

**Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si /Al
HETEROYAPILARIN ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIĞA
BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

Ali Rıza DENİZ

**Doktora Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı
Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN
2015
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si /Al
HETEROYAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

Ali Rıza DENİZ

**FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fiziği Bilim Dalı**

ERZURUM

**2015
Her hakkı saklıdır**



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si /Al HETEROYAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında, Ali Rıza DENİZ tarafından hazırlanan bu çalışma 30/04/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı – Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (5./5) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Abdulmecit TÜRÜT

İmza :

Üye : Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Cevdet COŞKUN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

İmza :

Üye : Doç. Dr. Kadem MERAL

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 21/05/2015 tarih ve 20/706 nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP, projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 2012/177 ve 2013/312

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

Au/Fe₃O₄/ p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si /Al HETEROYAPILARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

Ali Rıza DENİZ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Bu çalışmada; [100] doğrultusunda, 400 µm kalınlığında ve 1-10 Ω-cm öz direncine sahip p-Si ve n-Si kristalleri kullanıldı. Tek düze parçacık büyüklüğüne sahip Fe₃O₄ nanopartikülleri çözelti ortamında sentezlendi. Kristallerin kimyasal temizleme sürecinden sonra, kristalin mat yüzeyine buharlaştırma yoluyla Al metali büyütüldü ve kristalin diğer yüzeyine Fe₃O₄ nanoparçacıkları damlatma metoduyla kaplandı. Sonra 10⁻⁵ torr basınç altında Fe₃O₄ nanoparçacıklar üzerine Au metali buharlaştırıldı. Böylece, Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/p-Si/Al doğrultucu kontakları elde edildi. Fe₃O₄ nanoparçacıklar XRD ve TEM kullanılarak karakterize edildi. Farklı sıcaklıklar için bu yapıların I-V (akım-voltaj) ölçümleri alındı. Ayrıca, oda sıcaklığında bu yapıların C-V (kapasite-voltaj) ölçümleri alındı. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/p-Si/Al heteroyapıların farklı metotlar (Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde fonksiyonları) kullanılarak, I-V ölçümlerinden idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi bazı temel diyot parametreleri hesaplandı. Bu parametreler sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelendiğinde, artan sıcaklıkla engel yüksekliğinin arttığı ve idealite faktörü ile seri direncin artan sıcaklıkla azaldığı gözlemlendi. Bu değişimler Schottky engelindeki homojensizliğe atfedildi. Ayrıca, C-V ölçümlerinden Fermi enerji seviyesi, difüzyon ptansiyeli, taşıyıcı konsantrasyonu ve engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplandı. Tüm bunlara ek olarak Au/Fe₃O₄/p-Si/Al doğrultucu kontaklarının 25 gray ve 50 gray dozdaki X-ışını radyasyonunun I-V (Akım-Gerilim) karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırıldı.

2015, 165 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, metal/nanoparçacık/yarıiletken kontaklar, Fe₃O₄

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF Au/Fe₃O₄/p-Si/Al and Au/Fe₃O₄/n-Si/Al HETEROJUNCTIONS DEPENDENT ON TEMPERATURE

Ali Rıza DENİZ

Atatürk University
Graduate School of Science
Department of Physics
Department of Solid State Physics

Supervisor: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

In this study; p-Si and n-Si crystals were used which have the 1-10 Ωcm resistivity, the thickness of 400 μm and the direction of [100]. The Fe₃O₄ nanoparticles with uniform particle size were synthesized in solution conduction. After chemical cleaning process of wafers, Al metal was enlarged on the lusterless surface of crystals by vaporizing and Fe₃O₄ nanoparticles are coated on other surface of wafers with dropping method. Then, Au metal was vaporized on the Fe₃O₄ nanoparticles under 10^{-5} torr pressure. So, Au/Fe₃O₄/p-Si/Al and Au/Fe₃O₄/n-Si/Al rectifying contacts were obtained. The Fe₃O₄ nanoparticles have been characterized by using TEM and XRD. The current-voltage (I-V) measurements of these structures were taken for various temperatures. Also, capacitance-voltage (C-V) measurements of these structures were taken at room temperature. The some basic diode parameters such as ideality factor (n), barrier height (Φ_b) and series resistance (R_s) of Au/Fe₃O₄/p-Si/Al and Au/Fe₃O₄/n-Si/Al heterojunctions were calculated from I-V measurements using different methods (Thermionic Emission, Cheung and Norde functions). When the values of these parameters examined as a function of temperature, it was observed that the barrier height increased as the temperature increased and the ideality factor and series resistance decreased as the temperature increased. This was attributed to inhomogeneous in Schottky barrier. Also, diode parameters such as Fermi energy level, diffusion potential, carrier concentration and barrier height were calculated from the C-V measurements. In addition, the effects of 50 gray and 75 gray doses X-ray irradiation on the current-voltage (I-V) characteristics of Au/Fe₃O₄/p-Si/Al heterojunctions were examined.

2015, 165 Pages

Keywords: Schottky diode, metal/nanoparticles/semiconductor contact, Fe₃O₄

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunmuş olduğum bu çalışmada Atatürk Üniversitesi Fizik Bölümünde hazırlanmıştır.

Doktora yaptığım süre boyunca her türlü desteğini eksik etmeyen, gerek akademik yönden gerekse kişilik yönünden örnek aldığım, asistanlığını yapmaktan, beraber çalışmaktan gurur duyduğum ve bir ömür boyu gurur duyacağım çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a tüm samimiyetimle teşekkür ederim. Çalışmalarım süresince teorik ve pratik bilgisinden istifade ettiğimiz hocamız Sayın Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT'e teşekkür ederim.

Tezimde kullanmış olduğum Fe_3O_4 nanoparçacıkların sentezlenmesinde emeği olan Sayın Doç. Dr. Kadem MERAL'e, Sayın Doç. Dr. Önder METİN'e, Sayın Arş. Gör. Melike SEVİM'e ve Sayın Mehmet ŞİNOFOROĞLU'na çok teşekkür ederim. Tezimde gerek numunelerimin hazırlanmasında gerekse alınan ölçümlerde çok büyük yardımları olan başta Sayın Zakir ÇALDIRAN olmak üzere Sayın Yılmaz ŞAHİN'e, Sayın Hatice KAÇUŞ'a, Sayın İlknur KAPLAN'a, Sayın Arş. Gör. Fatih Mehmet COŞKUN'a ve Sayın Murat KOCA'ya ayrı ayrı teşekkür ederim. Ayrıca tezimi hazırlarken yaptığı yardımlarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a teşekkür ederim.

Fizik Bölümü Yoğun Madde Fiziği laboratuvarlarında çalışma imkânı sağladığı için bölüm başkanlığına, üzerimde çok emekleri olan tüm Fizik Bölümündeki hocalarıma ve tüm mesai arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca maddi ve manevi desteklerini üzerimden hiç eksik etmeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ali Rıza DENİZ

Nisan, 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Metal/Yarıiletken Kontaklar.....	9
2.1.1. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar.....	9
2.1.2. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar.....	13
2.2. Omik Kontaklar.....	15
2.2.1. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontaklar.....	16
2.2.2. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken omik kontaklar.....	18
2.3. Tünelleme Eklemleri.....	19
2.4. Metal (Omik)/ <i>p</i> -tipi Yarıiletken/Metal (Doğrultucu) Yapısı.....	20
2.5. Metal (Omik) / <i>n</i> -Tipi Yarıiletken / Metal (Schottky) Yapısı.....	21
2.6. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Sıcaklığın Etkisi.....	22
2.7. Termiyonik Emisyon ve Akım-Voltaj Karakteristiği.....	23
2.8. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Bazı Schottky Diyot Parametrelerinin Tayin Edilmesi.....	28
2.9. Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi.....	31
2.10. Difüzyon Teorisi.....	35
2.11. Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi.....	35
2.12. Deplasyon Bölgesinde Rekombinasyon (yeniden birleşim) ve Jenarasyon (taşıyıcı oluşumu).....	37
2.13. Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı.....	39
2.14. İmaj Kuvvetinin Etkisinden Dolayı Engel Yüksekliğinin Azalması.....	40
2.15. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojen Olmayan Engel Yüksekliğinin Analizi.....	42

2.16. Seri Direnç Etkisi	47
2.17. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi	49
2.18. Arayüzey Tabakasının Kapasitansa Etkisi	52
2.19. Derin Tuzakların Kapasitansa Etkisi	56
2.20. Demir Oksitler	56
2.21. Demir Oksit Nanoparçacıkların Sentez Teknikleri	59
2.21.1. Termal parçalama	59
2.21.2. Ortak çöktürme	63
2.21.3. Mikroemülsiyon	64
2.21.4. Hidrotermal sentez	66
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	68
3.1. Giriş	68
3.2. <i>p</i> -Si ve <i>n</i> -Si Kristallerinin Temizlenmesi ve Numunelerin Hazırlanması.....	68
3.3. Fe ₃ O ₄ Nanoparçacıkların Sentezi	71
3.4. Deney ve Ölçü Sistemleri	74
3.5. Fe ₃ O ₄ İnce Filminin Enerji Band Aralığının Belirlenmesi.....	76
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	78
4.1. Giriş	78
4.2. <i>I</i> – <i>V</i> (Akım – Voltaj) Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanımı	78
4.3. <i>I</i> - <i>V</i> (Akım-Voltaj) Ölçümleri ve Norde Fonksiyonlarının Kullanılması.....	115
4.4. Arayüzey Hâl Yoğunluğu (<i>N_{ss}</i>)	126
4.5. <i>C</i> - <i>V</i> (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri ve Yapılan Hesaplamalar	129
4.6. X-Işını Radyasyonunun Au/Fe ₃ O ₄ / <i>p</i> -Si/Al Doğrultucu Kontakın <i>I</i> - <i>V</i> (Akım- Voltaj) Karakteristikleri Üzerine Etkisi	141
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	146
5.1. Sıcaklığa Bağlı <i>I</i> - <i>V</i> Ölçümleri	146
5.2. Oda Sıcaklığında Yapılan <i>C</i> - <i>V</i> Ölçümleri	153
5.3. X-Işını Radyasyonunun Au/Fe ₃ O ₄ / <i>p</i> -Si/Al Diyodunun <i>I</i> - <i>V</i> Karakteristikleri Üzerine Etkisi	155
KAYNAKLAR	157
ÖZGEÇMİŞ	166

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
A^{**}	Diyodun etkin Richardson sabiti
C	Kapasite
E_c	İletkenlik bandının tabanı (minimumu)
E_v	Valans bandının tepesi(maksimumu)
E_c'	Metal içindeki termiyonik emisyon için gerekli minimum enerji
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_{ss}	Arayüzey hallerinin enerjisi
h	Planck sabiti
J	Akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
J_{sT}	Ters-doyma akım yoğunluğu
J_T	a.c. tünel akımı
k	Boltzmann sabiti
m_e	Elektronun kütlesi
n	İdealite faktörü
n^{++}	aşırı katkılı n tipi yarıiletken
p^{++}	aşırı katkılı p tipi yarıiletken
N_v	Yarıiletkenin valans bandındaki hal yoğunluğu
N_a	Akseptör konsantrasyonu
N_{ss}	Yarıiletkenle dengede olan hal yoğunluğu
p_i	Asal taşıyıcı konsantrasyonu

I	Akım
I_0	Satürasyon akımı
q	Elektronun yükü
$f_F(E)$	Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonu
$g_c(E)$	İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
Φ_b	Schottky engel yüksekliği
$\bar{\Phi}_b$	Ortalama engel yüksekliği
Φ_b^c	Kapasite voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği
Φ_b^j	Düz beslem gerilimine bağlı olarak $I-V$ ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
$\Psi(x)$	Yüzey potansiyeli
$\rho(x)$	Konuma bağlı uzay yükü yoğunluğu
δ	Metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabakanın kalınlığı
σ	Arayüzey hallerinin tesir kesiti
σ_i	Standart sapma
ρ_i	Voltaj katsayısı
Q	Birim alan başına düşen yük yoğunluğu
R_s	Seri direnç
R_m	Tünelleme direnci
T	Sıcaklık
τ	Zaman sabiti
τ_r	Elektronların bu bölgeyi geçmesi için gerekli zaman

V_{dif}	Difüzyon potansiyeli
V_x	Enerjinin taşınma yönündeki hızı

Kısaltmalar

AC	Alternatif akım
$C-V$	Kapasite-gerilim
DC	Doğru akım
FET	Field Effect Transistör (Alan Etkili Transistör)
IC	Integrated Circuit (Tümleşik Devre)
$I-V$	Akım-gerilim
SCLC	Space Charge Limited Current
TE	Termiyonik Emisyon
MESFET	Metal -Semiconductor -Field Effect Transistör
MOS	Metal- Oxide- Semiconductor
MOSFET	Metal -Oxide- Semiconductor (Field Effect Transistör)
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
Co	Kobalt
O	Oksijen
Fe	Demir
Pt	Platin
Zn	Çinko
GaAs	Galyum Arsenit
Si	Silisyum
Cu	Bakır
Au	Altın
Al	Alüminyum
In	İndiyum
Sn	Kalay
Sr	Stronsiyum
Nd	Neodimyum

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak	11
Şekil 2.2. Düz ve ters beslem altındaki Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kontak	12
Şekil 2.3. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı.....	14
Şekil 2.4. Kontak yapılmadan önce metal ve <i>n</i> -tipi yarıiletken enerji bant diyagramı ($\Phi_m < \Phi_s$)	16
Şekil 2.5. Kontakta sonra metal ve yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı..	17
Şekil 2.6. Düz beslem durumunda metal ve <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı.....	17
Şekil 2.7. Ters beslem durumunda metal ve <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı.....	18
Şekil 2.8. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı a; kontakta önce, b; kontakta sonra, c; $V \neq 0$ durumunda	19
Şekil 2.9. p^+pM yarıiletken yapının termal dengede enerji-bant diyagramı	21
Şekil 2.10. Termal dengede <i>n</i> -tipi Schottky diyodun enerji bant diyagramı.	22
Şekil 2.11. Düz beslem altındaki metal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi	24
Şekil 2.12. (a) Metal-dielektrik arayüzeyinde imaj yükü ve elektrik alan çizgileri, (b) Elektrik alan sıfırken potansiyel engelinde meydana gelen bükülme, (c) Sabit elektrik alanda imaj yükünden dolayı oluşan bükülme	41
Şekil 2.13. Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip bir Schottky kontağın üç boyutlu bant diyagramı.....	43
Şekil 2.14. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi	48
Şekil 2.15. Metal <i>p</i> -tipi yarıiletken yapılarda doğrultucu kontağın; a) Potansiyel dağılımı, b) Yük dağılımı	49
Şekil 2.16. Arayüzey tabakasının zayıf, düşük frekans durumunda (a) ve yüksek frekans durumunda (b) Schottky engeli için eşdeğer devre yapısı.....	54
Şekil 2.17. Arayüzey tabakasının kalın, düşük frekans durumunda (a) ve yüksek frekans durumunda (b) Schottky engeli için eşdeğer devre yapısı.....	55

Şekil 2.18. Yalıtkan arayüzey tabakasına sahip Schottky engeli için eşdeğer devre.....	55
Şekil 2.19. Hematit (a) ve Manyetit (b) için kristal yapı gösterimi	58
Şekil 2.20. Normal spinel ve ters spinel yapılarda katyonların dağılımı	59
Şekil 2.21. Farklı manyetik nanoparçacıklar (MFe_2O_4 , $M=Mn, Fe, Co, Ni$) için manyetizasyon değerleri.....	59
Şekil 2.22. (a) İki mikroemülsiyon karışımı, (b) indirgeyici ajan eklenmesi ve (c) ile sentezlenen gaz geçirilmesi nanoparçacıkların şematik gösterimi.....	66
Şekil 3.1. Buharlaştırma ünitesi	70
Şekil 3.2. Tavlama fırını	70
Şekil 3.3. Fe_3O_4 nanoparçacıkların TEM görüntüsü.....	72
Şekil 3.4. Fe_3O_4 nanoparçacıkların XRD deseni	72
Şekil 3.5. Fe_3O_4 nanoparçacıkların XRD deseni	73
Şekil 3.6. $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodunun şematik diyagramı	74
Şekil 3.7. $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyodunun şematik diyagramı	74
Şekil 3.8. Akım-voltaj ($I-V$) ve kapasite-voltaj ($C-V$) ölçüm sistemleri.....	75
Şekil 3.9. LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi	76
Şekil 3.10. Fe_3O_4 ince filminin oda sıcaklığında (αhv) ² 'nin hv 'ye karşı değişim grafiği	77
Şekil 4.1. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış referans $Au/p-Si/Al$ diyoduna ve $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyoduna ait $I-V$ grafikleri.....	81
Şekil 4.2. Oda sıcaklığında aynı şartlar altında hazırlanmış referans $Au/n-Si/Al$ diyoduna ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyoduna ait $I-V$ grafikleri.....	82
Şekil 4.3. $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyoduna ait sıcaklığa bağlı $I-V$ grafikleri.....	86
Şekil 4.4. $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyoduna ait sıcaklığa bağlı $I-V$ grafikleri.....	87
Şekil 4.5. $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodu için geleneksel metotla hesaplanmış engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	88
Şekil 4.6. $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyodu için geleneksel metotla hesaplanmış engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	89
Şekil 4.7. $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodu için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	90
Şekil 4.8. $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyodu için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	91

Şekil 4.9. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I) - I$ grafikleri.....	93
Şekil 4.10. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I) - I$ grafikleri.....	94
Şekil 4.11. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $H(I) - I$ grafikleri.....	95
Şekil 4.12. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $H(I) - I$ grafikleri.....	96
Şekil 4.13. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği	100
Şekil 4.14. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği	101
Şekil 4.15. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği ..	102
Şekil 4.16. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği ..	103
Şekil 4.17. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği	104
Şekil 4.18. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği	105
Şekil 4.19. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait $[(1/n)-1]$ ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye karşı değişim grafikleri.....	108
Şekil 4.20. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait $[(1/n)-1]$ ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye karşı değişim grafikleri.....	109
Şekil 4.21. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği.....	111
Şekil 4.22. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği.....	112
Şekil 4.23. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodu için T_0 anomalisini gösteren T 'nin bir fonksiyonu olarak nT grafiği.....	114
Şekil 4.24. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyodu için T_0 anomalisini gösteren T 'nin bir fonksiyonu olarak nT grafiği.....	115
Şekil 4.25. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $F(V) - V$ grafikleri.....	117
Şekil 4.26. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $F(V) - V$ grafikleri.....	118

Şekil 4.27. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait Norde fonksiyonundan elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği.....	120
Şekil 4.28. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait Norde fonksiyonundan elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği.....	121
Şekil 4.29. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait Norde fonksiyonundan elde edilmiş seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	123
Şekil 4.30. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait Norde fonksiyonundan elde edilmiş seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	124
Şekil 4.31. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodunun Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri	125
Şekil 4.32. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyodunun Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri	126
Şekil 4.33. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri.....	128
Şekil 4.34. Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri.....	128
Şekil 4.35. Aynı şartlar altında hazırlanmış Au/p-Si/Al ve Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodlarının oda sıcaklığında f=200 kHz sabit frekansta düz ve ters beslem durumlarında C-V grafikleri.....	130
Şekil 4.36. Aynı şartlar altında hazırlanmış Au/n-Si/Al ve Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyodlarının oda sıcaklığında f=200 kHz sabit frekansta düz ve ters beslem durumlarında C-V grafikleri.....	131
Şekil 4.37. Oda sıcaklığında Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodunun farklı frekans değerlerinde düz ve ters beslem durumlarında C-V grafikleri.....	133
Şekil 4.38. Oda sıcaklığında Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyodunun farklı frekans değerlerinde düz ve ters beslem durumlarında C-V grafikleri.....	134
Şekil 4.39. Oda sıcaklığında Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodunun farklı frekans değerlerinde düz ve ters beslem durumlarında 1/C ² -V grafikleri.....	135
Şekil 4.40. Oda sıcaklığında Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyodunun farklı frekans değerlerinde düz ve ters beslem durumlarında 1/C ² -V grafikleri.....	136

Şekil 4.41. Işınlamalar sonucu elde edilen Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodunun <i>I-V</i> grafikleri	142
Şekil 4.42. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodunun radyasyona bağlı idealite faktörü değerlerinin değişim grafiği	143
Şekil 4.43. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodunun radyasyona bağlı engel yüksekliği değerlerinin değişim grafiği	144
Şekil 4.44. Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyodunun radyasyona bağlı seri direnç değerlerinin değişim grafiği.....	145

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Demir oksitlerin kimyasal, manyetik ve fiziksel özellikleri.....	57
Çizelge 2.2. Nanoparçacıkların sentez şartları.....	62
Çizelge 2.3. Nanoparçacık elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan metotların avantajları ve dezavantajları	67
Çizelge 4.1. Oda sıcaklığında aynı şartlar altında hazırlanmış referans Au/ <i>p</i> -Si/Al diyodu ve Au/Fe ₃ O ₄ / <i>p</i> -Si/Al diyoduna ait <i>I-V</i> grafiklerinden geleneksel metotla elde edilen temel diyot parametreleri.....	82
Çizelge 4.2. Oda sıcaklığında aynı şartlar altında referans Au/ <i>n</i> -Si/Al diyodu ve Au/Fe ₃ O ₄ / <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait <i>I-V</i> grafiklerinden geleneksel metot ile elde edilen temel diyod parametreleri.....	83
Çizelge 4.3. Au/Fe ₃ O ₄ / <i>p</i> -Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı <i>I-V</i> grafiklerinden geleneksel metot ile elde edilen temel diyot parametreleri.....	86
Çizelge 4.4. Au/Fe ₃ O ₄ / <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı <i>I-V</i> grafiklerinden geleneksel metot ile elde edilen temel diyot parametreleri.....	87
Çizelge 4.5. Referans Au/ <i>p</i> -Si/Al diyoduna ait <i>I-V</i> grafiğinden geleneksel metot ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri	96
Çizelge 4.6. Referans Au/ <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait <i>I-V</i> grafiğinden geleneksel metot ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri	97
Çizelge 4.7. Au/Fe ₃ O ₄ / <i>p</i> -Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı <i>I-V</i> grafiklerinden geleneksel metot ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri	97
Çizelge 4.8. Au/Fe ₃ O ₄ / <i>n</i> -Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı <i>I-V</i> grafiklerinden geleneksel metot ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri	98
Çizelge 4.9. Au/Fe ₃ O ₄ / <i>p</i> -Si/Al diyodu için Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen temel diyot parametreleri	118
Çizelge 4.10. Au/Fe ₃ O ₄ / <i>n</i> -Si/Al diyodu için Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen temel diyot parametreleri	119

Çizelge 4.11. Oda sıcaklığında Au/Fe ₃ O ₄ /p-Si/Al diyoduna ait farklı frekans değerlerindeki (I/C^2-V) değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri.....	139
Çizelge 4.12. Oda sıcaklığında Au/Fe ₃ O ₄ /n-Si/Al diyoduna ait farklı frekans değerlerindeki (I/C^2-V) değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri.....	140

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken kontaklar hızla gelişen elektronik sanayisinde birçok alanda kullanılmaktadır. Elektronik sanayisinde metal-yarıiletken kontaklardan elde edilen Schottky diyotlar, güneş pilleri, mikrodalga karıştırıcı dedektörleri, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilimle değişen kondansatörler), hızlı anahtar (switching) uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Canlılar için yaşam koşullarını kolaylaştıran bu elektronik devre elemanları doğrultma prensibine dayanmaktadır. Kısaca alternatif akımı doğru akıma çevirme işlemine doğrultma denir. Bu işlem, elektronik sistemlerde diyotlarla gerçekleştirilir. Metal-yarıiletken kontaklarda bu işlem yarıiletken tarafında oluşan uzay yükü bölgesinin uygulama gerilimi ile lineer olmayan davranışı sonucu gerçekleşmektedir. İki metalin birleşimi ile kontak oluşabileceği gibi bir metalle bir yarıiletkenin atomik düzeyde teması ile de kontak oluşturabilir. Bir metalle bir yarıiletkenin belirli kurallar çerçevesinde birleştirilmesi ile oluşturulan Schottky diyotlar, yapısı itibari ile p-n ekleminden daha farklıdır. Bir p-n eklemine akım azınlık taşıyıcılarıyla sağlanırken, Schottky diyotlarda çoğunluk taşıyıcılarıyla sağlanmaktadır. Schottky kontaklar düşük gerilim, yüksek akım doğrultucuları olarak çalışırken, p-n eklemi yüksek gerilim, düşük akım doğrultucuları olarak çalışmaktadır. Ayrıca Schottky yapıların azınlık taşıyıcılarının çok az ve frekans tepkisinin yüksek olması gibi avantajlara sahip olmaları yanında yüksek anahtarlama hızına sahip olmaları bu diyotları IC (Integrated Circuit - Tümüleşik Devre) teknolojisi için önemli kılmaktadır.

Metal-yarıiletken kontaklarla ilgili ilk çalışma 1874'lü yıllarda Braun tarafından yapılmıştır. Braun, yaptığı çalışmalarda nokta kontak doğrultucularını dedektör olarak kullanmıştır.

1931'li yıllarda Schottky metal-yarıiletken kontaklarla ilgili, kontakların doğrultma özelliğini kullanarak ciddi çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların birincisi kontakta

meydana gelen akım sonucunda kontak boyunca oluşan potansiyel düşmesidir. 1932 yılında ise Wilson, doğrultma işlemini kuantum mekaniksel tünelleme yoluyla açıklamaya çalışmıştır ancak tahmininde yanılmıştır.

Schottky (1938) ve Mott (1938), elektronların gözlenen doğrultma yönünde potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon yolu ile geçtiğini açıklamışlardır. Mott (1938), potansiyel engelinin oluşmasını metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının farklı olmasına dayandırmıştır. Mott, yüklü (safsızlık) atomlarının olmadığı arayüzey bölgesinde elektrik alanın sabit olduğunu ve elektrostatik potansiyelin metale olan yaklaşımla aynı uzaklıkta lineer olarak değiştiğini kabul etmiştir. Schottky (1938) ise, metal yaklaşımındaki gibi Poisson denkleminde göre elektrik alanın lineer olarak artması ve elektrostatik potansiyelin kuadratik olarak değişmesi için engel bölgesinin sabit olan yüklü kirliliklerin konsantrasyonunu içerdiğini varsaymıştır.

1900'lü yılların başlarında kullanılan ilk pratik elektronik devre metal-yarıiletken diyodlardı. Bu diyodlar 'nokta kontak' olarak da adlandırılır. Nokta kontaklar ince metal bir telin yarıiletken yüzeyine dokundurularak yapılmıştır. Ancak bu kontaklar kolaylıkla üretilemediklerinden mekanik olarak fazla güvenilir olmamışlardır. Günümüzde yeniden üretilebilen ve güvenilir metal-yarıiletken kontaklar üretebilmek için vakum teknolojisi kullanılmaktadır.

Daha sonraki süreçlerde arayüzey tabakasının kontak parametrelerini önemli derecede etkilediği anlaşılmış olup, arayüzey tabakası olarak farklı maddeler kullanılarak üretilen Schottky diyotlar üzerinde yapılan çalışmaların sayısı da artmıştır.

Schottky diyotlarda uygun fiziksel koşullar sağlanarak oluşturulan Schottky engel yüksekliği Schottky diyotlar için en önemli parametredir. Bu sebepten dolayı son zamanlarda engel yüksekliğini yapay olarak arttırmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Bunun için metal ve yarıiletken arası çok ince bir arayüzey tabaka ile çeşitli yöntemlerle kaplanmaktadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarda metal ve yarıiletken arası çeşitli tipte arayüzey tabakaları ile kaplanmıştır. Metal ile yarıiletken arasındaki çok ince

arayüzey tabakası, hem metal ve yarıiletkeni birbirinden ayırır hem de yük geçişlerini düzenler. Bu tabakanın kontak parametrelerini önemli derecede etkilediği anlaşılmış ve değişik amaçlar için kullanılmak üzere farklı maddeler kullanılarak üretilen Schottky diyotlar üzerine yapılan çalışmalara doğru eğilim başlamıştır.

Arayüzey tabakasının kaplamak için çeşitli ince film büyütme yöntemleri vardır. Bunlar; püskürtme, buharlaştırma, kimyasal biriktirme, saçtırma ve sol-jel yöntemleri olarak sıralanabilir (Czapla *et al.* 1989; Chatelon *et al.* 1994; Bach and Krause 1997). Bu yöntemlerin her birinin kendine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri vardır.

Son zamanlarda arayüzey malzemesi olarak manyetik nanoparçacıkların sentezi ve kullanılması bu malzemelerin uygulama alanlarının çokluğu nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmektedir (Teja *et al.* 2008). Bu parçacıkların belli bir kritik boyutun altında fiziksel özellikleri değişmektedir. Bu kritik değer maddenin cinsine bağlı olarak farklılık gösterir ve bu değerın altında nanoparçacıklar uygulama alanları açısından oldukça kullanışlı hale gelir. Bu büyüklüklerde domain duvarları oluşamaz ve her bir nanoparçacık tek bir domain haline gelerek oda sıcaklığında süperparamanyetik özellik gösterir. Manyetik nanoparçacıklar biyomedikal, ilaç sektörü, kemoterapi ve radyoterapi gibi tıbbi uygulamalarda ve elektronik endüstrisinde kullanılmaktadırlar (Lu *et al.* 2007).

Manyetik nanoparçacıklar, farklı kompozisyon ve fazlarda demir oksitler Fe_3O_4 ve $\gamma-Fe_2O_3$, spinel yapıda ferromanyetik malzemeler $MgFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$ ve alaşımlar $CoPt_3$, $FePt$ olarak sentezlenebilir. Pek çok metotla nanoparçacık sentezi yapılabilmektedir. Kullanılan bazı yöntemler ortak çöktürme, mikroemülsiyon, hidrotermal sentez, termal parçalamadır (Teja *et al.* 2008; Laurent *et al.* 2008) Farklı metotlarla sentezlenen demir oksit nanoparçacıklar diyot parametrelerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Toplamda bilinen on altı tane oksitler ve oksihidroksitler vardır (Cornell and Schwertmann 2003).

Demir oksit çeşitleri son zamanlarda biyolojik sensörler, elektronik nanoaygıtlar, biyomedikal ve enerji gibi uygulamalarından dolayı dikkat çekmektedir. Ayrıca, demir oksit gibi nanoboyutlu malzemeler, mezoskopik etki, küçük nesne etkisi, kuantum boyut etkisi ve yüzey etkisi gibi üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Manyetit Fe_3O_4 nanoparçacıklar özellikle, süperparamanyetik, biyouyumluluk, kolay sentezlenme ve toksik olmama gibi özelliklerinden dolayı dikkat çekicidirler (Schwertmann and Cornell 1991). Fe_3O_4 kullanılmasının diğer bir avantajı ise manyetik özelliklerini fotolitografi, aşındırma ve elektrotların birikimi gibi sonrası süreçlerde sürdürmeleridir (Oh *et al.* 2012).

Fe_3O_4 spinel kristal yapısında şekillenmiş ferritler olarak adlandırılan tipik bir malzeme sınıfıdır. Fe_3O_4 yarı-metalik ve elektriksel iletkenliği olan bir malzemedir. Fe_3O_4 filmin iletkenliği oktahedral örgü içindeki demir ve ferrik iyonları arasındaki elektron alışverişinden dolayıdır ve bu nedenle iyonların rastgele dağılımı izotropik bir iletkenliğe yol açar.

Çaldıran *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada fabrikasyonu yapılmış Fe_3O_4/p -Si heteroeklemlerin $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerinden, idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi elektronik parametreleri hesaplanmıştır. Fe_3O_4/p -Si eklemının etkin ortalama Schottky engel yüksekliği $0,72 \pm 0,12$ eV ve ortalama idealite faktörü $2,62 \pm 0,09$ olarak hesaplanmış ve bu eklemının iyi bir doğrultma özelliği gösterdiği belirtilmiştir. İlâveten X-ışını radyasyonunun diyot parametreleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Tükenim ve birikim bölgelerindeki elektriksel özelliklerdeki değişikliklerin özellikle arayüzey polarizasyonuna, aygıtın seri direncine ve arayüzey hallerindeki yüklerin yeniden yapılanmasına ve yeniden sıralanmasına atfedilmiştir. Sonuç olarak Fe_3O_4 Schottky engel diyodun elektriksel özelliklerinin radyasyona ve uygulanan voltaja bağlı olduğu belirtilmiştir.

Panda *et al.* (2014) tarafından yapılan bir çalışmada ise $Fe_3O_4/MgO/n$ -Si (0 0 1) heteroyapısı darbeli lazer biriktirme tekniği kullanılarak üretilmiştir. Heteroeklemının elektriksel taşınım özellikleri 6 T manyetik alan uygulanarak ve uygulanmadan farklı

izotermal şartlar altında incelenmiştir. Eklemnin 60-300 K sıcaklık aralığı boyunca çok iyi doğrultucu özelliğe sahip bir manyetik diyodun gösterdiği davranışa benzer davranış gösterdiği belirtilmiştir. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}/n\text{-Si}$ heteroyapısının I - V ölçümleri 60-300 K sıcaklık aralığında alınmıştır ve tüm sıcaklıklarda idealite faktörü değeri 2'den çok büyük olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörünün büyük değerleri olabilecek bazı tünelleme süreçlerine atfedilmiştir. I - V karakteristiklerinden $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}/n\text{-Si}$ eklemının 60-300 K aralığında bir Schottky tipi eklem gibi davrandığı belirtilmiştir. Ayrıca $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}/n\text{-Si}$ eklemının engel yüksekliği $1,66 \text{ eV} \pm 0,006 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır.

Akın *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada Fe_3O_4 manyetik nanoparçacıklar koloidal metot kullanılarak sentezlenmiştir. Bu parçacıklar kullanılarak referans $\text{Fe}_3\text{O}_4/n\text{-GaAs}$ ve $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPF}/n\text{-GaAs}$ (PPF; pirolizlenmiş polimer filmler) yapıları üretilmiştir. Termiyonik Emisyon teorisi kullanılarak yapıların I - V karakteristiklerinden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPF}/n\text{-GaAs}$ yapısının engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri sırasıyla $0,62 \pm 0,002 \text{ eV}$ ve $1,16$ olarak hesaplanmıştır. $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPF}/n\text{-GaAs}$ yapısı için hesaplanmış engel yüksekliği değeri $\text{Fe}_3\text{O}_4/n\text{-GaAs}$ yapısı için $0,57 \pm 0,002 \text{ eV}$ olarak hesaplanmış engel yüksekliği değerinden çok daha büyüktür. Ayrıca $\text{Fe}_3\text{O}_4/n\text{-GaAs}$ yapısı için idealite faktörü değeri $2,94$ olarak hesaplanmış olup, bu değer $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PPF}/n\text{-GaAs}$ yapısı için hesaplanmış olan değerden oldukça büyüktür. İdealite faktörünün büyük olması arayüzey oksit tabakası boyunca uygulama potansiyelinin etkisine, ara tabaka/yarıiletken arayüzeyinde lokalize olmuş arayüzey hallerinin parçacık dağılımına, metal/yarıiletken arayüzeyindeki düşük engel yüksekliği yamalarının geniş bir dağılımına ve seri direnç etkisine atfedilmiştir.

Gupta *et al.* (2013) tarafından yapılan bir çalışmada CuFeO_2 ince filmi Sol-Gel spin metodu kullanılarak üretilmiştir. Fabrikasyonu yapılan $\text{Al}/p\text{-CuFeO}_2/p\text{-Si}/\text{Al}$ diyodunun elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri incelenmiştir. Diyodun I - V karakteristiklerinden engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri sırasıyla $0,55 \pm 0,01 \text{ eV}$ ve $1,62 \pm 0,2$ olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörünün büyük olması nedeniyle, diyodun ideal olmayan bir davranış sergilediği belirtilmiş ve bu durum arayüzey hallerinin ve Schottky engel yüksekliğinin homojensizliğine, silikon tabaka üzerindeki oksit tabakasına ve seri

direnç etkisine atfedilmiştir. Ayrıca $Al/p-CuFeO_2/p-Si/Al$ Schottky diyodu için uygulanan voltajın ve frekansın diyodun kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Diyodun kapasitesinin artan frekansla azaldığını belirtmişlerdir. Bu durumu yüksek frekanslarda kapasitenin, yük taşıyıcılarının alternatif akım sinyallerini takip edebilme yeteneğine bağlı olmasına atfedilmiştir.

Yang *et al.* (2011) tarafından yapılan bir çalışmada Fe_3O_4 filmler Nb katkılı $SrTiO_3$ (1 0 0), Al_2O_3 (0 0 1) tek kristallerin üzerine darbeli lazer biriktirme tekniği kullanılarak sentezlenmiştir. Fabrikasyonu yapılan bu yapıların $I-V$ karakteristikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. $Fe_3O_4/Nb:STO$ yapısının $I-V$ eğrisi doğrultucu davranış sergilerken, Fe_3O_4/ZnO yapısı daha zayıf bir doğrultma özelliği göstermiştir. Fe_3O_4/ZnO yapısı içindeki akım akışı $Fe_3O_4/Nb:STO$ yapısının aksine pozitif uygulama gerilimine göre negatif uygulama gerilimlerinde biraz daha büyüktür. Bu sonuçlar Schottky engelinin yüksekliğinin ve şeklinin kontak malzemesinin iş fonksiyonunun görelî büyüklüğüne bağlılığıyla açıklanmıştır. Sonuç olarak $Fe_3O_4/Nb:STO$ ve Fe_3O_4/ZnO eklemleri metal-yarıiletken kontakta tipik bir Schottky engeli oluşturmuştur.

Fan *et al.* (2012) tarafından yapılan bir çalışmada $Fe_3O_4/a-C/n-Si$ eklemleri sırasıyla a-C ve Fe_3O_4 tabakalarının Si yüzey üzerine hedefe bakan magnetron püskürtme tekniği kullanılarak biriktirilmesiyle oluşturulmuştur. Farklı kalınlıklardaki a-C tabakaları ile oluşturulan $Fe_3O_4/a-C/n-Si$ eklemlerin $I-V$ karakteristikleri incelenmiştir. Tüm eklemler lineer olmayan ve asimetric bir $I-V$ eğrisi davranışı sergilemiştir. Bu durum eklemin doğrultma özelliğine sahip olduğunu göstermiştir. Heteroeklemler içinde Fe_3O_4 'ün iş fonksiyonu (5,3 eV) aşırı katkılı n-Si'un iş fonksiyonundan (4,1 eV) daha büyüktür ve elektronlar uzay yükü bölgesi oluşturarak Si'den Fe_3O_4 'e doğru akacaktır. Bundan dolayı Fe_3O_4 tabakalar bir p-tipi tabaka gibi davranır ve heteroeklemler biraz asimetric $I-V$ karakteristiği sergilerler. $I-V$ karakteristiklerinden 0 nm ve 20 nm kalınlıklı a-C tabakalar için idealite faktörü sırasıyla 1,24 ve 1,19 olarak hesaplanırken, engel yüksekliği değerleri ise sırasıyla 0,19 eV ve 0,24 eV olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü değerinin ideal değeri olan 1'e yakın olmasının sebebi akımın iletiminde öncelikli olarak termiyonik alan emisyonunun baskın mekanizma olmasına atfedilmiştir.

Bu teoriye göre iletkenliği sağlayan taşıyıcılar arayüzeyde potansiyel engeli boyunca tünelleme yapacaktır.

Yan *et al.* (2009) tarafından yapılan çalışmada (1 1 1) yönelimli polikristal Fe₃O₄ ince filmleri rf-püskürtme tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Bu filmlerin XRD ve XPS lmleri alınmıştır. Bu lmler saf polikristal Fe₃O₄ filmlerin yüzey sıcaklığı 773 K üzerindeyken elde edilebileceğini göstermiştir. Yüzey pürüzlülüğünün hidrojenin aşındırma etkisinden dolayı hidrojenin kısmi basıncının artmasıyla artacağı belirtilmiştir. Ayrıca 40-300 K sıcaklık aralığında alınan *I-V* lmlerinden Fe₃O₄/Si heteroeklemlerin iyi bir doğrultma özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Fe₃O₄/Si heteroyapının *I-V* karakteristiğinden 300 K'de idealite faktörü değerı 1,9 olarak hesaplanırken, engel yüksekliliği değerı 0,69 eV olarak hesaplanmıştır. Bu durum 40 K'de sırasıyla 2,4 eV ve 0,08 eV olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada artan sıcaklıkla engel yksekliliğinin artması ve idealite faktörü değerinin azalması elektronların potansiyel engelinden daha büyük enerjiye sahip olduklarında termiyonik akım şeklinde engel üzerinden geçebilmesine atfedilmiştir. İlaveten elektronların arayüzey yakınındaki kusur miktarlarına bağlı olarak engel boyunca tünelleme yapabileceğine atfedilmiştir.

