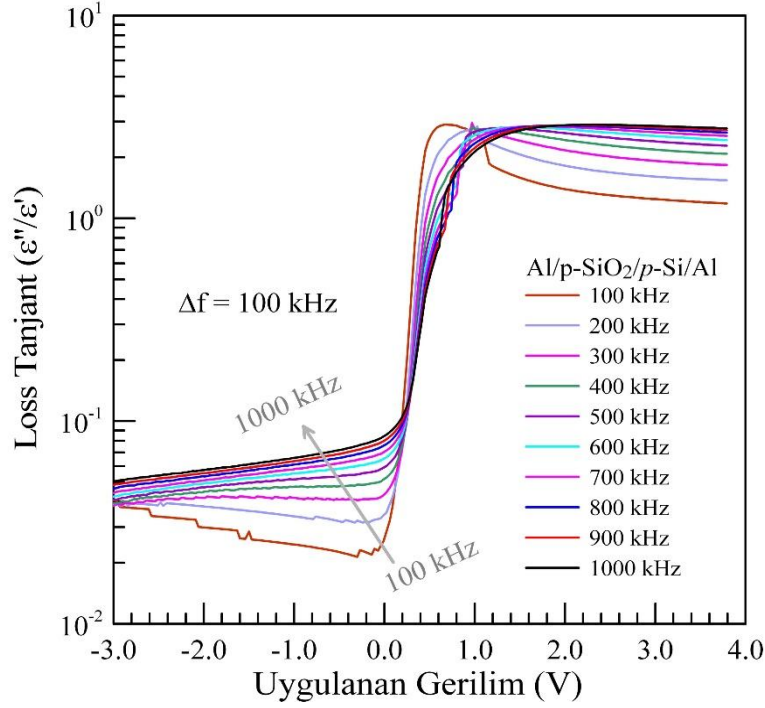
Denklemleri ifade edilebilir. Tanjan Loss, $\tan(\delta)$:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3.23)$$

Şeklinde verilebilir. ϵ' , ϵ'' , $\tan(\delta)$ parametrelerinin farklı frekanslardaki gerilime bağlı grafikleri Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Şekil 3.27 ile verilmiştir. Bu parametrelerin değerleri, ölçülmüş olan kapasitans ve kondüktans değerleri kullanılarak hesaplanmış ve belli bir voltajda frekansa güçlü bir şekilde bağlı bir ilişki görülmektedir.



Şekil 3.26 Dielektrik sabitinin gerilime bağlı farklı frekanslardaki sanal kısmının grafiği



Şekil 3.27 Gerilime bağlı farklı frekanslardaki Loss tanjant değeri

ac elektrik iletkenliği (σ_{ac})

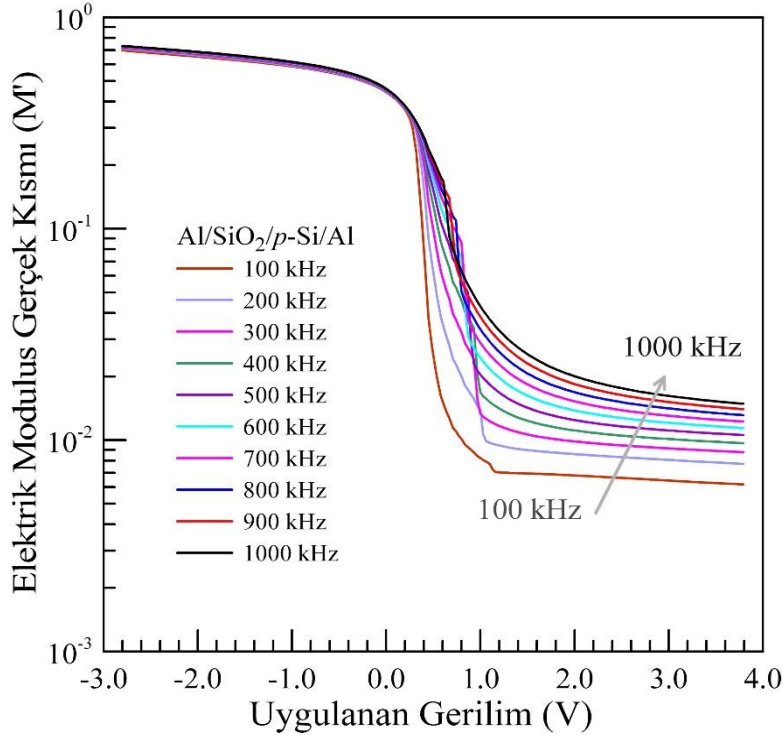
$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta \left(\frac{d}{A} \right) = \epsilon'' \omega \epsilon_0 \quad (3.24)$$

gibi verilebilir; Dielektrik özelliklerin hesaplanmasında yoğunluklu olarak tercih edildiği üzere, bu çalışmada da dielektrik özelliklerinin hesaplanmasında elektrik modülüs formalizmi kullanılacaktır. Kompleks impedans veya kompleks dielektrik sabiti ($\epsilon^* = 1/M^*$) değeri aşağıdaki eşitlik ile modülüs formalizmine dönüştürülebilir:

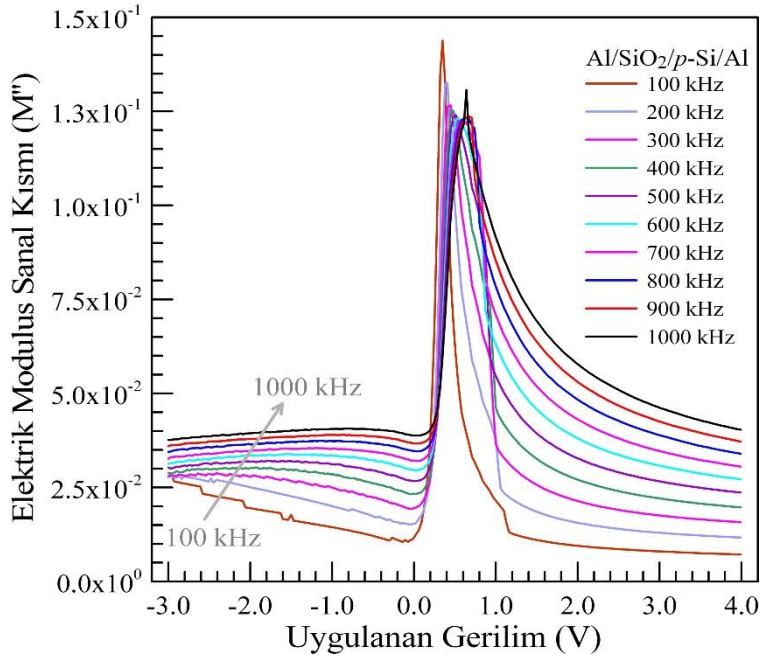
$$M^* = i\omega C_0 Z^* \quad (3.25)$$

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + jM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (3.26)$$

Reel kısım M' , ve imajiner kısım M'' ; ϵ', ϵ'' değerleri kullanılarak hesaplanır. Aşağıdaki Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'de M' ve M'' parametrelerinin gerilime karşı farklı frekanslardaki grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de görülebileceği üzere her iki parametrede gerilim ve frekans değişimlerinden özellikle ters ve doğru beslem bölgelerinde etkilenmektedir.