Ghosh *et al.* (2014) tarafından yapılan bir çalışmada Fe₃O₄/SiO₂/*n*-Si heteroyapıların elektriksel ve manyetik iletim özellikleri incelenmiştir. Fe₃O₄/SiO₂/*n*-Si heteroyapısının 25-300 K aralığında *I-V* lmleri yapılmıştır. Oda sıcaklığında *I-V* karakteristikleri ters ve düz beslem voltajları için hemen hemen simetrik bir yapı göstermiştir. Fakat sıcaklık azaldıkça karakteristik farklı bir davranış göstermiştir. Ters beslem voltajının artmasıyla düz beslem akımı çok kk kalırken eklem akımı önemli ölçüde artmıştır. 150 K'in üzerinde düz beslem akımının 300 K'e kadar artan sıcaklıkla arttığı gözlemlenmiştir. Buna karşın ters beslem akımı 160-300 K sıcaklık aralığında ters diyot davranışı gösterir. Ters ve düz beslem, *C-V* karakteristiklerinden düz ve ters beslem durumunda kapasitenin sırasıyla arttığı ve azaldığı grlmştir.

Master *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada darbeli lazer büyütme tekniği ile büyütülen ZnO/*p*-Si ve ZnO/Fe₃O₄/*p*-Si heteroyapıların doğrultma özellikleri

incelenmiştir. Eklemin özelliklerinin sıcaklığa güçlü bir şekilde bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen ölçümler ara Fe_3O_4 tabakasının $\text{ZnO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/p\text{-Si}$ içindeki iletim özelliklerini değiştirmekte önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. $\text{ZnO}/p\text{-Si}$ içinde eklem boyunca elektriksel iletim için termiyonik emisyon baskın mekanizmadır. Oysa $\text{ZnO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/p\text{-Si}$ içinde oda sıcaklığında termiyonik emisyon modeli lineer olmayan $I\text{-}V$ karakteristiğini açıklar, fakat elektriksel iletim tünelleme mekanizması tarafından yönetilir. Yapılan bu çalışmada $\text{ZnO}/\text{Fe}_3\text{O}_4/p\text{-Si}$ heteroyapısının elektriksel özelliklerinin $\text{ZnO}/p\text{-Si}$ yapısından daha iyi olduğu belirtilmiştir. Bu durumun nedeni Fe_3O_4 'ün farklı elektriksel özelliklere sahip yarı metalik bir malzeme olmasına ve Fe_3O_4 'ün ZnO ve $p\text{-Si}$ yüzeyleri arasında doğrultma özelliklerini değiştirebileceğine atfedilmiştir. Sıcaklığa bağlı ölçümlerden azalan sıcaklıkla idealite faktörü artmış ve 300 K'de 2 iken, 110 K'de ise 4,4'e yükselmiştir. Diğer bir taraftan azalan sıcaklıkla engel yüksekliği 0,67 eV'den 0,20 eV'ye düşmüştür. Azalan sıcaklıkla idealite faktörünün artması ve engel yüksekliğinin azalması engeldeki homojensizlik, kusurlar, tünelleme ve seri direnç gibi çeşitli nedenlere atfedilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal/Yarıiletken Kontaklar

Bir metalle yarıiletkenin atomik seviyede birleştirilmesi sonucu oluşan kantağa **metal-yarıiletken kontak** denir. Bir metal ile bir yarıiletken kontak haline getirildiğinde enerji-band diyagramlarının farklı olmasından dolayı aralarında bir yük alışverişi meydana gelir. Bu olay denge durumuna ulaşınca kadar devam eder. Isıl denge meydana geldiğinde her iki malzemenin Fermi enerji seviyeleri aynı düzeydedir. Metal-yarıiletken kontak, iki malzemenin idealde sıfır dirençle temas etmesi olarak ele alınır.

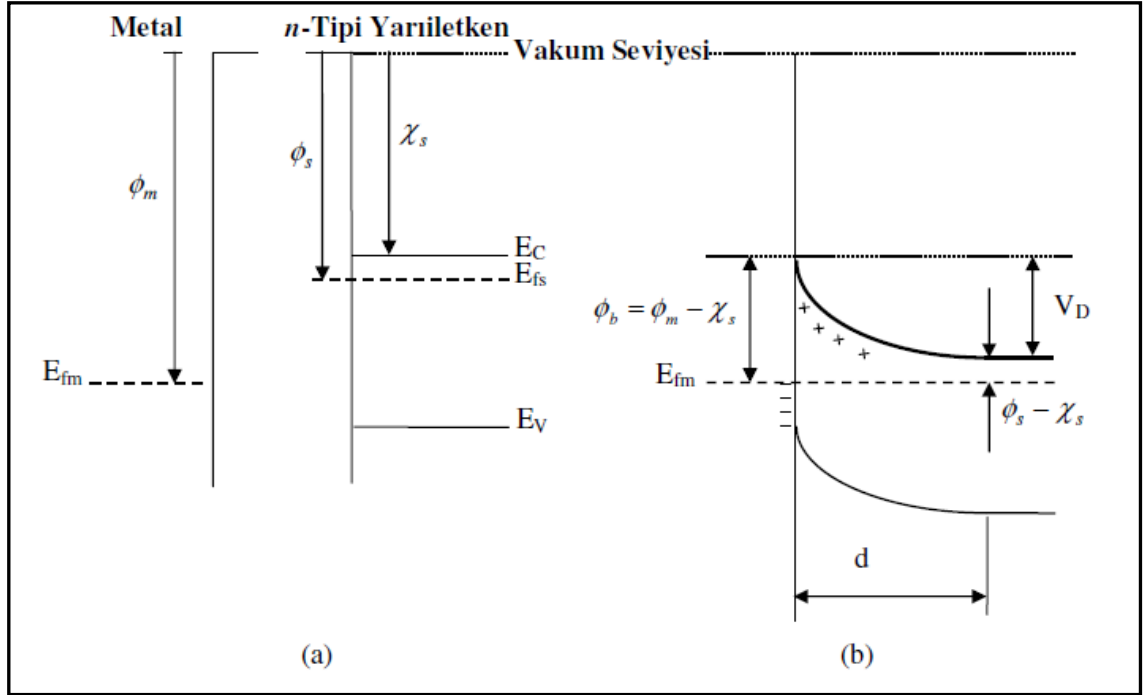
Metal-yarıiletken kontaklarda metal olarak Au, Al, In, Ag, Sn gibi çeşitli metaller kullanılırken yarıiletken olarak n veya p tipi yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. Böylece metal-yarıiletken kontakları, kullanılan yarıiletkenin tipine göre; metal n -tipi yarıiletken kontak ve metal p -tipi yarıiletken kontak olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Akım iletim durumlarına göre kontaklar; doğrultucu kontaklar (Schottky kontak) ve omik kontak olmak üzere iki durumda incelenir. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) olmak üzere metal/ n -tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ ise omik kontak oluşur. Metal/ p -tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ için omik kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ için ise doğrultucu kontak oluşur.

2.1.1. Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Metal-yarıiletken kontaklarda akım taşıyıcıların bir yönden diğer yöne göre daha kolayca akabildiği kontaklara, **doğrultucu kontak** (Schottky kontak) denir. N -tipi yarıiletken-metal kontaklarda, Schottky kontak elde edebilmek için yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) metalin iş fonksiyonundan (Φ_m) daha küçük ($\Phi_m > \Phi_s$) olması gerekir. Doğrultucu kontaklarda kontakta önce n -yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar yukarıdadır. Kontakta sonra yarıiletkenle metal arasında

bir yük alışverişi olur ve denge hali oluşuncaya yani elektrokimyasal potansiyeller (Fermi seviyeleri) eşit oluncaya kadar bu alışveriş devam eder (Ziel 1968). Elektronlar, geride iyonize olmuş donörler bırakarak yarıiletken den metale geçerler. Doğrultucu kontak oluşumu sonucunda n-tipi yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ile metal tarafındaki yüzey yükleri arasında zıt yüklemelerinden dolayı bir dipol tabakası oluşur. Bu da kontakta, bir potansiyel engelinin oluşmasını sağlar. Yani yarıiletken tarafına bandların aşağı doğru bükülmesine neden olur. Kontakten önceki ve sonraki durumlar için enerji band diyagramları Şekil 2.1’de görülmektedir. Metal n-tipi yarıiletken için engel yükseklikleri yarıiletken tarafında $eV_{dif} = (\Phi_m - \Phi_s)$ ve metal tarafında $e\Phi_b = (\Phi_m - \chi_s)$ eşitlikleriyle verilir. Burada e elektronun yükü, V_{dif} difüzyon potansiyeli, Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu, Φ_b diyodun engel yüksekliği ve χ_s yarıiletkenin elektron ilgisidir. Yarıiletkenin elektron ilgisi (χ_s), iletkenlik bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkına denir (Ziel 1968). Difüzyon potansiyeli yarıiletkenin iç potansiyeli olup metalin yüzeyine göre ölçülür.

Yarıiletken tarafındaki d kalınlığına sahip ve elektronlardan arınmış olan bölgeye uzay yükü bölgesi, **arınma bölgesi** veya **Schottky bölgesi** denir. Arınma bölgesinin elektronlardan arınmasıyla geriye kalan sabit pozitif yüklü donör atomlarına “**uzay yükü**” denir. Bu bölgenin metal tarafında negatif yüzey yüklerine, yarıiletken tarafında pozitif uzay yüküne sahip olduğundan bir kondansatör gibi davranır ve bir kapasiteye sahiptir. Oluşan bu kapasiteye **Schottky kapasitesi** veya **arınma bölgesi kapasitesi** denir. Bu Schottky kapasitesi, arınma tabakasının kalınlığı (d) ile ters orantılı, iyonize olan donörlerin konsantrasyonuna bağlı olup, ve difüzyon potansiyeli (V_D) değeri ile doğru orantılı olacaktır (Rhoderick and Williams 1988). Bu kapasite p-n yapılar da **eklem kapasitansı** olarak bilinir ve Schottky kapasitesiyle karşılaştırılmayacak kadar büyüktür, yüksek frekanslarda bükülmeye sebep olur.



Şekil 2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak

- (a) Kontak öncesi
(b) Kontak sonrası (denge durumu)

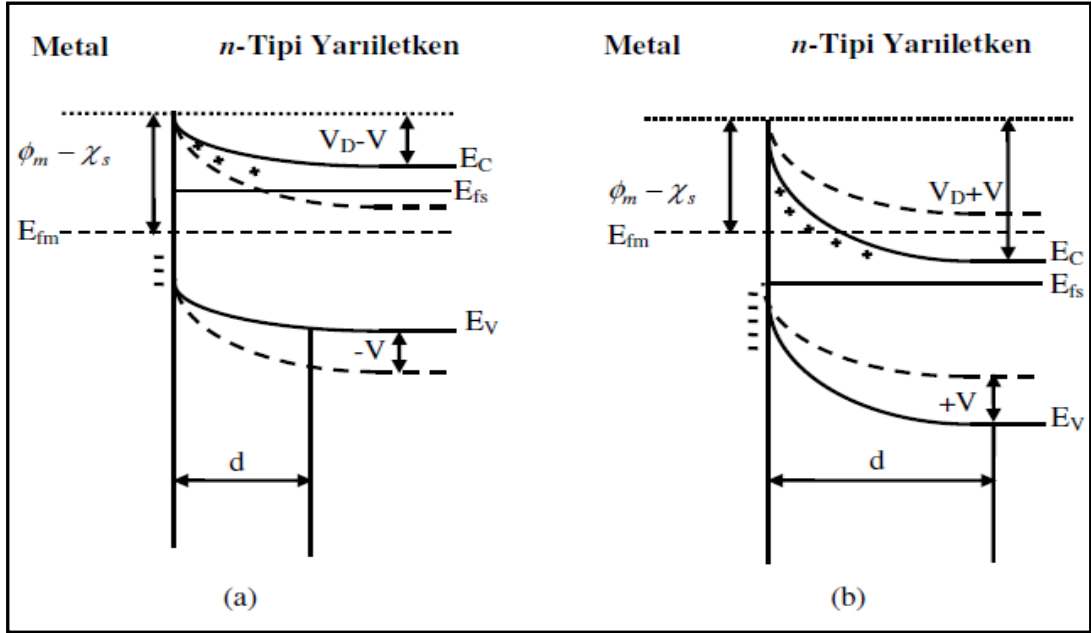
Kontak haline getirilmiş ve dengedeki metal n-tipi yarıiletken Schottky kontakta metaldeki bazı elektronlar termal uyarılma nedeniyle yeterli enerjiye sahip olduklarından potansiyel engelini geçip metalden yarıiletkene ve bazıları ise ters yönde yani yarıiletkenden metale geçerler. Bu geçişlerde eşit ve ters yönlü I_o akımları oluşur. Böylece net akım sıfır olur.

Yarıiletkene eV büyüklüğünde bir negatif potansiyel uygulanırsa metalden yarıiletkene giden elektronlar için engel değişmeyeceğinden bu elektronların oluşturacağı akımda da bir değişiklik olmayacaktır. Bunun yanı sıra yarıiletkenin iletkenlik bandındaki enerji seviyeleri eV kadar yükselecektir. Bundan dolayı yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalır. Buna bağlı olarak metalden yarıiletkene akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar artar. Oluşan net akım ise;

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

eşitliği ile verilir. Burada I_0 doyma akımı, V uygulanan potansiyel, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Schottky etkisi ve ara yüzey tabakası hariç tutulursa, metal tarafındaki engel yüksekliği uygulanan V voltajından bağımsız olduğundan dolayı sabittir. Yarıiletken tarafında ise engel yüksekliği uygulanan V voltajı ile doğru orantılı olarak değiştiğinden engel yüksekliği sabit değildir. Bu durum Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Düz ve ters beslem altındaki Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontak

- (a) $V < 0$ olması durumunda enerji band diyagramı
 (b) $V > 0$ olması durumunda enerji band diyagramı

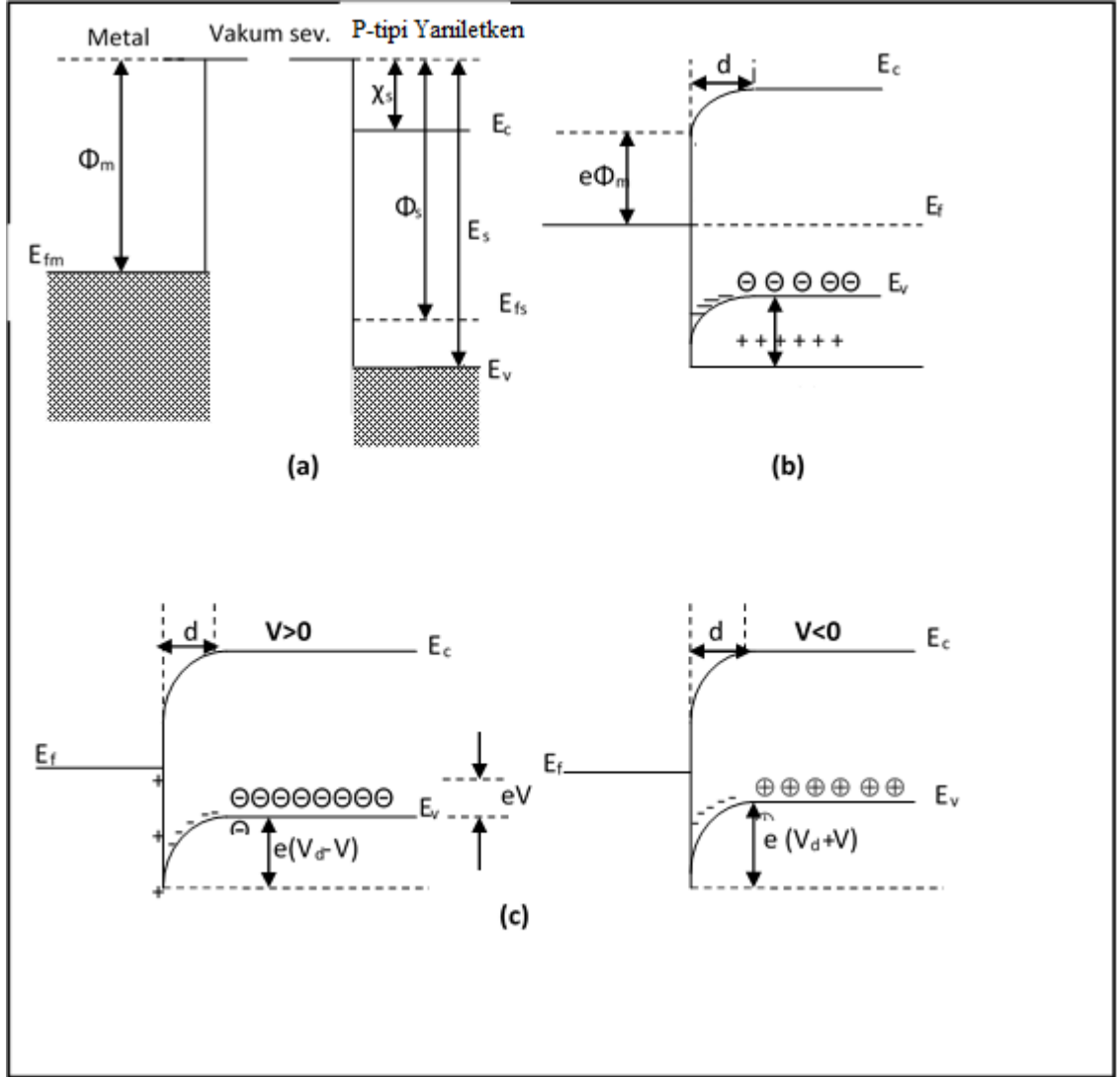
Metal/ n -tipi yarıiletken Schottky kontaktlarda yarıiletken tarafına $-V$ ($V < 0$) negatif voltaj uygulanırsa kontak düz beslemde (ileri yönde kutuplama), $+V$ ($V > 0$) pozitif voltaj uygulanırsa "kontak ters beslemedir" (ters yönde kutuplama) denir.

2.1.2. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Bir metal ve bir p -tipi yarıiletkeni dikkate alınmış ve oluşan kontak için $\Phi_m < \Phi_s$ olsun. Oda sıcaklığında akseptörlerin hepsinin iyonize olduğu kabul edilsin. Kontakta önce, Şekil 2.3.a'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontakta sonra her iki maddenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metalden yarıiletkene doğru elektron akışı olur. Bunun sonucu olarak, yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler d kalınlığında bir uzay yükü tabakası içerisinde dağılırlar. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiği için, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_d = \Phi_s - \Phi_m \quad (2.2)$$

olur. Burada V_d difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakta metal tarafındaki holler için engel yüksekliği; $e\Phi_b = E_g - \Phi_m$ ifadesi ile verilir.



Şekil 2.3. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontakın enerji-bant diyagramı a; kontakta önce, b; kontakta sonra ve termal dengede, c; $V \neq 0$ durumunda

Yarıiletkendeki bazı holler termal uyarılmadan dolayı, potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanarak, metalin içine geçebilirler. Benzer şekilde metalde termal olarak oluşan bazı holler de engeli aşacak kadar enerji kazanarak, yarıiletkenin içine geçebilirler. Böylece kontakta engelden geçen eşit ve zıt yönlü iki I_0 akımı oluşur.

Yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa (Şekil 2.3.b), soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Bunun sonucu olarak yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşer ve buna bağlı

olarak yarıiletkenden metale geçen holler için engel yüksekliği eV kadar azalır. Sonuçta sağdan sola doğru olan akım pozitif kabul edilirse, karakteristik akım,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

olacaktır. Bu durum bir doğrultucu karakterizasyonudur.

2.2. Omik Kontaklar

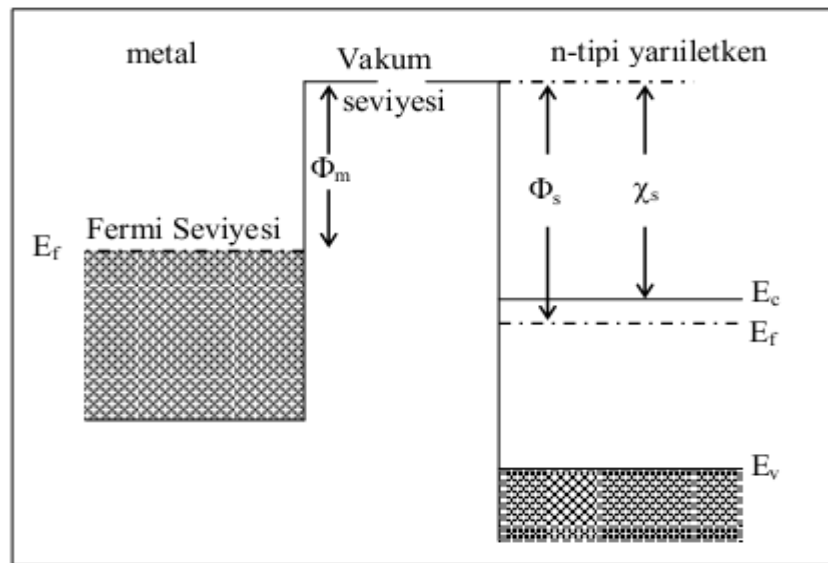
Uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren metal/yarıiletken eklem **omik kontak** olarak tanımlanır (Neamen 1992; Brillson 1993). Aşırı katkılanmış p tipi bir yarıiletkende fermi enerji seviyesi (E_f), valans bandının içine girer. Bu durumda dar bir potansiyel engeli oluşacaktır ve oluşan potansiyel engel dalgaboyu mertebesinde olacağından tünelleme yolu ile her iki yönde serbestçe yük geçişi gözlenecektir. Akım-gerilim ilişkisi Ohm kanunu ile verilen kontaklar omik bir davranış sergilerler. Kontak direncinin değeri ise omik kontakın kalitesini belirler. Her iki yönde de akım akışına müsaade edecek omik kontak elde etmenin üç genel şekli vardır. Bunlardan ilki Schottky engel yüksekliği düşük olan bir eklem oluşturularak elektronların her iki yönde de geçiş yapabileceği bir kontak yapmaktır (non-rectifying barrier). İkincisi Schottky engel yüksekliği büyük olsa dahi elektronların tünelleme yapabileceği dar potansiyel engele sahip bir kontak oluşturmaktır (tunnelling barrier). Bu tünelleme engeli, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik (n^{++} veya p^{++}) gösterecek şekilde katkılamak suretiyle elde edilir. Üçüncüsü termal difüzyonla dar bant aralıklı taban ile aynı özellikte bir tabaka oluşturmak suretiyle omik kontak oluşturmaktır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu ve fermi enerji seviyesinin pozisyonuna göre n ve p tipi yarıiletkenler ile yapılan omik kontaklar farklılıklar gösterir.

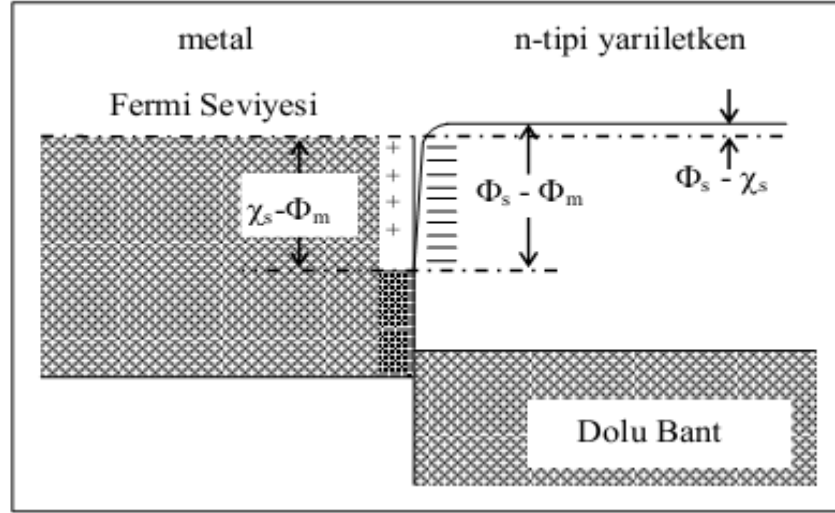
2.2.1. Metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontaklar

$\Phi_s > \Phi_m$ durumunda, bir metalle bir *n*-tipi yarıiletken arasında omik kontak oluşur. Şekil 2.4'de kontaklan önce metalin ve yarıiletkenin enerji bant diyagramları verilmiştir. Kontaklan önce metalin Fermi seviyesi yarıiletkenin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yukarıdadır. Kontaklan sonra metaldeki elektronlar geride pozitif yükleri bırakarak yarıiletkene geçerler. Metal tarafında pozitif yüzey yükü, yarıiletken tarafında ise negatif yüzey yükü tabakası oluşur. Böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Yük alış verişi bittikten sonra yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil 2.5'de görüldüğü gibi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir. Kontak haline getirilmiş ve dengedeki metal-yarıiletken omik kontakta, metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale kolayca yük akışı olur.

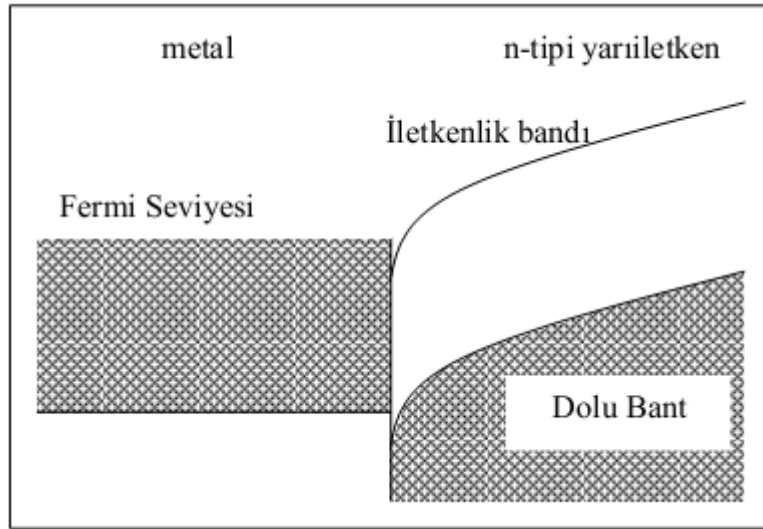
Metal tarafına pozitif bir *V* gerilimi uygulanırsa yarıiletkenden metale akan elektronlar için engel olmadığından elektronlar bu yönde kolayca hareket ederler (Şekil 2.6). Yarıiletkene bir pozitif gerilim uygulanırsa elektronların karşılaşacakları engel yüksekliği yine çok küçük olacak ve elektronlar metalden yarıiletkene kolayca akacaktır (Şekil 2.7).



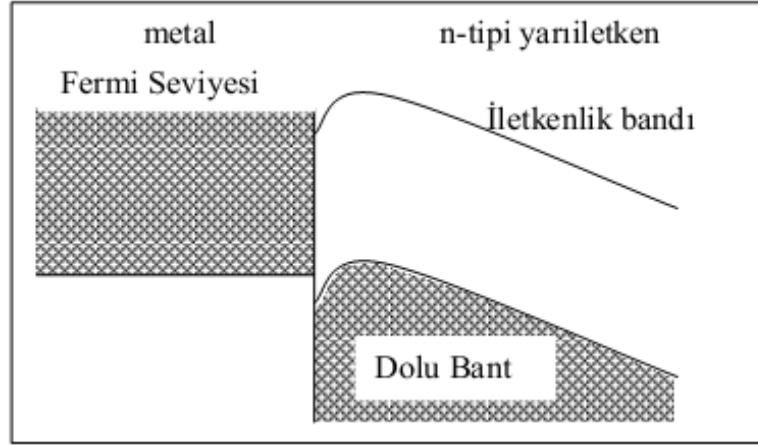
Şekil 2.4. Kontak yapılmadan önce metal ve *n*-tipi yarıiletken enerji bant diyagramı ($\Phi_m < \Phi_s$)



Şekil 2.5. Kontakta sonra metal ve yarıiletken omik kontakın enerji bant diyagramı



Şekil 2.6. Düz beslem durumunda metal ve *n*-tipi yarıiletken omik kontakın enerji bant diyagramı



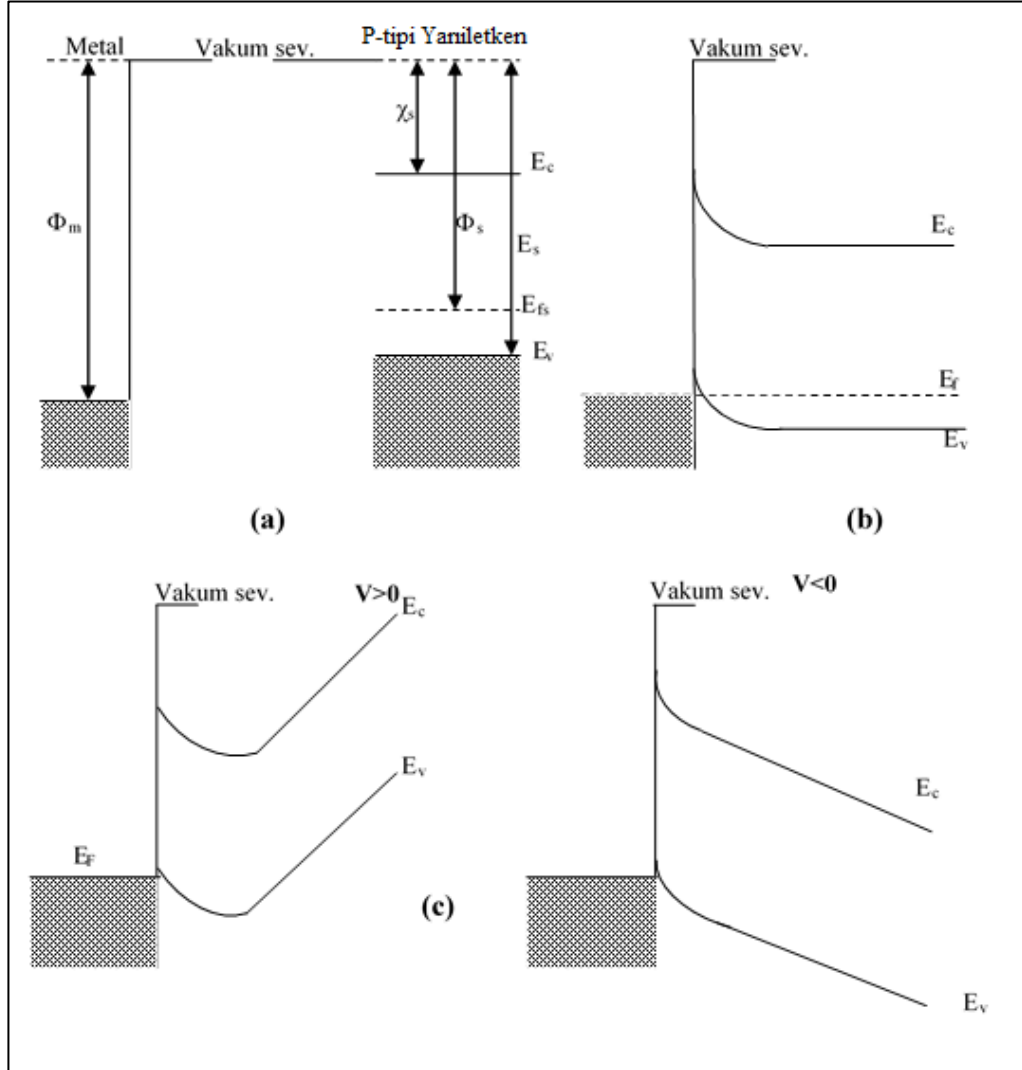
Şekil 2.7. Ters beslem durumunda metal ve n -tipi yarıiletken omik kontakın enerji bant diyagramı

Sonuç olarak böyle bir kontakta, elektronlar her iki yönde de kolayca hareket edebilirler. Omik kontakta bir $+V$ gerilimi uygulandığında, potansiyel bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Metale negatif bir ($-V$) gerilim uygulandığında, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektron geçişi olmasından dolayı bu kontaklara **enjeksiyon kontaktarı** da denir (Ziel 1968).

2.2.2. Metal/ p -tipi yarıiletken omik kontaktlar

$\Phi_m > \Phi_s$ durumunda bir metalle bir p -tipi yarıiletken kontak halinde olsunlar. Şekil 2.8.a'da görüldüğü gibi, kontakdan önceki durumda yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakdan sonra termal denge durumunda bir yük alışverişi meydana gelecektir. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (hollerden dolayı) bırakarak metal tarafına geçerler ve metal tarafında bir negatif yüzey yükünün oluşmasına neden olurlar. Buna bağlı olarak yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 2.8.b'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı düşer. Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla p -tipi olur. Elektronlar, metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca akabilirler. Bu yük hareketi, hollerin yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen holler yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralize olurlar. Ters beslem

durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler de kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler.



Şekil 2.8. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontakın enerji bant diyagramı a; kontakdan önce, b; kontakdan sonra, c; $V \neq 0$ durumunda

2.3. Tünelleme Eklemi

Tünelleme metal-yarıiletken doğrultucu diyotlardaki önemli bir akım iletim mekanizmasıdır. Elektronlar engel yüksekliğini aşmak yerine daralan engel genişliği sayesinde Schottky engeli boyunca tünellenirler. Geniş yasak enerji aralığına sahip

yarıiletken numuneler üzerinde omik kontak yapmak çok zordur. Çünkü bu malzemeler üzerinde düşük engel yüksekliği oluşturmak suretiyle taşıyıcıların her iki yönde de geçiş yapabilmeleri pratik açıdan büyük güçlükler doğurur. Bu tür malzemeler için, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik gösterecek biçimde (n^{++} ya da p^{++}) katkılanmak suretiyle, büyük engel yüksekliğine sahip, ancak taşıyıcıların her iki yönde de tünelleme yapabilmesine izin verecek kadar dar potansiyel engeli oluşturmak mümkündür. Katkılama işlemi termal difüzyon, iyon ekme (ion implantation), ya da epitaksiyel büyütme tekniklerinden biri kullanılarak yapılabilir (Neamen 1992).

Coşkun (2000), bir doğrultucu kontağın uzay yükü bölgesinin genişliği (deplasyon bölgesi), yarıiletken katkılanan kirlilik atomlarına ait konsantrasyonun karekökünün tersiyle orantılı olduğu belirtilmiştir (Aydoğan 2003).

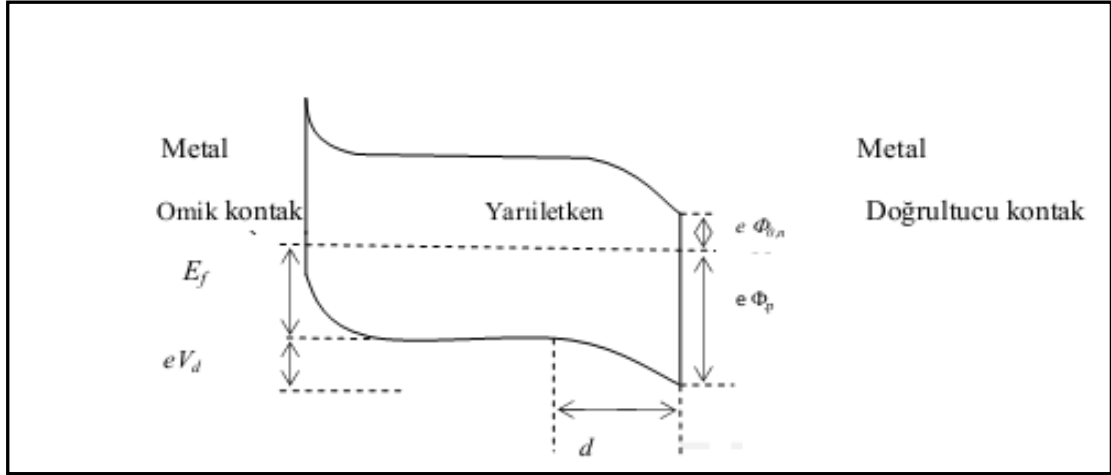
$$w = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{qN_d}\right)\left(\phi_b - (E_c - E_f) - V - \frac{kT}{q}\right)} \quad (2.4)$$

Bundan dolayı uzay yükü bölgesinin genişliği, katkı atomlarının konsantrasyonunun artmasıyla azalır. Bu durumda katkı konsantrasyonu arttıkça, potansiyel engel genişliği azalacak ve taşıyıcıların her iki yönde de tünelleme yapma ihtimaliyeti artacaktır. Bu yüzden tünelleme ile omik kontak oluşturmada yarıiletken yüzeyin aşırı tiplilik gösterecek seviyede katkılanması gerekmektedir.

2.4. Metal (Omik)/p-tipi Yarıiletken/Metal (Doğrultucu) Yapısı

Metal (Omik)/p-tipi yarıiletken/Metal (Doğrultucu) yapısı; p-tipi yarıiletkenin bir yüzeyinin hol bakımından çok zengin olan p^+p omik kontağı ile diğer yüzeyinin pM doğrultucu kontağı yapılmasıyla oluşturulur (Temirci 2000). Böyle bir yapının enerji-bant diyagramı Şekil 2.9'da görülmektedir. Bu yapının p^+ omik kontak tarafına pozitif bir gerilim uygulandığında yapı doğru beslemde, negatif bir gerilim uygulandığında

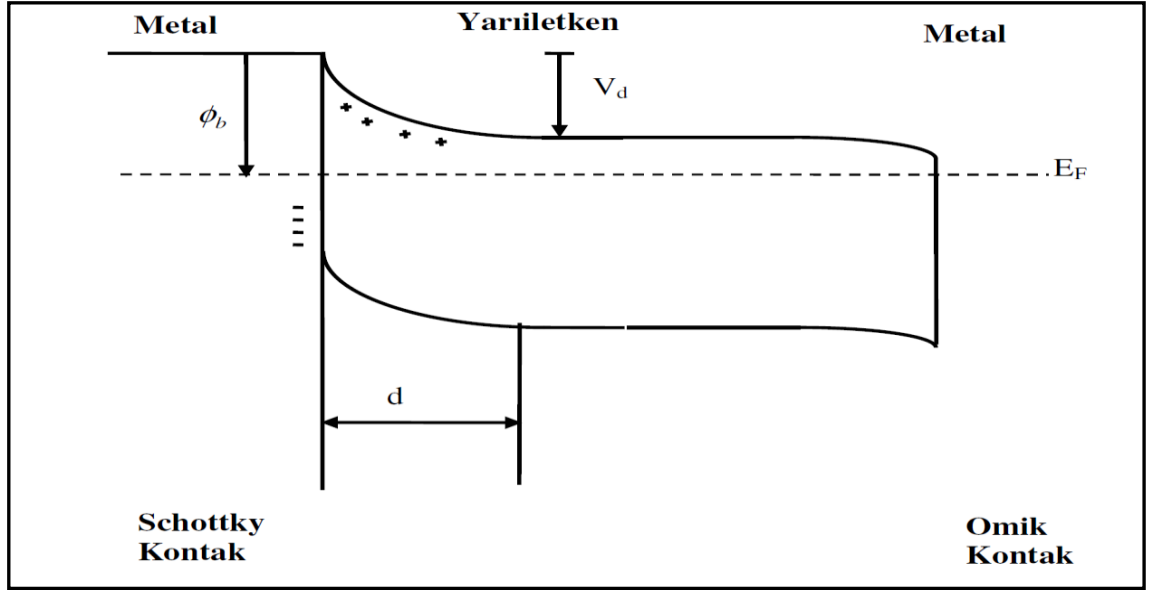
yapı ters beslemde olur. p^+pM yapısı, diyot karakteristiği gösterdiği için böyle bir yapı, yarıiletken diyot olarak nitelendirilir (Kotan 2008).



Şekil 2.9. p^+pM yarıiletken yapının termal dengede enerji-band diyagramı

2.5. Metal (Omik) / n-Tipi Yarıiletken / Metal (Schottky) Yapısı

N -tipi yarıiletkenin bir yüzeyinin omik kontak olması için elektron bakımınca zengin (n^+) bir bölge, diğer yüzeyinin ise Schottky kontak olması için bir metal (M) buharlaştırılarak metal/ n -tipi yarıiletken Schottky diyodu elde edilmiş olur. Bu yapı n^+nM ile gösterilir. Termal denge durumundaki enerji-band diyagramı Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Termal dengede n -tipi Schottky diyodun enerji band diyagramı.

$n^+ nM$ karakteristik bakımından diyot özelliği gösterdiğinden bunlara Schottky diyodlar denir. Bu yapıyı düz beslemek için omik kontak tarafa negatif ($V < 0$), ters beslemek için omik tarafa pozitif bir voltaj ($V > 0$) uygulanmalıdır.

2.6. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Sıcaklığın Etkisi

Yarıiletken devre elemanlarında kullanılan kontakların çoğu farklı şekillerde ısıya maruz kalmaktadır. Metalin yarıiletkene yapışmasını artırmak için bu durum kaçınılmaz olabilir. İdeale yakın doğrultucu kontak elde ederken kontakın eriyebileceği sıcaklıktan kaçınmak çok önemlidir. Çünkü arayüzey yarıiletkenin içinde keskin metalik sivri bir çıkıntıya sahip düzlemsel olmayan yapıya sahip olmaya başlar. Bu durum oluştuğunda, çıkıntının ucundaki yüksek alan bölgesi elektriksel karakteristikleri nispeten bozulabilir (Aydoğan 2003).

Devre elemanı uygulamalarında diyotta akım akışı ile oluşan ısının bir sonucu olarak bir düzensizlik oluşabilir. Gözlenen metalürjik değişimler için $I-V$ karakteristiklerinin bozulmasını açıklamak oldukça zordur. $I-V$ karakteristiklerindeki değişim her zaman

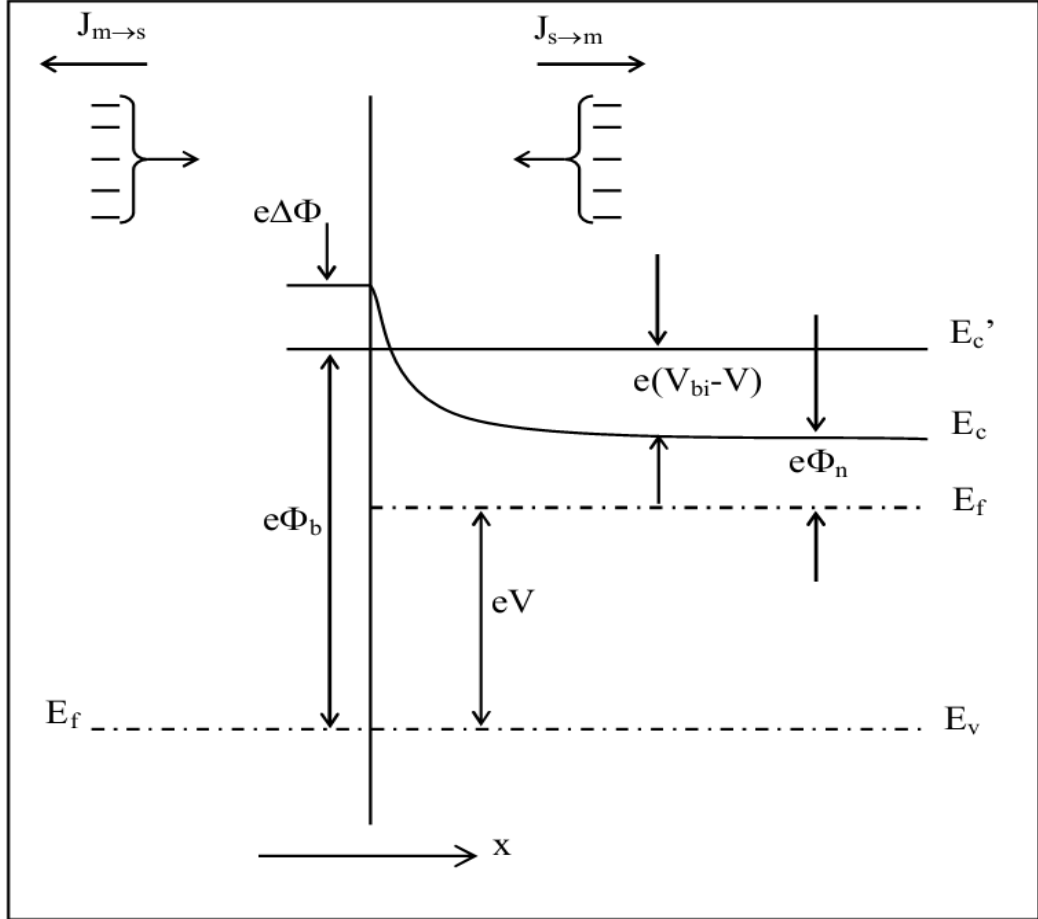
engel yüksekliğindeki bir değişimle basitçe açıklanamayabilir. Bazen karakteristikler donör veya akseptör olarak davranan atomların yarıiletkene difüze oldukları kabul edilerek yorumlanabilir veya yarıiletkende katkı atomlarının etkin yoğunluğunun değiştirilmesi için elektriksel olarak aktif merkezler oluşturulur. Katkı yoğunluğu arttıkça engel daralır ve termiyonik alan emisyonu oluşabilir. Yarıiletken içine giren atomlar veya kusurlar asıl katkı atomlarıyla zıt polaritede iseler etkin hal yoğunluğu azalır ve bazen p-n eklemının oluşabileceği durum elde edilir. Bunun en iyi örneği Al/Si kontaktlardır ve teknolojik öneminden dolayı yaygınca çalışılmaktadır (Rhoderick 1988).

2.7. Termiyonik Emisyon ve Akım-Voltaj Karakteristiği

Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı **termiyonik emisyon** olarak tanımlanır. Schottky kontaktlarda bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi bu teori ile açıklanmaktadır. Metal/yarıiletken Schottky diyotlarda termoyonik emisyon teorisi taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar akımı sağlar. Metal/yarıiletken kontağa bir gerilim uygulandığında metal ve yarıiletkendeki Fermi enerji seviyeleri artık aynı hizada olmayacak ve termal olarak uyarılmış elektronlar engelin diğer tarafına geçeceklerdir. Yarıiletken tarafındaki elektronlar için engel yüksekliği, uygulanan gerilime göre değişir. Doğru beslem altında elektronlar için engel yüksekliği azalacak ve bu sayede metalden yarıiletkene doğru olan akım artacaktır. Ters beslem durumunda ise engel artacak ve metalden yarıiletkene doğru olan akım azalacaktır.

Sze (1981) tarafından bildirildiğine göre; termiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontağa ait potansiyel engelinin, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok

küçük olduğu kabul edilmektedir. Buna paralel olarak deplasyon bölgesinde görülen sürüklenme ve difüzyon bu teoriye göre ihmal edilmektedir (Çaldıran 2013).



Şekil 2.11. Düz beslem altındaki metal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi

Şekil 2.11'de V büyüklüğünde düz beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak görülmektedir. Burada $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu nedenle,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} v_x dn \quad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_c' metal içindeki termiyonik emisyon için gerekli minimum enerji, v_x taşınma yönündeki hızdır. Artan elektron konsantrasyonu,

$$dn = g_c(E) f_F(E) d(E) \quad (2.6)$$

ile verilir. Burada, $g_c(E)$ iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu ve $f_F(E)$, Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonudur. Maxwell-Boltzmann yaklaşımı uygulanarak elektron konsantrasyonu için,

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[\frac{-(E - E_F)}{kT}\right] dE \quad (2.7)$$

yazılabilir. $(E - E_c)$ enerjisi serbest elektronun kinetik enerjisi olarak kabul edilirse, bu durumda,

$$\frac{1}{2} m_n^* v^2 = E - E_c \quad (2.8)$$

$$dE = m_n^* v dv \quad (2.9)$$

ve

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (2.10)$$

olur. Bu sonuçlar kullanılarak (2.10) ifadesi yeniden düzenlenirse,

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h}\right)^3 \exp\left(\frac{-e\phi_n}{kT}\right) \exp\left(\frac{-m_n^* v^2}{2kT}\right) 4\pi v^2 dv \quad (2.11)$$

elde edilir. Bu denklem, hızları v ve $v + dv$ aralığında değişen elektronların sayısını verir. Hız, bileşenlerine ayrılırsa; $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ şeklinde olur. Buradan (2.5) ifadesi,

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(\frac{-e\phi_n}{kT} \right) \int_{v_{0x}}^{\infty} v_x \exp\left(\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* v_y^2}{2kT} \right) dv_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* v_z^2}{2kT} \right) dv_z, \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. v_{0x} hızı, x doğrultusundaki harekette elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için gerekli olan minimum hızdır. Son ifadede aşağıdaki değişken değiştirmeleri yapılabilir,

$$\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \equiv \alpha^2 + \frac{e(V_{bi} - V)}{kT} \quad (2.13.a)$$

$$\frac{m_n^* v_y^2}{2kT} \equiv \beta^2 \quad (2.13.b)$$

$$\frac{m_n^* v_z^2}{2kT} \equiv \gamma^2 \quad (2.13.c)$$

Ayrıca minimum v_{0x} hızı için, $\frac{1}{2} m_n^* v_{0x}^2 = e(V_{bi} - V)$ yazılabilir. Bu durumda $v_x \rightarrow v_{0x}$

şartı için $\alpha = 0$ olur. Yine $v_x dv_x = \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right) \alpha d\alpha$ yazılabilir. Bu ifadeler (2.12)

denkleminde kullanılırsa;

$$\begin{aligned}
J_{s \rightarrow m} &= 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp\left(\frac{-e\phi_n}{kT} \right) \exp\left[\frac{-e(V_{bi} - V)}{kT} \right] \\
&\times \int_0^\infty \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^\infty (-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^\infty (-\gamma^2) d\gamma
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Bu son ifadenin integrali alınır;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[\frac{-e(\phi_n + V_{bi})}{kT} \right] \exp\left(\frac{eV}{kT} \right) \tag{2.15}$$

ya da

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[\frac{-e\phi_b}{kT} \right] \exp\left(\frac{eV}{kT} \right) \tag{2.16}$$

olur. Uygulama gerilimi sıfır olduğunda $J_{s \rightarrow m}$ ile $J_{m \rightarrow s}$ tamamen eşittirler. Yani,

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left[\frac{-e\phi_b}{kT} \right] \tag{2.17}$$

olur. Eklemdaki net akım yoğunluğu $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$ olur. Daha açık ifadeyle net akım yoğunluğu,

$$J = \left[A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT} \right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \tag{2.18}$$

olur. Burada A^* termiyonik emisyon için Richardson sabiti olup,

$$A^* = \frac{4\pi em_n^* k^2}{h^3} \quad (2.19)$$

ile verilir. Genel bir durum için (2.18) ifadesi,

$$J = J_{sT} \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.20)$$

olarak yazılabilir. Burada J_{sT} ters-doyma akım yoğunluğu olarak bilinir ve

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir. ϕ_b Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azaldığı ve $\phi_b = \phi_{b0} - \Delta\phi$ şekline verildiği dikkate alınarak (2.21) ifadesi yeniden,

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\phi}{kT}\right) \quad (2.22)$$

şeklinde yazılır. Engel yüksekliğindeki $\Delta\phi$ değişimi, artan elektrik alanla ya da artan ters beslem gerilimi ile artacaktır.

2.8. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Bazı Schottky Diyot Parametrelerinin Tayin Edilmesi

Metal/yarıiletken kontak yapısının doğru beslem I - V karakteristikleri yardımıyla Schottky diyot parametrelerinin hesaplanmasında Cheung and Cheung (1986),

tarafından farklı bir model sunulmuştur. Termiyonik emisyonun bulunan akım yoğunluğu (J) diyodun etkin alanı A ile çarpılırsa diyottan geçen toplam akım;

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.23)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadede $eV \gg kT$ ise, 1 ihmal edilebilir. Pratikte uygulanan gerilimin tamamı deplasyon bölgesine düşmediği dikkate alındığında, ideal durumdan sapmaların söz konusu olacağı söylenebilir. İdeal durumdan sapmaları ifade edebilmek için birimsiz sabit olan (n) idealite faktörü dikkate alınmalıdır. Bu durumda yukarıda ifade edilen akım denklemini aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.24)$$

uygulanan gerilim V 'nin IR_s kadarlık miktarı seri direnç bölgesine düşeceği için V yerine $(V) - IR_s$ yazarak (2.24) denklemini aşağıdaki şekilde yeniden yazabiliriz.

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

Son eşitlikten;

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.26)$$

ifadesi elde edilir. (2.26) eşitliğinin $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.27)$$

ifadesi elde edilir. (2.27) eşitliğinde, $\frac{dV}{d(\ln I)}$ 'nin I ya göre grafiği bir doğru olacaktır.

Bu grafikten elde edilecek olan doğrunun eğimi nötral bölge direncini ya da R_s , seri direncini verecektir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan (n) idealite faktörü bulunabilir. Potansiyel engeli Φ_b 'yi bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (2.28)$$

şeklinde bir $H(I)-I$ fonksiyonu tanımlanabilir. (2.26) ve (2.27) eşitliklerinden;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.29)$$

yazılabilir. (2.29) eşitliğinde $H(I)-I$ grafiği çizildiğinde bu grafik de bir doğru şeklinde olacak ve bu doğrunun eğimi de R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun $H(I)-I$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği $e\Phi_b$ bulunur (Reddy *et al.* 2012).

2.9. Norde Fonksiyonları ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Yüksek seri dirence sahip metal-yarıiletken kontaklarda, seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi fiziksel (elektronik) parametrelerin tayin edilmesi amacıyla yeni yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri de Norde tarafından $n = 1$ durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan, $F(V)$ fonksiyonudur. Bu yöntem R_s ve Φ_b 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlarda uygulandığı için sadece bir sıcaklıkta $I-V$ eğrisine ihtiyaç vardır (Norde 1979).

Sato ve Yasamura, Norde tarafından sunulan yöntemi geliştirerek idealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda da ($1 < n < 2$) n , R_s ve Φ_b değerinin hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Bu yöntem R_s ve Φ_b 'nin sıcaklığı değiştiği durumlarda da uygulanabileceğinden en az iki farklı sıcaklıktaki $I - V$ eğrisine ihtiyaç vardır. Benzer yöntem Mc Lean tarafından da belirtilmiştir (Sato and Yasamura 1985).

Termiyonik emisyon teorisine göre Schottky diyotların da düz beslem altındaki akım-gerilim ilişkisi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_o}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.30)$$

şeklindedir. Burada ilk çarpan I_o doyma akımı, V_o ise engel tabakası boyunca gerilim düşmesidir. Pratik olarak Schottky diyodları düz beslem akım-gerilim karakteristiklerinde ideal durumlardan bazı sapmalar gösterebilir ($n > 1$ gibi). Bundan dolayı eşitlik 2.13'deki akım ifadesi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_o}{nkT}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{eV_o}{kT}\right) \right] \quad (2.31)$$

şeklini alır. Burada $\left[\exp\left(-\frac{eV_o}{kT}\right) \right] \ll 1$ durumu göz önüne alınır ve Schottky diyoduna uygulanan V geriliminin bir kısmının seri direnç üzerine $V_o = V - IR_s$ şeklinde düşeceği düşünülürse 2.31 ifadesi;

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.32)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Burada V dışardan uygulanan gerilimi, R_s de seri direnci göstermektedir.

Termiyonik emisyon teorisi sadece diyodun düz beslem I - V karakteristiğinin lineer bölgesinde kullanılır. Yüksek seri direnç nedeniyle lineer bölge $kT/e \ll V \ll I R_s$ aralığıyla sınırlanır ve daralma gösterir. Bu durum $\ln(I)$ - V grafiğinin değerlendirilmesi daha karışık bir hal alır ve bu bölgede doyma akımı I_0 ve engel yüksekliği (Φ_b) değeri güvenilir olarak hesaplanamaz. R_s , Φ_b ve n değerlerini hesaplamak için daha güvenilir metotlar mevcuttur. İlk olarak Norde tarafından sunulan fonksiyon aşağıdadır.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (2.33)$$

Bu $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla $n=1$ için, R_s , Φ_b 'nin hesaplanmasına çalışılmıştır.

Bu yöntemle R_s , Φ_b 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlarda geçerli olduğundan tek bir I - V eğrisine ihtiyaç vardır. Eşitlik 2.30'un her iki tarafının \ln 'i alınıp eşitlik 2.31'de yerine yazıldığında,

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n}\right)V + \frac{IR_s}{n} + \varphi_b \quad (2.34)$$

elde edilir. Burada $R_s=0$ ideal durumu için $F(V)$ - V grafiğinin eğimi $(n-2/2n)$ olan bir doğrudur ve $F(V)$ eksenini $V=0$ 'da kestiği nokta Φ_b 'yi verir. Bu arada seri direnç sıfırdan farklı ise $F(V)$ fonksiyonu bir minimumda geçer ve

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA * T^2 R_s} \right) \quad (2.35)$$

şeklinde verilebilir. Eşitlik 2.35'in V 'ye göre türevi alınıp eşitlik düzenlenirse,

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{1}{2} \left[\frac{n-2}{2} + \frac{\beta I R_s}{n + \beta I R_s} \right] = \frac{n-2 + \beta I R_s}{2(n + \beta I R_s)} \quad (2.36)$$

olur. $(1/\beta = kT/e)$ ve $\partial F(V)/\partial V = 0$ şartında $F(V)$ bir minimum geçer. Minimumdan geçen akım I_{ob} gerilim değeri ise V_{oi} 'dir. Burada

$$\frac{n-2 + \beta I_{oi} R_{si}}{2(n + \beta I_{oi} R_{si})} = 0 \quad (2.37a)$$

$$n-2 + \beta I_{oi} R_{si} = 0 \quad (2.37b)$$

yazılır. Burada R_{si} ve Φ_b ' için sırasıyla

$$R_{si} = \frac{(2-n)}{I_{oi}} - \frac{kT_i}{e} \quad (2.38)$$

$$\phi_b = F(V_{oi}) + \left(\frac{2-n}{n} \right) V_{oi} - \left(\frac{2-n}{n} \right) \frac{1}{\beta_i} = F(V_{oi}) + \left(\frac{2-n}{n} \right) \left(\frac{V_{oi}}{2} - \frac{kT_i}{e} \right) \quad (2.39)$$

eşitlikleri çıkarılır. Burada R_{si} , β_i , V_{oi} ve I_{oi} ($i=1, 2, \dots, n$) farklı sıcaklıklara karşılık gelen değerlerdir. K.E Bohlin ise Schottky engel diyodunun I - V ölçümünden elde edilen R_s , Φ_b ve n değerlerinin belirlenmesini mümkün kılan iki farklı fonksiyon tanımlamıştır (Bohlin 1986). Norde fonksiyonun ilk terimi olan $V/2$ yerine V/γ terimi kullanılmıştır. Buradaki γ idealite faktöründen büyük olmak kaydıyla ($\gamma > n$) keyfi bir sabittir. Bu durumda Norde fonksiyonu,

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \left[\ln \left(\frac{I}{AA * T^2} \right) \right] \quad (2.40)$$

şeklinde yazılır. Yine eşitlik 2.30'da her iki tarafın \ln 'i alınırsa

$$F(V, \gamma) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_b + \frac{IR_s}{n} \quad (2.41)$$

eşitliği elde edilir. İdeal diyotta seri direncin sıfır olduğu düşünülürse $F(V, \gamma)$ 'nın V 'ye bağlı grafiği, eğimi $(n-\gamma)/\gamma$ olan bir doğru olur ama seri direnç varsa bu fonksiyon

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \left[\ln \left(\frac{V}{R_s AA * T^2} \right) \right] \quad (2.42)$$

biçiminde olur. Yüksek voltaj değerleri için bu fonksiyon; eğimi $1/\gamma$ olan bir doğruya yaklaşır. γ değeri n 'den büyük olduğu sürece fonksiyon kesikli olarak bir minimumdan geçer. $F(V, \gamma)$ fonksiyonun V 'ye göre türevini alıp minimum noktada sıfıra eşitlediğimizde,

$$I_o = \frac{\gamma - n}{\beta R_s} \quad (2.43)$$

eşitliği elde edilir. Burada ki I_0 ve V_0 değeri minimum noktadaki akım ve gerilim değerleridir. Sonuç olarak engel yüksekliği ve seri direnç ifadeleri

$$\phi_b = F(V_0, \gamma) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma} \right) V_0 - \frac{(\gamma - n)}{\beta n} \quad (2.44)$$

$$R_s = \frac{(\gamma - n)}{\beta I_0} \quad (2.45)$$

şeklinde olur.

2.10. Difüzyon Teorisi

Aralarında parçacık yoğunluğu farkı bulunan iki bölge arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru gerçekleşen yük geçişleri difüzyon olarak tanımlanır. Metal-yarıiletken kontaklarda yük geçişleri, sıvılar ve gazlarda olduğu gibi elektronların/hollerin yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye difüzyonu ile meydana gelir. Aşağıdaki varsayımlar dikkate alınarak difüzyon teorisi şöyle açıklanır;

- 1- Potansiyel engelin yüksekliği kT/q enerjisinden çok daha büyüktür,
- 2- Tükenim bölgesindeki elektronların çarpışmaları ihmal edilir,
- 3- $d=0$ ve $d=w$ 'daki taşıyıcı konsantrasyonları akımdan etkilenmemiştir (yani onlar termal denge değerine sahiptir)
- 4- Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir (Sze 1981).

2.11. Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi

Crowell ve Sze termiyonik emisyon ve difüzyon teorisini birleştirerek Termiyonik emisyon difüzyon teorisini geliştirdiler. Bu teori metal yarıiletken arayüzey kenarında

tanımlanmış olan rekombinasyon hızı üzerine kurulmuştur. Metal ile yarıiletken gövde arasına uygulanan gerilim, metale doğru bir elektron akışına neden olur. Taşıyıcıların bir kısmı optik fonon geri saçılmalarına bir kısmı da kuantum mekaniksel yansımalara uğradığından akım değeri azalır. Sze bunun nedenini rekombinasyon hızındaki azalmaya bağlamıştır. Termiyonik emisyon difüzyon teorisine göre elektronlar metal yarıiletken arayüzeyinde optik fononlarla etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri göz önüne alınarak A^* Richardson sabiti A^{**} olarak değişir. Buna göre en genel I - V (akım-gerilim) ifadesi,

$$J = J_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (2.46)$$

ile verilir. Burada T sıcaklık, n diyodun idealite faktörü ve J_0 doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = -A^{**}T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT}\right] \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilir. A^{**} , düzenlenmiş etkin Richardson sabitidir. β engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı olmak üzere,

$$A^{**} = A^* \exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \quad (2.48)$$

ile verilir. Eğer metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir oksit tabakası (MIS-MOS) varsa Richardson sabiti oksit tabakasına bağlı etkin değer alır ve A^{**} yerine yalıtkan oksit tabakası nedeniyle A_{etk} alır:

$$A_{etk} = A^{**} \exp\left[\frac{-4\pi\delta}{h(2m^*\chi)^{1/2}}\right]^{1/2} \quad (2.49)$$

Burada δ , metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir oksit tabakanın kalınlığı, $m^*=m_0$ etkin kütle, h Planck sabiti, χ ise yarıiletkenin elektron yakınlığıdır. İdeal diyottan

sapmaları belirlemek amacıyla idealite faktörü, “n” olarak tanımlanır. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal bir Schottky diyotta n=1’dir. Buna göre akım yoğunluğu ifadesi;

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.50)$$

şeklini alır. Burada n idealite faktörü 1’den uzaklaştıkça engel yüksekliğinin voltaja bağlılığı artmaktadır. İdealite faktörü yarıiletken ile dengede arayüzey durumları N_{ss} ve metal yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı (δ) cinsinden,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (2.51)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemden ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşılır. Yani idealite faktörü, hem yalıtkan tabaka kalınlığının artmasıyla hem de arayüzey durumlarının artması ile doğru olacak şekilde artmaktadır. Engel alçalması ve A^* ’nın alana bağımlı olması nedeniyle gerçek Schottky diyotlarında n idealite faktörü $1 < n < 1,2$ arasında değer alır (Güzel 2006).

2.12. Deplasyon Bölgesinde Rekombinasyon (yeniden birleşim) ve Jenerasyon (taşıyıcı oluşumu)

Bir yarıiletkenin sıfır Kelvin sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda iletkenlik bandında elektronlar ve valans bandında holler bulunur. İletkenlik bandındaki serbest elektronun valans bandındaki bir hol ile birleşmesi sonucu bir enerji açığa çıkar. Bu şekilde serbest bir elektron ile holün yok olması (yeniden birleşmesi) olayı **rekombinasyon** olarak adlandırılır. Tersine, yeterli enerjiyi alan bir elektron kovalent bağdan koparak serbest hale gelebilir. Bu olay **jenerasyon** (elektron-hol çiftinin oluşması) olarak adlandırılır. Uzay yükü bölgesindeki rekombinasyonun önemi Yu *et al.* (1968) tarafından ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Rekombinasyon olayı genel anlamda lokal durumlar sonucunda ortaya çıkar. Shockley-Read (1950) ve Hall teorilerine göre, en etkin olan rekombinasyon merkezleri, band aralığının ortasına yakın enerjilere sahip merkezlerdir.

Schottky diyotlarda rekombinasyonun olduğu durumlardaki akım iletim mekanizması p-n eklem diyodun akım iletim mekanizmasına benzemektedir. Sah *et al.* (1957) düz beslemdeki küçük akımlar için akım yoğunluğunun yaklaşık olarak;

$$J_r = J_{r0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.52)$$

ile verilebileceğini açıklamışlardır. Burada $J_{r0} = \left(\frac{qn_i w}{2\tau_r}\right)$ dir. Burada n_i , asal elektron konsantrasyonu olup $n_i \alpha \left(\frac{-qE_g}{2kT}\right)$ şeklinde bir orantı vardır. Ayrıca burada w , deplasyon bölgesinin genişliği, τ_r , elektronların bu bölgeyi geçmesi için gerekli zamandır. Homojen dağılıma sahip merkezlerden dolayı elektron ve holler için yakalama tesir kesitleri eşit olur.

Rekombinasyon akımının termiyonik emisyon akımına oranı,

$$T^2 \tau_r \exp\left[q\left(\frac{E_g + V - 2\Phi_b}{2kT}\right)\right] \quad (2.53)$$

ile verilmektedir (Karataş 2003). Bu oran τ_r , V ve E_g ile artarken, Φ_b ile azalmaktadır. Düz beslemdeki rekombinasyon akımının sıcaklıkla ters orantılı değişimi yüksek ve düşük sıcaklıklarda iki farklı eğimi olan bir doğru verir. Bu bölgelerde, düşük sıcaklıklarda aktivasyon enerjisi $(E_g - V)/2$ değerine ve yüksek sıcaklıklarda ise $(\Phi_b - V)$ değerine yaklaşık olarak eşittir. Bu durumlar dikkate alındığında Schottky diyotlarda ideal durumdan sapmaların bir nedeni de rekombinasyon akımıdır. İdeal durumdan sapmalar özellikle düşük sıcaklıklarda daha belirgin olduğu için düşük sıcaklıklardaki ölçülerin de dikkate alınması gerekir.

Şayet tünelleme ve imaj kuvvet azalması düşük bir donör konsantrasyonu ile önemli derecede azaltılırsa, deplasyon bölgesinde elektron-hol çiftlerinin üretiminden dolayı

fark edilebilir derecede bir ters akım oluşabilir. Bu işlem rekombinasyonun tersi bir işlem ve akım yoğunluğu bileşenini $J_g, \left(J_g = \frac{qn_i w}{2\tau_r} \right)$ artırır. Deplasyon bölgesinin genişliği (V_d+V) ile orantılı olduğu için, akım yoğunluğu ters uygulama gerilimi ile artar. Jenerasyon akımı yüksek engel yüksekliği durumlarında ve kısa ömürlerin söz konusu olduğu yarıiletkenlerde çok önemlidir. Özellikle yüksek sıcaklıklardan ziyade düşük sıcaklıklarda çok önemlidir. Çünkü, termoyonik emisyon bileşeninden daha düşük aktivasyon enerjisine sahiptir.

Deplasyon bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon etkileri, termoyonik emisyon akım taşınma mekanizması bileşenine paralel bir artış verir. Bu durum özellikle orta dereceli sıcaklıklarda (175 K-235 K) önemli bir mekanizmadır (Rhoderick 1988).

2.13. Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı

Homojen olmayan engele sahip bir Schottky diyot modeli için aşağıdaki temel ifadeler kullanılmaktadır.

$$\Phi_b^j = \bar{\Phi}_b - \frac{\sigma_s^2}{\left(\frac{2kT}{q} \right)} \quad \text{ve} \quad \Phi_b^c = \bar{\Phi}_b \quad (2.54)$$

Burada Φ_b^j , düz beslem gerilimine bağlı olarak I - V ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği, Φ_b^c , kapasite voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği, $\bar{\Phi}_b$ ortalama engel yüksekliği ve σ_s standart sapmadır. Yukarıdaki son iki ifade homojen olmayan Schottky engeli için sıcaklık ve bahsedilen parametreler arasındaki ilişkiyi vermektedir. Bu ifadelere göre, I - V ve C - V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin farklı olması anlamına da gelmektedir. Ayrıca, gerilim altında engel dağılımının değiştiği dikkate alınırsa, idealite faktörünün de açıklanması bu ifadelerle mümkün olabilir. (2.54) ifadesi potansiyel engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi hakkında bilgi vermektedir. Her sıcaklık için I - V karakteristiğinin sıfır uygulama

gerilimine fit edilmesiyle bulunan I_0 doyma akımlarından hesaplanan engel yüksekliklerinin, $1/T$ 'ye karşı değişim karakteristiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi $\left(\frac{q\sigma_s^2}{2k}\right)$ olur ve bu değerlerden standart sapma bulunur. Bu lineer doğrunun potansiyel engel yüksekliğini kestiği nokta ise ortalama engel yüksekliğini verir.

2.14. İmaj Kuvvetinin Etkisinden Dolayı Engel Yüksekliğinin Azalması

İdeal bir Schottky diyot için engel yüksekliği ifadesi;

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (2.55)$$

ile verilmektedir. Fakat bazı etkiler teorik olarak verilen bu gerçek Schottky engel yüksekliği ifadesini değiştirebilir. Bu etkilerden ilki; Schottky etkisi veya imaj kuvvet etkisinden dolayı engel yüksekliğinin azalmasıdır.

Metalden x kadar uzaklıktaki bir mesafede bir dielektrikteki bir elektron bir elektrik alan oluşturacaktır. Elektrik alan çizgileri, metal yüzeyine dik olmalıdır ve bu çizgiler metalin yüzeyinden iç kısma doğru x kadarlık bir mesafede yerleşmiş bir $+e$ imaj yükününki ile aynı olacaktır. Bu imaj etkisi Şekil 2.12.a'da gösterilmiştir. İmaj yükü ile Coulumb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etki eden kuvvet,

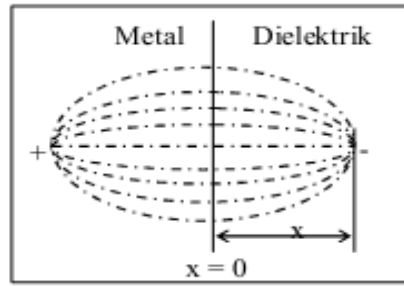
$$F = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -eE \quad (2.56)$$

ifadesi ile verilir (Neamen 1992). Potansiyel ifadesi ise,

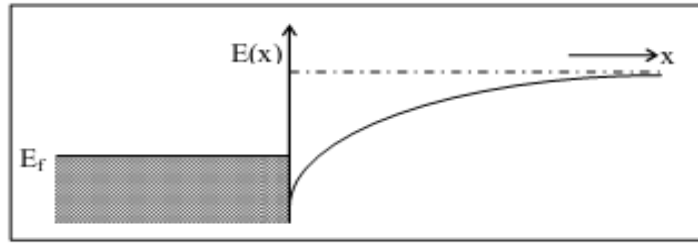
$$-\Phi(x) = +\int_x^\infty E dx' = +\int_x^\infty \frac{e}{4\pi\epsilon_s 4(x')^2} dx' = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.57)$$

ile verilir. Burada x integral değişkeni olup, $x = \infty$ için potansiyel sıfır kabul edilmektedir.

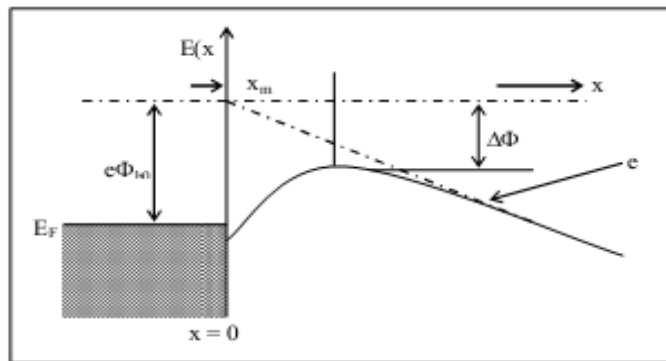
Elektronun potansiyel enerjisinin $-e\Phi(x)$ değişimi başka elektrik alanın olmadığı kabul edilerek Şekil 2.12.b'de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.12. (a) Metal-dielektrik arayüzeyinde imaj yükü ve elektrik alan çizgileri, (b) Elektrik alan sıfırken potansiyel engeline meydana gelen bükülme, (c) Sabit elektrik alanda imaj yükünden dolayı oluşan bükülme

Dielektrikteki bir elektrik alanının varlığında potansiyel ifadesi ilave bir terim olarak modifiye edilir ve aşağıdaki gibi olur;

$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} - Ex \quad (2.58)$$

Sabit bir elektrik alanının varlığında elektronun potansiyel enerji değişimi Şekil 2.12.c.'de gösterilmiştir. Bu şekilde potansiyel engeli piki azalmıştır. Potansiyel engeli pikinin bu şekilde azalması Schottky etkisi ve imaj kuvveti etkisi ile engel yüksekliğinin azalması olarak bilinir.

$$\frac{d(e\Phi(x))}{dx} = 0 \quad (2.59)$$

Şartı dikkate alınarak maksimum engelin konumu,

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (2.60)$$

ve Schottky engel yüksekliğinin azalması,

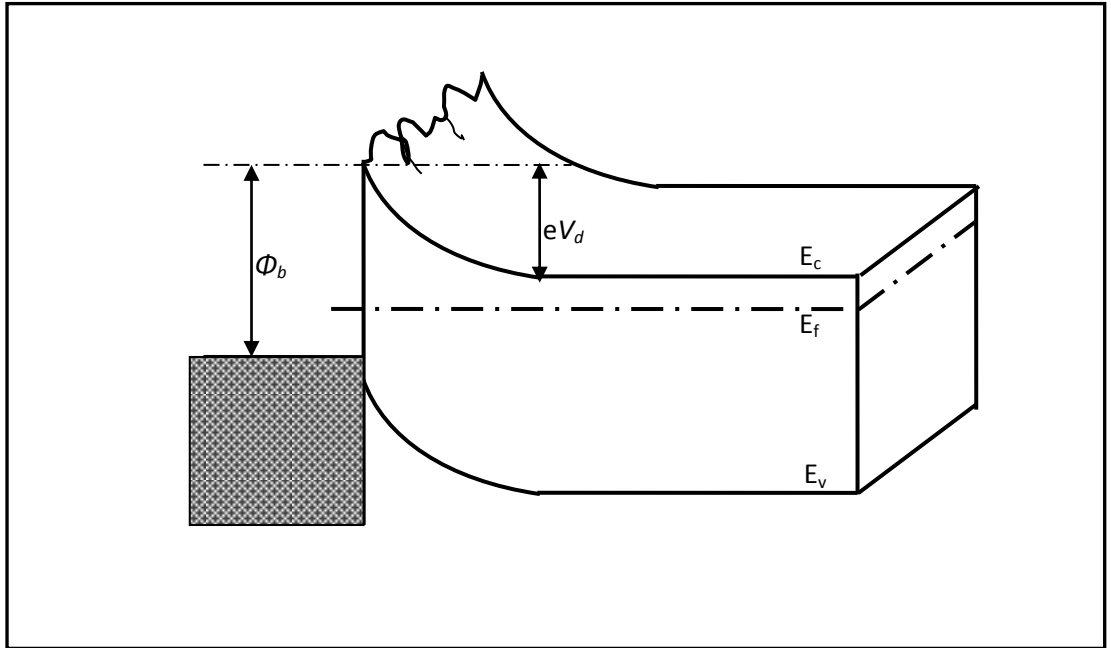
$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.61)$$

ile verilir.

2.15. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojen Olmayan Engel Yüksekliğinin Analizi

Schottky kontaklarda engel yüksekliği, akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçümleri için farklı sonuçlar verir. Schottky kontaklarda I - V ve C - V ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yüksekliğinin değişimi ve idealite faktörünün 1'den büyük olması

farklı şekillerde açıklanmaktadır. Metal/yarıiletken arayüzeyinin düzgün olmaması, Şekil 2.13’de gösterilen V_d (built-in voltajı) ve engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimlerine neden olarak homojen olmayan bir dağılıma neden olacaktır. Metaldeki atomik yapı, dislokasyonlar ve tane sınırlarının yanı sıra metalin kalınlığının değişimi arayüzeyin pürüzlü olmasına neden olabilir. Bu potansiyel değişimlerin bir başka nedeni de; alan emisyonundan dolayı lokal engel yüksekliğinin azalması olabilir.



Şekil 2.13. Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip bir Schottky kontağın üç boyutlu bant diyagramı

Ayrıca arayüzeyde farklı metalik fazların etkisi ile de bu lokal değişimler ortaya çıkabilir. Bunun yanı sıra yarıiletkendeki donör atomlarının rastgele dağıldığı düzenli bir örgüde, donör atomları arasındaki düzensiz mesafeler de bahsedilen potansiyel değişimlerin bir başka nedeni olabilir. Potansiyel değişim modeli homojen olmayan Schottky kontaklar için daha önce yapılan çalışmalardan farklıdır (Aydoğan 2003).

Metal-yarıiletken kontaklarda yukarıda ifade edilen çeşitli nedenlerden kaynaklanan anormallikler, kontakların ideal davranmamasına neden olmakta ve engel parametrelerinin uygulanan gerilimle değişmesine neden olmaktadır. Böylece Schottky

engel parametreleri, bu homojensizliklerden dolayı uygulanan gerilime duyarlı olmaktadır. Ayrıca bu homojensizlikleri tasvir etmek için biri Tung'un "*pinch-off*" modeli ve diğeri paralel iletkenlik modeli olmak üzere genelde iki farklı yaklaşım kabul edilmektedir (Gülnahar 2008).