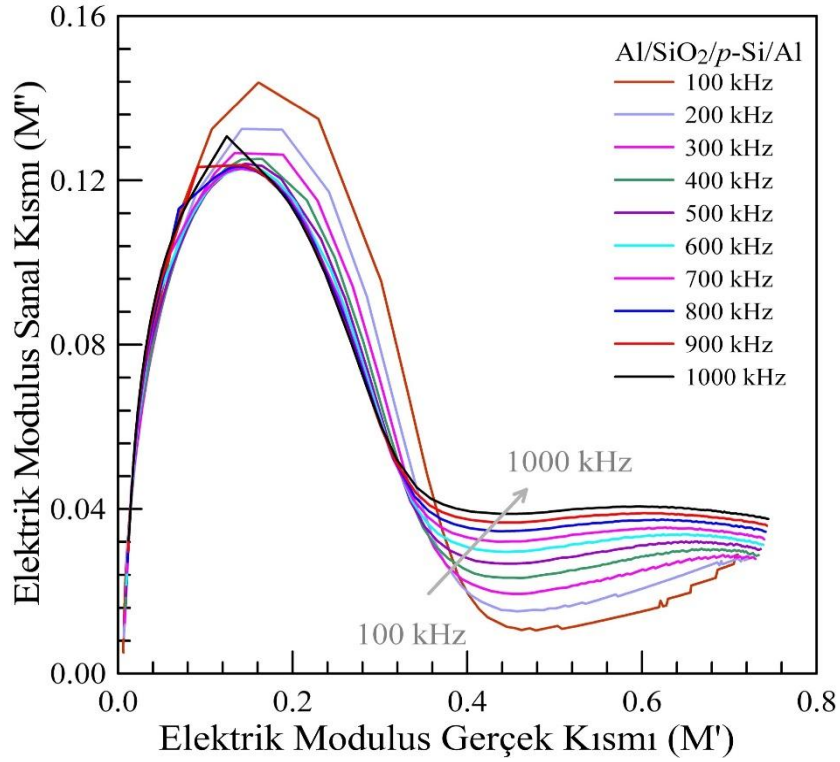


Şekil 3.28 Gerilime bağı, 300K ve farklı frekanslardaki elektrik modülüs reel kısmı grafiği



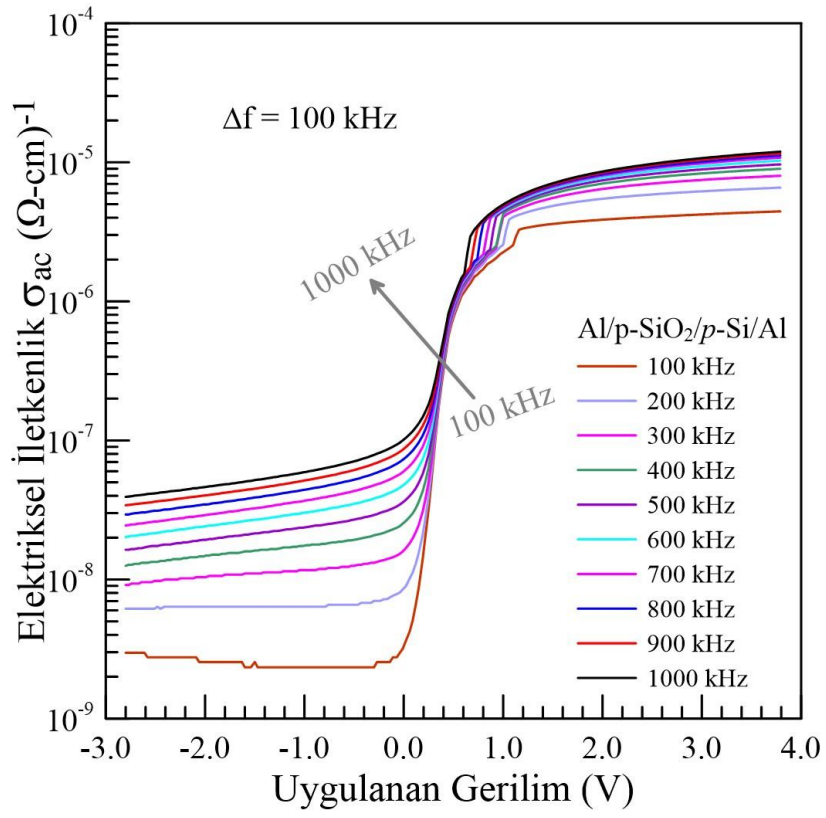
Şekil 3.29 Gerilime bağı, 300K ve farklı frekanslarda elektrik modülüs sanal kısmı grafiği 3.0 – 4.0V aralığında

Malzemelerin empedans davranışını belirlemek için elektrik modulusleri kullanılarak çizilen $M'' \sim M'$ eğrisi ile açıklanabilir. Şekil 3.30, farklı frekanslarda M' - M'' eğrilerini gösterir.



Şekil 3.30 300K farklı frekanslarda elektrik modülüs sanal kısım-gerçek kısmı grafiği