Homojen olmayan metal-yarıiletken yapılarda serbest yük taşınım işi genelde paralel iletkenlik modeliyle ve dolayısıyla termiyonik emisyon denklemiyle açıklanmaya çalışılmaktadır. Bu modele göre akım, denk. (2.50)'de gösterildiği gibi her biri kendi alan ve Schottky engel yüksekliğine sahip tüm dağılımlarda akan akımların toplamı olarak kabul edilmekte ve farklı engel yüksekliklerine sahip olan dağılımların birbirleriyle etkileşmemeleri üzerine kurulmaktadır. Ancak Tung'un "*pinch-off*" modelindeyse toplam akım, dağılımlarda akan akımın ve homojen Schottky engel yüksekliğine sahip tüm alan içerisinde akan akımın toplamı biçimindedir ve farklı Schottky engel yüksekliğine sahip komşu dağılımlar arasında etkileşmeyi hesaba katmaktadır. Bu modelde küçük bir dağılım içerisinde akan akım, uygulanan gerilime ve dağılım parametresine bağlı olan etkin bir Schottky engel yüksekliğine ve etkin bir alana sahip bir diyodun akımına benzerdir. Ayrıca bir dağılım parametresine sahip olan bu model, düşük gerilim ve düşük sıcaklıklarda görülen anormallikleri açıklayabilmektedir. Ancak bu model, paralel iletkenlik modeli kadar açık olan bir model değildir. Çünkü "*pinch-off*" modelinde dağılım alanı ve Schottky engel yüksekliğinin azalması gibi dağılım parametrelerini ve dağılım sayısını I - V karakteristikleriyle ilişkilendirmek zordur. Ayrıca bu model, engel homojensizliklerinin geniş ve düşük engel yüksekliğine sahip dağılımın çok az olduğu durumda geçerlidir. Paralel iletkenlik modelinde uzaysal engel homojensizlikleri, şimdiye kadar Gauss dağılımı, çoklu-Gauss dağılımı, sabit gibi birçok dağılım fonksiyonları ile ifade edilmiştir. Gauss dağılım fonksiyonu, açık fiziksel anlamı, küçük engel homojensizlikleri için geçerliliği ve onun fiziksel basitliğinden dolayı yaygınca kullanılmaktadır. Ayrıca Gauss dağılım modeli, azalan sıcaklıklarda engel yüksekliklerinde görülen azalmaları ve idealite faktörü değerlerinde oluşan artışları ve Richardson grafiğinde görülebilen anormal davranışları anlatabilen bir modeldir (Gülnahar 2008).

Paralel iletkenlik modeline göre, dağılım bölgesinde her biri farklı engel yüksekliğine sahip ve paralel konumda olan Schottky engel dağılımlarının her biri toplam akıma bağımsız olarak katkı yapabilmektedir. Bu modele göre Ohdomari and Tu (1980) tarafından öne sürülen ideal bir diyodun I - V denklemi olan denklem (2.50)'yi

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(\frac{qv}{nkT}\right) - 1 \right] \int_0^\infty A\Phi_b \exp\left(\frac{q\Phi_b}{kT}\right) d\Phi_b \quad (2.62)$$

biçiminde ifade etmemiz mümkündür. Bu denklemde $A\Phi_b$, diyodun Schottky engel homojensizliklerini anlatan dağılım parametresidir. Metal-yarıiletken kontaklarda, farklı ihtimallere sahip metal-yarıiletken arayüzeyinde farklı standart sapma ve ortalama değerleriyle sonsuz sayıda Gauss dağılımlarının olduğu düşünülse de homojen olmayan Schottky kontak yapıyı tasvir etmek için genelde keyfi bir dağılım fonksiyonunu da kullanılabilir (Yu-Long *et al.* 2002). Böylece $A\Phi_b$ keyfi dağılım fonksiyonu,

$$A(\phi_b) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\phi_b - \phi_{bi})^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (2.63)$$

şeklinde belirtilir (Yu-Long *et al.* 2002). Bu denklemde A_i , σ_i ve ϕ_{bi} sırasıyla her bir Gauss dağılımının nüfuzunu, standart sapmasını ve ortalama engel yüksekliğini ifade etmektedir. Normalizasyon şartından $A\phi_b$ keyfi dağılım fonksiyonunu,

$A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n = I$ biçiminde yazmak mümkündür (Yu-Long *et al.* 2002).

Schottky engel yüksekliği değerlerinin dağılımından dolayı belirli sıcaklık aralıklarında bu dağılımların ortalama standart sapmasını hesaplayabilen yukarıda belirtilen sabit, log normal ve Gauss dağılımı gibi matematiksel dağılımları kullanmak mümkündür. Ancak ideal termiyonik emisyon-difüzyon modelinde gözlenen ayrılışlar, daha kullanışlı olan Gauss dağılımıyla yorumlanabilir. Bu nedenle denklem (2.50) ve denklem (2.52) karşılıklı eşitlenerek engel yüksekliğini,

$$\varphi_b = -\frac{kT}{q} \ln \sum_{i=1}^n A_i \exp \left(-\frac{q\varphi_{bi}}{kT} + \frac{q^2 \sigma_i^2}{2k^2 T^2} \right) \quad (2.64)$$

$$\phi_b = -\frac{kT}{q} \ln \sum_{i=1}^n A_i \exp \left(-\frac{q\phi_{bi}}{kT} + \frac{q^2 \sigma_i^2}{2k^2 T^2} \right) \quad (2.64)$$

şeklinde elde etmek mümkün olacaktır (Yu-Long *et al.* 2002). Bu denklem n'ye bağlı olarak birden çok Gauss dağılımına sahip kontak yapıların dağılımlarını açıklayabileceği gibi tekli ya da çift Gauss dağılımına sahip diyot yapıların dağılımlarını da tasvir edebilmektedir. Böylece engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı olan değişimi, çift Gauss dağılımı sergilediği bir deneysel ölçüm durumunda denklem (2.64)'den Φ_b engel yüksekliği ve $A_1(\Phi_b)$, $A_2(\Phi_2)$ keyfi dağılım fonksiyonları,

$$\varphi_b = -\frac{kT}{q} \ln \left[A_1 \exp \left(-\frac{q\varphi_{b1}}{kT} + \frac{q^2 \sigma_1^2}{2k^2 T^2} \right) + A_2 \exp \left(-\frac{q\varphi_{b2}}{kT} + \frac{q^2 \sigma_2^2}{2k^2 T^2} \right) \right] \quad (2.65)$$

ve dağılım katsayıları, $A_1 + A_2 = 1$

$$A(\phi_b) = A_1(\phi_b) + A_2(\phi_b) \quad (2.66)$$

$$A_1(\varphi) = \frac{A_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\varphi_b - \varphi_{b1})^2}{2\sigma_1^2} \right] \quad (2.67)$$

$$A_2(\varphi_b) = \frac{A_1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\varphi_b - \varphi_{b2})^2}{2\sigma_2^2} \right] \quad (2.68)$$

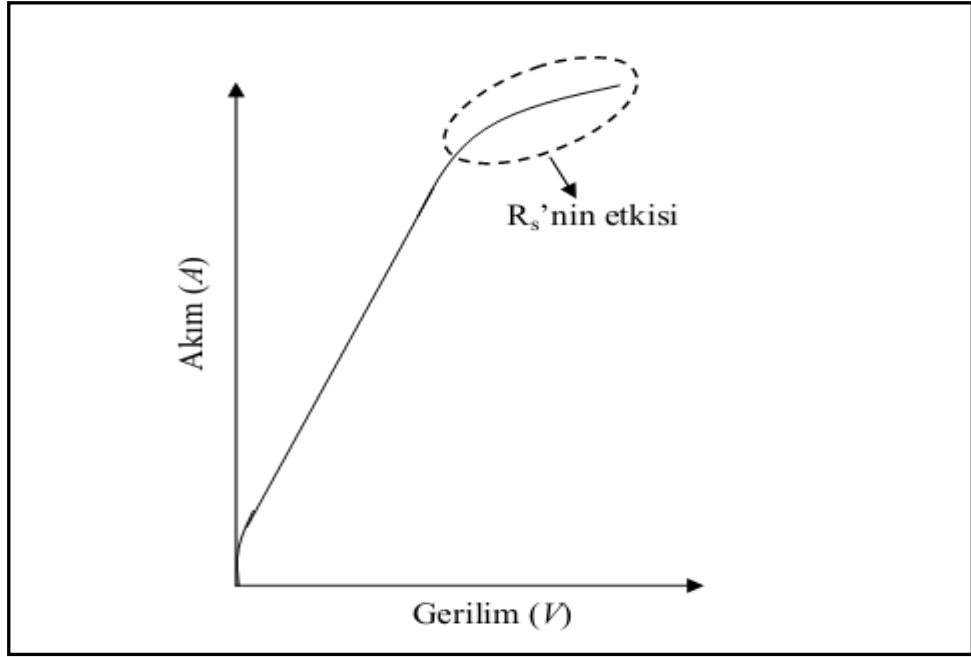
şeklindedir (Yu-Long *et al.* 2002). Ayrıca engel yüksekliği dağılımının tek Gauss dağılımıyla ifade edildiği bir durumda $A_2, A_3, \dots, A_n=0$ ve $A_1=1$ olacak $\phi_{b2}, \phi_{b3}, \dots, \phi_{bn}=0$ ve $\sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n=0$ olacağından denklem (2.64),

$$\varphi_b = \varphi_{b1} - \frac{q\sigma_1^2}{2kT} \quad (2.69)$$

şeklinde tek Gauss dağılımı için literatürde sıkça kullanılan Werner ve Güttler'in tekli Gauss denklemi (Werner and Güttler 1991) elde edilebilir. Böylece tek ve çift Gauss dağılımı için elde edilen bu denklemler üçlü ya da daha çok olan bir Gauss dağılımı için denk. (2.64)'den aynı yol kullanılarak elde edilebilecektir ve bu durumda denklem (2.65), denklem (2.66) de bulunan Gauss parametreleri artacak şekilde olacaktır.

2.16. Seri Direnç Etkisi

Metal-yarıiletken yapılarda görülen homojensizliklere neden olan etkilerden biri de seri direnç etkisidir. Seri direnç, metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan deplasyon bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir ve R_s ile gösterilir. Bu etki, büyük gerilim değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının düşmesine neden olur. Şekil 2.14 bir Schottky diyotta büyük gerilim değerlerinde seri direncin etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir (Güllü 2008).



Şekil 2.14. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi

Seri direnç diyotlarda güç kaybına neden olmakta ve diyodun yapısına bağlılık göstermektedir. Aktif yarıiletken devre elemanlarında ortaya çıkan seri direnci kapsamlı olarak bipolar transistör yapısında görmek mümkündür. Bir bipolar transistörün sabit iki noktası arasındaki toplam direncini üçe ayırabiliriz:

1. Metalik iletkenin direnci, R_m
2. Kontak direnci, R_c
3. Yarıiletken direnci, R_s

Böylece bu noktalar arasında oluşan toplam direnç,

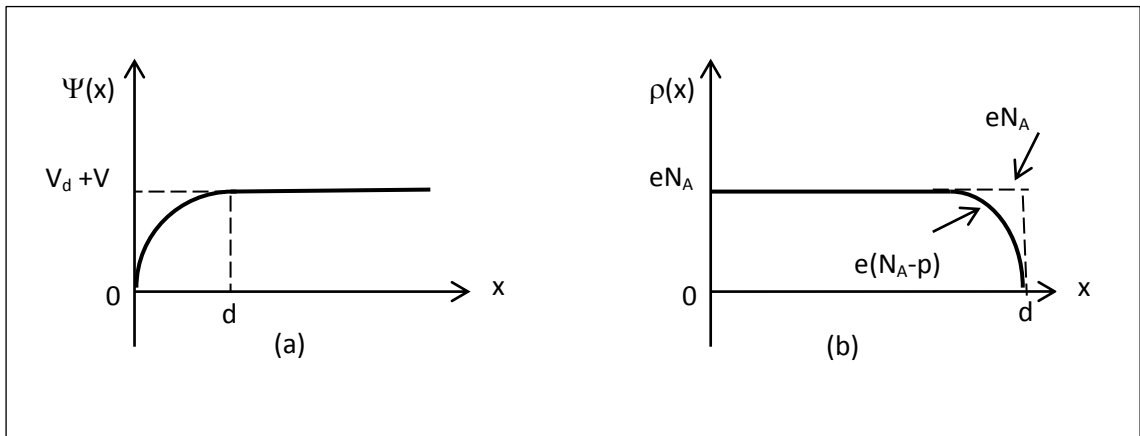
$$R_T = 2R_m + 2R_c + R_s$$

ifadesi biçimindedir.

Schottky diyotlar genelde yarıiletkenlerin az katkılı olmasını gerektirir. Ancak katkı oranı düşük bir tabakaya zayıf omik kontak oluşumu yüksek seri dirence neden olacağı için diyot fabrikasyonunda pratik olmaz. Pratikte diyotlar aşırı katkılı olan altlık üzerine ince film oluşturulması ile yapılırlar ve oluşan bu yapı seri direncin minimum olmasını sağlar. Böylece yüksek kaliteli bir omik kontak elde etmek için yüksek katkılı bir altlık kullanmak gerekir. Bir yüzeysel eklem diyotta katkılanmamış epitaksiyal tabaka, yeterince kalın olacağı için seri direnç değerinin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda alt tabakanın gövde direnci, omik kontak direnci ve katkılanmamış epitaksiyal tabakanın direnci seri direncin artmasında birer etken olmaktadır (Gülnahar 2008).

2.17. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi

Metal/Yarıiletken kontaklarda oluşan arınma bölgesi (dipol tabakası), yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ve metal tarafındaki yüzey yüklerinden dolayı bir kondansatör gibi davranır. Ters beslem durumunda uygulanan gerilim arttığı zaman arınma bölgesi genişleyecektir. Yarıiletkende metale yakın önemli bir hol yoğunluğu mevcutsa, yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesi ile çakışacağından hol yoğunluğu düşecektir



Şekil 2.15. Metal p-tipi yarıiletken yapılarında doğrultucu kontağın; a) Potansiyel dağılımı, b) Yük dağılımı

Schottky bölgesinin kapasitesi, bu yük dağılımından dolayı değişecektir. Bu özelliklerinden dolayı Schottky diyotları, gerilim kontrollü değişken kapasitörler olarak

kullanılabilmektedirler. Schottky bölgesinin kapasitesini bulmak için, diyodun engel bölgesindeki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği;

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.70)$$

şeklinde ifade edilebilir (Ziel 1968).

Burada ϵ_s yarıiletkenin, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yükü yoğunluğudur. Uzay yükü yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_a - N_d) \quad (2.71)$$

olarak yazılabilir (Rhoderick 1988). Burada N_d , yarıiletkendeki iyonize olmuş donör yoğunluğu, N_a , yarıiletkendeki iyonize olmuş akseptör yoğunluğudur. $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile uzay yük yoğunluğu $\rho(x)$ 'in konuma bağlı değişimleri Şekil 2.15'de gösterilmiştir.

Engel tabakasının potansiyelini V_d , ve kontağa uygulanan potansiyeli V ile temsil edelim. $e(V_d - V) \gg kT$ olduğunda $0 \leq x \leq d$ aralığında yük taşıyıcılar d uzunluğunda Debye difüzyon uzunluğu ile verilen bir bölgede kısmen bulunacaklardır. Dolayısı ile p-tipi yarıiletken için $N_A \gg N_d$ olduğundan uzay yükü yoğunluğu için

$$\rho(x) = eN_A \quad (2.72)$$

yazılabilir. (2.70) ve (2.72) eşitliklerinden

$$\frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = - \frac{eN_A}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.73)$$

elde edilir. (2.73) ifadesinin çözümü aşağıdaki sınır şartları altında aranabilir.

$$1) x = 0 \text{ için } \Psi(x) = 0$$

$$2) x \geq 0 \text{ için } \psi(x) = V_d + V$$

$$3) x = d \text{ için } \frac{d\Psi(x)}{dx} = 0$$

(2.73) denklemi için üçüncü sınır şartını dikkate alarak integral alırsak, arınma bölgesi için elektrik alanı bulabiliriz.

$$E(x) = -\frac{d\Psi(x)}{dx} = -\frac{eN_A}{\varepsilon_s \varepsilon_0} (x - d) \quad (2.74)$$

yukarıdaki sınır şartlarından birincisini dikkate alarak (2.74) ifadesinin integrali alınacak olursa,

$$\Psi(x) = -\frac{eN_A}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \left(\frac{1}{2} x^2 - xd \right) \quad (2.75)$$

elde edilir. (2.75) ifadesinin çözümü de ikinci sınır şartı dikkate alınarak çözülmüşür;

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0}{eN_A} (V_d \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.76)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade, Schottky bölgesinin genişliğidir. Burada $V > 0$ için kontak doğru, $V < 0$ için kontak ters beslemedir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu;

$$Q = -eN_A d \quad (2.77)$$

ile verilir. (2.76) ve (2.77) eşitlikleri dikkate alındığında;

$$Q = -[2\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_A (V_d \pm V)]^{1/2} \quad (2.78)$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca Schottky kapasitesi (2.78) eşitliğine sahip Q yükünün uygulanan gerilime göre değişimi olarak tanımlanır. Buna göre kapasite için,

$$C = \left| \frac{\partial Q}{\partial V} \right| \quad (2.79)$$

yazılarak (2.78) ve (2.79) eşitliklerinden,

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_A}{2(V_d + V)} \right]^{1/2} \quad (2.80)$$

veya

$$C = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{d} \quad (2.81)$$

olarak bulunur. Bu sonuca göre arınma bölgesinin kapasitesi, uygulanan gerilim ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters ve akseptör veya donör yoğunluğu ile doğru orantılıdır.

2.18. Arayüzey Tabakasının Kapasitansa Etkisi

Schottky diyotta arayüzey tabakasından kaynaklanan kapasitans, uygulanan gerilime bağlı olarak deplasyon bölgesinde farklılık göstermektedir ve deplasyon bölgesinin kapasitansı ile seri halde bulunmaktadır. Arayüzey tabakasının yeterince ince olması kapasitans analizi için kolaylıktır. Çünkü ince yapıya sahip arayüzey tabakası metal ve

yarıiletken arasında tünelleme ihtimaliyetini artırmakta ve kapasitansı hesaplamak için dikkate alınmadığı gibi azınlık taşıyıcılarına doğrudan bir katkı yapmamaktadır. Fakat bu haller dolaylı olarak kapasitansı etkileyebilmekte ve uygulanan gerilimin ve telafi olmamış donorların etkisiyle yükler arasında bulunan ilişkiyi değiştirebilmektedir (Henisch 1989). Ayrıca arayüzey tabakasını işgal eden elektronlar metalden tünellemeyle geçmekte ve yapıya bir gerilim uygulandığında net negatif yük miktarı artmaktadır. Böylece toplam kapasitans homojen yapının kapasitansından farklı olacaktır (Blood and Orton 1992).

Bu nedenle arayüzey hallerinin olduğu durumda oluşan kapasitansı,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_{ox} + C_s} \quad (2.82)$$

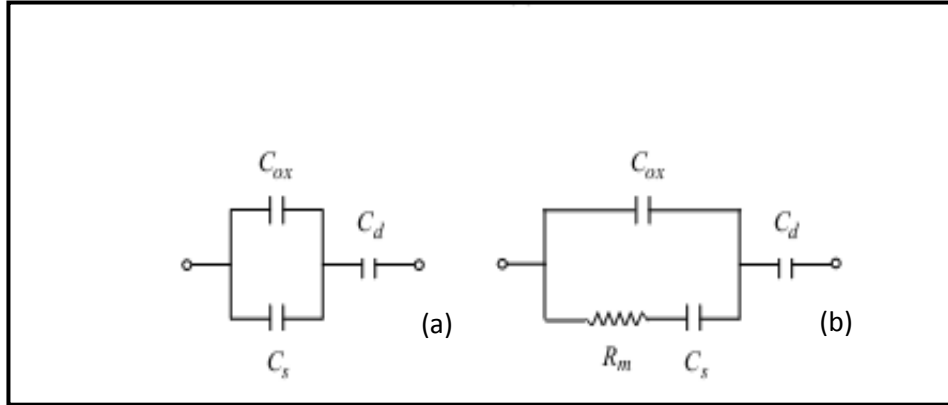
Şeklinde ifade edilir. Bu denklemde C_d , C_{ox} ve C_s

$$C_d = \left(\frac{\epsilon_s q N_d}{2} \right)^{1/2} \left(V_d - \frac{kT}{q} \right)^{-1/2} \quad (2.83)$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_i}{\delta_b} \quad (2.84)$$

$$C_s = qD_s \quad (2.85)$$

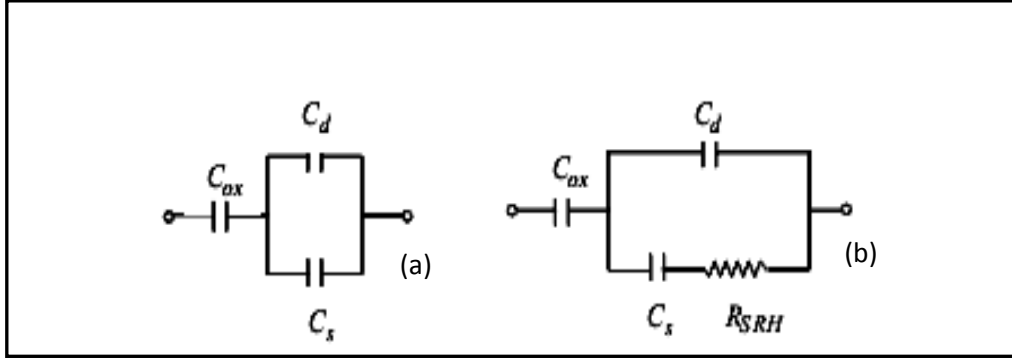
biçiminde olup C_d , V_d difüzyon sabitine sahip olan ideal Schottky engelinin kapasitansı ya da deplasyon kapasitansı olarak adlandırılmaktadır ve C_{ox} , ϵ_i dielektrik sabitine ve δ_b aralıklı olan paralel plakalı bir kapasitörün kapasitansına benzer olarak, oksit tabakasının kapasitansı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.16. Arayüzey tabakasının zayıf, düşük frekans durumunda (a) ve yüksek frekans durumunda (b) Schottky engeli için eşdeğer devre yapısı

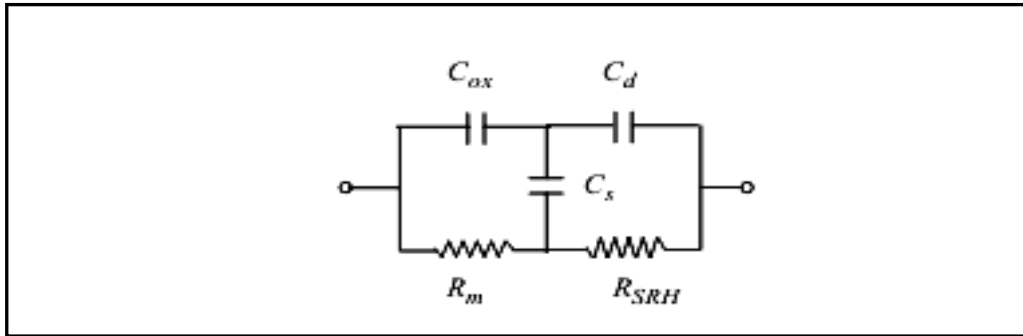
Arayüzey tabakası yeterince ince olduğunda ara yüzey hallerin zaman sabiti çok kısa olacak ve yüksek bir ölçüm frekansını izleyebileceklerdir. Ancak arayüzey tabakasının kalınlığı arttığında ya da uygulanan frekans, yüksek frekans değerlerine kadar artırıldığında m olarak ifade edilen arayüzey hallerinin zaman sabiti, arayüzey hallerinin yoğunluğundan çok büyük olabilecektir. Bu durumda oluşan eşdeğer devre Şekil 2.16.b'de gösterilmektedir. Bu şekildeki R_m tünelleme direncini ifade etmektedir.

Metal ve arayüzey halleri arasında bulunan yalıtkan tabakanın elektronların tünelleymeyeceği kadar çok kalın olduğu düşünülürse, metalden valans bandına doğru boşlukların tünellemesi çok az olacak ve boşluk-quasi Fermi seviyesi yarıiletken Fermi seviyesi ile aynı olacaktır. Böylece arayüzey hallerinin yoğunluğu, Shockley-Read-Hall rekombinasyon mekanizmasına benzer olarak yarıiletkenin valans ve iletkenlik bandları arasında karşılıklı elektron alış-verişi ile belirlenebilecektir. Ayrıca bu durumda arayüzey hallerinin işgal edebilme ihtimali yarıiletken Fermi seviyesi ile belirlenmektedir. Ara yüzey hallerinin sürekli enerji seviyelerine sahip olduğu durumda kapasitans qD_s değerine ya da ayırık enerji seviyelerine sahip olduğunda ise $q^2 N_s f_s - f_s / kT$ değerine eşittir ve arayüzey-hal kapasitansı deplasyon kapasitansı ile paraleldir.



Şekil 2.17. Arayüzey tabakasının kalın, düşük frekans durumunda (a) ve yüksek frekans durumunda (b) Schottky engeli için eşdeğer devre yapısı

Böylece düşük ve yüksek frekans değerlerinde oluşan eşdeğer devre Şekil 2.17’de gösterilmektedir. Arayüzey tabakası ince yapıda olduğunda metalle, kalın olduğundaysa yarıiletkenle daha iyi bir iletim kurar. Ancak arayüzey tabakasının çok kalın ya da çok ince olmadığı ara durumda eşdeğer devre yapısı Şekil 2.18’de gösterilmektedir. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi arayüzey tabakası ince bir yapıda olduğunda C_s kapasitansı C_{ox} kapasitansı ile paralel, kalın bir yapıda olduğunda C_s kapasitansı C_d deplasyon kapasitansı ile paralel olacaktır.



Şekil 2.18. Yalıtkan arayüzey tabakasına sahip Schottky engeli için eşdeğer devre

Metal ve arayüzey halleri arasında elektronların tünelleme ihtimaliyeti zayıfsa, arayüzey hal yoğunluğunun E_f^s ile belirlenme ihtimaliyeti çok düşük olur. Ancak arayüzey hal yoğunluğu E_f^s ile belirlenmediğinde arayüzey hal enerjisi E_f^s ile aynı seviyede olacak ve kapasitans değeri maksimuma ulaşamayacaktır. Arayüzey halleri valans bandıyla baskın

olarak değiş tokuş yaparsa ve boşluk kuasi-Fermi seviyesi E_{fm} ile aynı hizadaysa ara yüzey hal yoğunluğu bu durumda E_{fm} ile belirlenebilecektir. Ancak arayüzey halleri iletkenlik bandında bulunan elektronlarla baskın olarak karşılıklı değiş tokuş yaparsa hal yoğunluğu ξ_n veya E_f^S ile belirlenebilecektir. Arayüzey tabakasında potansiyel, arayüzey hallerinin yük değişiminden dolayı uygulanan gerilimle ve arayüzey hallerinin enerjisiyle değişmektedir. Bunun sonucu olarak arayüzey yüklerinin değişmesiyle kapasitans değişmekte, difüzyon potansiyelinin değişmesiyle C_d deplasyon kapasitansı değişmekte ve difüzyon potansiyelinde oluşan değişim diyotta bir frekans değerinde termiyonik emisyon akımını değiştirmektedir.

2.19. Derin Tuzakların Kapasitansa Etkisi

Deplasyon bölgesinde derin tuzak seviyesi Fermi seviyesiyle birlikte değiştiğinde tuzak seviyesi ve tuzakta bulunan yüklerin davranışı değişecektir. Çünkü bant bükülme miktarı uygulanan gerilime bağlı olduğundan dolayı tuzaktaki yüklerin durumu uygulanan gerilime bağlı olacak ve sonuçta kapasitans etkin olacaktır. Schottky kontaklarda tuzakların kapasitansa etkisini inceleyebilmek için düşük kusur konsantrasyonlarını karakterize ve dedekte edebilen uygun metotlar kullanılmalıdır.

2.20. Demir Oksitler

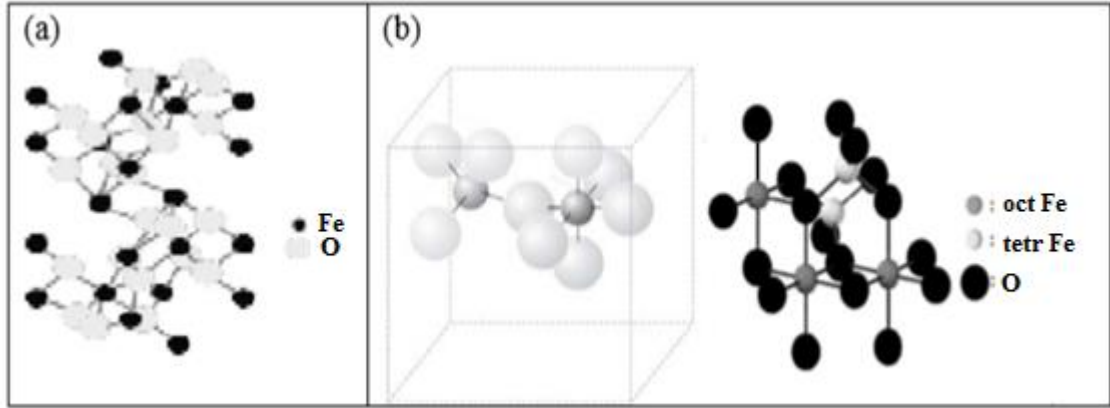
Demir oksitler doğada farklı formlarda bulunmaktadır. Bunlar, hematit ($\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$), maghemit ($\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$) ve manyetit (Fe_3O_4) şeklindedir. Bu üç demir oksit, kimyasal, manyetik ve fiziksel özellikleri nedeniyle teknolojik açıdan oldukça önemlidir (Teja and Koh 2008). Bu özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Demir oksitlerin kimyasal, manyetik ve fiziksel özellikleri (Teja and Koh 2008)

	Hematit	Manyetit	Maghemit
Moleküler formül	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe_3O_4	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Yoğunluk (g/cm^3)	5.26	5.18	4.78
Erime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1350	1583-1597	-
Manyetik yapı	Zayıf ferromanyetik veya antiferromanyetik	Ferrimanyetik	Ferrimanyetik
Curie sıcaklığı (K)	956	850	820-986
300 K de doyum manyetizasyonu, M_s ($\text{A.m}^2/\text{kg}$)	0.3	92-100	60-80
Sertlik	6.5	5.5	5
Kristal yapılar	rombohedral, hegzagonal	kübik	kübik, tetrahedral
Hücre parametresi	$a=0.5034,$ $c=1.375(\text{hegzagonal})$ $a_{RH}=0.5427,$ $\alpha=55.3^{\circ}(\text{rombohedral})$	$a=0.8396$	$a=0.83474(\text{kübik})$ $a=0.8347,$ $c=2.501(\text{tetragonal})$
μ_m (μB)	5	4.1	5

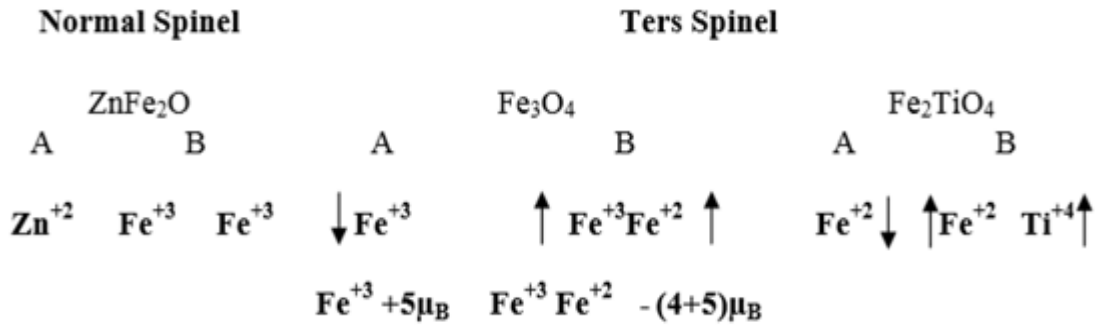
Hematit ilk bilinen demir oksittir ve kayalar ile toprakta yaygın olarak bulunur. Hematit kan renginde, eğer kristal haldeyse siyah veya gri renktedir. Çevre şartlarında oldukça karalıdır ve diğer kararsız demir oksitlerin dönüşümünün son ürünüdür. Manyetit, siyah demir oksit, mıknatıs taşı veya Herkül taşı olarak bilinir. Geçiş metal oksitler arasında en güçlü manyetik maddedir. Maghemit toprakta manyetitin havayla temasıyla veya diğer oksitlerin ısıtılmasıyla meydana gelir. Hematitle karşılaştırıldığında yarı karalıdır. anyonlarının demir katyonlarıyla sıkı paketlenmiş yüzeyleri oluşturması şeklinde tanımlanabilir. Hematitte oksijen iyonları oktahedral tabakaları dolduran Fe^{+3} iyonlarıyla hegzagonal sıkı paketlenmiş düzende bulunur. Hematit ve Manyetit için kristal yapı Şekil 2.19'da gösterilmektedir. Manyetit ters sipinel yapıdadır. Birim hücre başına 16 Fe^{+3} ve 8 tane Fe^{+2} katyonu bulunur. Bundan dolayı her bir formülde, Fe_3O_4 , bir A alt tabakasına karşı iki B alt tabakası bulunur. Şekil 2.20'de gösterildiği gibi katyonlar A ve B alt tabakalarında dağılmıştır. Birim hücrede A tetrahedral, B oktahedral düzenlenmedir. Fe^{+3} iyonları oktahedral ve tetrahedral alt tabakalarda dağılmıştır. Fe^{+2} ve Fe^{+3} Oh alt tabakalarda dış manyetik alanda paralele sıralanırken, Fe^{+3} Td alt tabakalarda dış manyetik alanda attiparalel olarak sıralanırlar. Maghemit

manyetite benzer spinel yapıdadır fakat alt tabakalarda boşluklar bulunur. Normal spinel yapılarda ise benzer katyonlar benzer alt tabaka bulunurlar (Teja and Koh 2008; Duran *et al.* 2008).

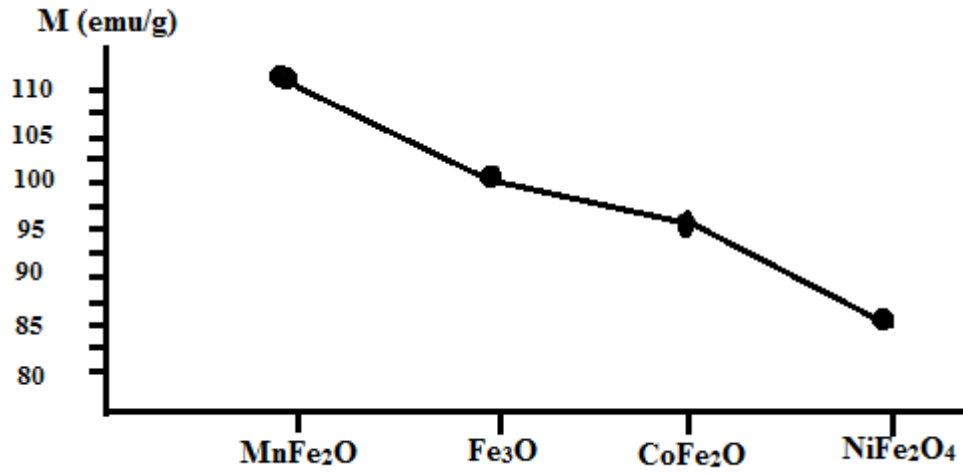


Şekil 2.19. Hematit (a) ve Manyetit (b) için kristal yapı gösterimi

Spinel yapıda, A-O-B bağları arasındaki açı 125° olup B-O-B arasındaki açı 90° dir ve A-O-A arasında ise açı bulunmamaktadır. Güçlü süperdeğiş-tokuş etkileşmeleri nedeniyle antiferromagnetik A-B çiftleri oluşur. B alt tabakalarında kendi aralarında zayıf 90° antiferromanyetik çiftler meydana gelir. Ters yönelmiş $+3$ katyonlarının atomik momentleri birbirlerini yok eder ve net manyetik moment Fe^+ iyonundan kaynaklanır. Fe^{+3} , d^5 elektron konfigürasyonuna, Fe^{+2} ise d^6 konfigürasyonuna sahiptir, molekül başına $(Fe^{+3})Td (Fe^{+2} Fe^{+3}) Oh O_4$ toplam manyetik moment, yaklaşık $4\mu_B$ eşittir. M^{+2} ($M=Mn, Co, Ni$) için elektron konfigürasyonu sırasıyla d^5, d^4, d^3 'dür ve Şekil 2.21'de gösterilmektedir. Oh alt tabakadaki Fe^{+2} 'nin değişmesiyle net manyetizasyon da değişmiştir.



Şekil 2.20. Normal spinel ve ters spinel yapılarında katyonların dağılımı



Şekil 2.21. Farklı manyetik nanoparçacıklar (MFe_2O_4 , $M=Mn, Fe, Co, Ni$) için manyetizasyon değerleri

2.21. Demir Oksit Nanoparçacıkların Sentez Teknikleri

2.21.1. Termal parçalama

Küçük boyutlarda, monodispers, oda sıcaklığında süperparamanyetik nanoparçacıklar termal parçalama yöntemiyle kolaylıkla sentezlenebilmektedir. Bu yöntemle öncül maddeler (Fe -oleat, $Fe(CO)_5$, demir(III) asetilasetonat) yüksek kaynama noktalı organik çözücüler (1-hekzadeken, 1-oktadeken, 1-ekosen, trioktilamin, phenyl ether, oktil ether) içinde surfaktan (oleik asit) varlığında parçalanarak monodispers nanoparçacıklar elde

edilir (Lee *et al.* 2005; Lu *et al.* 2007; Bronstein *et al.* 2007). Elde edilen nanoparçacıklar hekzan ve toluen gibi organik çözücülerde dispers olurlar. Kullanılan çözücünün cinsi, reaksiyon süresi, kullanılan surfaktan ve miktarı, kullanılan öncül madde parçacık boyutunu ve morfolojisini belirleyen parametrelerdir. Ayrıca bu sentez tekniğiyle diğer manyetik nanoparçacıklar, CoFe_2O_4 , Cr_2O_3 , MnO , Co_3O_4 ve NiO da sentezlenebilmektedir (Lu *et al.* 2007). Park *et al.* (2005) toksit ve pahalı olan pentakarbonil gibi bir bileşik kullanmak yerine ucuz ve çevreye dost olan metal klorür ve sodyum-oleat kullanarak, 40 g'a kadar monodispers nanoparçacıklar sentezlemişlerdir. Kullanılan çözücü ve oleik asit miktarını değiştirerek 5-22 nm arasında parçacıklar elde etmişlerdir. Sentezi iki aşamada gerçekleştirmişlerdir.

I. Demir – oleat Kompleksinin (öncül madde) Sentezi

Metal klorür ve sodyum-oleatın 70°C deki reaksiyonuyla metal-oleat kompleksini sentezlemişlerdir.



$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ suda çözülerek sodyum oleat, etil alkol, ve hekzanla karıştırılır. Karışım 70°C ye kadar ısıtılarak bu sıcaklıkta argon gazı altında 4 saat karıştırılır. Reaksiyon tamamlandığında üstte kalan demir-oleat içeren kırmızı kahverengimsi katman ayrılır. Demir-oleat 3 kez saf suyla yıkanır. Hekzan buharlaştırıldıktan sonra demir-oleat kompleksi fırında kurutulur (Park *et al.* 2005)

II. Demir Oksit Nanoparçacıklarının Sentezi

Elde edilen öncül maddeyi yüksek ısıyla parçalamışlardır (Park *et al.* 2004).

Metal-oleat kompleksi $\frac{\text{Yüksek kaynama noktalı çözelti}}{\text{Termal Parçalanma}}$ monodispers nanoparçacıklar

Demir-oleat kompleksini oleik asit varlığında 1-oktadeken çözücüsü içinde 320°C ye kadar ısıtmışlar ve bu sıcaklıkta 30 dk reaksiyon sürdürmüşler. Baştan şeffaf olan çözelti siyah renge dönmüş ve böylece nanoparçacıklar elde etmişler. Çözelti oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra etil alkol eklenip santrifüjlenerek nanoparçacıkları çöktürmüşlerdir. Çekirdeklenme 200-240°C de bir oleat ligandının karbondioksit çıkışıyla birlikte parçalanmasıyla meydana geldiğini ve asıl büyümenin 300°C civarında kalan iki oleat ligandının parçalanmasıyla gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Çekirdeklenme ve büyüme süreçlerini birbirinden ayırarak monodispers nanoparçacıklar elde etmişlerdir (Park *et al.* 2004).

Oleik asit miktarı, çözücünün cinsi ve reaksiyon süreleri değiştirilerek bu parametrelerin nanoparçacık boyutu ve dağılımı üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Kaynama noktası yüksek çözücü kullandıklarında parçacık boyutu artmıştır. Oleik asit miktarını arttırdıklarında parçacık boyutunda küçük artışlar gözlemlemişlerdir. Reaksiyon süresinin nanoparçacık sentezinde çok önemli bir rol oynadığını, değişik sıcaklıklarda reaksiyon sürelerini değiştirerek gözlemlemişlerdir. Reaksiyon sürelerine ve sıcaklığa bağlı olarak polidispers veya monodispers oldukça kristal veya kristal yapıları zayıf nanoparçacıklar oluşmuştur. Örneğin 260°C de reaksiyonu bir gün sürdürdüklerinde polidispers ve zayıf kristal yapıda 9 nm boyutunda parçacıklar elde etmişlerdir. Aynı sıcaklıkta reaksiyon üç gün sürdürüldüğünde ise monodispers 12 nm nanokristaller elde edebilmişlerdir. Reaksiyon 240°C de bir gün sürdürüldüğünde ise nanoparçacık elde edilememiştir. Reaksiyon aynı sıcaklıkta üç gün sürdürüldüğünde ise yaklaşık 14 nm polidispers nanoparçacıklar elde etmişlerdir (Park *et al.* 2004).

Bu yöntemle Park *et al.* (2004) nanoparçacık eldesinin üç avantajı olduğunu vurgulamışlardır. Bunlardan ilki; tek bir reaksiyonla 40 g'a kadar monodispers nanokristaller elde edilebilir olmasıdır. Sentez pek çok sistemde aynı anda başlatıldığına birkaç kilograma kadar nanokristaller elde edilebilir. İkinci avantajı, çevreye dost ve ekonomik olmasıdır. Üçüncüsü ise, farklı yapıda monodispers nanokristaller elde edilebilir olmasıdır.

Başka bir çalışmada ise, Roca *et al.* (2006) farklı öncül maddeler ($\text{Fe}(\text{oleat})_3$, $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ve $\text{Fe}(\text{acac})_3$ farklı kaynama noktasına sahip çözücüler (phenyl eter, octyl eter, octadeken) kullanarak farklı boyutlarda ve kristal yapıda nanoparçacıklar sentezlemişlerdir. Çizelge 2.2’de sentez şartları gösterilmektedir. Her bir çözücü öncül maddeler için idealdirler. Öncül maddelerin her birini organik çözücülerde oleik asit varlığında ısıtmışlar ve reaksiyonu 30 dakika sürdürmüşlerdir. Siyah renkli karışımı oda sıcaklığına kadar soğutmuşlar, etil alkol ekleyerek santrifüjlemişler ve böylece nanoparçacıkları çöktürmüşlerdir. Elde ettikleri nanoparçacıkları 50°C de vakum altında kurutmuşlardır.

Çizelge 2.2. Nanoparçacıkların sentez şartları (Roca *et al.* 2006)

Öncül maddeler	$T_D(\text{K})$	Çözücü	$T_B(\text{K})$	Parçacık boyutu(nm)
Asetilaset	330-350	Fenil eter	527	5.0 ± 1.5
Karbonil	373	Oktil eter	560	6.1 ± 0.7
Oleat	473-523	Oktadekanda	593	16.2 ± 1.9

* T_D =parçalanma sıcaklığı, T_B =çözücünün kaynama sıcaklığı

Aynı çalışmada üç unsuru analiz etmişlerdir: öncül madde, surfaktant, çözücü. Her durumda öncül maddeyi, oleik asit içeren organik çözücüye eklemişler, kaynama sıcaklığına çıkmışlar ve sistemi bu sıcaklıkta 30 dk tutmuşlardır. Elde ettikleri siyah karışımı oda sıcaklığına soğutmuşlar, ethanolle çöktürmüşler, santrifüjlemişler ve 50°C de vakum altında kurutmuşlardır (Roca *et al.* 2006).

Çalışmada, öncül madde olarak $\text{Fe}(\text{CO})_5$ kullanıldığında, ilk önce demir nanoparçacıkları oluşur ve daha sonra 300°C de oksidantla okside olarak manyetit nanoparçacıkları elde edilir. Öncül maddenin konsantrasyonu nanoparçacıkların boyutlarını etkilemiştir. Yüksek demir konsantrasyonu ile daha küçük parçacıklar elde etmişlerdir (Roca *et al.* 2006). Demir(III)asetilasetonat alkol varlığında reaksiyonuyla manyetit nanoparçacıkları elde etmişlerdir. Alkol $\text{Fe}(\text{III})$ ü $\text{Fe}(\text{II})$ ye indirger ve süreç ısının artışıyla devam eder. Demir klorür gibi demir tuzundan öncül maddenin elde

edilip surfaktan varlığında parçalanmasıyla manyetit eldesi mümkündür. Bu durumda indirgeyici atmosfer parçalanma ürünüyle sağlanır (Roca *et al.* 2006).

Kaynama noktası yüksek çözücü kullanıldıklarında ise demir oksit nanokristallerinin yarıçapları artmıştır. Bu da yüksek kaynama noktalı çözücüde demir-kompleksinin reaktivitesinin daha yüksek olmasından kaynaklanır. Parçacıkların yüzeyleri ise düzensizlikten küreselliğe doğru değişmiştir. Fe(acac)₃ farklı çözücülerde parçalanarak nanoparçacıklar sentezlemiştir. Octyl eter kullanıldığında 5.0±1.5 nm den 10.4±1.0 nm ye kadar değişen nanoparçacıklar elde etmişlerdir. 1-octadecene kullanıldığında ise 12.8±1.9 nm boyutunda parçacıklar elde etmişlerdir (Roca *et al.* 2006).

Surfaktan nanoparçacıkların boyutlarında ve şekillerinde önemli bir rol oynar. Oleik asit en çok kullanılan surfaktandır. Reaksiyon çözeltisinde surfaktan moleküllerinin bulunması çekirdeklenme ve büyüme sürecini etkiler. Fe(CO)₅/oleik asit oranı 1:3 olduğunda parçalanma sıcaklığı 260°C'den 285°C'ye yükselmiştir. Öncül madde surfaktanın oranı 1:5 den daha büyük olduğunda çekirdeklenme engellendiğinden dolayı parçacıkların oluşmadığını gözlemlemişlerdir. Ligand konsantrasyonu arttırıldığında parçacık boyutu artmıştır (Roca *et al.* 2006).

Parçacıkların manyetik özellikleri parçacık boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Oleik asit parçacıkların etrafını sararak düşük sıcaklıklarda parçacıkların manyetik özelliklerini etkiler. Oleik asit varlığı parçacık boyutuna ve koersivite değerine bağlı olmaksızın yüksek doyum değerlerine neden olduğunu tespit etmişlerdir (Roca *et al.* 2006).

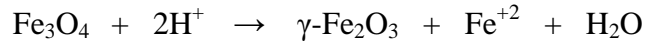
2.21.2. Ortak çöktürme

Ortak çöktürme demir oksit (Fe₃O₄, γ-Fe₂O₃) sentezinde kolay ve kullanışlı bir yöntemdir. Uygun oranlarda karıştırılan Fe⁺² ve Fe⁺³ iyonları bazik ortamda (amonyak veya sodyumhidroksit çözeltisi) güçlü bir karıştırıcı altında çöktürülür. Fe₃O₄

nanoparçacıklarının çökmesi için pH değeri 8 ile 14 arasında olmalıdır (Lu *et al.* 2007; Laurent *et al.* 2008). Fe₃O₄ nanoparçacıkları için reaksiyon aşağıdaki şekilde yazılır:



Bu yöntemle elde edilen parçacıkların boyut, şekil ve bileşimi, Fe⁺²/Fe⁺³ oranı, kullanılan tuz (klorür, sülfat, nitrat) pH, sıcaklık, baz tipi, iyonik şiddete bağı olarak değişir. Oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebilir. Sentez şartları belirlendiğinde , aynı nitelikte nanoparçacıklar tekrar elde edilebilir. 3-20 nm arasında parçacık elde etmek mümkündür. Manyetik nanoparçacıklar için manyetik doyum değerleri bulk değerinden (90 emu/g) düşük olarak 30-50 emu/g arasında değişir. Manyetit (Fe₃O₄) kararlı değildir. Havayla ya da asit ortamında kolayca okside olarak maghemite (γ-Fe₂O₃) dönüşürler.



Maghemit için oksidasyon büyük bir problem değildir. Bu yüzden, manyetit nanoparçacıkları kasıtlı olarak okside edilerek maghemit nanoparçacıklarına dönüştürülürler. Bu dönüşüm parçacıkların asit ortamında dispersiyonu ve ardından demir(III)nitrat eklenmesiyle yapılır. Bu şekilde hazırlanan parçacıklar çözeltinin pH değerine bağı olarak yüzey yüklerine sahiptirler. Bu yöntemin en büyük avantajı büyük miktarda parçacık sentezlenebiliyor olmasıdır. Ortak çöktürmeyle elde edilen nanoparçacıklar polidisperstirler. Bloklama sıcaklığı parçacık boyutuna bağıdır. Geniş boyut dağılımı, geniş oranda bloklama sıcaklık dağılımına neden olur. Bu yüzden, parçacıklar pek çok uygulama alanı açısından ideal olmayan manyetik davranışlar sergilerler (Lu *et al.* 2007).

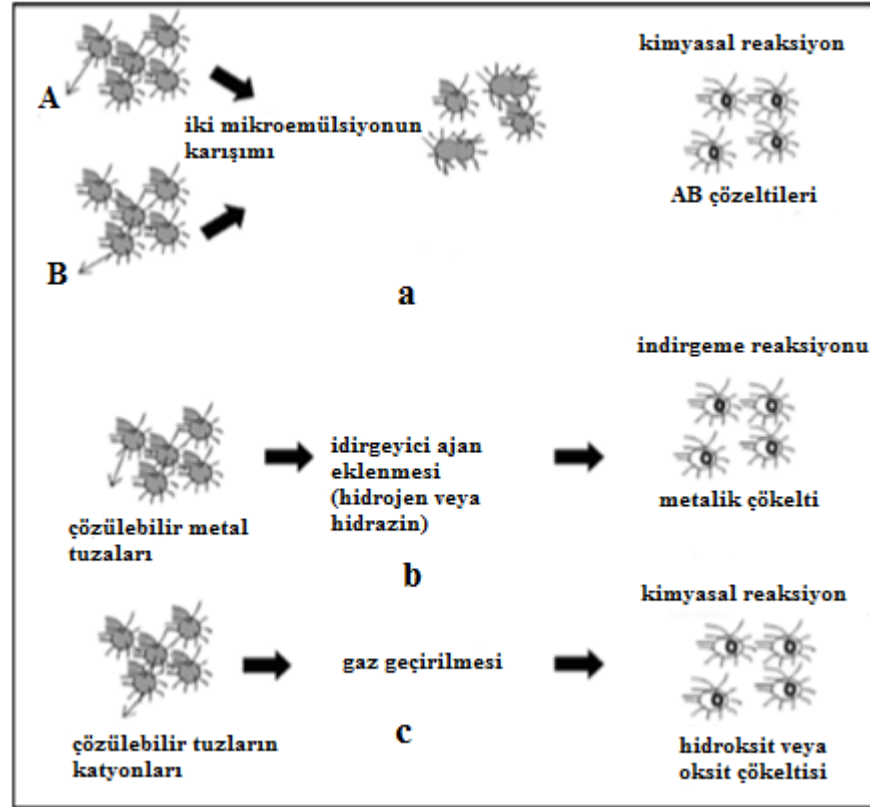
2.21.3. Mikroemülsiyon

Mikroemülsiyonla, birbirine karışmayan iki sıvının kararlılığı sağlanır. Yağ fazında nanoboyutta su damlaları içeren, water-in-oil (w/o) mikroemülsiyonu demir oksit

nanoparçacıkları elde etmek için sıkça kullanılan bir metottur. Sürfaktan kaplı su birikintisi, parçacıkların formasyonu için uygun ortamı oluşturur ve parçacıkların büyümelerini sınırlandırır. Manyetik nanoparçacıklar, su fazındaki Fe^{+2}/Fe^{+3} ve NaOH in çöktürme reaksiyonuyla kolayca elde edilir. Parçacıklar miseller içinde büyütülür ve çözücü ekleyerek (aseton, etil alkol) çöktürülür. Mikroemülsiyon damlalarının boyutu su surfaktan oranıyla belirlenmesine rağmen, nanoparçacıkların boyutu reaksiyona giren maddelerin konsantrasyonu ve surfaktan filmin esnekliğinden etkilenir (Lee *et al.* 1992; Lu *et al.* 2007)

Şekil 2.22’de görüldüğü gibi mikroemülsiyonla pek çok yolla nanoparçacık elde edilebilir. Bir metotta reaktant A ve B iki özdeş w/o mikroemülsiyonundaki sıvı fazda çözülür ve AB çökeltisi elde edilir. diğeri bir metodla nanoparçacıklar hidrazin gibi sıvı veya hidrojen gibi gaz indirgeme ajanlarının eklenmesiyle elde edilir. Diğeri bir metottaysa, oksit, hidroksit veya karbonat çökeltileri çözülmüş tuz katyonları içeren mikroemülsiyonundan O_2 , NH_3 , CO_2 gazları geçirilmesiyle elde edilir. Water- in-oil mikroemülsiyonu demir oksit, metalik demir nanoparçacıkları, manyetik polimerik demir oksit nanoparçacıkları ve silika kaplı demir oksit nanoparçacıkları sentezinde kullanılır. Sentezde değişik surfaktantlar kullanılır: Bis (2-ethylhexyl) sulfosuccinate (AOT), sodyum dodecyl sülfat (SDS), cetyltrimethylammonium bromid (CTAB), polivinylpyrrolidone (PVP), diethyl sulfosuccinate (DES) (Teja and Koh 2008).

Bu yöntemle küresel, dikdörtgen ve küp şeklinde, neredeyse monodispers nanoparçacıklar elde edilebilir. Termal parçalama ve ortak çöktürme teknikleriyle karşılaştırıldığında elde edilen nanoparçacık miktarı oldukça azdır. Büyük miktarda parçacık sentezi için çok miktarda çözücüye gerek vardır bu yüzden çok kullanılan bir yöntem değildir.



Şekil 2.22. (a) İki mikroemülsiyon karışımı, (b) indirgeyici ajan eklenmesi ve (c) ile sentezlenen gaz geçirilmesi nanoparçacıkların şematik gösterimi (Teja and Koh 2008)

2.21.4. Hidrotermal sentez

Sistem, hidrotermal şartlar altında farklı reaksiyon sıcaklıklarında metal linoleat (katı), sıvı fazda etanol-linoleik asit ve su etanol karışımından oluşur. Bu yöntemle monodispers 9 nm Fe_3O_4 ve 12 nm $CoFe_2O_4$ nanoparçacıkları elde edilir. Ayrıca monodispers, hidrofilik, tek kristal ferrit mikroküreleri elde edilir. $FeCl_3$, etilen glikol, sodyum asetat ve polietilen glikol iyice karıştırılarak basınçlı kaplara konur ve reaksiyon $200^\circ C$ de 8-72 saat arasında gerçekleştirilir. Bu yöntemle 200-800 nm arasında monodispers nanoparçacıklar elde edilir (Lu *et al.* 2007; Wang *et al.* 2007). Bu yöntemde kullanılan etilen glikol yüksek kaynama noktalı indirgeyici ajan, sodyum asetat parçacıkların bir araya gelerek büyümelerini engelleyen elektrostatik stabilizör, polietilen glikol da parçacıkların büyümelerini engelleyici surfaktan olarak görev yapar. Sodyum asetat ise nanoparçacıkların etrafını yükleyerek elektrostatik itme sağlar ve

parçacıkların birleşmelerini engelleyici olarak görev yapar. Hidrotermal sentez manyetik nanoparçacık sentezinde az kullanılan bir yöntem olmasına rağmen yüksek kalitede nanoparçacık elde edilmesine olanak verir. Ortak çöktürme ve termal parçalama çok çalışılan yöntemlerdir ve bol miktarda nanoparçacık sentezlenebilmektedir (Lu *et al.* 2007). Bu metotların avantajları ve dezavantajları Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Nanoparçacık elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan metotların avantajları ve dezavantajları (Lu *et al.* 2007)

Metodlar	Sentez	Reaksiyon Sıcaklığı (°C)	Reaksiyon periyodu	Çözücü	Yüzek aktif ajan	Boyut Dağılımı	Yüzey Kontrolü	Ürün Miktarı
Ortak Çöktürme	Basit çevre şartlarında	20-90	Dakikalar	Su	Gerekli Reaksiyon esnasında yada reaksiyon sonrası	farklı	İyi değil	Yüksek
Termal parçalama	Komplike, inert atmosferde	100-320	Saatler ve günler	Organik çözücü	Gerekli reaksiyon esnasında	Aynı	Çok iyi	Yüksek
Mikroemülsiyon	Komplike, çevre şartlarında	20-50	Saatler	Organik çözücü	Gerekli reaksiyon esnasında	farklı	İyi	Düşük
Hidrotermal sentez	Basit yüksek basınçta	220	Saatler, günler	Su, etanol	Gerekli reaksiyon esnasında	Aynı	Çok iyi	orta

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu çalışmada diyot elde etmek için taban malzeme olarak inorganik yarıiletken madde olan 400 µm kalınlıklı, (100) doğrultulu ve 1-10 Ω-cm öz dirence sahip bir yüzü parlatılmış p-tipi Si ve n-tipi Si, doğrultucu kısmında ise metal ile yarıiletken arasında demir oksit malzemesi kullanılmıştır. Bu bölümde, referans Au/p-Si/Al ile Au/n-Si/Al diyotları ve Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ile Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının yapımı için gerekli olan fabrikasyon süreci yer almaktadır. Ayrıca elde edilen numunenin *I-V*, *C-V* karakteristik parametrelerinin ölçümünde kullanılan cihazlar ve teknikler bu bölümde yer almaktadır.

3.2. p-Si ve n-Si Kristallerinin Temizlenmesi ve Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan kristaller tabaka şeklinde olup ve numunelerin yüzeylerinde herhangi bir pürüz gözlenmemiştir. Ancak elde edilen diyotların istenilen kalitede olabilmesi için Si kristal yüzeylerinin kimyasal kirliliklerden arındırılması gerekmektedir. Bu yüzden numuneler kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Kimyasal temizleme işleminde sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanmıştır (Karataş and Türüt 2004; Kotan 2008; Güler *et al.* 2008; Uğurel *et al.* 2008).

- 1- Aseton'da ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 2- Metanol'de ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 3- Deiyonize su ile yeteri kadar yıkandı.
- 4- RCA1 (H₂O:H₂O₂:NH₃; 6:1:1) çözeltisinde 60 °C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 5- Seyreltik HF (H₂O:HF; 10:1) çözeltisi ile 30 saniye yıkandı.
- 6- RCA2 (H₂O:H₂O₂:HCl; 6:1:1) çözeltisinde 60 °C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 7- Deiyonize su ile yeteri kadar yıkandı.
- 8- Seyreltik HF (H₂O:HF;10:1) çözeltisi ile 30 saniye yıkandı.
- 9- 20 dakika akan deiyonize su içerisinde bekletildi.

10- El ile temas edilmemesine dikkat edilerek azot gazı altında iyice kurutuldu.

Diyotların üretimi sırasında kirlilikler diyot parametrelerini olumsuz etkileyeceğinden dolayı ortam şartları ve kullanılacak malzemelerin temiz olması da önem arz etmektedir. Buharlaştırılacak olan Al ve Au metalleri seyreltik HF ile, omik kontakın fırında tavlama işlemi için kullanılacak quartz pota aseton ve metanolla yaklaşık 5'er dakika ve buharlaştırmada kullandığımız ısıtıcı %10'luk HCl ile ultrasonik olarak yıkandıktan sonra, deiyonize su ile iyice durulanıp kurutulmuştur.

Vakum cihazı ve çalışmada kullanılacak yardımcı ekipmanların temizliği yapıldıktan sonra buharlaştırma işlemi için kullanılacak ısıtıcı vakum pompasındaki yerine yerleştirildi ve buharlaştırılacak olan, önceden kimyasal temizliği yapılmış olan küçük bir parça Al metali ısıtıcıdaki yerine konuldu. Buharlaştırma işlemi yapılmadan önce metali oksitlenme türü kirliliklerden arındırmak için metal vakum ortamında eritildi. Omik kontak yapmak üzere numunelerin mat tarafı (omik kontak yapılacak yüzey) aşağıdaki ısıtıcıya bakacak şekilde vakum sistemindeki tutucuya uygun yükseklikte yerleştirildi ve buharlaşan metalin parlak yüzeyini kirletmesini engellemek için kristalin üstte kalan parlak yüzey üzerine lamel konuldu. Buharlaştırılacak metalin, yarıiletken malzeme ile etkileşimi açısından numunenin bırakılacağı yükseklik iyi ayarlanmalıdır. Omik kontaklarda numune ile buharlaştırılacak metal arasındaki uzaklık Schottky kontaklara göre daha az olmalıdır. Böylece buharlaşacak metalin yarıiletken yüzeyine atomik boyutta daha yoğun kaplanması sağlanabilir. Önceden çalıştırılarak işlem yapılmaya hazır hale getirilen vakum sisteminin içindeki basınç yaklaşık olarak 10^{-5} torr değerine düştüğünde, ısıtıcı üzerine yerleştirilmiş olan Al metali ısıtıcıya yüksek bir akım uygulanması sonucunda Şekil 3.1'de görülen buharlaştırma ünitesinde buharlaştırılmıştır. Kısa bir süre sonra vakum cihazına hava verilip, sistem dengeye ulaştıktan sonra numuneler vakum cihazından çıkartılarak kimyasal olarak temizlenmiş quartz pota içine yerleştirildi. Numuneleri tavlama işlemine tabi tutmak için Şekil 3.2'de görülen fırın kullanılmıştır. Önceden ısıtılarak hazır hale getirilen fırında, N_2 ortamında p-tipi numune $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 3 dakika ve n-tipi numune $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 10 dakika tavlandı. Bu işlemden sonra quartz pota tavlama işlemi için numuneler ile beraber fırının girişine

çekilerek soğuması için bir süre bekletildi. Böylece p -Si/Al ve n -Si/Al omik kontaktarı elde edilmiş oldu.



Şekil 3.1. Buharlaştırma ünitesi



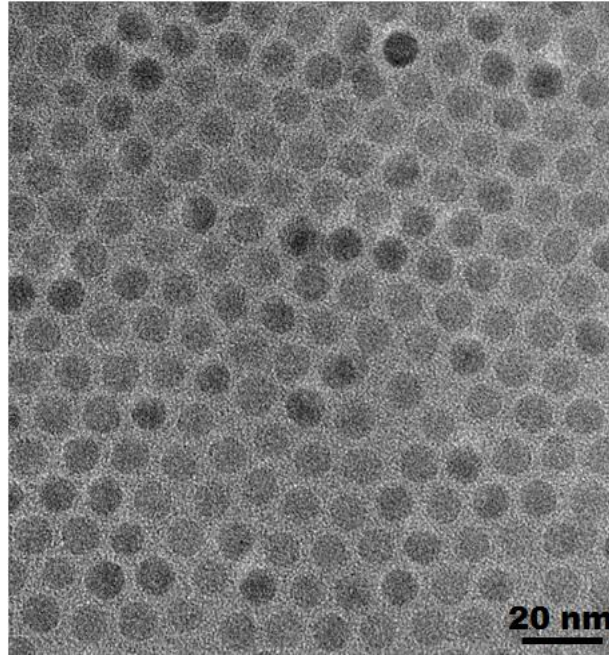
Şekil 3.2. Tavlama fırını

3.3. Fe₃O₄ Nanoparçacıkların Sentezi

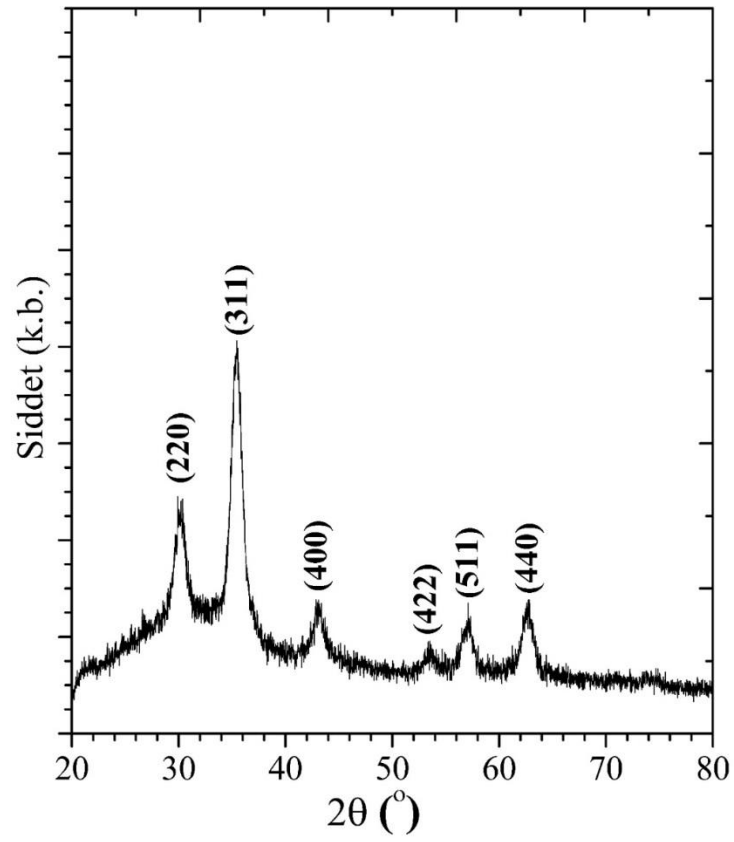
Fe₃O₄ nanoparçacıkların sentezi için oleilamin (>%70), benzil eter, demir asetilasetonat (Fe (acac)₃, %99) ve hegzan, Sigma-Aldrich'den temin edildi. Fe₃O₄ nanoparçacıklar oleilamin ve benzil eter varlığında Fe(acac)₃'ün termal olarak bozunmasıyla sentezlendi.

Fe₃O₄ nanopartiküllerin morfolojisi TEM ile incelendi. Fe₃O₄ nanoparçacıklar TEM görüntüsü Şekil 3.3'de verilmiştir. TEM görüntülerinden Fe₃O₄ nanoparçacıkların parçacık büyüklüğü 8±0,4 nm olarak belirlendi. TEM görüntülerinden sentezlenen Fe₃O₄ nanopartiküllerin tek düze parçacık boyutun sahip olduğu ve küresel olduğu belirlendi.

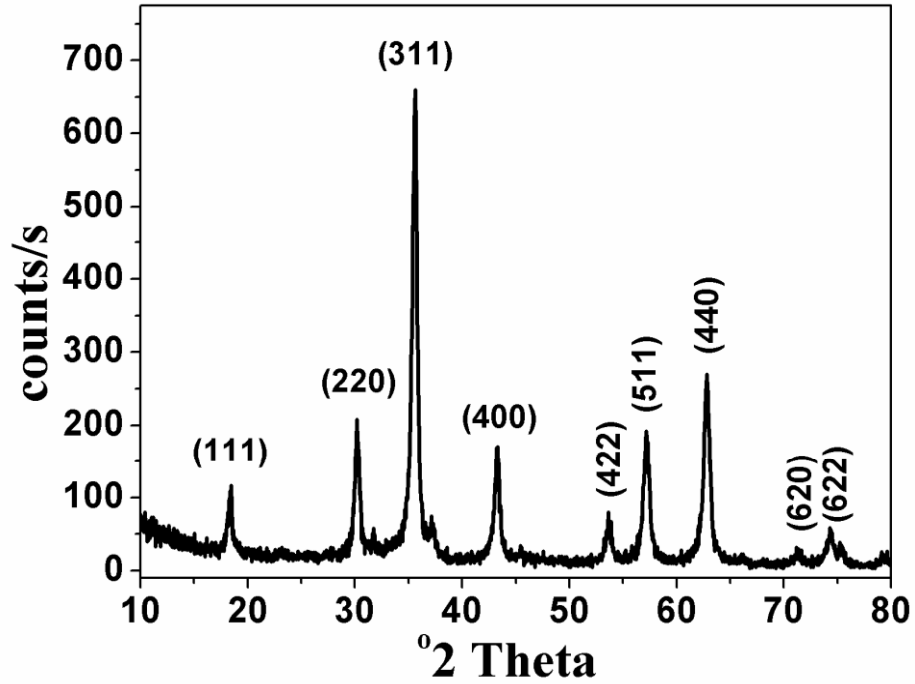
X-ışını kırınım deseni (XRD), Cu K α radyasyonu ($k=1,5418 \text{ \AA}$) ile bir Bruker AXS D8-ADVANCE kırınım ölçer ile belirlendi. Şekil 3.4'de Fe₃O₄ nanoparçacıklar için XRD spektrumları verilmiştir. Tüm kırınım piklerinin bağıl yoğunluğu ve pozisyonu literatürdeki manyetik Fe₃O₄ nanoparçacıkları ile tutarlıdır (Li *et al.* 2015; Qin *et al.* 2015; Shen *et al.* 2015). El Ghandoor *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada Fe₃O₄ nanoparçacıkların kırınım pikleri Şekil 3.5' de görüldüğü üzere aynı açı değerlerinde aynı pikleri vermiştir. Bu sebepten dolayı piklere ait indisler bu çalışmada olduğu gibi belirtildi. Tüm kırınım pikleri hücre sabitleri ile Fe₃O₄'ün saf kübik fazına endeksli olabilir. Güçlü ve keskin pikler Fe₃O₄ nanoparçacıkların yüksek saflıkta ve iyi kristal olduğu durumlarda ortaya çıkar (Manikandan *et al.* 2014).



Şekil 3.3. Fe₃O₄ nanoparçacıkların TEM görüntüsü



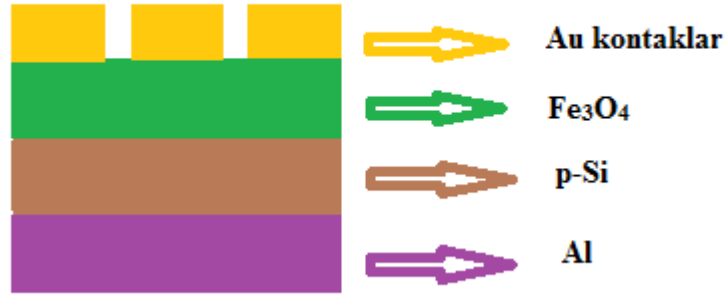
Şekil 3.4. Fe₃O₄ nanoparçacıkların XRD deseni



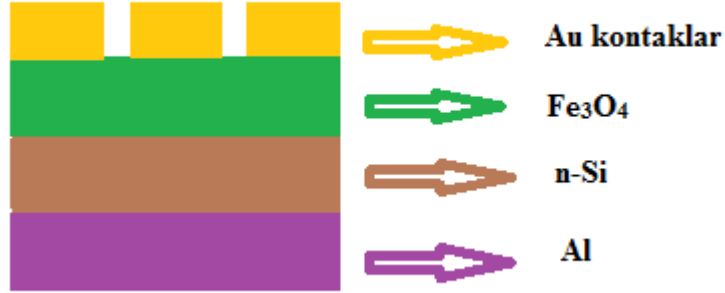
Şekil 3.5. Fe₃O₄ nanoparçacıkların XRD deseni (El Ghandoor *et al.* 2012)

Sentezlediğimiz Fe₃O₄ çözeltisi omik kontak işlemi tamamlanan *p*-Si ve *n*-Si yarıiletken kristallerinin üzerine basit damlatma yöntemiyle kaplandı. Kaplama işlemi yapılırken kaplamanın olabildiğince homojen olmasına dikkat edildi. Kaplama işleminden sonra, kaplanan Fe₃O₄ nanoparçacıkları ile kaplanmış olan numunelerimiz bu parçacıkların kuruması için yaklaşık olarak 30 dakika kurumaya bırakıldı. *p*-Si ve *n*-Si kristallerin parlak yüzeylerine Fe₃O₄ büyütülerek elde edilen Fe₃O₄/*p*-Si/Al ve Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyotları 10 dakika 70 °C’de tavlandı. Daha sonra referans Au/*p*-Si/Al ile Au/*n*-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al ile Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al Schottky yapıların fabrikasyonuna başlandı. Üzerine Fe₃O₄ kaplanmış ve omik kontağı yapılmış olan numuneler, 1 mm çapındaki deliklere sahip pirinçten yapılmış gölge maske üzerine, omik kontak için kaplanan yüzeyleri yukarı bakacak şekilde yerleştirilerek üzeri cam lamel ile kapatıldı. Laboratuvarımızdaki omik kontak işleminde kullandığımız kaplama ünitesinin cam fanusu kapatılarak vakuma alındı. Kaplama ünitesinin içerisinde basınç $\approx 10^{-5}$ torr değerine ulaşıncaya, sisteme akım verildi. Fe₃O₄ kaplanmış yüzey üzerine 40 nm kalınlıkta Au metali buharlaştırılarak Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’deki gibi nokta şeklinde doğrultucu (Schottky) kontaklar elde edildi. Elde edilen referans Au/*p*-Si/Al ile Au/*n*-Si/Al ve

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ile Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının oda sıcaklığında ve değişen sıcaklıklarda yani 40 K ile 300 K arasında 20 K'lık adımlarla *I-V* ölçümleri alındı. Ayrıca bu diyotların oda sıcaklığında *C-V* ölçümleri alındı. Alınan bu ölçümlerden farklı metotlardan bazı temel diyot parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği gibi) hesaplandı.



Şekil 3.6. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun şematik diyagramı

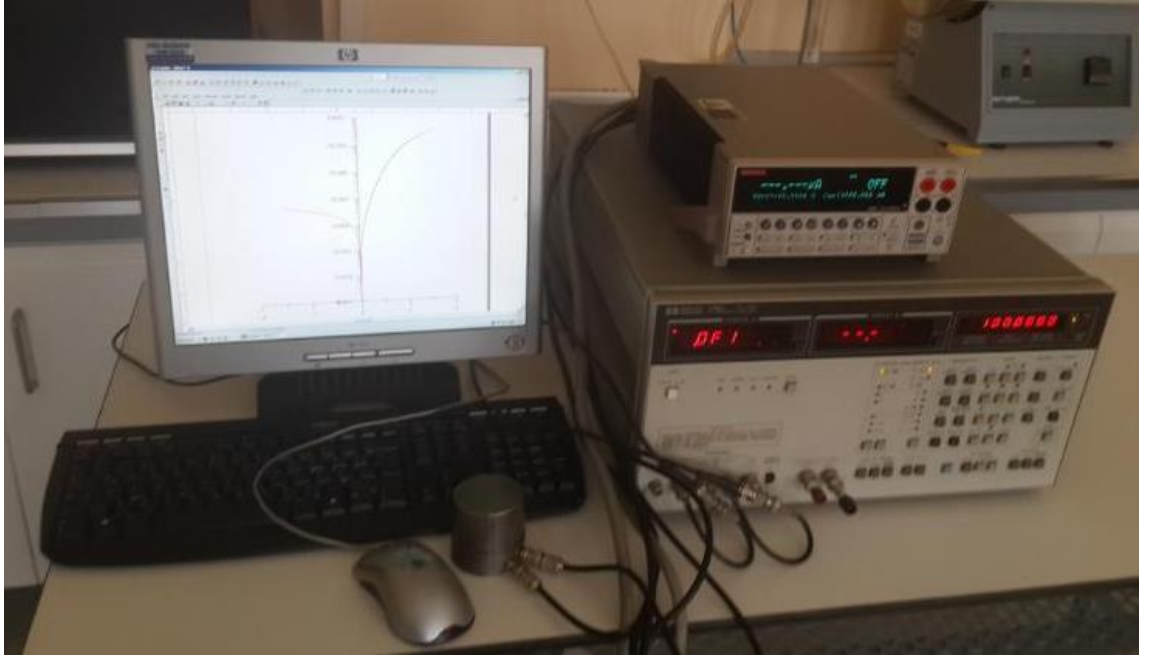


Şekil 3.7. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodunun şematik diyagramı.

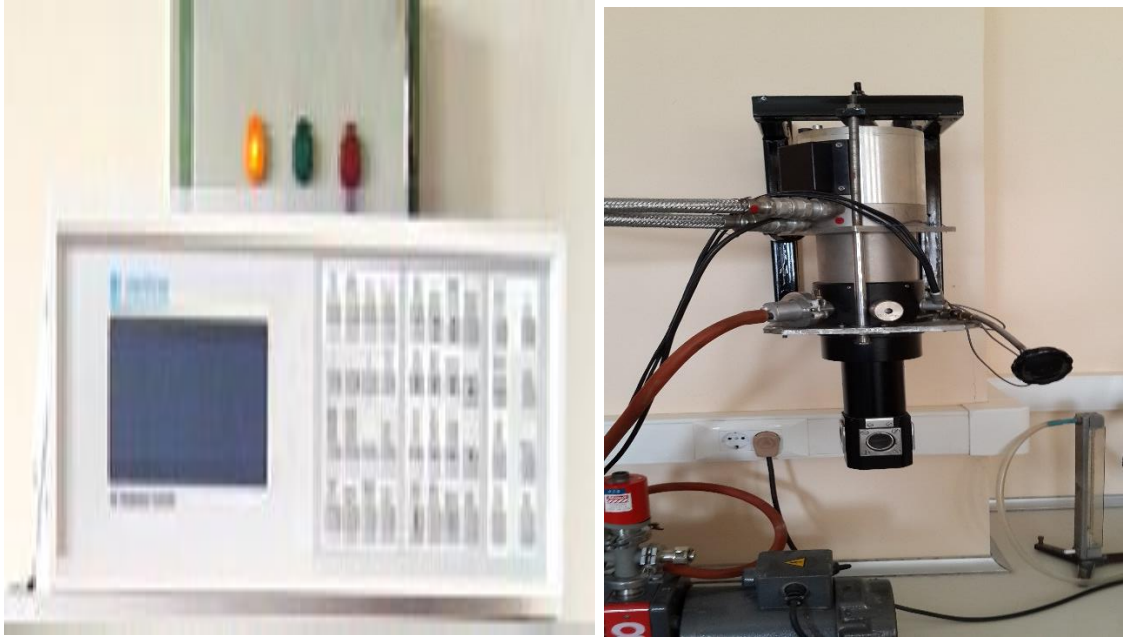
3.4. Deney ve Ölçü Sistemleri

Fabrikasyonunu yaptığımız diyotların oda sıcaklıklarında “KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile *I-V* (akım-voltaj) ve HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı ile de *C-V* (kapasite-voltaj) ölçümleri alındı. *I-V* ve *C-V* ölçümlerinin alındığı sistemlerin düzeneği Şekil

3.8’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.9’da gösterilen KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile $\text{Au/Fe}_3\text{O}_4/p\text{-Si/Al}$ ve $\text{Au/Fe}_3\text{O}_4/n\text{-Si/Al}$ yapılarının 300 K ile 40 K arasında 20 K’lik adımlarla sıcaklığa bağlı I - V ölçümleri yapıldı. Numune sıcaklığı LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi yardımıyla $\pm 0,1$ K hassasiyetle kontrol edildi.