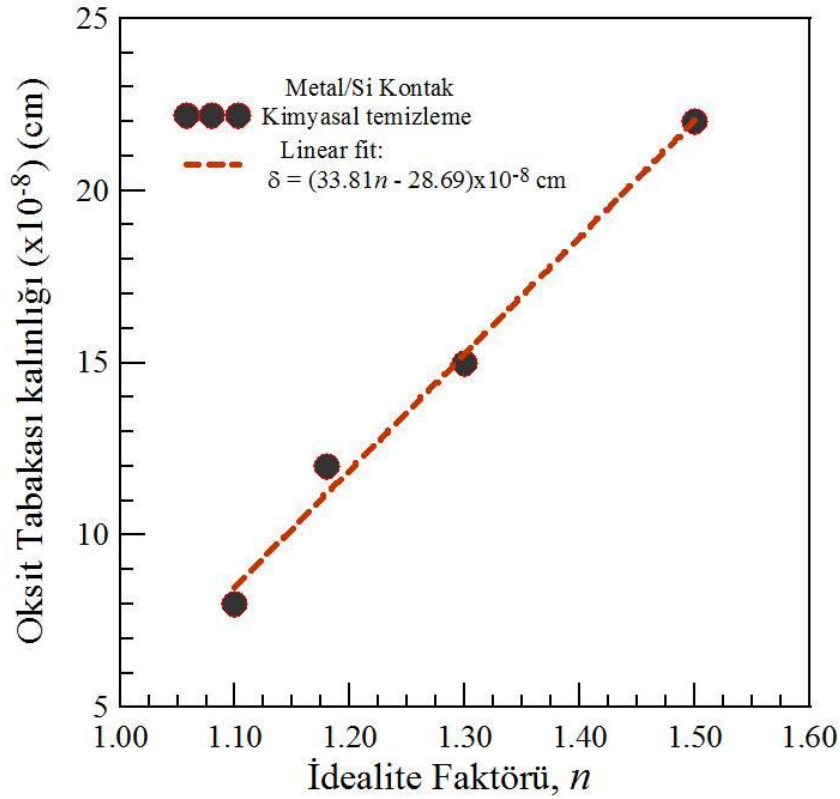
Şekil 3.31 300 K ve farklı frekanslarda ac elektriksel iletkenlik grafiğini gösterir. ac iletkenlik düşük frekans ve gerilimlerde neredeyse sabit olsa da, yüksek frekansta üssel olarak artış göstermiştir. Al/SiO₂/p-Si/Al diyonu için, malzemenin polarizasyonunun artan frekansla azaldığı dolayısıyla artan frekansla elektrik iletkenliğinin arttığı gözlenmiştir. Bu durum Al/SiO₂/p-Si/Al diyonun iletkenliğinin, bir atlama modeline (hopping mechanism) sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.31 300K ve farklı frekanslardaki ac elektriksel iletkenlik grafiği

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneysel olarak karakteristiklerini belirlemeye çalıştığımız Al/SiO₂/p-Si/Al metal/oksit tabaka/yarıiletken (MOS) veya diğer bir adıyla metal/yalıtkan tabaka/yarıiletken (MIS) yapılar edilmiştir. Bu yapı için taban malzeme olarak 1-10 Ω-cm öz direçli p-Si kullanılmıştır. Arka yüzeyi omik kontaklı olan bu Si dilim, laboratuvar ortamında iki hafta kadar (15 gün) bekletilerek ön parlak yüzeyi üzerinde doğal SiO₂ tabakasının oluşması sağlanmıştır. Diyot parametrelerinin elde edilmesi için, yaygın olarak, TE akım denklemleri tercih edilmektedir. Çalışmamızda, elektriksel parametrelerin ölçüm sıcaklığıyla olan ilişkilerinden dolayı, Al/SiO₂/p-Si/Al MIS yapıların farklı ölçüm sıcaklarında akım-gerilim (*I-V*) ve farklı frekanslarda kapasite-gerilim (*C-V*) ölçümleri yapılmış ve yorumlanmıştır.



Şekil 4.1 İdealite faktörün SiO₂ tabakasını kalınlığına bağlı değişimi

Al/SiO₂/p-Si MIS yapının deneysel frekans bağımlı *C-V* ve *G-V* ölçüm verilerinden admittans karakteristikleri ve bu karakteristiklerinden, gerçek ϵ' ve sanal dielektrik

ϵ'' sabiti, loss-tanjant (ϵ''/ϵ'), gerçek M' ve sanal elektriksel modülüs M'' ve ac iletkenlikli σ_{ac} gibi parametreleri hesaplanmıştır.

Herbir numune sıcaklığı için ileri beslem I - V eğrilerinden hesaplanan idealite faktörü n ve potansiyel engel yüksekliği (PEY) Φ_{b0} (I - V) değerleri Tablo 3.1’ de verilmiştir. İdealite faktörü deneysel I - V eğrilerinin terniyonik emisyon (TE) akım modelinden sapmasının bir ölçüsüdür. İdeal bir kontak için n değeri yaklaşık olarak bire eşittir. p -Si tabakasının üst yüzeyindeki SiO_2 tabaka kalınlığını Şekil 4.1’den belirleyebiliriz (Card & Rhoderick, 1971). Bu grafik, ref (Card & Rhoderick, 1971)’deki deneysel idealite faktörü ve ona karşılık gelen SiO_2 tabaka kalınlığı verileri kullanılarak çizilmiştir (Aydın, Akkılıç, & Kılıçoğlu, 2004). Bu oksit tabaka kalınlık hesabı için, Şekil 4.1 grafiğinin datalarına fit denklemi olan $\delta = (33,81n - 28,69) \times 10^{-8}$ cm kullanılabilir. Tablo 3.1’den görüleceği gibi, $\text{Al}/\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ MIS diyot yapısının oda sıcaklığındaki, yaklaşık 300 K, idealite faktörü $n = 2,36$ değeri bu fit denkleminde yerine yazılırsa, SiO_2 tabaka kalınlığı için $\delta = 51,10 \times 10^{-8}$ cm = 51,10 Å = 5,11 nm değeri elde edilir.

Yine, Tablo 3.1 ‘den görüleceği gibi, $\text{Al}/\text{SiO}_2/p\text{-Si}$ MIS diyot için oda sıcaklığı PEY değeri 0,73 eV olarak elde edildi. Bu 0,73 eV değeri, literatürde arayüzey tabakasız $\text{Al}/p\text{-Si}$ metal-yarıiletken (MS) Schottky diyot için verilen 0,58 eV değerinden 0,15 eV kadar daha büyüktür. Huang ve diğerleri (Huang, Lin, Horng, & Chen, 2013), Tascioglu ve diğerleri (Taşcıoğlu, Tan, Yakuphanoglu, & Altındal, 2018), Kocyigit ve diğerleri (Kocyigit, Yıldırım, Sarılmaz, & Ozel, 2019) and Çağlar vd (Caglar, Caglar, Ilcan, & Yakuphanoglu, 2009), 300 K ‘de sırasıyla, $\text{Al}/\text{Alq}_3/p\text{-Si}$ için 0,78 eV, $\text{Al}/(\text{CdZnO})/p\text{-Si}/\text{Al}$ için 0,74 eV, $\text{Au}/\text{Cu}_2\text{WSe}_4/p\text{-Si}$ fotodiyot için 0,82 eV ve $\text{Al}/\text{SnO}_2/p\text{-Si}$ için 0,87 eV değerlerini buldular. Ayrıca, Sekhar et al, (Sekhar, ve diğerleri, 2018) $\text{Al}/(\text{Ta}_2\text{O}_5)_{0,85}(\text{TiO}_2)_{0,15}/p\text{-Si}$ MIS diyot için 300 K ‘de 0,71 eV ve Aldemir vd. (Durmu., Al ‘ I Aldem ‘ Ir, Kökce, Faruk, & Ir, 2017) $\text{Al}/\text{PTh-SiO}_2/p\text{-Si}$ yapı için 300 K ‘de 0,70 eV bulmuştur.