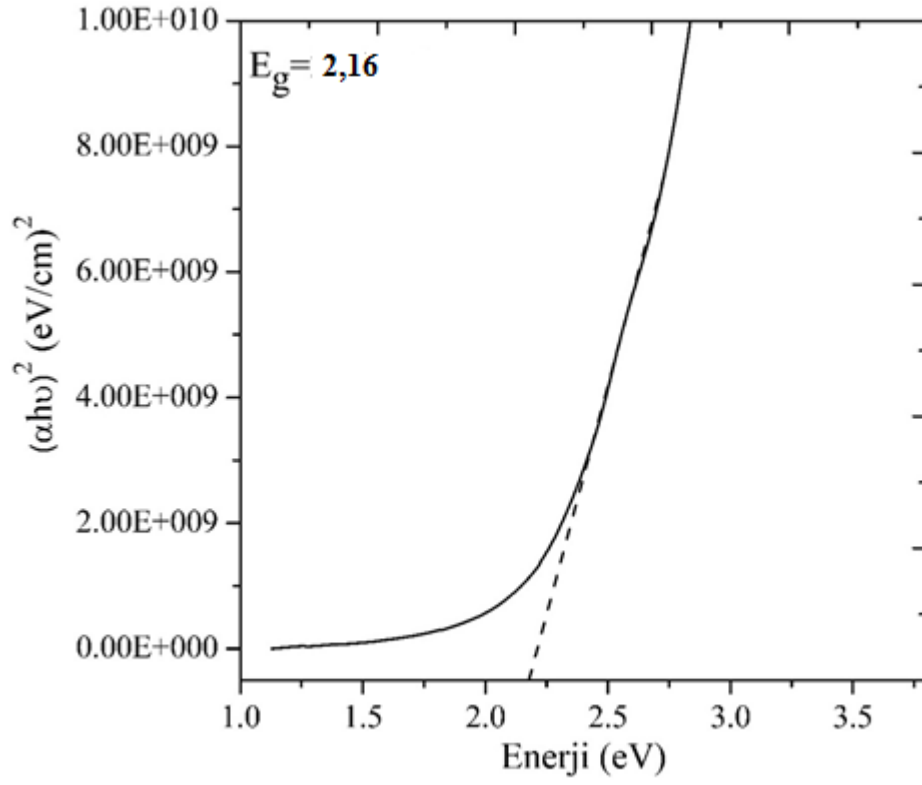
Şekil 3.8. Akım-voltaj (I - V) ve kapasite-voltaj (C - V) ölçüm sistemleri



Şekil 3.9. LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi

3.5. Fe₃O₄ İnce Filminin Enerji Band Aralığının Belirlenmesi

Pratikte optik band aralığını belirlemek için Tauc grafiği kullanılır. Fe₃O₄ filmine ait Tauc grafiği Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekil 3.10'da yatay eksene düz bir çizgiyle fit çizdiğimizde, fitin yatay ekseni kestiği nokta filmin enerji band aralığını verir. Optik band aralığının değerini hesaplamak için Tauc eşitliği olarak bilinen $(\alpha hv)^{1/n} = A (hv - E_g)$ ifadesi kullanılır. Bu eşitlikte h Planck sabiti, v frekans, α soğurma katsayısı, A oransal sabit ve E_g band aralığıdır. n ise bir sabit olup, direkt geçişler için değeri 1/2 iken indirekt geçişlerde değeri 2'dir. Literatürde yapılmış olan çalışmalarda Fe₃O₄'ün indirekt band aralığına sahip olduğu belirtilmiştir (Duret and Gratzel 2005, Glasscock *et al.* 2008). Bu çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda Fe₃O₄ filmin enerji band aralığı 2,16 eV olarak hesaplandı. Elde edilen bu değer literatürde Fe₃O₄ için hesaplanmış band aralığı değerleri ile hemen hemen aynıdır (Ogawa *et al.* 2013)



Şekil 3.10. Fe₃O₄ ince filminin oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı değişim grafiği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Bu bölümde bir önceki bölümde ayrıntılarıyla fabrikasyon süreci anlatılmış olan Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ile Au/Fe₃O₄/n-Si/Al ve referans Au/p-Si/Al ile Au/n-Si/Al diyodlarının, oda sıcaklığı ve farklı sıcaklıklarda alınmış olan *I-V* (Akım – Voltaj) ölçümlerinden ve oda sıcaklığında alınmış *C –V* (Kapasite – Voltaj) ölçümlerinden yararlanarak farklı metotlarla hesaplanmış temel diyod parametrelerinin bir kısmı yer almaktadır. Bunlara ek olarak, bu bölümde Au/Fe₃O₄/p-Si/Al doğrultucu kontaklarının çeşitli dozlardaki X-ışını radyasyonunun *I-V* (Akım-Voltaj) karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Ayrıca, bu parametrelere bağlı olarak oluşturulan tablo ve grafikler de bu bölümde yer almaktadır.

4.2. *I – V* (Akım – Voltaj) Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanımı

Fabrikasyon süreci tamamlanan Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodlarının *I – V* ölçümleri hem oda sıcaklığında hem de sıcaklık kontrol ünitesi yardımıyla 40 K ile 300 K aralığındaki sıcaklık değerleri için alındı. *I-V* grafiğinin lineer davranış gösterdiği düz beslem kısmından diyotların idealite faktörleri ve engel yükseklikleri hesaplanırken, yüksek akım değerlerine karşılık gelen ve lineerliğin bozulduğu bölgeden seri direnç değerleri hesaplandı.

Bir Schottky diyodun Termiyonik Emisyon (TE) teorisine göre, doğru beslem akımı uygulanan potansiyele bağlı olarak;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadede I , akım, I_0 , doyma akım yoğunluğu ve k , Boltzmann sabitidir. ($k = 1,380658 \times 10^{-23}$ JK) Bu ifadede $eV \gg nkT$ olması durumunda üstel terim yanındaki '1' ihmal edilebilir. Bu durumda ifadenin yeni hali;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (4.2)$$

şeklinde olur. (4.2) ifadesinin her iki tarafının tabii logaritmasını alıp, sonra da V 'ye göre türevini alırsak; idealite faktörü için (4.3) ifadesi elde edilir.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.3)$$

İdealite faktörü; diyodun karakteristiğini belirleyen oldukça önemli bir parametredir. "n" sembolü ile gösterilir ve birimi yoktur. İdeal bir diyot için n değeri 1'dir ve n değeri 1'den uzaklaştıkça, yani n değeri büyüdükçe diyot ideal olmayan bir davranış sergiler (Tung 1991; Tsiarapas *et al.* 2014). Genelde uygulamada idealite faktörü 1'den büyük değere sahip olur. İdealite faktörü değerinin büyük olmasının nedeni ince doğal ara yüzey oksit tabakalarının ve seri direnç gibi etkilerin varlığına atfedilir. Bununla birlikte homojen olmayan engel yüksekliği yüksek idealite faktörü değerleri için önemli bir açıklama olmaktadır (Aydın *et al.* 2011; Gupta and Yakuphanoglu 2012). Aynı zamanda daha yüksek idealite faktörü bir organik ara tabakanın veya belirli bir arayüzey yapısının neden olduğu arayüzey dipolleri ve ara yüzeyde oluşan fabrikasyon kaynaklı kusurlar gibi ikincil mekanizmaların varlığından olabilir (Kumar *et al.* 2013; Reddy 2014)

Ayrıca idealite faktörünün büyük olması arayüzey tabakasındaki potansiyel düşmesine, aşırı akımın ve yarıiletken/yalıtkan tabakalar arasındaki arayüzey halleri boyunca rekombinasyon akımının varlığına atfedilebilir (Reddy 2014)

Tung (2001), Schottky diyotlardan elde edilen I - V karakteristiklerinin bazı durumlarda (örneğin; idealite faktörünün yaklaşık 1.03'den büyük olduğu durumlarda) termiyonik-emisyon modeli ile doğrudan açıklanamayacağını göstermiştir. Bu durumu, Schottky engel yüksekliğinin uygulanan gerilime bağlı olduğunu kabul ederek açıklamıştır. Aynı zamanda idealite faktörünün 1'den daha büyük olduğu durumları, engelin imaj kuvvet etkisiyle azalması, jenerasyon-rekombinasyon akımları, arayüzey halleri ve tünelleme gibi etkilerin varlığıyla açıklamıştır.

Diyot için aldığımız I - V ölçümlerinden $\ln I$ 'nın V 'ye karşı grafiğini çizdiğimizde, düz beslem kısmındaki lineer bölgeye doğru bir fit çizilirse bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ ifadesi elde edilir. Elde edilen bu değer ve e , (elektronun yükü $=1,6 \times 10^{-19}$ C), k (Boltzmann sabiti $=8,625 \times 10^{-5}$ eV/K) ve T (mutlak sıcaklık (K)) değerleri (4.3) ifadesinde yerine yazılarak 40 K ile 300 K sıcaklık değerleri arasındaki idealite faktörü değerleri hesaplandı.

Çizilen fitten elde edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey ekseni kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir ve (4.2) ifadesindeki I_0 doyma akım yoğunluğu,

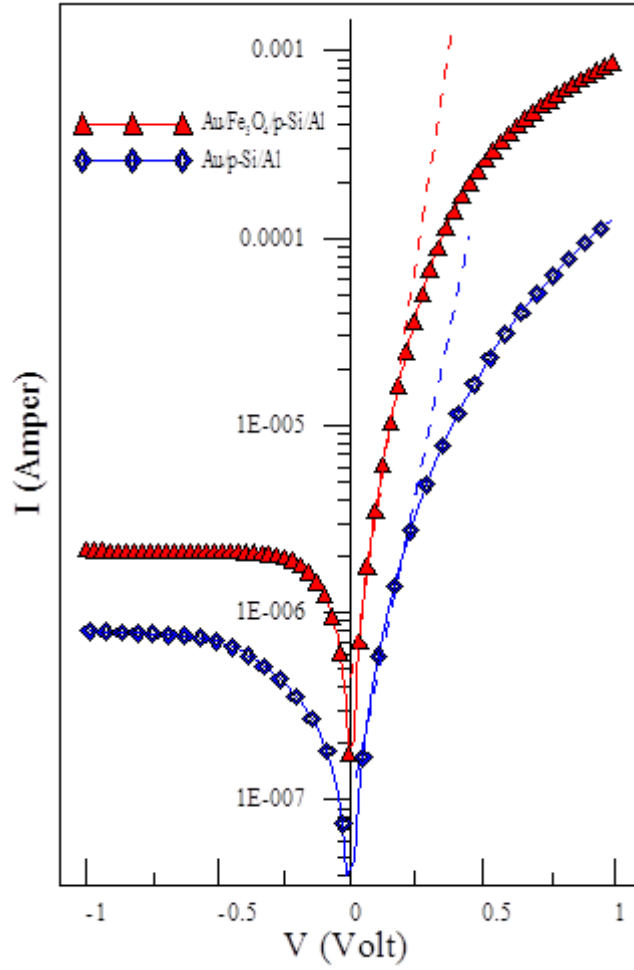
$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.4)$$

eşitliği ile verilmektedir. (4.4) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp $e\Phi_b$ ifadesi yalnız bırakılırsa, (4.5) eşitliği ile verilen engel yüksekliği ifadesi elde edilmiş olunur.

$$e\Phi_b = kT \ln(AA^* T^2 / I_0) \quad (4.5)$$

(4.5) ifadesinde, A , diyodun etkin alanı ($A=0,00785 \text{ cm}^2$) A^* , Richardson sabiti olup, bu değer p -Si için $32 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$ ve n -Si için $112 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$ 'dir (Rhoderick and Williams 1988; Metin *et al.* 2014; Çaldıran 2013).

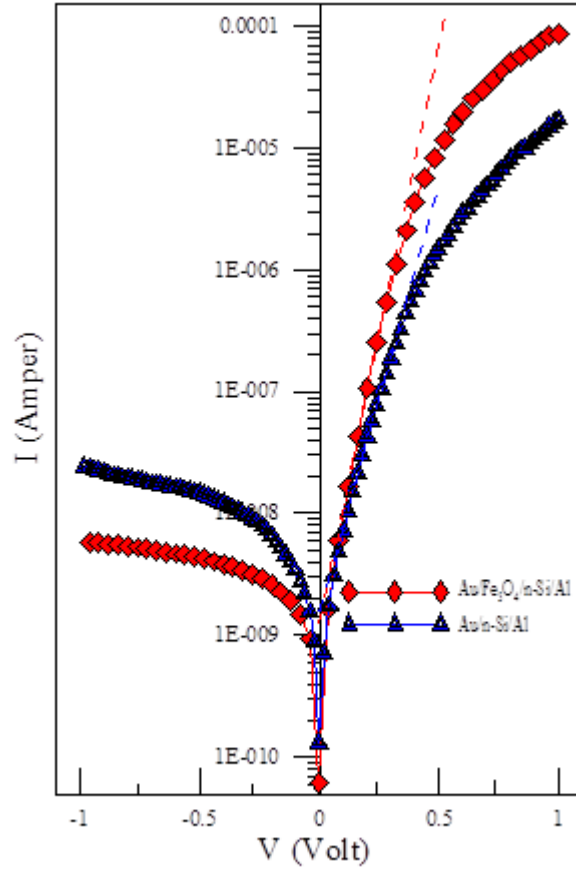
Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının ve aynı şartlar altında hazırlanmış olan referans Au/p-Si/Al ve Au/n-Si/Al diyotlarının *I-V* grafikleri sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Referans Au/p-Si/Al ve Au/n-Si/Al diyotlarına ait geleneksel metot kullanılarak hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış referans Au/p-Si/Al diyoduna ve Au/Fe₃O₄/p-Si/ Al diyoduna ait *I-V* grafikleri

Çizelge 4.1. Oda sıcaklığında aynı şartlar altında hazırlanmış referans Au/*p*-Si/Al diyodu ve Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al diyoduna ait *I-V* grafiklerinden geleneksel metotla elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık (Oda Sıcaklığı 300 K)	<i>I-V</i>	
	<i>n</i>	$\Phi_b(eV)$
Referans Au/ <i>p</i> -Si/Al	1,58	0,61
Au/Fe ₃ O ₄ / <i>p</i> -Si/Al	1,17	0,65



Şekil 4.2. Oda sıcaklığında aynı şartlar altında hazırlanmış referans Au/*n*-Si/Al diyoduna ve Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyoduna ait *I-V* grafikleri

Çizelge 4.2. Oda sıcaklığında aynı şartlar altında referans Au/*n*-Si/Al diyodu ve Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyoduna ait *I-V* grafiklerinden geleneksel metot ile elde edilen temel diyod parametreleri

Sıcaklık (Oda Sıcaklığı 300 K)	<i>I-V</i>	
	<i>n</i>	$\Phi_b(eV)$
Referans Au/ <i>n</i> -Si/Al	1,91	0,74
Au/Fe ₃ O ₄ / <i>n</i> -Si/Al	1,18	0,83

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de oda sıcaklığında referans diyotlarla ile kaplanmış olan diyotların *I-V* karakteristiklerinin karşılaştırılması ve Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.1’de ise bu diyotlardan geleneksel metot ile elde edilen temel diyot parametrelerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Grafiklerden ve elde edilen diyot parametrelerinden Fe₃O₄’ün diyodun karakteristiğinde iyileştirme yaptığı net bir şekilde görülmektedir. Oda sıcaklığında referans Au/*p*-Si/Al diyodu için idealite faktörü 1,58 bulunurken engel yüksekliği değeri 0,61 eV olarak bulundu. Aynı şartlar altında hazırlanmış Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al diyodu için idealite faktörü 1,17 bulunurken engel yüksekliği 0,65 eV olarak bulundu. Bu durum *n*-Si taban malzemeli diyot için de benzer olup, Au/*n*-Si/Al diyodu için idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 1,91 ve 0,74 eV iken Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyodu için idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 1,18 ve 0,83 eV olarak bulundu.

Değerlerden de anlaşıldığı üzere Fe₃O₄ malzemesi temel diyod parametrelerini iyileştirmektedir. Fe₃O₄ malzemesi diyotların idealite faktörü değerini ideal değeri olan 1’e yaklaştırırken engel yüksekliği değerinin istenildiği üzere daha yüksek değerlere ulaşmasını sağlamıştır. Bu durumu Fe₃O₄’ün yarı metalik ve elektriksel iletken bir malzeme olmasıyla açıklayabiliriz. Son zamanlarda yarı metalik ve elektriksel iletken malzemelerin yapıların elektriksel özelliklerini iyileştirmesi üzerine yapılan çalışmalar sürmektedir. Geleneksel bir yarı metalik iletken olarak manyetit Fe₃O₄, Fermi

seviyesindeki güçlü spin polarizasyonu, yüksek Curie sıcaklığı, yarı metalik olma, düşük elektriksel dirence sahip olma ve Fe oksit stokiometrisi açısından iyi kimyasal kararlılık göstermesi gibi büyüleyici özelliklerinden dolayı birçok aygıt uygulamalarında ve mühendislik alanında kullanılmaktadır (Akın *et al.* 2014). Saf Fe_3O_4 numunesinin direnci $3,2 \cdot 10^{-4} \Omega\text{m}$ olarak bulunmuştur (Hsu *et al.* 2002). Fe_3O_4 filmlerin iletkenliği oktahedral kafes bölgeleri içerisindeki ferro ve ferri iyonları arasındaki elektronların değişiminden dolayıdır ve bu nedenle geçiş üzerindeki iyonların rastgele dağılımı izotropik bir iletkenliğe neden olur (Çaldıran *et al.* 2013).

Arayüzey tabakası ile kontaktaki engel yüksekliği değişimi arayüzey tabakası ile yarıiletken yüzey arasındaki arayüzey yüklerinin varlığına bağlıdır. Arayüzey hallerindeki mevcut negatif veya pozitif yüklerdeki artış yarıiletkenin deplasyon tabakasını etkileyecektir. *n*-tipi yarıiletken yüzeyde pozitif yüklenmiş donör gibi arayüzey halleri, pozitif uzay yükleri deplasyon bölgesinde azalırken negatif yüklenmiş akseptör gibi arayüzey yüklerinin artacağından dolayı engel yüksekliğini azaltır. Bu yüzden tabakası ile yarıiletken yüzey arasındaki negatif yüklenmiş akseptörlerden veya pozitif yüklenmiş donörlerin varlığından dolayı engel yüksekliğinin artacağını söyleyebiliriz (Rhoderick and Williams 1988).

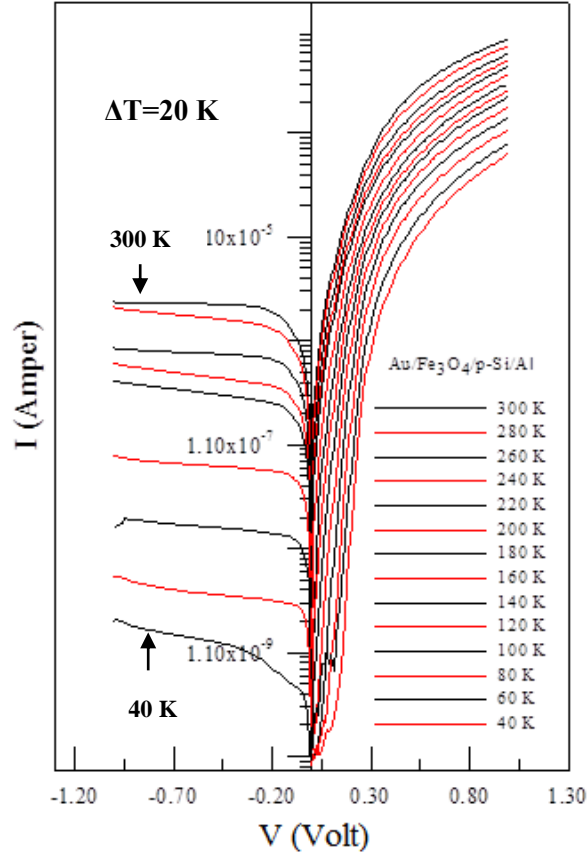
Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 sırasıyla $\text{Au}/\text{Fe}_3\text{O}_4/p\text{-Si}/\text{Al}$ ve $\text{Au}/\text{Fe}_3\text{O}_4/n\text{-Si}/\text{Al}$ diyotlarının sıcaklığa bağlı (40 K-300 K) *I-V* grafiklerini göstermektedir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de ise bu diyotların sıcaklığa bağlı olarak geleneksel metot ile elde edilen temel diyot parametreleri yer almaktadır. $\text{Au}/\text{Fe}_3\text{O}_4/p\text{-Si}/\text{Al}$ diyodu için 40 K ile 300 K arasında idealite faktörü değeri 1,17 ile 4,16 arasında iken, engel yüksekliği değeri 0,13 ile 0,65 eV arasında değişmektedir. $\text{Au}/\text{Fe}_3\text{O}_4/n\text{-Si}/\text{Al}$ diyodu için 40 K ile 300 K arasında idealite faktörü değeri 1,13 ile 2,92 arasında iken, engel yüksekliği değeri 0,13 ile 0,83 eV arasında değişmektedir.

Çizelgelerden de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça idealite faktörü değeri azalırken, engel yüksekliği değeri artmaktadır. Bu değişimler Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. İdealite faktörünün

$n > 1$ çıkması saf termiyonik emisyon teorisinden sapma olduğunu göstermektedir. Metal-yarıiletken ara yüzeyde akım iletimi sıcaklığa bağlı olduğundan dolayı, düşük sıcaklıklarda elektronlar daha düşük bir engel ile karşılaştıklarından akım iletimi baskın olur ve idealite faktörü değeri de artar (Sullivan 1991; Tung 1992). Bu çalışmada büyük idealite faktörü değerleri Fe_3O_4 nanoparçacıkların arayüzeyindeki ikincil mekanizmalara ve arayüzey kusurlarının oluşturabileceği engel yüksekliğinin yanal olarak homojen olmayan dağılımına atfedilir (Korkut *et al.* 2009; Ejderha *et al.* 2010; Evans – Freeman *et al.* 2011; El-Zohary *et al.* 2013; Afandiyeva *et al.* 2013; Deniz *et al.* 2013; Korucu and Duman 2013; Korucu and Turut 2014; Khurelbaatar *et al.* 2014; Lin and Lin 2014; Chand and Kumar 2014).

Sıcaklık artıkça elektronlar daha yüksek bir engeli aşmaya yetecek kadar enerji kazanacaklar ve sonuçta engel yüksekliği sıcaklığa ve doğru beslem voltajına bağlı olarak artacaktır (Karataş *et al.* 2005; Çaldıran *et al.* 2014). Ayrıca sıcaklıkla engel yüksekliğindeki ve idealite faktöründeki sapmalar genellikle ara yüzeydeki yüzey kusurları, arayüzey kontaminasyonu nedeniyle oluşan yüksek arayüzey hal yoğunluğu ve homojen olmayan katkılama konsantrasyonu gibi birkaç fiziksel nedenlerden olabilecek homojensizlikten kaynaklanır (Tung 1992).

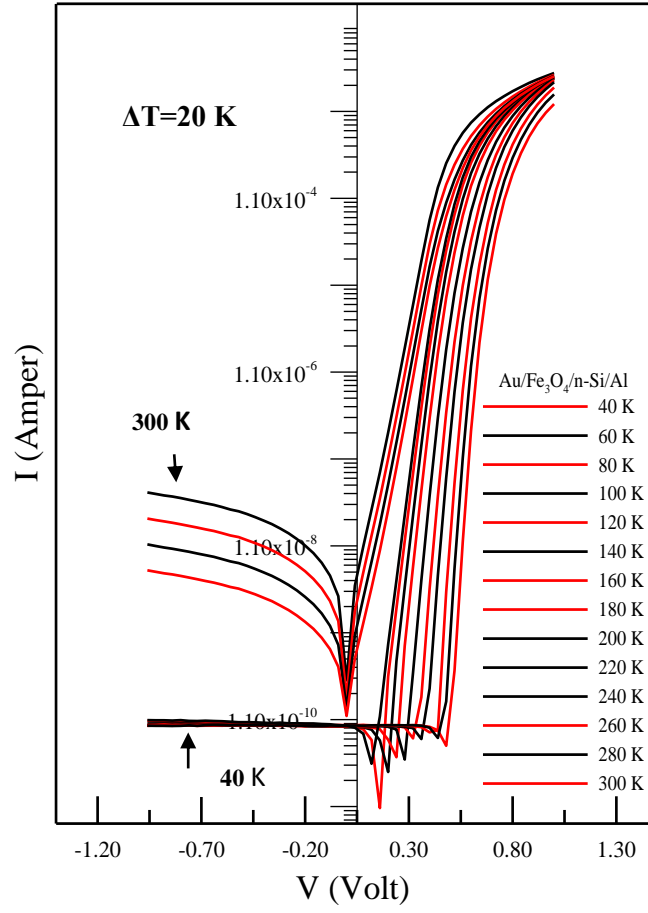
Literatürde deneysel verilerin ve homojen olmayan Schottky engelli diyodların I - V karakteristiklerini anlatmada iki ana yaklaşım öne sürülür. Bu yaklaşımlar Tung (1992) ve Werner and Guttler (1991) tarafından öne sürülen modellere dayanmaktadır. Tung modeline göre lokal olarak düzensiz bölgelerin veya ortalama engel yüksekliği ile ilgili nispeten daha düşük veya yüksek engelli yamaların varlığı homojen olmayan Schottky engeli oluşumunu sağlar. Ancak Werner-Guttler'in modeline göre engel yüksekliğinin genellikle sıcaklık ve voltajın her ikisine de bağlı belirgin bir engel yüksekliği sağlayacak Gaussian fonksiyonuna göre dağıtılmış olması gerekir.



Şekil 4.3. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı *I-V* grafikleri

Çizelge 4.3. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı *I-V* grafiklerinden geleneksel metot ile elde edilen temel diyot parametreleri

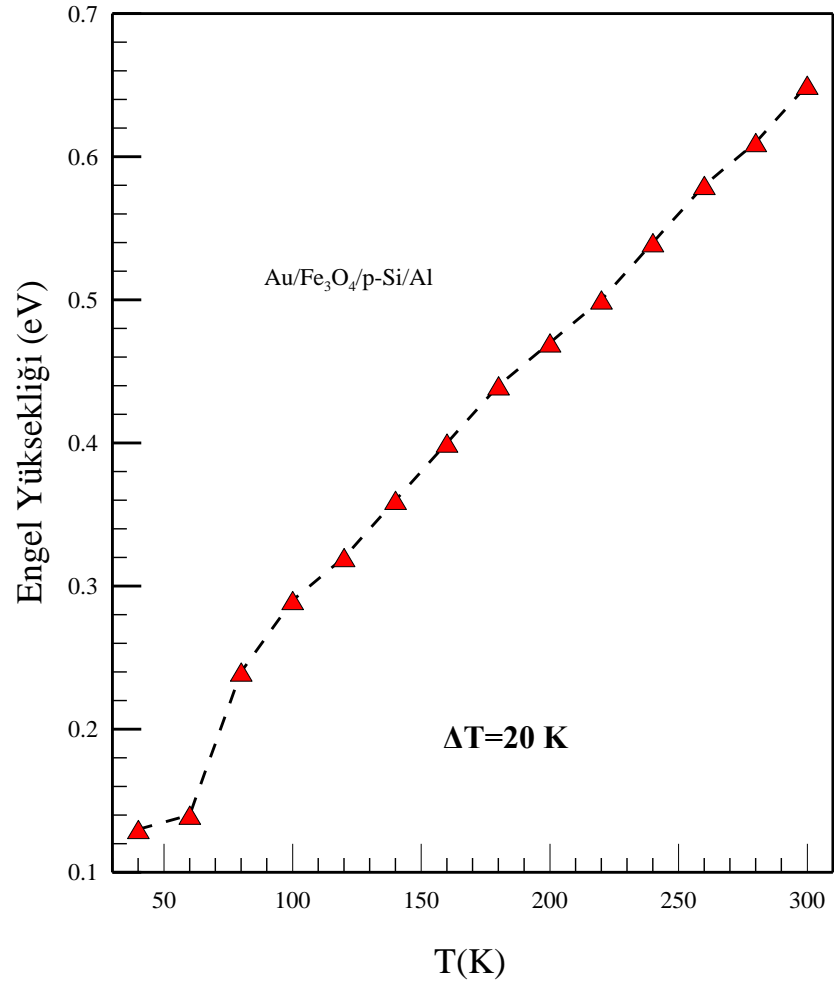
Sıcaklık (K)	<i>I-V</i>	
	<i>n</i>	Φ_b (eV)
40	4,16	0,13
60	2,86	0,14
80	2,40	0,24
100	1,80	0,29
120	1,73	0,32
140	1,67	0,36
160	1,60	0,40
180	1,51	0,44
200	1,46	0,47
220	1,40	0,50
240	1,31	0,54
260	1,26	0,58
280	1,22	0,61
300	1,17	0,65



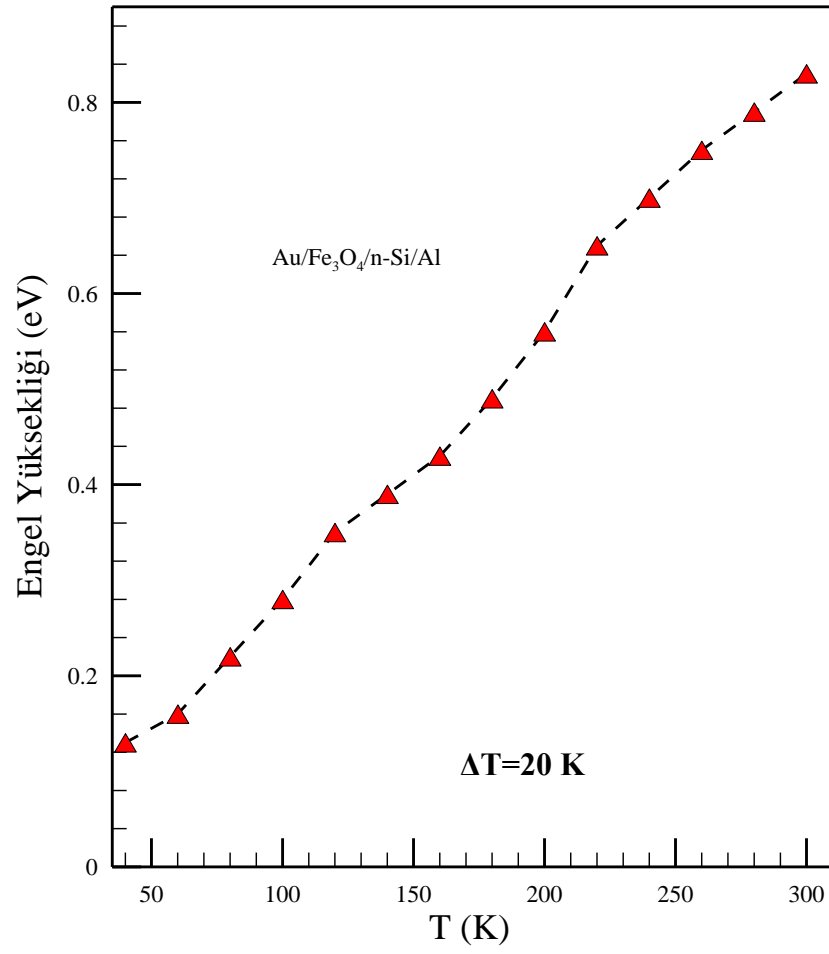
Şekil 4.4. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı *I-V* grafikleri

Çizelge 4.4. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı *I-V* grafiklerinden geleneksel metot ile elde edilen temel diyot parametreleri

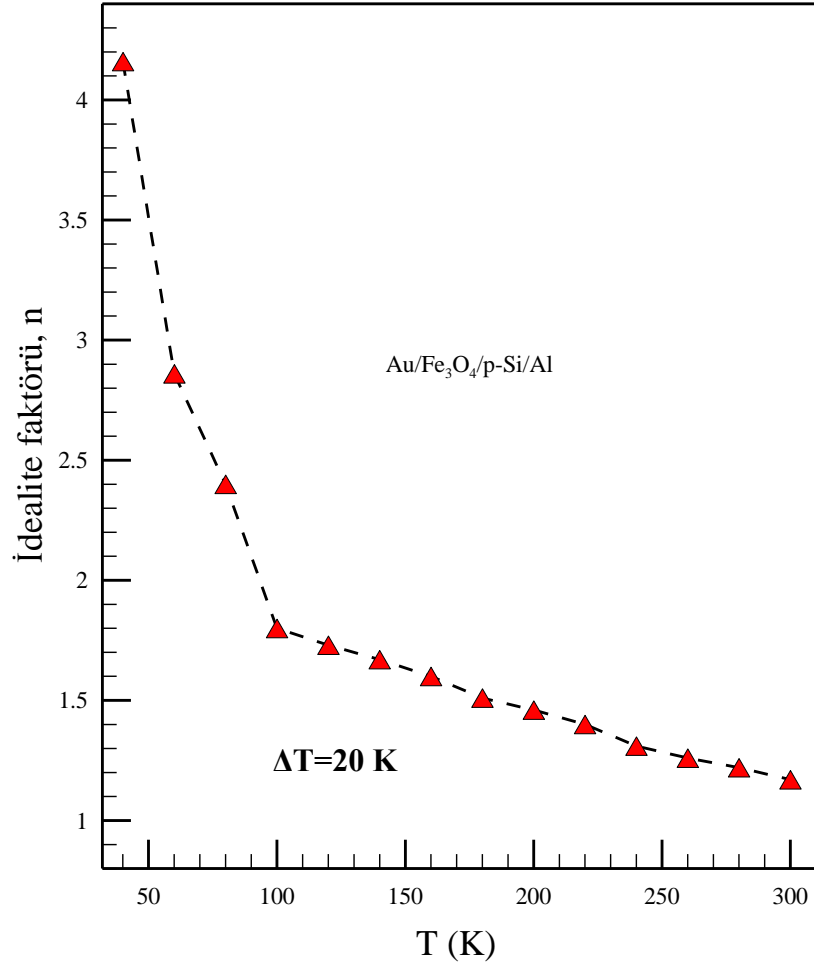
Sıcaklık (K)	<i>I-V</i>	
	<i>n</i>	Φ_b (eV)
40	2,92	0,13
60	2,61	0,16
80	2,01	0,22
100	1,91	0,28
120	1,75	0,35
140	1,71	0,39
160	1,62	0,43
180	1,50	0,49
200	1,45	0,56
220	1,39	0,65
240	1,34	0,70
260	1,29	0,75
280	1,23	0,79
300	1,18	0,83



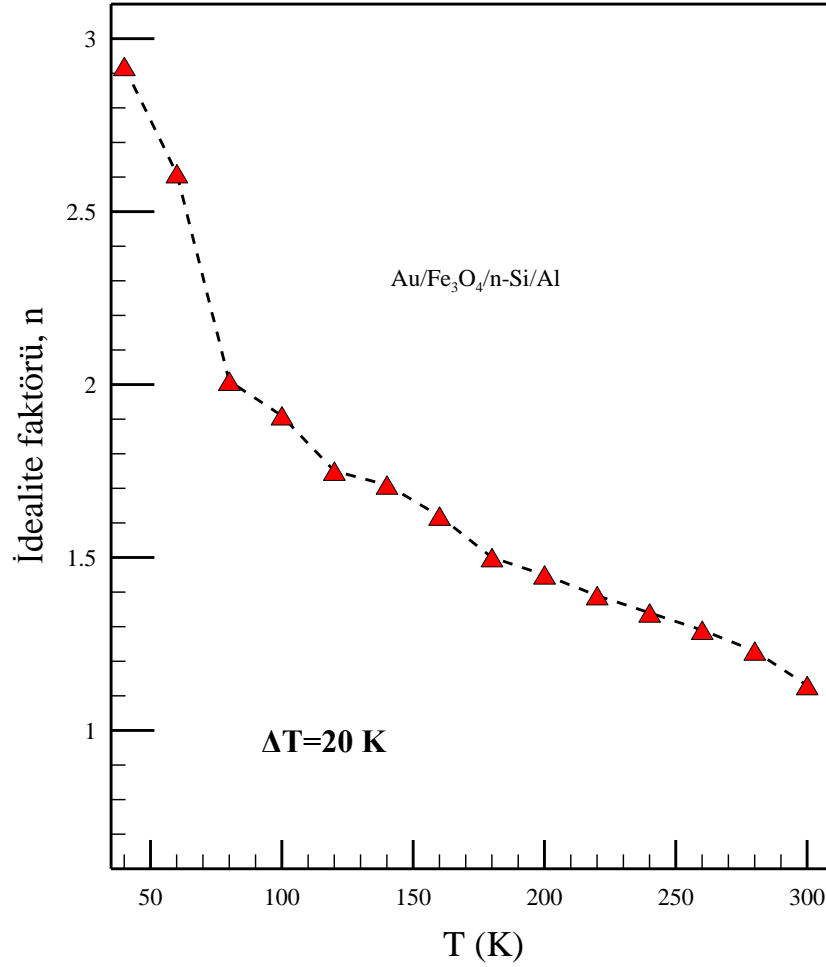
Şekil 4.5. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için geleneksel metotla hesaplanmış engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 4.6. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyonu için geleneksel metotla hesaplanmış engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği



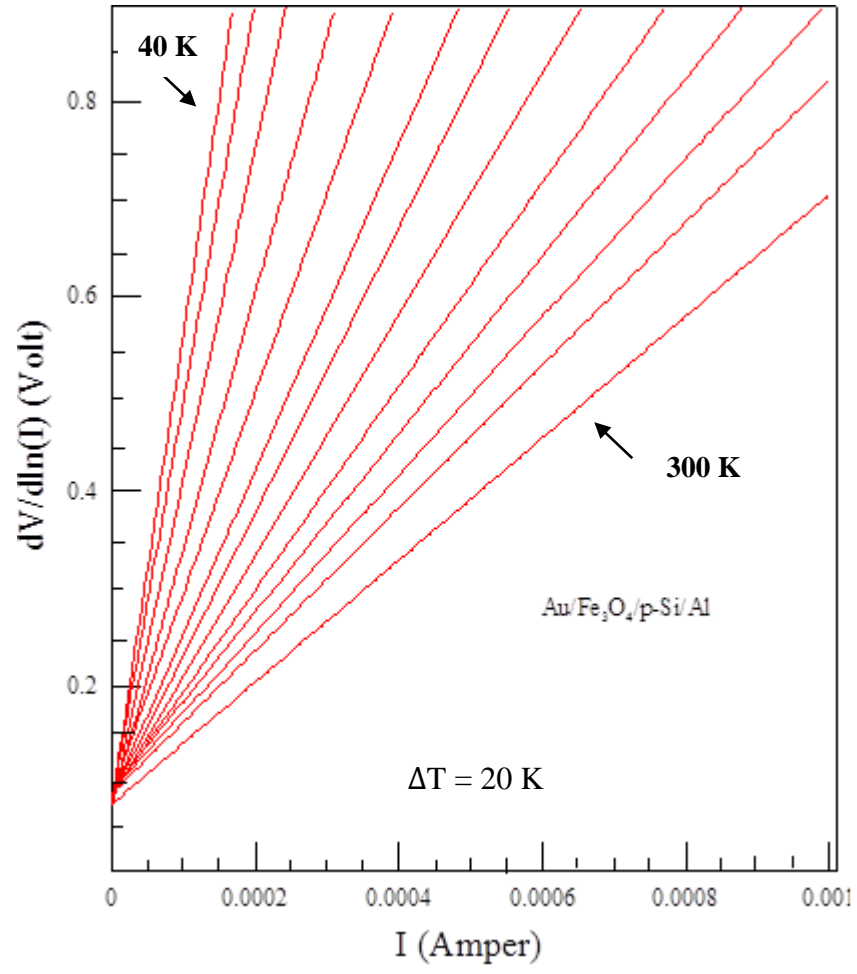
Şekil 4.7. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği



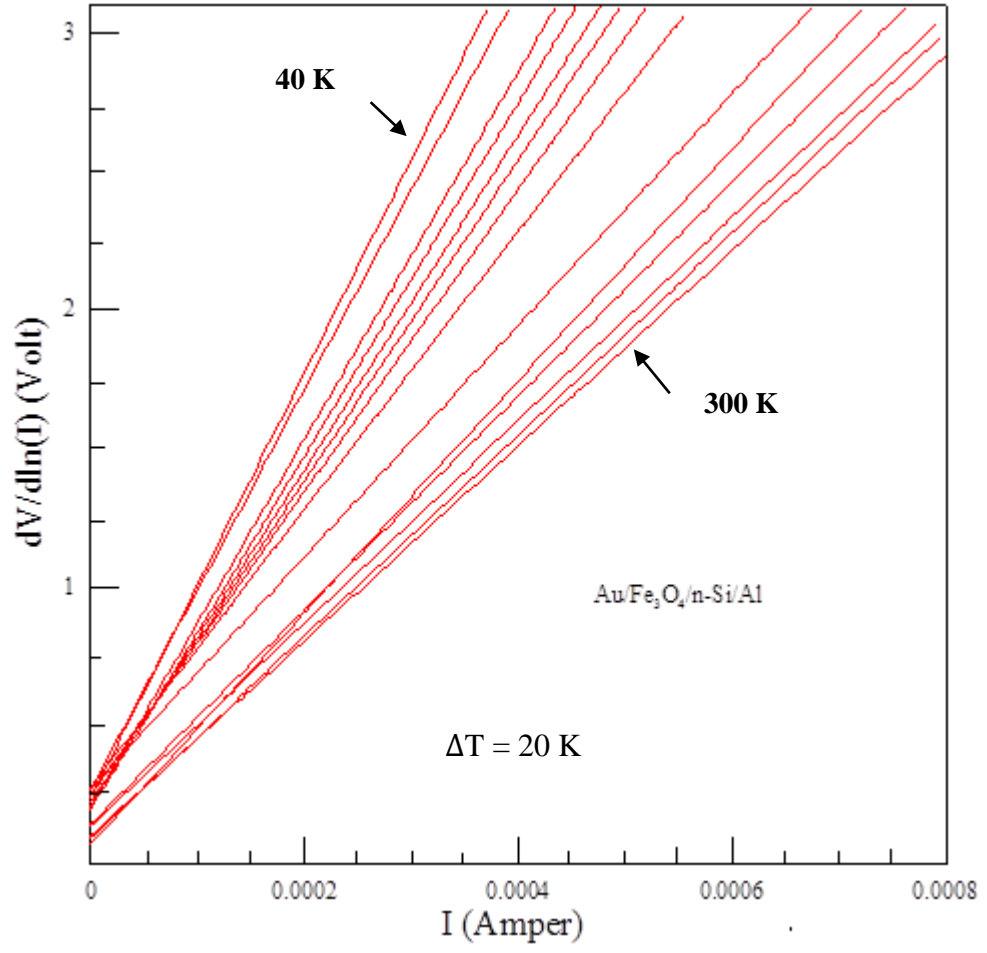
Şekil 4.8. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği

Genellikle düz beslem I - V karakteristikleri düşük düz beslem gerilimlerinde yarı-logaritmik ($\log I$ - V) ölçekte lineerdir. Fakat uygulanan gerilim yeterince büyük olduğunda arayüzey halleri, arayüzey yalıtkan tabakası ve seri direnç etkisinden dolayı önemli ölçüde lineerlikten sapar. Seri direnç düz beslem I - V karakteristiğinin aşağı yönlü kavisinde (lineer olmayan bölgede) önemlidir, fakat diğer iki parametre I - V karakteristiğinin lineer ve lineer olmayan her iki bölgesinde de önemlidir. Arayüzey hal yoğunluğunun ve seri direncin düşük olması, daha büyük bir aralıkta I - V eğrisinin düz bir çizgi vermesini sağlar. I - V grafiğinin lineer aralığı azaldıkça engel yüksekliği ve idealite faktörünün belirlenme doğruluğu daha zayıf olur (Karataş and Altındal 2005).

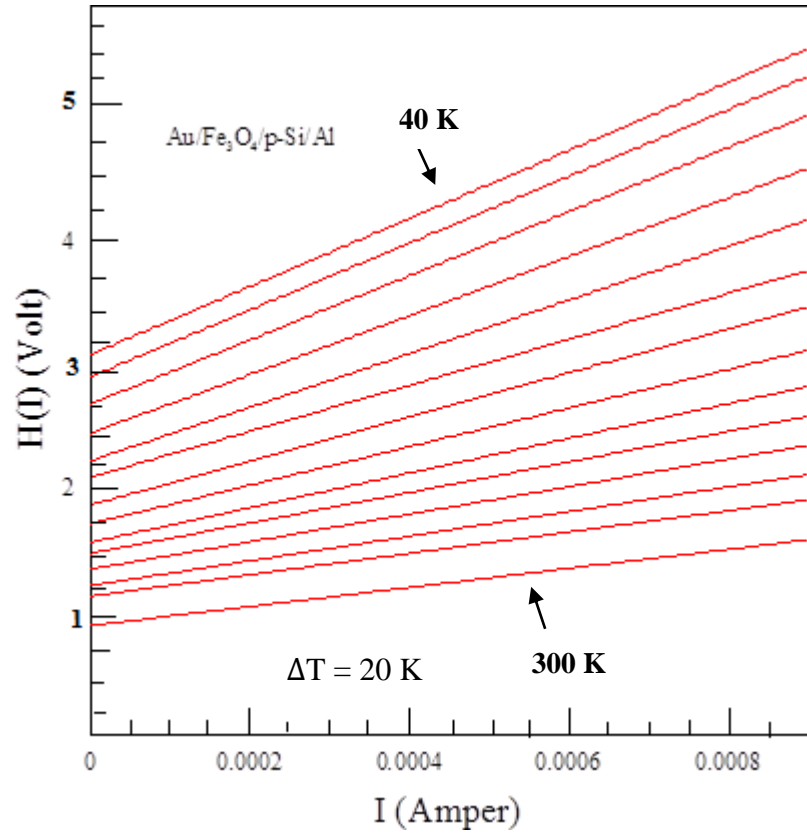
(2.27) ve (2.29) (Cheung fonksiyonları) eşitlikleri kullanılarak, Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının 300 K-40 K sıcaklık aralıklarında engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri hesaplandı. (2.10) denkleminde bulunan $dV/d(\ln I)$ ifadesinin I 'ya karşı grafiği çizildiğinde bir doğru elde edilir. Bu doğrunun eğiminden seri direnç değerleri; doğrunun $I=0$ 'da doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü elde edildi.(2.29) denkleminde elde edilen $H(I)-I$ grafiğinin eğiminden seri direnç; $I=0$ iken doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği elde edildi (Cheung and Cheung 1986). Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının sıcaklığa bağlı, Cheung fonksiyonlarından elde edilmiş $dV/d(\ln I)-I$ grafikleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da, $H(I)-I$ grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Oda sıcaklığında Cheung fonksiyonlarından hesaplanmış olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri referans Au/p-Si/Al ve Au/n-Si/Al diyotları için sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir. Ayrıca Cheung fonksiyonlarından sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmış olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için sırasıyla Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.



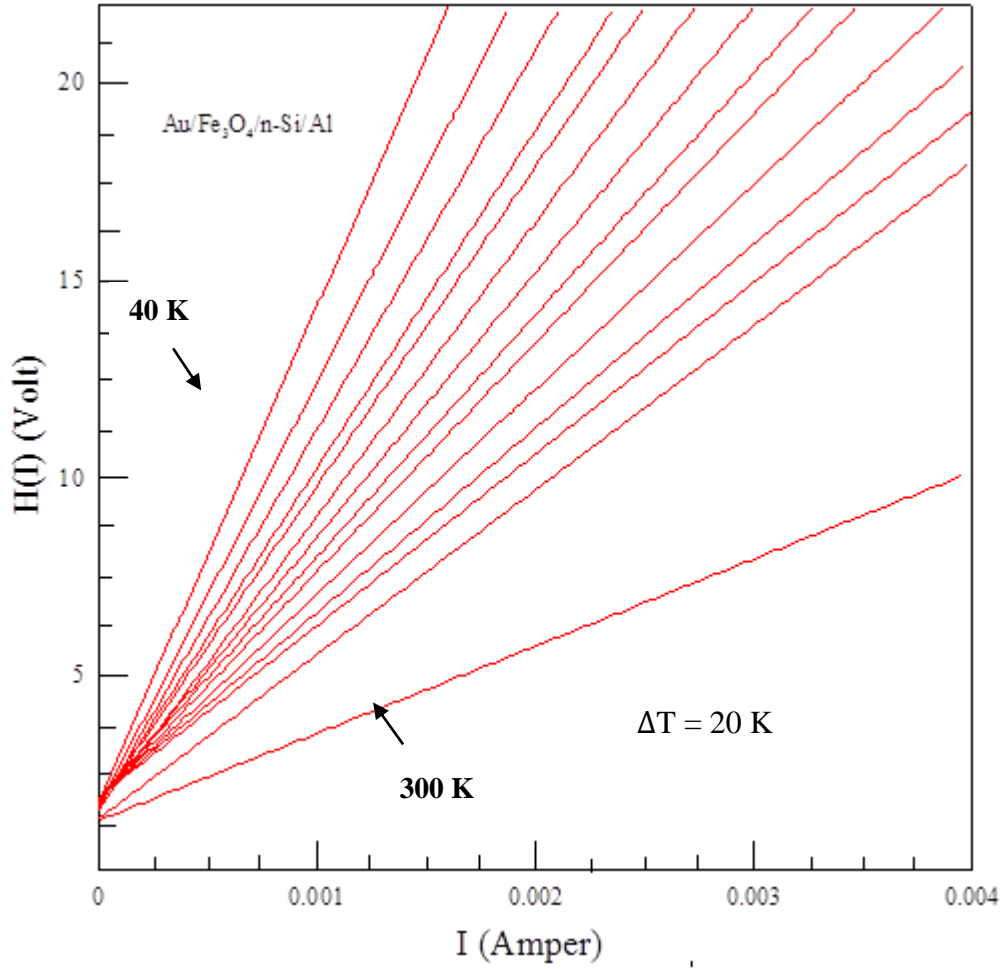
Şekil 4.9. $\text{Au/Fe}_3\text{O}_4/\text{p-Si/Al}$ diyoduna ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I) - I$ grafikleri



Şekil 4.10. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri



Şekil 4.11. $\text{Au/Fe}_3\text{O}_4/\text{p-Si/Al}$ diyoduna ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ - I grafikleri



Şekil 4.12. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ - I grafikleri

Çizelge 4.5. Referans Au/p-Si/Al diyoduna ait I - V grafiğinden geleneksel metot ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık	I - V		$dV/d(\ln I)$		$H(I)$ - I	
	n	$\Phi_b(eV)$	n	$R_s(\Omega)$	$\Phi_b(eV)$	$R_s(\Omega)$
Oda Sıcaklığı	1,58	0,61	2,87	1131	0,60	1901

Çizelge 4.6. Referans Au/n-Si/Al diyoduna ait I - V grafiğinden geleneksel metot ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık	I - V		$dV/d(\ln I)$		$H(I)$ - I	
	n	$\Phi_b(eV)$	n	$R_s(\Omega)$	$\Phi_b(eV)$	$R_s(\Omega)$
Oda Sıcaklığı	1,91	0,74	2,79	4096	0,69	3746

Çizelge 4.7. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiklerinden geleneksel metot ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	I - V		$dV/d(\ln I)$		$H(I)$ - I	
	n	$\Phi_b(eV)$	n	$R_s(\Omega)$	$\Phi_b(eV)$	$R_s(\Omega)$
40	4,16	0,13	9,86	4841	0,10	2748
60	2,86	0,14	9,41	4144	0,11	2696
80	2,40	0,24	8,84	3390	0,17	2590
100	1,80	0,29	8,13	2630	0,23	2377
120	1,73	0,32	7,41	2053	0,26	2165
140	1,67	0,36	7,01	1678	0,28	1858
160	1,60	0,40	6,21	1466	0,33	1779
180	1,51	0,44	5,56	1240	0,38	1557
200	1,46	0,47	5,17	1047	0,41	1400
220	1,40	0,50	4,92	915	0,44	1232
240	1,31	0,54	4,44	812	0,48	1111
260	1,26	0,58	3,97	736	0,55	904
280	1,22	0,61	3,70	734	0,59	861
300	1,17	0,65	2,74	639	0,62	769

Çizelge 4.8. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı *I-V* grafiklerinden geleneksel metot ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen temel diyot parametreleri

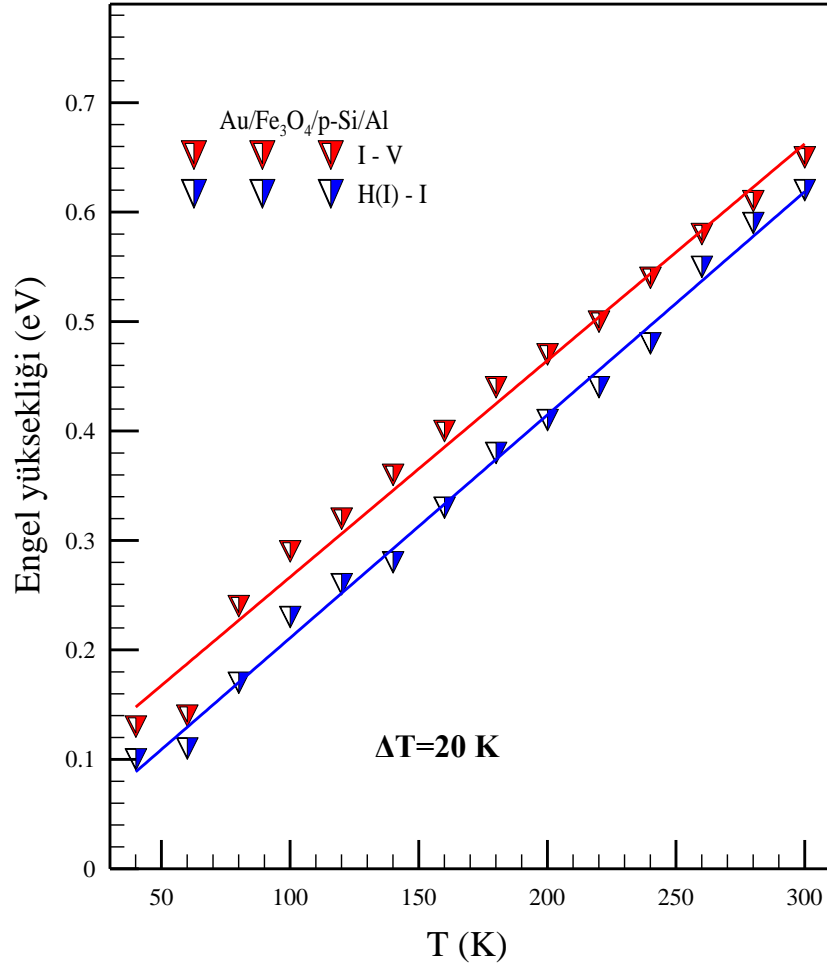
Sıcaklık (K)	<i>I-V</i>		<i>dV/d(lnI)</i>		<i>H(I)-I</i>	
	<i>n</i>	$\Phi_b(eV)$	<i>n</i>	$R_s(\Omega)$	$\Phi_b(eV)$	$R_s(\Omega)$
40	2,91	0,13	9,82	28828	0,12	24589
60	2,61	0,16	9,59	21295	0,14	20832
80	2,01	0,22	9,48	20752	0,20	19065
100	1,91	0,28	9,02	17425	0,27	16670
120	1,75	0,35	8,67	16499	0,34	15681
140	1,71	0,39	8,29	14339	0,37	13998
160	1,62	0,43	7,70	13876	0,41	13390
180	1,50	0,49	7,06	12843	0,47	12580
200	1,45	0,56	6,57	11142	0,54	10986
220	1,39	0,65	5,92	10974	0,58	9856
240	1,34	0,70	5,02	9838	0,63	9065
260	1,29	0,75	3,95	6701	0,69	5212
280	1,23	0,79	3,01	4160	0,75	4160
300	1,18	0,83	2,63	3913	0,80	3730

Çizelge 4.7’de görüldüğü üzere Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için 40 K–300 K sıcaklık aralığında *dV/d(lnI)-I* grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerleri 2,74 ile 9,86 arasında ve elde edilen seri direnç değerleri 639 Ω ile 4841 Ω arasında azalan sıcaklıkla uyumlu bir artış göstermektedir. Ayrıca bu diyot için *H(I)-I* grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri azalan sıcaklıkla 769 Ω ile 2768 Ω arasında uyumlu bir şekilde artarken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,10 eV ile 0,62 eV arasında azalan sıcaklıkla uyumlu bir azalma göstermektedir.

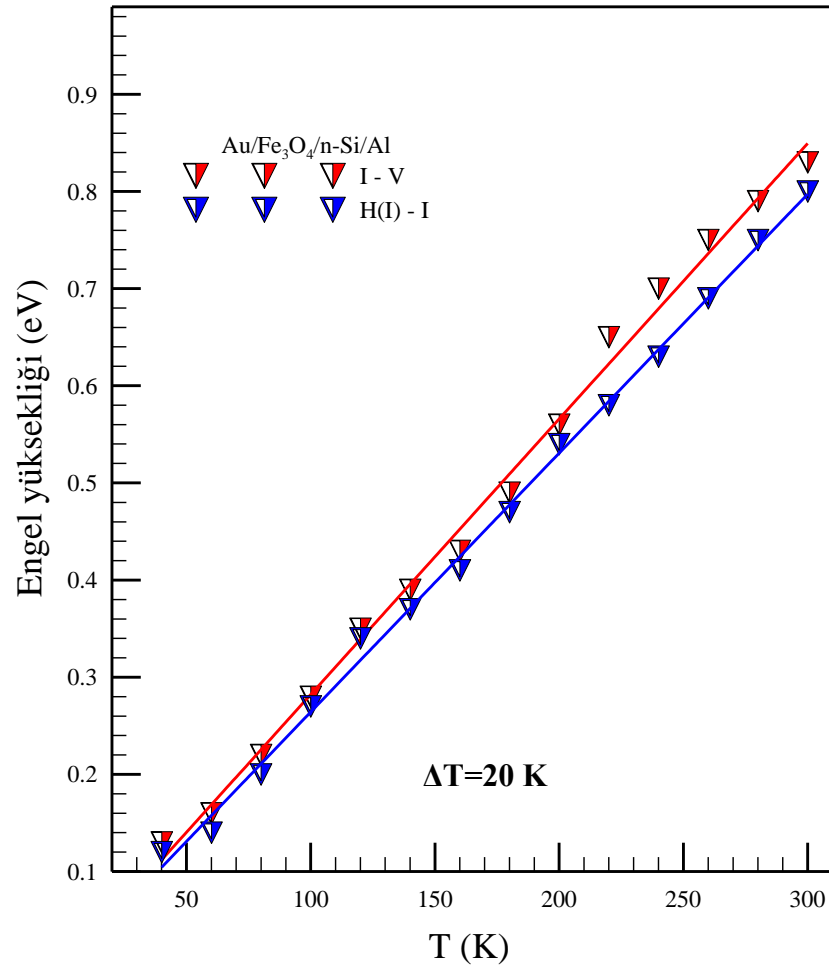
Çizelge 4.8’de görüldüğü üzere Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için 40 K–300 K sıcaklık aralığında $dV/d(\ln I)$ - I grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerleri 2,63 ile 9,82 arasında ve elde edilen seri direnç değerleri 3913 Ω ile 28828 Ω arasında azalan sıcaklıkla uyumlu bir artış göstermektedir. Ayrıca bu diyot için $H(I)$ - I grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri azalan sıcaklıkla 3730 Ω ile 24589 Ω arasında uyumlu bir şekilde artarken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,12 eV ile 0,80 eV arasında azalan sıcaklıkla uyumlu bir azalma göstermektedir.

Artan sıcaklıkla azalan idealite faktörü değeri ve artan engel yüksekliği değerleri geleneksel metotla sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan değerlerle benzer bir değişim göstermektedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’den görüldüğü üzere Cheung metodundan hesaplanan engel yüksekliği değerleri geleneksel metotla hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığında benzer davranış göstermektedir. Ancak Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’den görüldüğü gibi Cheung metodundan hesaplanan idealite faktörü değerleri geleneksel metotla hesaplanan değerlerden daha büyüktür. Bu durum seri direnç etkisine, arayüzey hallerine ve arayüzey tabakası üzerindeki gerilim düşüşüne atfedilebilir (Karataş and Türüt 2006; Hamdaoui *et al.* 2014; Reddy 2014)

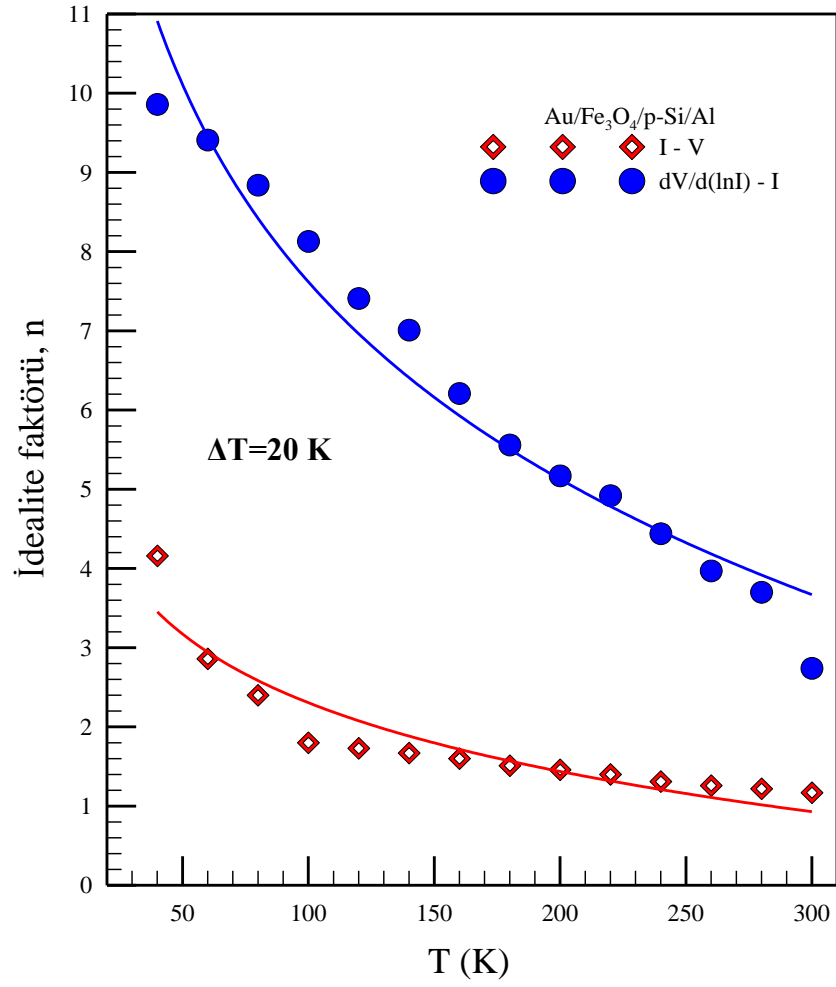
Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al için seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere gerek Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için gerekse Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için $dV/d(\ln I)$ - I eğrisinden ve $H(I)$ - I eğrisinden elde edilen seri direnç değerleri birbirleriyle uyumludur. Bu şekillerde yüksek sıcaklıklara gidildikçe seri direnç değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu durum, sıcaklık arttıkça diyottan daha fazla akım geçmesi ile açıklanabilir. Sıcaklığın düşmesiyle seri direnç değerlerinin artması; yüksek sıcaklıklarda iyonizasyon ile serbest taşıyıcı yoğunluğunun artmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir (Chand and Kumar 1996; Dökme and Altındal 2006; Soylu 2007; Peta *et al.* 2012; Kaçuş 2014; Dogan and Elagoz 2014; Hamdaoui *et al.* 2014; Çaldıran *et al.* 2014).



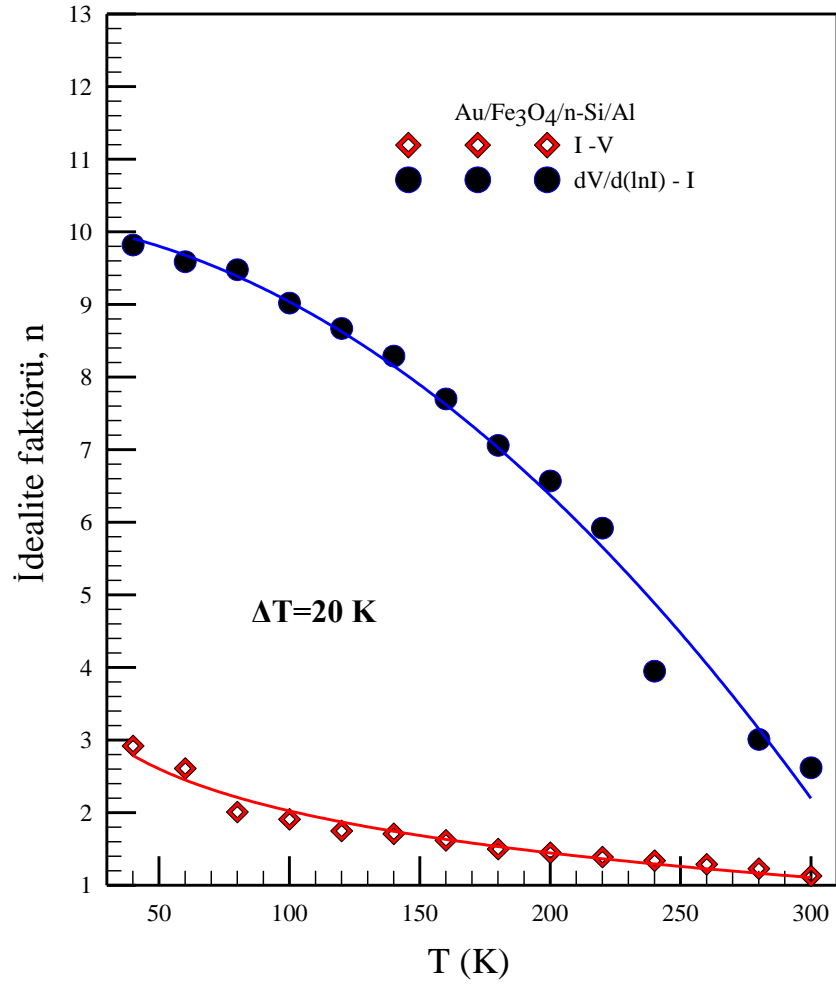
Şekil 4.13. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği



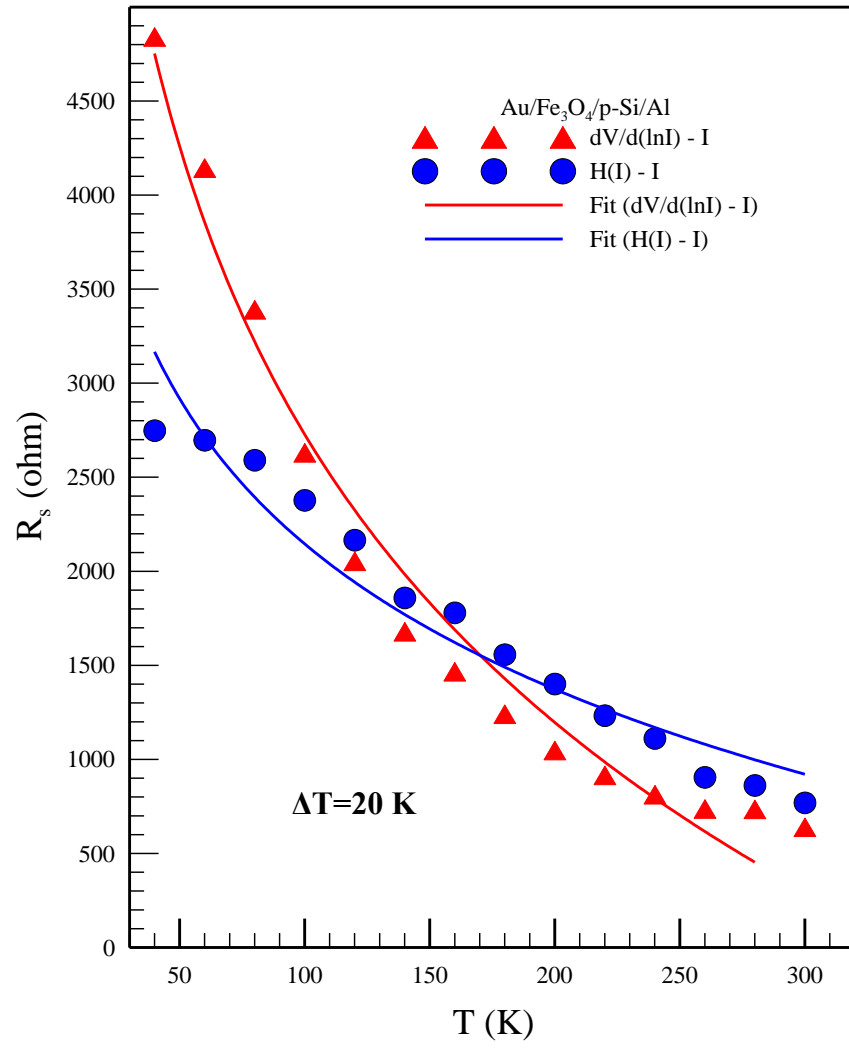
Şekil 4.14. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği



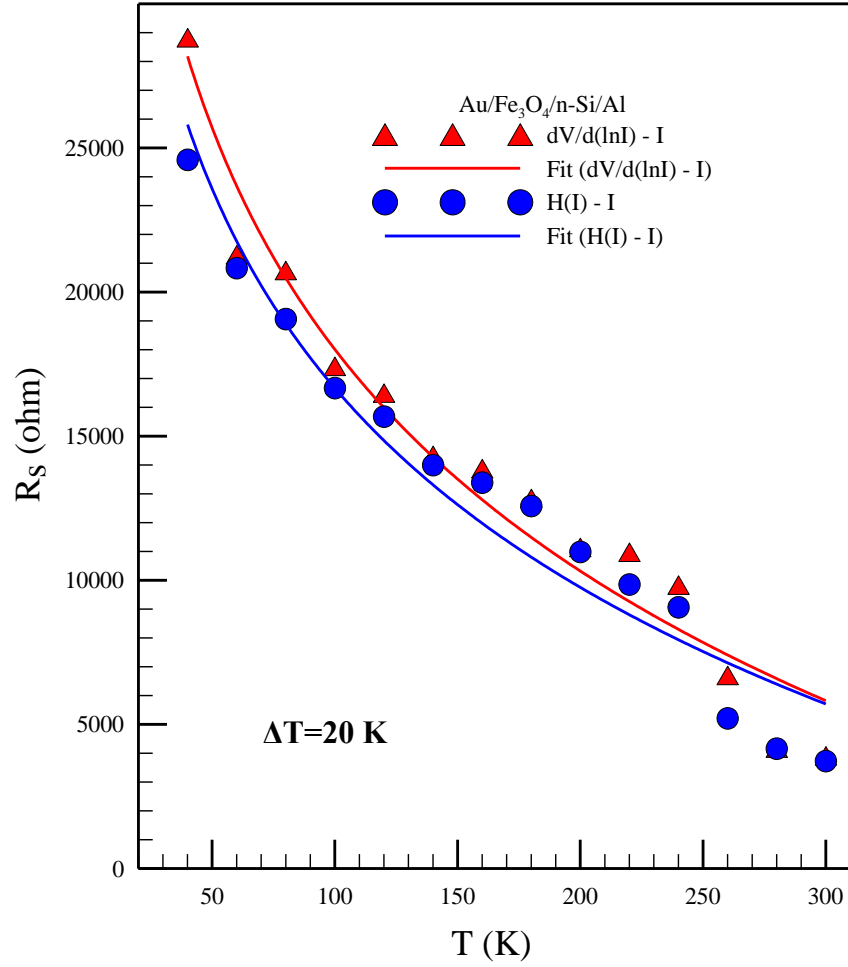
Şekil 4.15. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği



Şekil 4.16. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği



Şekil 4.17. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği



Şekil 4.18. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafiği

Deneysel çalışmalardan elde edilen engel yüksekliği dağılımının standart sapmasını ve $V=0'$ da ortalama engel yüksekliği değerlerini elde etmek için tekli Gauss denklemi olan (2.69) denklemi kullanılmaktadır. Bu denkleme göre Φ_b engel yüksekliğinin $1/T$ 'ye ya da $q/2kT$ 'ye karşı olan değişiminin eğimi dağılımın σ_i standart sapmasını ve y-ksenini kesen nokta ise $V=0'$ da $\bar{\Phi}_b$ ortalama engel yüksekliği değerini vermektedir. Fiziksel olarak bir dağılımın σ_i standart sapması, dağılımın büyüklüğünü belirlemekle birlikte kontakta mevcut olan Schottky engel homojensizliklerinin etkisini ve büyüklüğünü göstermekte ve $\bar{\Phi}_b$ dağılımının $V=0'$ da ortalama engel yüksekliği değerini temsil etmektedir. Mevcut bir dağılımda σ_i standart sapmasının ve $\bar{\Phi}_b$ ortalama engel yüksekliği değerinin küçük olması; dağılımda mevcut homojensizliklerinin yeterince

küçük olduğunu $\bar{\phi}_b$ ve σ_i 'nin büyük değerlere sahip olması ise kontak yapısında bu anormalliklerin büyük ve etkili olduğunu ifade etmektedir (Reddy *et al.* 2014; Metin *et al.* 2014).

İdealite faktörü değerlerinin voltaj katsayılarını hesaplamak ve Gauss dağılımlarını elde etmek için her dağılım bölgesinin voltaj katsayısı tekli Gauss denklemi olan (4.6) denklemi kullanılarak elde edilir. Bu denkleme göre $(1/n)-1$ 'in $1/T$ 'ye ya da $q / 2kT$ 'ye karşı olan değişiminin eğimi dağılımın ρ_3 voltaj katsayısını ve y-eksenini kesen nokta ise ρ_2 voltaj katsayısını verir. Bir dağılımda ρ_3 voltaj katsayısı idealite faktörü dağılımının standart sapmasını ve ρ_2 voltaj katsayısı idealite faktörünün tersi $V=0$ 'daki değerini vermektedir. Engel yüksekliğinin dağılımlarına benzer olarak ρ_3 ve ρ_2 voltaj katsayılarının küçük olması Schottky engel homojensizliklerinin yeterince küçük ve bu katsayıların büyük olması ise engel homojensizliklerinin büyük olacağını ifade etmektedir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'nin y eksenlerinden biri sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodlarının engel yüksekliği değerlerinin $1/2kT$ 'ye karşı olan değişim grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.19'da ve Şekil 4.20'de sırasıyla 160 K ve 120 K sıcaklık değerlerinde kesişen lineer tek bir çizgi yerine metal-yarıiletken arayüzeyinde iki farklı engel yüksekliğinin varlığını gösteren iki lineer çizgi olduğu görülmektedir. Bu yüzden şekiller incelendiğinde metal-yarıiletken arayüzeyinde engelin çift Gauss dağılımı gösterdiği anlaşılmaktadır (Cimilli *et al.* 2009; Ejderha *et al.* 2009; Barış *et al.* 2013; Bobby *et al.* 2013; Beştaş *et al.* 2014).

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine lineer fit uygulanarak ortalama engel yüksekliği değerleri 40 K ile 160 K arasında 0,44 eV iken 160 K ile 300 K arasında 0,95 eV olarak hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri ise 40 K ile 160 K arasında 0,128 eV iken 160 K ile 300 K arasında 0,048 eV olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodunun engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine lineer fit uygulanarak ortalama engel yüksekliği değerleri 40 K ile 120 K arasında 0,34 eV iken 120 K ile 300 K arasında 1,21 eV ve standart sapma değerleri 40 K ile 120 K arasında 0,135 eV iken 120 K ile 300 K arasında 0,054 eV olarak hesaplanmıştır.

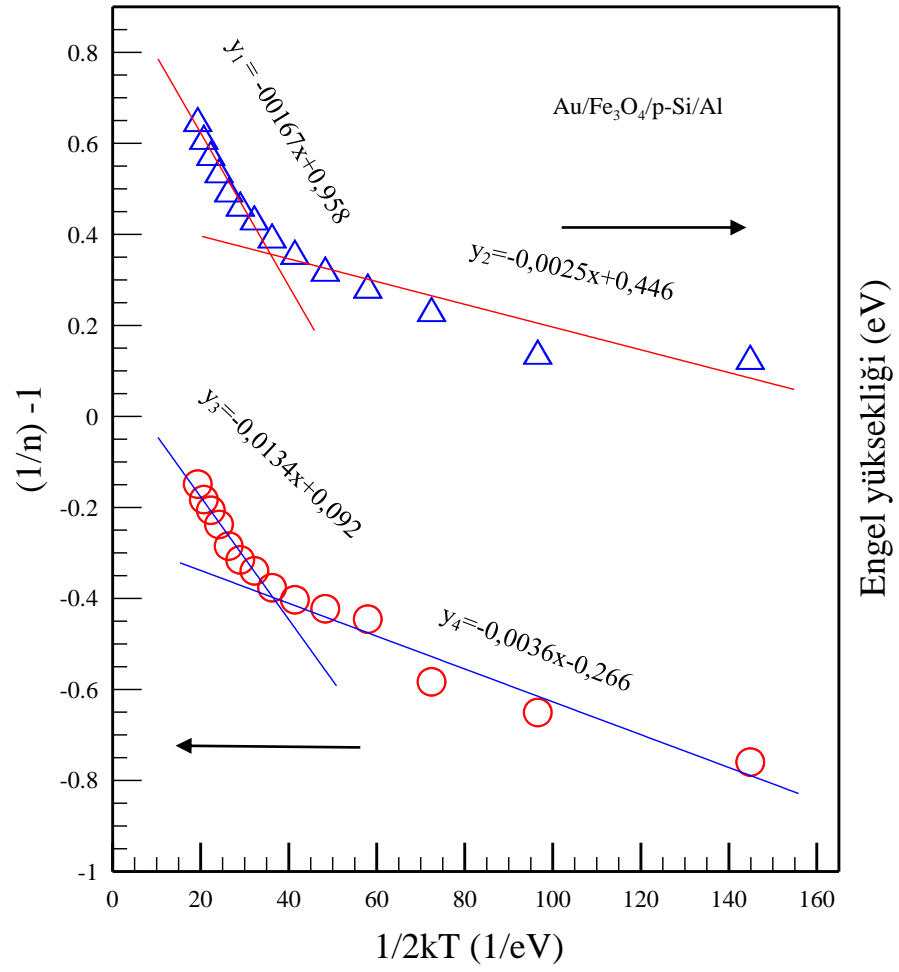
Standart sapma engelin homojenliği hakkında önemli bilgi vermektedir. Başka bir deyişle standart sapma engel homojenliğinin bir ölçüsüdür ve yüksek homojen engel yüksekliğinde standart sapma küçüktür. Hesaplanan standart sapma değerlerinin her ikisi hesaplanan ortalama engel yüksekliği değerleriyle karşılaştırıldığında küçük değildir. Bu durum Au/Fe₃O₄/Si yapısının arayüzeyinde büyük homojensizlik olduğunu ve potansiyel dalgalanmaların düşük-sıcaklık *I-V* karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Ayrıca Şekil 4.19'un ve Şekil 4.20'nin diğer y eksenleri sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodlarının idealite faktörü'nün tersinin $q/2kT$ 'ye karşı değişimini göstermektedir. İdealite faktörü değerleri yüksek sıcaklıklarda daha küçük değerlere sahiptir, düşük sıcaklıklarda ise idealite faktörü değerlerindeki artışın birbirine yakın olmasından dolayı idealite faktörünün tersinin daha yavaş azaldığı görülmektedir. Bu yüzden engel yüksekliği değerinin $q/2kT$ 'ye karşı olan değişiminde olduğu gibi bu grafiklerde de idealite faktörü değerlerinin ikili Gauss dağılımına uydukları görülmektedir.

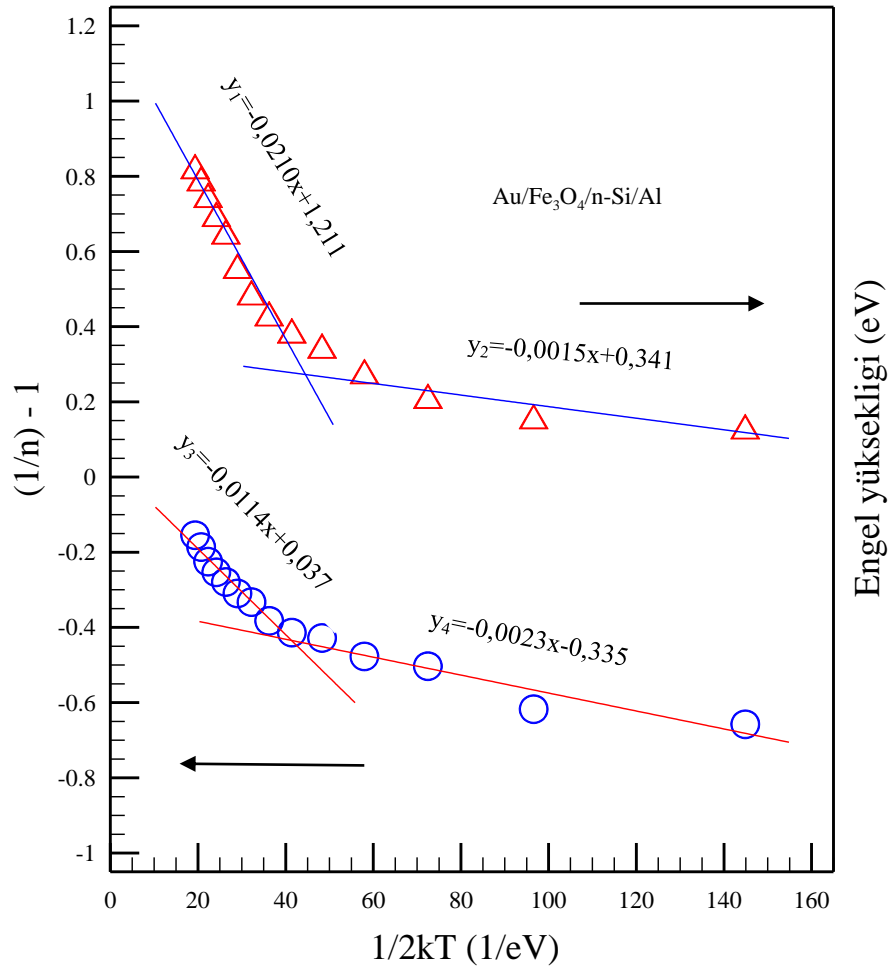
İdealite faktörü değerlerinin voltaj katsayılarını hesaplamak ve Gauss dağılımlarını elde etmek için her dağılım bölgesinin voltaj katsayısı tekli Gauss denklemi olan

$$\left(\frac{1}{n_{ap}} - 1 \right) = -\rho_2 + \frac{e\rho_3}{2kT} \quad (4.6)$$

Werner ve Güttler eşitliği (Werner and Güttler 1991) kullanılarak elde edilir. Şekil 4.19'da gösterilen $[(1/n)-1]$ 'in $1/2kT$ 'ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları 40 K ile 140 K arasında $\rho_2 = -0,266$ ve 140 K ile 300 K arasında $\rho_2 = 0,092$, 40 K ile 140 K arasında $\rho_3 = -0,00385$ V ve 140 K ile 300 K arasında $\rho_3 = -0,0191$ V olarak bulunmuştur. Aynı şekilde Şekil 4.20'de gösterilen $[(1/n)-1]$ 'in $1/2kT$ 'ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları 40 K ile 130 K arasında $\rho_2 = -0,335$ ve 130 K ile 300 K arasında $\rho_2 = 0,037$, 40 K ile 130 K arasında $\rho_3 = -0,00469$ ve 130 K ile 300 K arasında $\rho_3 = -0,0227$ V olarak bulunmuştur.