Giriş kısmında ifade edildiği gibi, MS arayüzeyinde ince bir tabaka bulundurmanın bir maksadı da; bu arayüzey tabakası yardımıyla MS kontağın engel yüksekliğini değiştirmektir. MS kontağın, mesela $\text{Al}/p\text{-Si}$ kontağın PEY ‘nden daha düşük PEY ‘li bir diyot küçük sinyalli sıfır beslem doğrultucu ve mikrodalga karıştırıcı olarak

kullanılabilir. Yine, arayüzey tabakasız kontağın PEY'inden daha yüksek PEY'li diyotlarda, gate kontağı (SiO₂ tabaka üzerindeki metal kontak) için kullanışlıdır. Özellikle, arayüzey tabakasız GaAs *n*-tipi kanallı (özellikle artış modunda) MESFET'lerde, artan gate-PEY yüksekliği, devrenin gürültüye dayanma miktarının (noise margins) artmasına vesile olur. *n*-tipi InP ve InGaAs yarıiletken FET'lerde, düşük PEY'li bir Schottky kontak kabul edilemez büyüklükte sızıntı akımının oluşmasına neden olabilir. Bundan dolayı, kontak veya gate metali olarak yüksek PEY'li bir Schottky kontak, FET kullanımı için daha uygundur. Yine, beklenen değerinden daha yüksek PEY'li devre elemanları (aygıtlar) yüzey recombinyonu (tekrar birleşme) ve azınlık taşıyıcı yaşama süresi, taşıyıcı difüzyon sabitlerinin belirlenmesi çalışmalarında kullanılabildikleri gibi, güneş gözeleri ve fotodiyot gibi optik dedektör olarak da kullanılabilirler (Rhoderick & Williams, 1988; Sze & M., Physics of semiconductor devices 2nd edition, 1981).

Ölçüm sıcaklığına bağlı olarak yapılan ölçümler, diyot parametrelerinin beklenilenden farklı çıkmasına sebep olabilir. Şekil 3.5'den görüleceği gibi, MIS diyot yapısına ait farklı sıcaklıklarda hesaplanmış PEY değerleri artan ölçüm sıcaklığıyla artmaktadır. Bu istenmeyen sonuç, Şekil 2.7'de çizilen MS Schottky kontağın enerji-band diyagramında tanımlandığı şekliyle, PEY 'in yanal (lateral) olarak homojen veya uniform (tekdüze) olmayışından ileri gelebilir. Yani PEY, MS yanal arayüzey boyunca aynı değerde olmadığından, azalan sıcaklıkla akım taşıyıcılarının daha düşük PEY 'den geçmeyi tercih ederler. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'ya bakıldığında görülür ki, azalan sıcaklıkla PEY değeri azalmakta ve idealite faktörü değeri artmaktadır. İnhomojen engel yükseklikli Schottky diyotlar sıcaklığa bağlı olarak böyle bir davranış gösterirler. Engel yüksekliği-sıcaklık grafiği, sıcaklığa bağlı olarak lineer bir davranış göstermiştir. Engel yüksekliğinin azalan sıcaklıkla azalarak lineer bir davranışı MIS diyotlar için beklenen deneysel bir sonuçtur.

Yukarıda sayılan faktörlerden dolayı, aktivasyon enerjisi (Richardson grafiği) grafiğinde de lineerlikte sapma gözlemlenir. Şekil 3.4'de her bir sıcaklıktaki ileri beslem *I-V* eğrisinin *V=0* karşılık gelen doyma akım değerleriyle çizilen Richardson eğrileri, Al/SiO₂/p-Si diyonu için, $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ ve $(nkT)^{-1}$ olarak Şekil 3.7'de ve ilgili parametreleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Deneysel verilerden çizilmiş olan $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ grafiğinin sıcaklığa bağlı olarak lineerlikten sapmasının sebebi, bariyer yüksekliğinin uzaysal inhomjenliği, yani yüksek ve düşük bariyer bölgeleri içeren ara yüzeydeki potansiyel dalgalanmalardan ileri gelebilir. Böyle bir durumda, akım düşük bariyer yüksekliğinden akmayı tercih edecektir. Bu bağlamda, $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ grafiğinde, düşük sıcaklıklardaki nonlineerliğin sebebi, bariyer yüksekliğinde ortaya çıkan yanal inhomjenliğin artışıdır, $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ grafiği Gaussian dağılımı kullanılarak lineer hale getirilebilir.

TE akım teorisine bağlı olarak, klasik Richardson eğrisi [$\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ veya $(nkT)^{-1}$ grafiği] potansiyel engel yüksekliğini (PEY) ve taban malzeme olarak kullanılan *p*-tipi silisyumun Richardson sabitini verir. Şekil 3.7’de 200 K’den itibaren düşük sıcaklıklara doğru $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ grafiğinin lineerlikten saptığı görülmektedir. Bu grafiğin lineer kısmına yapılan fitten 0,17 eV’luk bir PEY değeri elde edilmiştir. Ölçüm sıcaklık aralığında lineer olan $\ln(I_0/T^2) \sim (n kT)^{-1}$ grafiği de 0,60 eV’luk bir PEY değeri vermiştir. $\ln(I_0/T^2) \sim (kT)^{-1}$ grafiği Gaussian dağılımı kullanılarak lineer hale getirilip beklenen değerlere yakın değerler elde edilebilir. Bunun için

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi} - \frac{q\sigma_0^2}{2kT} \quad (3.6)$$

eşitliği kullanılabilir (Çetin, Şahin, Ayyildiz, & Türüt, 2005; Kocyigit, Yıldırım, Sarılmaz, & Ozel, 2019; Taşcıoğlu, Tan, Yakuphanoglu, & Altındal, 2018; Caglar, Caglar, Ilican, & Yakuphanoglu, 2009; Sekhar, ve diğerleri, 2018; Güçlü, Özdemir, Kökce, & Altındal, 2016; Werner & Güttler, 1991). Bu eşitliğe göre, aşağıda verilen $\Phi_{ap} \sim (2kT)^{-1}$ grafiğinin lineer bir davranış göstermesi, Şekil 3.5’deki sıcaklığa bağlı engel yüksekliği değerlerinin Gaussian dağılım modeline uyarak azalan sıcaklıkla azaldığı söylenebilir (Akın & Yüksel, 2018; Nezhadesm-Kohardafchahi, ve diğerleri, 2018; Şafak Asar, Asar, Altındal, & Özçelik, 2015; Güçlü, Özdemir, Kökce, & Altındal, 2016). Bu durumda, Gaussian dağılımına göre modifiye edilmiş TE modeli kullanılarak diyot parametrelerinin beklenen değerlerine yakın değerler hesaplanabilir.

Hesaplamış olduğumuz sıcaklık bağımlı PEY değerlerinin Gaussian dağılımına göre ortalama değer $\bar{\Phi}_b$ ve standart sapma σ_s şeklinde ifade edilen parametrelerle

değerlendirilebileceğini söyleyebiliriz. Şekil 3.4’de her bir sıcaklıktaki ileri beslem I - V eğrisinden elde ettiğimiz $\Phi_{ap} = \Phi_{b0}$ değerleri kullanılarak denklem (3.6)’ya göre çizilen $\Phi_{ap} \sim (2kT)^{-1}$ grafiği (Şekil 3.8), ortalama bariyer yüksekliği $\bar{\Phi}$ değerini ve standart sapmayı σ_0 verir. Şekil 3.8’de biri düşük sıcaklık bölgesinde ve diğeri yüksek sıcaklık bölgesinde olmak üzere iki lineer bölge, yani, iki adet Gaussian dağılımı bulunmaktadır. Bu iki bölge, iki farklı $\bar{\Phi}$ ve σ_0 değeri vermektedir. Şekil üzerinde verilen bu değerlerin, yüksek sıcaklık bölgesinden $\bar{\Phi}1 = 1,15$ eV, $\sigma1_0 = 147,65$ mV ve düşük sıcaklık bölgesinden $\bar{\Phi}2 = 0,69$ eV, $\sigma_0 = 83,66$ mV olduğunu görebiliriz. Standart sapma, engel yüksekliği inhomojenliğinin bir ölçüsüdür. Yüksek sıcaklık bölgesinde $\sigma1_0 = 147,65$ mV değerindeki standart sapma değeri $\bar{\Phi}1 = 1,15$ eV ‘nin yaklaşık %12,84 ve düşük sıcaklık bölgesinde $\sigma_0 = 83,66$ mV değeri $\bar{\Phi}2 = 0,69$ eV ‘nin yaklaşık %12,12 olarak belirlenir. Yani, her iki bölge için standart sapmanın değeri, ortalama bariyer yüksekliğine oranının yaklaşık %10 ‘luk değeri, bizi bariyer inhomojenliğinin fazla olmadığı sonucuna götürebilir.

Şekil 3.9, Denklem (3.8)’e göre her iki sıcaklık bölgesi için modifiye edilmiş deneysel değerlere çizilen Richardson grafiği $\ln(1/T^2) - q^2\sigma_s^2/2k^2T^2 \sim (kT)^{-1}$ verir. Bu grafiği çizmek için, Tablo 3.1 ‘de verilen her bir sıcaklıktaki deneysel ileri beslem I_0 doyma akım değerleri, ayrıca, Şekil 3.8 de iki bölge için elde edilen $\sigma1_0$ ve $\sigma2_0$ değerleri denklem (3.8)’de kullanılmıştır. Şekil 3.9 da yüksek sıcaklık bölgesinde ortalama veya homojen PEY için $\bar{\Phi}1 = 1,16$ eV düşük sıcaklık bölgesi için $\bar{\Phi}2 = 0,70$ eV elde edilmiştir. Bu değerler Şekil 3.8 deki $\Phi_{ap} \sim (2kT)^{-1}$ grafiğinden elde edilen değerlere çok yakındır (Badalı, Altındal, & Uslu, 2018).

Şekil 3.11 ‘de ileri beslem I - V eğrileri belli bir beslem değerinden sonra lineerlikten sapar, yani yüksek voltaj veya akım bölgesinde bu eğrilerde aşağı doğru bir bükülme olur. Bu bükülme MIS diyotun seri direnci olan R_s ‘den ileri gelir, Lineerlikten sapma artan seri direnç değeriyle daha düşük voltajlardan başlar ve böylece I - V eğrisinin lineer kısmı daha dar bir voltaj aralığına düşmüş olur. PEY değerinin düşük ve idealite faktörü değerinin yüksek çıkma sebeplerinden biri de budur. Al/SiO₂/p-Si/Al MIS diyodun seri direnci R_s , sırasıyla, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11, verilerden her bir sıcaklıktaki $dV/d(\ln I) \sim I$ ve $H(I) \sim I$ grafiklerinden belirlenmiştir. Eşitlik 3.9 ‘a göre çizilen Şekil 3.10 ‘daki doğruların eğimleri seri direnci, grafiğin düşey eksenini kesişim

noktası da (nkT/q) değerini verir. Eşitlik 3.10'a göre çizilen Şekil 3.11'deki $H(I) \sim I$ grafikleri de, eğimleri seri direnci ve düşey eksen kesişim noktaları da PEY değerlerini verir. Elde edilen değerler Tablo 3.2 'de verilmiştir. Tablo 3.2 'den görüldüğü gibi, her iki grafikten bulunan R_s değerleri birbiriyle yakın uyuma içindedirler ve azalan sıcaklıkla R_s değeri artmıştır. Örnek olarak, 300 K 'de 4,67 k Ω ve 120 K'de 24,27 k Ω değerleri elde edilmiştir. Bundan başka, Şekil 3.12, MIS diyoda ait Şekil 3.4'de verilen her bir sıcaklıktaki ters ve ileri beslem I - V eğrilerinden Ohm Kanunu kullanılarak hesaplanan direnç değerlerini gösterir. Bu Grafiklerde, ileri belem tarafı seri direnci R_s ve ters beslem tarafı da paralel yani şant direnci R_p vermektedir. İleri beslem tarafında belli bir voltaja karşılık gelen her bir sıcaklıktaki seri direnci R_s değerleri hemen hemen Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 'den elde edilen değerlere yakın değerlerdir. R_p direncinin her bir sıcaklıkta uygulanan gerilim boyunca sabit kalması diyodun kalite ve performansının bir delilidir. Bilhassa, yüksek sıcaklıkta voltaja karşı seri direnç grafiğinde R_p direncinin gerilim boyunca sabitliği açık olarak göze çarpmaktadır.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 'de, oda sıcaklığında farklı frekanslarda ölçülen (~ 300 K) kapasitans- uygulanan potansiyel farkı (C - V) ve kondüktans-uygulanan potnsiyel farkı (G - V) karakteristikleri verilmiştir. Negatif gerilim veya ters beslem altında, görüldüğü üzere, kapasitans ve kondüktans değerinde frekansa bağlı bir değişme gözlenmemiştir. Yani, ters beslem altında belli bir voltajda frekansa bağlı olarak C - V eğrilerinde bir değişim olmazken, G - V eğrilerinde kondüktans artan frekansla artmıştır. Ayrıca, ters beslem altında, -4 V 'dan 0,0 V 'ta doğru, her bir frekansta, kapasitans artmıştır. Ancak pozitif gerilim veya ileri beslem altında, belli bir voltajda, kapasitans ve kondüktans değerleri frekans ile ters orantılı olarak değişmektedir. Şekil 3.15, frekansa bağlı olarak potansiyel farkına karşı faz açısı grafiğini gösterir. Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 'de, farklı frekanslara bağlı C - V ve G - V eğrilerinin doyum bölgesi (birikim) dikkate alınarak p -Si taban malzeme üzerindeki doğal oksit SiO_2 tabakanın kapasitans değeri C_{ox} ve bu tabakanın kalınlığı, seri direnç gibi parametreler hesaplanmış ve bu parametrelerden bazıları Tablo 3.4 'de verilmiştir.

MIS diyodun farklı frekanslardaki ters beslem C^{-2} - V grafiği Şekil 3.16' de verilmiştir. Bu grafikten hesaplanan PEY Φ_{CV} ve serbest taşıyıcı yoğunluğu N_A gibi

parametrelerinin frekansa bağılı grafikleri ve Şekil 3.17 ve (A) ve (B) 'de verilmiştir. Şekil 3.17, 300 K'de frekans ile engel yüksekliği değerleri (A) : C^2-V eğrilerinin yaklaşık -1,0 V ile -3,0 V aralığı için, (B) : C^2-V eğrilerinin yaklaşık 0,0 V ile -1,0 V aralığı için verilmiştir. Şekil 3.18, 300K'de frekansa bağılı serbest taşıyıcı yoğunluğu değerleri (A) : C^2-V eğrilerinin yaklaşık -1,0 V ile -3,0 V aralığı için, (B) : C^2-V eğrilerinin yaklaşık 0,0 V ile -1,0 V aralığı için çizilmiştir. Şekil 3.18 (A) ve (B) göz önüne alındığında, (A) 'da serbest taşıyıcı yoğunluğu N_A değerleri artan frekansla artmıştır. Bu artan frekansla ac sinyalini izleyen ve p -Si ile dengede olan arayüzey hallerinin, yasaklanmış band aralığında valans bandından iletkenlik bandına doğru, serbest taşıyıcı yoğunluğuna olan katkısının arttığını söyleyebiliriz. (B) 'de ise, serbest taşıyıcı yoğunluğu N_A değerleri artan frekansla azalmıştır. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü, artan frekansla p -Si ile dengede olan ve ac sinyalini izleyebilen arayüzey hallerinin yoğunluğu oldukça azalır ve p -Si taban malzemenin beklenen gerçek N_A değerine yaklaşmış olunur.

Şekil 3.13'de görüleceği üzere; $C-V$ eğrilerinde, inversiyon (tersinim), tükenim (arınma) (depletion) ve birikim (accumulation) bölgeleri mevcuttur. Kondüktans ve kapasitans değerleri, grafiklerden görülebileceği üzere pozitif beslem altında birikim bölgesine kadar artmaya devam etmektedir. Yığılma veya birikim bölgesi ileri beslem bölgesine karşılık gelir ve hem kapasitans hem de kondüktans eğrileri bu bölgede doyuma ulaşmışlardır. Bu bölgedeki her bir frekanstaki G_{ma} ve C_{ma} değerleri denklem (3.16) 'da kullanılarak yığılma bölgesi sabit direnç yükselen frekansla beraber toplam diyot kapasitansı tükenme kapasitansının yanında frekansa bağılı ve elektron emisyonu ile ilgili olarak yavaş yanıt veren derin kirlilik seviyelerinden kaynaklı toplam dirençten de etkilenir (Nicollian & Goetzberger, 1967).

Şekil 3.19 'deki $R_s \sim V$ grafikleri her bir frekasta doğru beslem tarafında 0.0 ve yaklaşık 1.0 Volt aralığında bir pike sahiptirler. Düzeltilmiş kondüktans eğrileri arınma bölgesinde bir tepe değeri verir (Şekil 3.23, Şekil 3.23). Ölçülmüş deneysel $C-V$ ve $G-V$ dataları kullanılarak 3.17 ve 3.18 eşitlikleri vasıtasıyla düzeltilmiş (corrected) $C_c \sim V$ ve $G_c \sim V$ grafikleri Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de verilmiştir. Hesaplama yapılırken, denklem (3.19) 'da her bir frekans için yığılma bölgesi sabit direnç R_{ss} değerleri kullanılmıştır.

Bir dielektrik malzeme, bir elektrik alan altında polarize olabilen bir yalıtkandır. Bir dış elektrik alan altında elektrik yükleri bu dielektrik malzeme boyunca bir akım oluşturmaz, fakat yüklerin denge durumundaki konumlarında bir değişim olur. Dolayısıyla, dielektrik malzeme polarize olur ve böylece içerisinde bir elektrik alan oluşur. Malzeme içerisinde oluşan bu elektrik alan kısmen, dışarıdan uygulanan elektrik alanı dengelemeye çalışır. Özellikle de metallerde bu iç elektrik alan uygulanan dış elektrik alanı sıfırlayınca kadar devam eder. Yaygın olarak kullanılan "yalıtkan" terimi düşük elektriksel iletimi ima etmesine rağmen, "dielektrik" tipik olarak yüksek polarize olma yeteneği olan malzemeleri tanımlamak için kullanılır. Bu da "*dielektrik sabiti*" denilen bir büyüklükle ifade edilir (Murarka, Eizenberg, & Sinha, 2003).

DeneySEL sonuçlara göre, frekans ve potansiyel farkına bağlı olarak kompleks dielektrik sabitinin gerçek ϵ' ve sanal ϵ'' kısımları ve loss tanjant $\tan(\delta)$, parametrelerinin farklı frekanslarda gerilime bağlı grafikleri Şekil 3.25, Şekil 3.26, Şekil 3.27 ile verilmiştir. Bu parametrelerin değerleri, ölçülmüş olan kapasitans ve kondüktans değerleri kullanılarak hesaplanmış ve belli bir voltajda frekansa güçlü bir şekilde bağlı bir ilişki gözlenmiştir. Frekansa bağlı olarak MIS yapının dielektrik sabiti veya dielektrik özelliklerinin değişimi, esas olarak, elektrik dipol kutuplanmasına, arayüzey kutuplanmasına ve arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımına bağlıdır. Yapıdaki iletkenlik veya iletim (conduction) ve hopping mekanizması hakkında detaylı bilgi edinmek için, voltaj ve frekans bağımlı admittans ölçümlerine ihtiyaç duyulur. Dielektrik sabitinin azalan frekansla artan bu değerleri, muhtemel bir arayüz polarizasyon mekanizmasının varlığına bağlanabilir, çünkü arayüz durumları *ac* sinyalinin düşük frekanslarda izleyebilir ve hem kapasitans hem de dielektrik değerlere katkıda bulunabilir. ϵ' ve sanal ϵ'' 'deki frekansa bağlı bu dağılım Maxwell–Wagner'e ve uzay yük polarizasyonuna bağlanabilir

Şekil 3.28, Şekil 3.29'da, M' ve sanal M'' parametrelerinin gerilime karşı farklı frekanslardaki grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de görülebileceği üzere, her iki parametre de yaklaşık 0.0 V ile 1.0 V gerilim aralığında her bir frekansta gerilime bağlı bir değişim gösterirken, diğer voltaj aralıklarında değişen voltaja rağmen hemen hemen sabit kalmaktadırlar. $M' \sim V$ ve $M'' \sim V$ grafikleri Eşitlik 3.25 ve Eşitlik 3.26

kullanılarak hesaplanmıştır. Özellikle 0.0 V ile 1.0 V gerilim aralığında, her bir frekansta M'' bir pik göstermekte olup bu pik yüksekliği frekans arttıkça arayüzey durumlarının/tuzaklarının etkisiyle azalmaktadır. Ayrıca bu davranış dielektrik rölaksasyon (durulma) mekanizmasının frekansa olan hassasiyetinden ziyade uygulanan öngerilim voltajı ile ilgilidir. $M'' \sim M'$ eğrilerinde, ters beslem ve arınma bölgesindeki pik değerleri MIS yapıdaki arayüzey tuzakların parçacık yoğunluk dağılımı ve bunların durulma zamanı ile ilgilidir. Öte yandan M' değeri minimum değerinde iken M'' değeri maksimum değerine ulaşmaktadır, bu durum SiO_2 katmanına bağlı olarak oluşan indükleyici davranış ve durulma süreci nedeniyle, $M_\infty = 1/\epsilon_\infty$ değerinde maksimumuna ulaşır.

Malzemelerin empedans davranışı, elektrik modülüsleri kullanılarak çizilen $M'' \sim M'''$ eğrisi ile açıklanabilir. Şekil 3.28, Şekil 3.29, farklı frekanslarda $M'' \sim M'$ eğrilerini gösterir. Kompleks koordinat düzlemi üzerinde, tüm frekanslar için farklı yarıçaplı bombeli bir yarım daire gözlemlenmiştir. Özellikle düşük frekanslarda, elektrik modülüsünün $M'' \sim M'$ diyagramını durulma işlemleri oluşturmaktadır. Arayüzey polarizasyonu, düşük frekansta aşırı hassastır ve mobil şarj taşıyıcıların, bariyerlerin taşınmasını sağlayan fiziksel bir bariyer tarafından kesilmesi durumunda oluşur. Ayrıca, grafikte gözlenen yarım daire biçimleri, tane sınırlarının dirençliliğine karşılık gelmektedir. Özellikle düşük frekanslarda gözlenen yarım daire biçimleri, baskın yarıiletken ve arayüzey tabakasının etkilerinden ziyade arayüzey hallerinin ve yüklerinin katkısına karşılık gelir.

Sonuç olarak, MIS diyotta arayüzey doymamış bağların arayüzey SiO_2 tabakası vasıtasıyla doymaları ve bu tabakanın arayüzeyde varlığı sebebiyle, diyot engel yüksekliğinin artmasına katkıda bulunmuştur. Yüksek PEY'li diyotlarda, gate kontağı (SiO_2 tabaka üzerindeki metal kontak) için kullanışlıdır. Özellikle, MESFET 'lerde, artan gate-PEY yüksekliği, devrenin gürültüye dayanma miktarının (noise margins) artmasına ve yarıiletken FET'lerde sızıntı akımının düşük değerlerde kararlı kalmasını sağlar. Bundan dolayı, kontak veya gate metali olarak yüksek PEY'li bir Schottky kontak, FET kullanımı için çok uygundur.

KAYNAKÇA

- Akın, Ü., & Yüksel, Ö. (2018, 9 13). Frequency and voltage dependence of electrical modulus and dielectric studies of spin coated perylene–diimide (PDI) organic semiconductor films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(17), 15183-15190.
- Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., & Tataroğlu, A. (2003, 10 1). The role of interface states and series resistance on the I–V and C–V characteristics in Al/SnO₂/p-Si Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 47(10), 1847-1854.
- Aydin, M., Akkiliç, K., & Kılıçoğlu, T. (2004, 10 30). The importance of the neutral region resistance for the calculation of the interface state in Pb/p-Si Schottky contacts. *Physica B: Condensed Matter*, 352(1-4), 312-317.
- Badali, Y., Altındal, Ş., & Uslu, İ. (2018, 6 1). Dielectric properties, electrical modulus and current transport mechanisms of Au/ZnO/n-Si structures. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(3), 325-331.
- Biber, M. (2003, 1 1). Low-temperature current–voltage characteristics of MIS Cu/n-GaAs and inhomogeneous Cu/n-GaAs Schottky diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 325, 138-148.
- Caglar, Y., Caglar, M., Ilıcan, S., & Yakuphanoglu, F. (2009, 10). Determination of the electronic parameters of nanostructure SnO₂/p-Si diode. *Microelectronic Engineering*, 86(10), 2072-2077.
- Card, H., & Rhoderick, E. (1971, 10 1). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 319.
- Çetin, H., Şahin, B., Ayyildiz, E., & Türüt, A. (2005, 7). Ti/p-Si Schottky barrier diodes with interfacial layer prepared by thermal oxidation. *Physica B: Condensed Matter*, 364(1-4), 133-141.
- Çetinkaya, H., Yıldırım, M., Durmuş, P., & Altındal, Ş. (2017, 10 15). Correlation between barrier height and ideality factor in identically prepared diodes of Al/Bi₄Ti₃O₁₂/p-Si (MFS) structure with barrier inhomogeneity. *Journal of Alloys and Compounds*, 721, 750-756.
- Chand, S., & Kumar, J. (1997, 10 1). Electron transport and barrier inhomogeneities in palladium silicide Schottky diodes. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 65(4-5), 497-503.
- Cheung, S., & Cheung, N. (1986, 7 14). Extraction of Schottky diode parameters from forward current- voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
- Cowley, A., & Sze, S. (1965, 10). Surface States and Barrier Height of Metal- Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212-3220.
- Durmuş, D., Alı Aldemir, D., Kökce, A., Faruk, A., & Ir, Ö. (2017). Temperature effects on the electrical characteristics of Al/PTh–SiO₂/p-Si structure. *Bull. Mater. Sci.*, 40(7), 1435-1439.

- Eglash, S., Newman, N., Pan, S., Mo, D., Shenai, K., Spicer, W., . . . Collins, D. (1987, 6). Engineered Schottky barrier diodes for the modification and control of Schottky barrier heights. *Journal of Applied Physics*, 61(11), 5159-5169.
- Ejderha, K., Yıldırım, N., Türüt, A., & Abay, B. (2012, 1 28). Temperature-dependent I-V characteristics in thermally annealed Co/p-InP contacts. *The European Physical Journal Applied Physics*, 57(1), 10102.
- Energy Band Theory. (tarih yok). *Physics of Semiconductor Devices* (s. 1-49). içinde Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Güçlü, Ç., Özdemir, A., Kökce, A., & Altındal, Ş. (2016, 7). Frequency and Voltage-Dependent Dielectric Properties and AC Electrical Conductivity of (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs with Thin Al₂O₃ Interfacial Layer at Room Temperature. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 325-330.
- Hardikar, A., Karandikar, M., & Bhonde, R. (1999, 8). Effect of partial pancreatectomy on diabetic status in BALB/c mice. *The Journal of endocrinology*, 162(2), 189-95.
- Hill, W., & Coleman, C. (1980, 9 1). A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid-State Electronics*, 23(9), 987-993.
- Huang, W., Lin, T.-C., Horng, C.-T., & Chen, C.-C. (2013, 7). Barrier heights engineering of Al/p-Si Schottky contact by a thin organic interlayer. *Microelectronic Engineering*, 107, 200-204.
- Karatas S, Altındal S, Turut A, O. (2017, 11). Temperature dependence of characteristic parameters of the H-terminated Sn/p-Si(100) Schottky contacts. *Applied Surface Science*, 423, 250-260.
- Kocyigit, A., Yıldırım, M., Sarılmaz, A., & Ozel, F. (2019, 4 5). The Au/Cu₂WSe₄/p-Si photodiode: Electrical and morphological characterization. *Journal of Alloys and Compounds*, 780, 186-192.
- Mönch, W. (2001). *Semiconductor Surfaces and Interfaces* (Cilt 26). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Murarka, S., Eizenberg, M., & Sinha, A. (2003). *Interlayer dielectrics for semiconductor technologies*. Amsterdam: Elsevier/Academic Press.
- Nezhadesm-Kohardafchahi, S., Farjami-Shayesteh, S., Badali, Y., Altındal, Ş., Jamshidi-Ghozlu, M., & Azizian-Kalandaragh, Y. (2018, 11 1). Formation of ZnO nanopowders by the simple ultrasound-assisted method: Exploring the dielectric and electric properties of the Au/(ZnO-PVA)/n-Si structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 86, 173-180.
- Nicollian, E., & Brews, J. (1982). *MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology*. Wiley.
- Nicollian, E., & Goetzberger, A. (1967, 7 8). The Si-SiO₂ Interface - Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. *Bell System Technical Journal*, 46(6), 1055-1133.
- Ohdomari, I., & Tu, K. (1980, 7 9). Parallel silicide contacts. *Journal of Applied Physics*, 51(7), 3735-3739.

- Osvald, J. (2006, 4). Intersecting behaviour of nanoscale Schottky diodes I–V curves. *Solid State Communications*, 138(1), 39-42.
- Pakma, O., Tozlu, C., Kavasoglu, N., Kavasoglu, A., & Ozden, S. (2011, 4 29). I–V–T analysing an inhomogeneous Au/Poly(4-vinyl phenol)/p-Si structure with a double Gaussian distribution of barrier heights. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 58(1), 244-250.
- Paoli, T. (1976, 11 15). Determination of the lasing threshold in stripe- geometry double- heterostructure junction lasers. *Applied Physics Letters*, 29(10), 673-675.
- Polat, O., Coskun, M., Coskun, F., Zengin Kurt, B., Durmus, Z., Caglar, Y., . . . Turut, A. (2019, 5 30). Electrical characterization of Ir doped rare-earth orthoferrite YbFeO₃. *Journal of Alloys and Compounds*, 787, 1212-1224.
- Rhoderick, E., & Williams, R. (1988). *Metal-semiconductor contacts*. Clarendon Press.
- Şafak Asar, Y., Asar, T., Altındal, Ş., & Özçelik, S. (2015, 9 12). Dielectric spectroscopy studies and ac electrical conductivity on (AuZn)/TiO₂/p-GaAs(110) MIS structures. *Philosophical Magazine*, 95(26), 2885-2898.
- Schottky, W. (1926, 10). On the Origin of the Super-Heterodyne Method. *Proceedings of the IRE*, 14(5), 695-698.
- Sekhar, M., Reddy, N., Reddy, B., Prakash, B., Akkera, H., Uthanna, S., & Park, S.-H. (2018, 3 15). Influence of substrate bias voltage on crystallographic structure, optical and electronic properties of Al/(Ta₂O₅)_{0.85}(TiO₂)_{0.15}/p-Si MIS Schottky barrier diodes fabricated by dc magnetron sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 76, 80-86.
- Song, Y., Van Meirhaeghe, R., Laflère, W., & Cardon, F. (1986, 6 1). On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid-State Electronics*, 29(6), 633-638.
- Sullivan, J., Tung, R., Pinto, M., & Graham, W. (1991, 12 15). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *Journal of Applied Physics*, 70(12), 7403-7424.
- Sze, S. (tarih yok). *Physics of semiconductor devices*.
- Sze, S., & M., S. (1981). *Physics of semiconductor devices* 2nd edition. New York, Wiley-Interscience, 1981. 878 p.
- Sze, S., & Ng, K. (2007). *Physics of semiconductor devices*. Wiley-Interscience.
- Taşcıoğlu, İ., Tan, S., Yakuphanoglu, F., & Altındal, Ş. (2018, 10 11). Effectuality of Barrier Height Inhomogeneity on the Current–Voltage–Temperature Characteristics of Metal Semiconductor Structures with CdZnO Interlayer. *Journal of Electronic Materials*, 47(10), 6059-6066.
- Tugluoglu, N., Karadeniz, S., Acar, S., & Kasap, M. (2004, 9). Temperature-Dependent Barrier Characteristics of Inhomogeneous In/p-Si (100) Schottky Barrier Diodes. *Chinese Physics Letters*, 21(9), 1795-1798.

- Tung, R. (1992, 6 15). Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509-13523.
- Tung, R. (2001, 11 9). Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 35(1-3), 1-138.
- Van der Ziel, A. (1971). *Solid state physical electronics*. Prentice-Hall.
- Werner, J., & Güttler, H. (1991, 2 4). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69(3), 1522-1533.
- Werner, J., & Güttler, H. (1991, 1 1). Transport Properties of Inhomogeneous Schottky Contacts. *Physica Scripta*, T39(T39), 258-264.
- Wieder, H. (1982, 11 4). MOS (Metal Oxide Semiconductors) Physics and Technology by E. H. Nicollian and J. R. Brews. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 21(4), 1048-1049.
- Zakaria, N., Kasjoo, S., Zailan, Z., Isa, M., Taking, S., & Arshad, M. (2017, 12). On the Difference in Apparent Barrier Height as Obtained From Capacitance-Voltage and Current-Voltage-Temperature Measurements on Al/P-Inp Schottky Barriers. *Solid-State Electronics*, 138, 16-23.
- Zhu, T., Lambert, D., Shelton, B., Wong, M., Chowdhury, U., & Dupuis, R. (2000, 10 30). High-voltage mesa-structure GaN Schottky rectifiers processed by dry and wet etching. *Applied Physics Letters*, 77(18), 2918-2920.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Muhammed Can ÖZDEMİR

Elektronik Posta: mucan54@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Lisans	SAÜ, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü	2015
Yüksek Lisans	İMU, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı	2019