Şekil 4.19. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait $[(1/n)-1]$ ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye karşı değişim grafikleri



Şekil 4.20. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait $[(1/n)-1]$ ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye karşı değişim grafikleri

Metal-yarıiletken kontakların elektriksel davranışının homojen olmayan engel yüksekliğine sahip olması birçok araştırmacı tarafından teorik hesaplamalar ve deneysel sonuçlar doğrultusunda kabul edilmiştir. Metal-yarıiletken arayüzeyindeki Schottky engel homojensizliği özellikle düşük sıcaklıklarda Schottky engelli diyodun anormal davranışlarını açıklamada önemli bir parametredir. Yarıiletken yüzeyin etkin Richardson sabiti metal-yarıiletken kontaklardaki Schottky engel yüksekliğini hesaplamada önemli bir parametredir. Bu nedenle etkin Richardson sabitinin yüksek doğrulukta belirlenmesi oldukça önemlidir. Eğer Schottky diyodun $I-V$ karakteristiği Termiyonik emisyon teorisine uyuyorsa, 1 ile 1,1 arasında değişen idealite faktörüne sahip olmalıdır. Azalan sıcaklıkla Schottky engel yüksekliğinin anormal bir şekilde azalması, idealite faktörünün artması ve $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $(1/T)$ 'ye karşı değişiminden lineer

olmayan bir durum gözlenmesi gibi ideal davranıştan sapma gösteriyorsa, Schottky diyodun karakteristiklerinde homojen olmayan engel yüksekliğinin etkili olduğunu söyleyebiliriz. Böyle bir durumda sapmaların nedeni akım akışının küçük engeller boyunca olmasına yorulabilir. Çünkü elektronlar düşük engellerde ve küçük gerilimlerde sadece engel boyunca geçebilecek kadar enerjiye sahip olabilirler (Korucu and Türüt 2014)

Tekli dağılımları açıklayabilen ve literatürde çok iyi bilinen modifiye edilmiş Richardson denklemi;

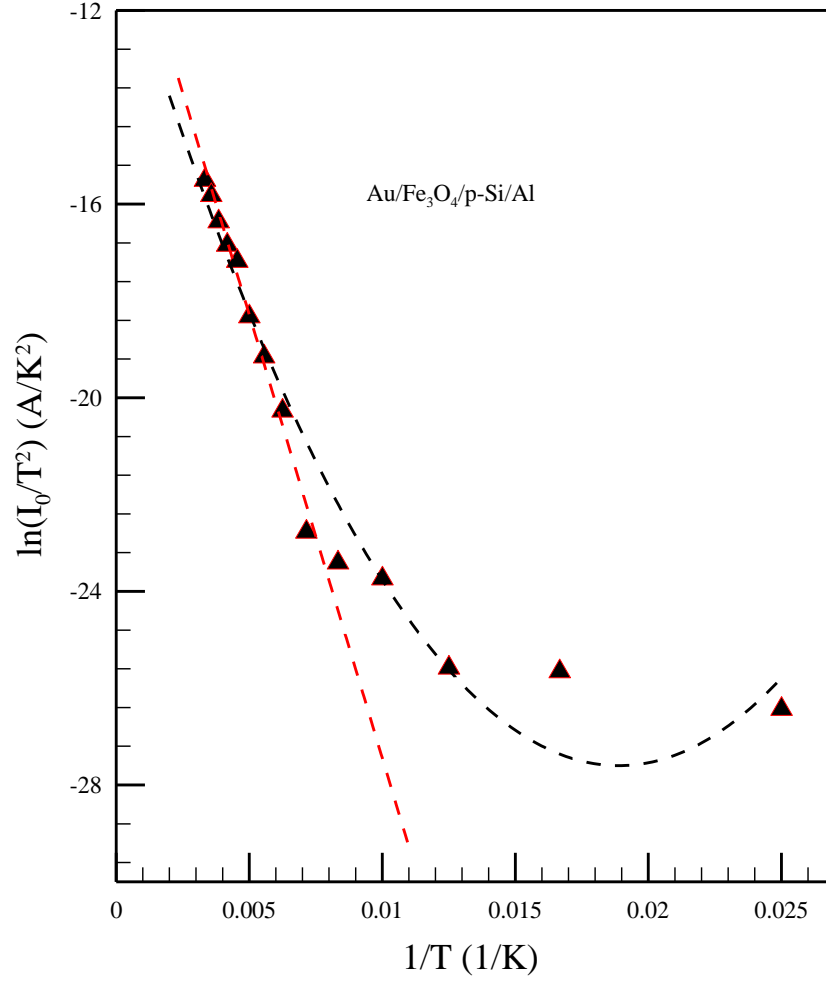
$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_{ap}}{kT}\right) \quad (4.7)$$

$$\varphi_{ap} = \bar{\varphi}_b - \frac{e\sigma_0^2}{2kT} \quad (4.8)$$

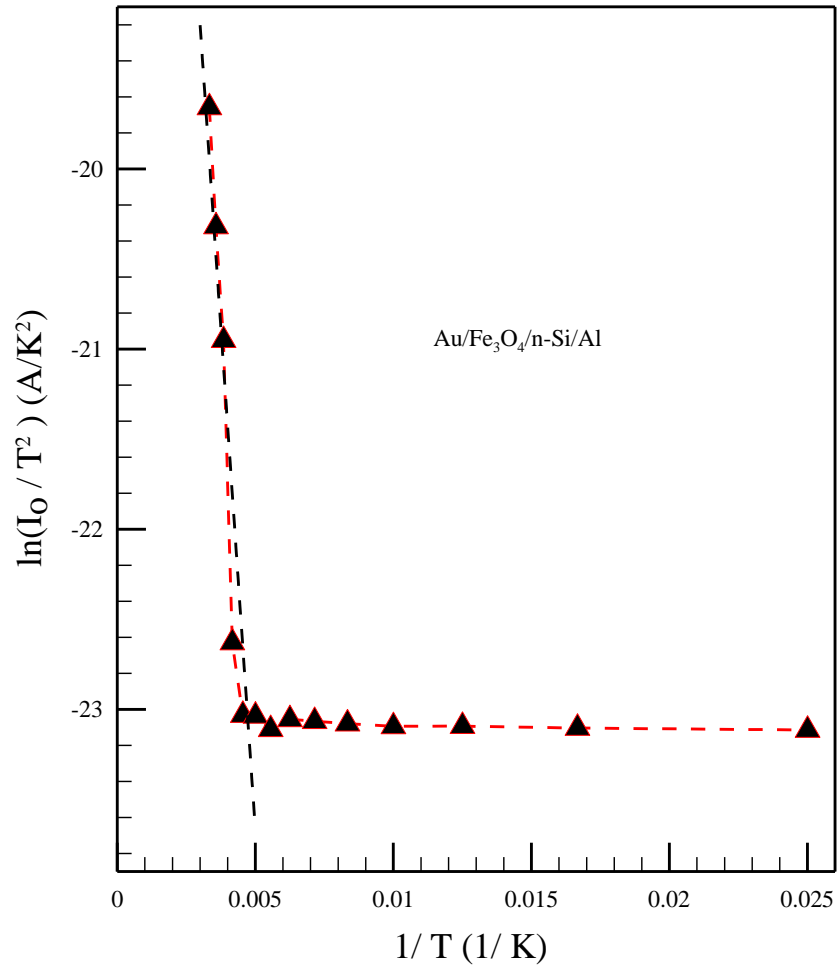
$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{e^2\sigma_0^2}{2kT^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\bar{\varphi}_b}{kT} \quad (4.9)$$

(4.7) ve (4.8) denklemlerinin birleştirilmesiyle elde edildi. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodlarına ait $\ln(I_0/T^2)$ ’nin $1/T$ ’ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafikleri yer almaktadır. Modifiye edilmiş Richardson grafiğinde çizilen lineer fitin y-eksenini kesen noktası modifiye edilmiş Richardson sabitini verir. Doğrunun eğiminden faydalanılarak (4.9) eşitliğinden elde edilen Richardson sabitinin değeri Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodları için sırasıyla $A^* = 3,97 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$ ve $A^* = 2,17 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$ olarak bulundu. Hesaplanan bu değerler teorik olarak hesaplanan n-Si için $112 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$ değerinden ve p-Si için $32 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$ değerlerinden çok küçüktür. Bu durumun sebebi kontakın homojen olmayan karakteristiği olabilir. Bu durum metal/yarıiletken arasında farklı kalınlıktaki oksit tabakalarının oluşumundan dolayı ara yüzeyde yüksek ve düşük engel alanlarının olduğu anlamına gelir. Ara yüzeyde bu potansiyel dalgalanmalar nedeniyle diyot akımı potansiyel dağılımı içinde tercihen daha düşük engel boyunca akacaktır (Aydoğan 2003;

Dökme *et al.* 2005; Mtangi *et al.* 2009; Akkaya *et al.* 2014; Sharma and Periasamy 2014; Durmuş and Yıldırım 2014; Mamor *et al.* 2014; Fiat *et al.* 2014; Ouennoughi *et al.* 2015).



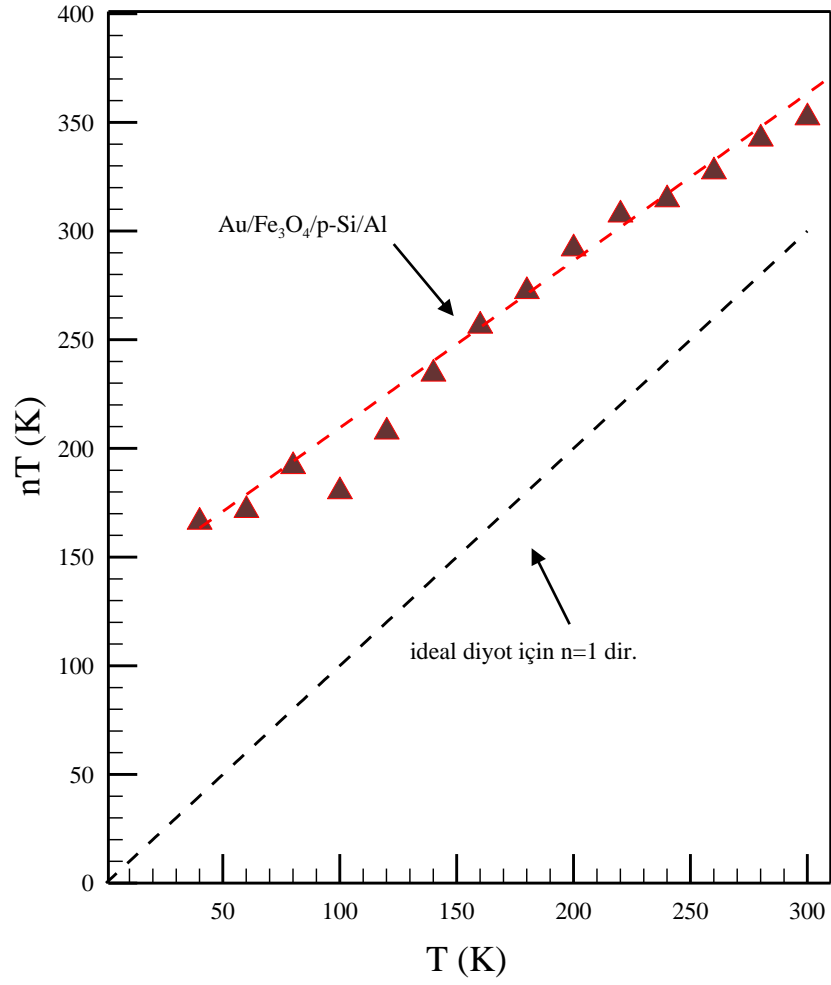
Şekil 4.21. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği



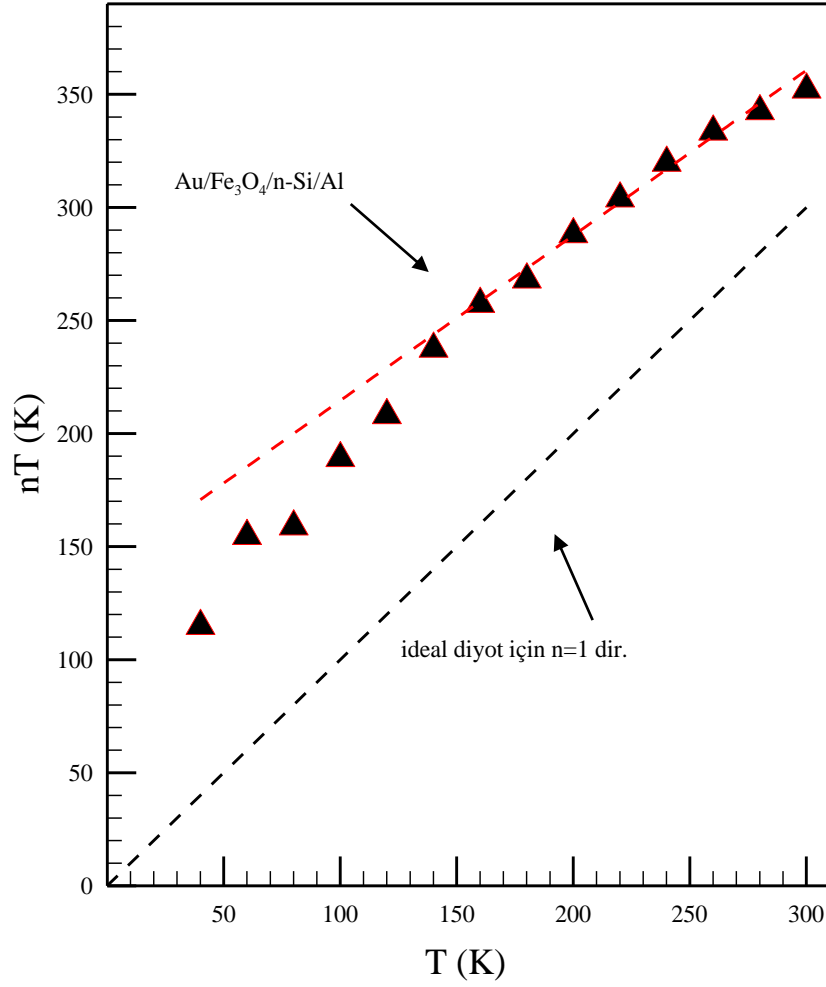
Şekil 4.22. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği

İdealite faktörünün yüksek değerlere sahip olması akım mekanizması için termiyonik emisyon teorisinden bir sapma olduğunu gösterir. Azalan sıcaklıkla idealite faktöründeki artış “**T₀ etkisi**” olarak bilinir. T₀ etkisi idealite faktörünün sıcaklıkla değişimini açıklanmada oldukça önemlidir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 $nT/q = (T + T_0)/q$ ve T/q ifadelerinin verilerini gösterir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de görüldüğü gibi artan sıcaklıkla idealite faktörünün değeri $n=1$ olan teorik değerine yaklaşır. Bu durum $n=1+(T_0/T)$ ilişkisiyle tanımlanabilir. İdealite faktörünün sıcaklığa bağlılığı Schottky engel yüksekliği içerisindeki homojensizliklere atfedilir. Ayrıca böyle bir durum engel boyunca taşıyıcıların tünellemesinden, imaj kuvvetinden dolayı engelin azalmasından ve metal-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey hal yoğunluğundan kaynaklanabilir (Hamdaoui *et al.* 2014)

İdealite faktörünün sıcaklığa bağlılığı $n=1+(T_0/T)$ ifadesinden bulundu ve burada T_0 sıcaklığa bağlı olan bir sabittir (Reddy and Reddy 2012; Deniz *et al.* 2013; Korucu *et al.* 2013; Metin *et al.* 2014; Özerli *et al.* 2014; Ouennoughi *et al.* 2015). Şekil 4.12.a ve Şekil 4.12.b'ye göre $nT/q = (T+T_0)/q$ ifadesinin verisi birleşme eğim çizgisine paralel düz bir çizgiyle fit edilebilir. Deneysel değerler üzerine fit edilen düz çizgi ideal Schottky kontak davranışını gösteren çizgiyle paralel değildir ve Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için 132,5 K iken Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için 141,5 K' de lineerlikten bir sapma vardır. Bu durum Schottky engeli boyunca yanal homojensizliğin varlığıyla açıklanabilir. Sıcaklık düştüğünde eklem akımı daha düşük Schottky engel bölgeleri boyunca akacaktır ve engel yüksekliğinin değeri küçük olacaktır. Dolayısıyla idealite faktörünün değeri yüksek olacaktır. Düşük Schottky engel yüksekliği yamalarının geniş bir dağılımıyla homojen olmayan bir Schottky engel diyodunun idealite faktörü sıcaklık azaldığında T_0 etkisinden daha hızlı bir oranda artar. Deneysel olarak gözlenen idealite faktörünün sıcaklığa bağlılığının tamamı engel yüksekliğinin homojensizliğiyle tutarlıdır.



Şekil 4.23. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için T_0 anomalisini gösteren T 'nin bir fonksiyonu olarak nT grafiği



Şekil 4.24. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için T₀ anomalisini gösteren T'nin bir fonksiyonu olarak nT grafiği

4.3. I-V (Akım-Voltaj) Ölçümleri ve Norde Fonksiyonlarının Kullanılması

Norde fonksiyonu seri direnç ve engel yüksekliği değerlerinin belirlenmesinde kullanılabilen diğer bir metottür. Norde 1979 yılında metal-yarıiletken kontaklardaki seri direnç ve engel yüksekliği değerlerini hesaplamak için n=1 durumunda seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan bir $F(V)$ fonksiyonu türetmiştir. Bu fonksiyon aşağıdaki eşitlikle verilmektedir (Norde 1979).

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \left(\frac{kT}{2} \right) \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.10)$$

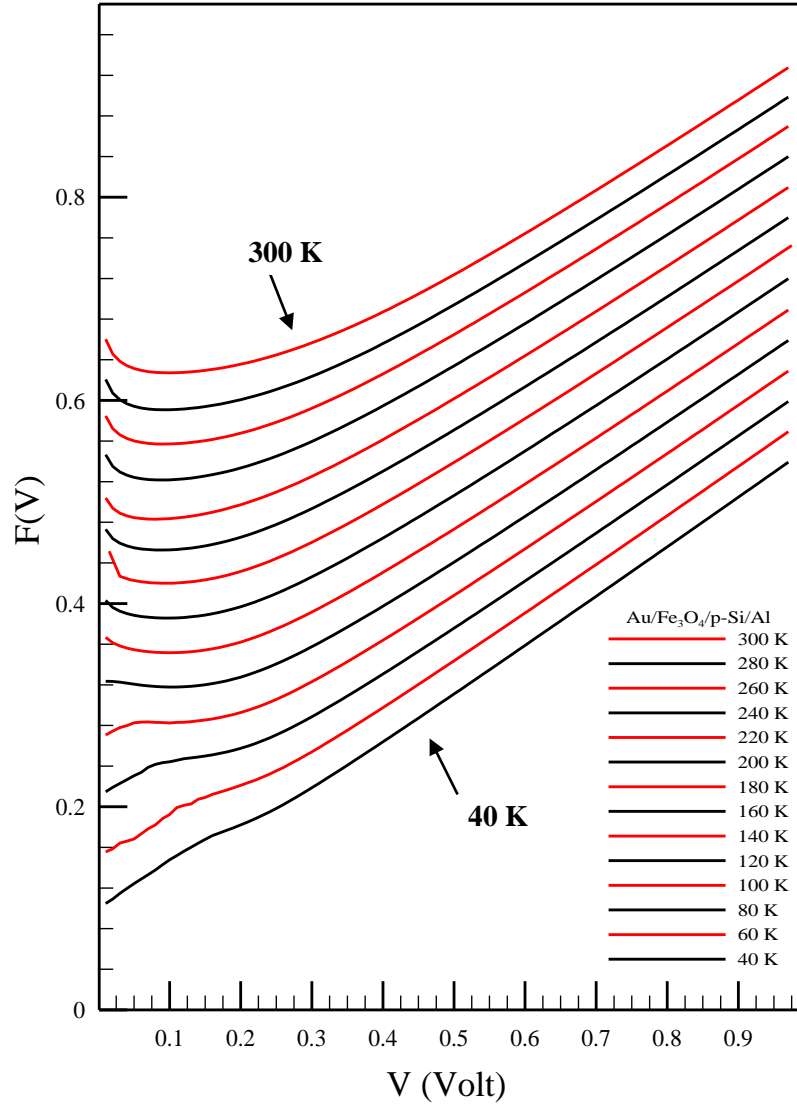
(4.10) eşitliğindeki $I(V)$ ifadesi diyodun $I-V$ grafiğinden elde edilen akım değeridir, γ ise idealite faktörü değerinden daha büyük rastgele bir tam sayıdır. İlk önce F 'nin V 'ye karşı grafiği çizilir. Bu grafikten $F(V)$ 'nin V 'ye karşı olan minimum değeri belirlenir. Buradan engel yüksekliği değeri (4.11) denklemiyle hesaplanır.

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.11)$$

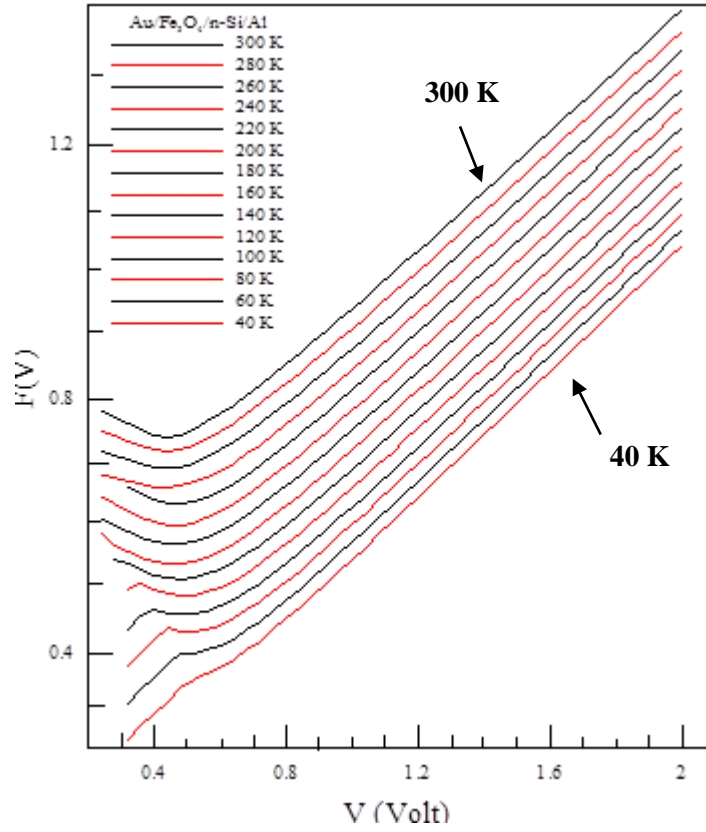
Bu eşitlikteki $F(V_0)$ değeri $F(V)$ 'nin minimum değeridir ve V_0 ise bu değere karşılık gelen minimum değerdir. Seri direnç değerleri ise (4.12) denklemiyle hesaplanır (Aydoğan *et al.* 2011; Young *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2013; Özmen and Yağlıoğlu 2014; Kaçuş *et al.* 2014).

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_0} \quad (4.12)$$

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodları için sıcaklığa bağlı olarak $F(V)$ 'nin V 'ye karşı değişim grafiklerini vermektedir. Bu grafiklerden de görüldüğü üzere sıcaklıkla değişim oldukça uyumludur. Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da bu diyodların 40 K ile 300 K arasında sıcaklığa bağlı olarak, Norde fonksiyonlarıyla hesaplanan engel yüksekliği ve seri direnç değerleri bulunmaktadır. Çizelge 4.9'da görüldüğü üzere Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için 40 K ile 300 K arasında engel yüksekliği değeri 0,75 eV ile 0,10 eV arasında değişirken, seri direnç değerleri ise 144 k Ω ile 8,010 k Ω arasında değişmektedir. Çizelge 4.10'da ise Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için 40 K ile 300 K arasında engel yüksekliği değeri 0,83 eV ile 0,10 eV arasında değişirken, seri direnç değerleri ise 257 k Ω ile ~10 k Ω arasında değişmektedir.



Şekil 4.25. $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyoduna ait sıcaklığa bağlı $F(V) - V$ grafikleri



Şekil 4.26. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $I(V) - V$ grafikleri

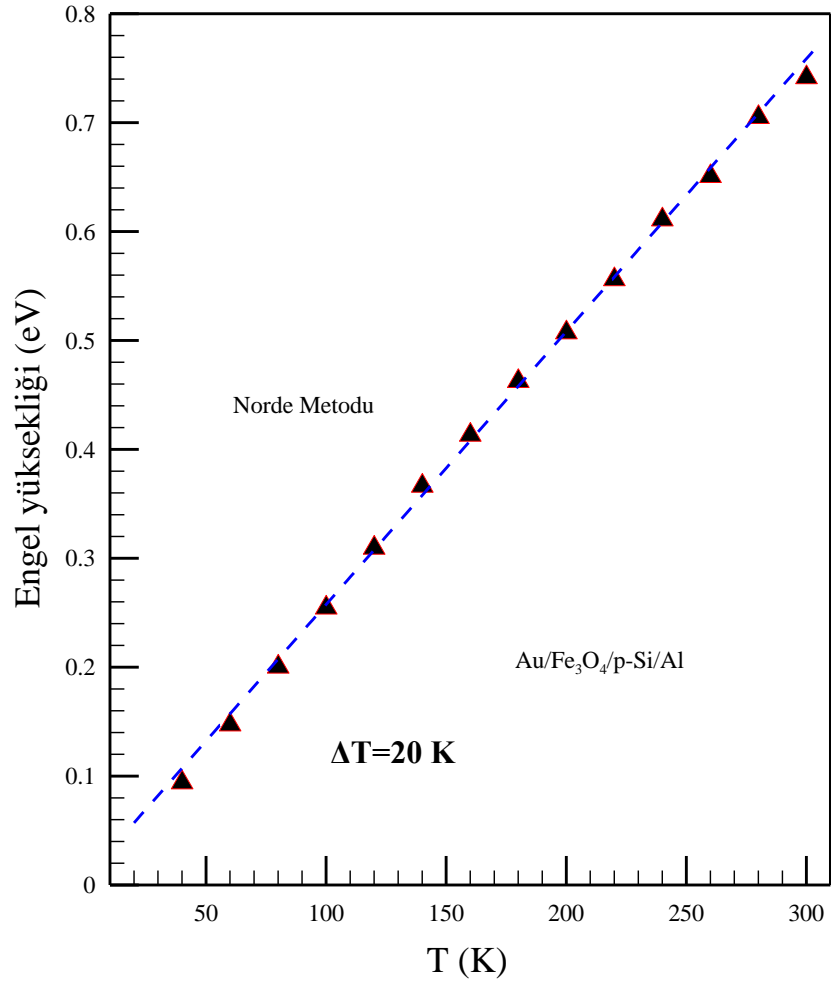
Çizelge 4.9. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyonu için Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	$\Phi_b(eV)$	$R_s(k\Omega)$
300	0,74	8,01
280	0,70	13,9
260	0,65	12,1
240	0,61	20,3
220	0,55	23,8
200	0,51	27,3
180	0,46	26,4
160	0,41	29
140	0,36	41,8
120	0,31	96,7
100	0,26	112
80	0,21	115
60	0,16	133
40	0,10	144

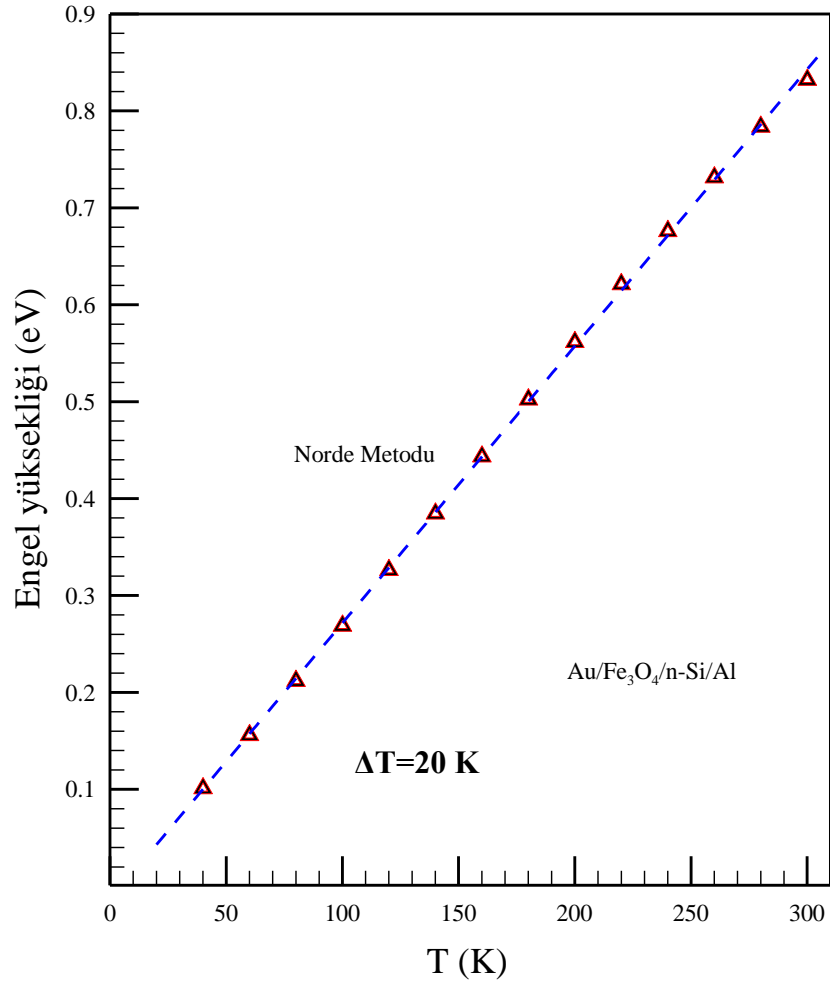
Çizelge 4.10. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	$\Phi_b(eV)$	$R_s(k\Omega)$
300	0,83	9,93
280	0,78	20,2
260	0,73	31,7
240	0,67	44,3
220	0,62	62,5
200	0,56	64,4
180	0,50	83,7
160	0,44	133
140	0,38	168
120	0,32	137
100	0,26	194
80	0,21	220
60	0,15	241
40	0,10	257

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodları için Norde fonksiyonlarından elde edilen engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri verilmiştir. Her iki grafikte de görüldüğü üzere artan sıcaklıkla engel yüksekliği değerleri uyum içinde artmaktadır. Çünkü düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların düşük engelleri aşması mümkün olabileceğinden metal-yarıiletken ara yüzeyinden akım geçişi sıcaklıkla aktive olan bir süreçtir. Bu yüzden akım geçişi düşük Schottky engel yüksekliğinin yamaları içinden akan akım yoluyla olacaktır. Sıcaklık arttıkça daha çok elektron daha yüksek engelleri aşmak için yeterli enerjiye sahip olacaktır. Sonuç olarak baskın engel yüksekliği sıcaklık ve uygulama voltajı ile artacaktır (Deniz *et al.* 2013; Karataş *et al.* 2013)



Şekil 4.27. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait Norde fonksiyonundan elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği

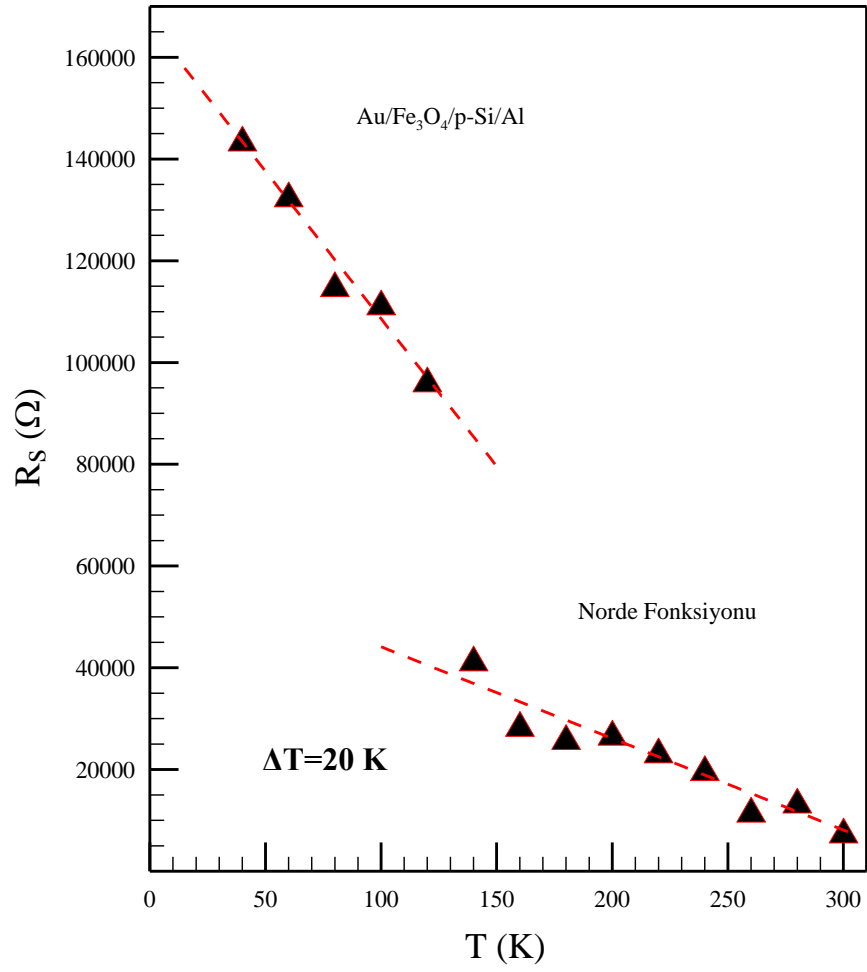


Şekil 4.28. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait Norde fonksiyonundan elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği

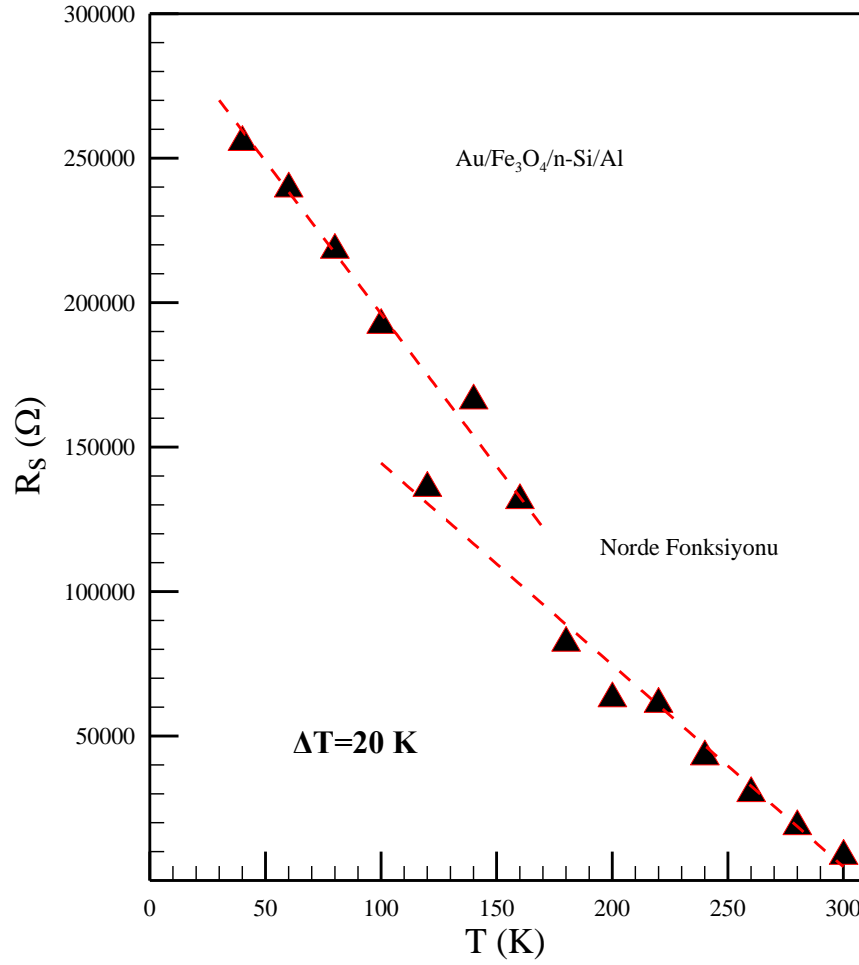
Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodları için Norde fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri verilmiştir. Her iki grafikte de görüldüğü üzere artan sıcaklıkla seri direnç değerleri uyum içinde azalmaktadır. Sıcaklık düşüşü ile seri direnç artışının, düşük sıcaklıklardaki serbest taşıyıcı konsantrasyonunun eksikliğinden kaynaklandığına inanılmaktadır (Deniz *et al.* 2013)

Seri direnç kontakların ve eklemlerin elektriksel karakteristikleri üzerinde önemli bir parametredir. Bu parametre eklemdaki arayüzey tabakasının varlığından etkilenir ve ideal olmayan düz beslem *I-V* karakteristiğine yol açar. Genel olarak düz beslem *I-*

karakteristiği düşük döz beslem voltajlarında yarı logaritmik bir ölçekte lineerdir. Fakat yüksek voltajlarda seri direnç etkisinden ve diğer etkilerden dolayı doğrusallıktan önemli bir ölçüde sapar. Cihaza bir V döz beslem uygulandığında, uygulanan gerilim arayüzey tabakası, deplasyon tabakası ve yapının seri direnç kombinasyonu tarafından paylaşılacaktır. Bu yüzden yüksek sıcaklık bölgelerinde yüksek akım değeri elde etmek için daha yüksek voltajlara gerek duyulur. Yeterince büyük voltajlarda döz beslem $I-V$ grafiklerinin aşığıya doğru konkav bükülmesine seri direnç etkisinin, bunun dışında yarıiletken ile denge içindeki arayüzey hallerinin neden olduğu iyi bilinmektedir. Bu tür yüksek seri direnç davranışı arayüzey tabakasına ve arayüzey hallerine atfedilebilir. Engel yüksekliği ve seri direncin her ikisi de numune sıcaklığı ile kuvvetlice değişmektedir. Aynı zamanda seri direnç değerinin artışının nedeni düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların azalmasına atfedilebilir (Sağlam *et al.* 2013; Deniz *et al.* 2014).

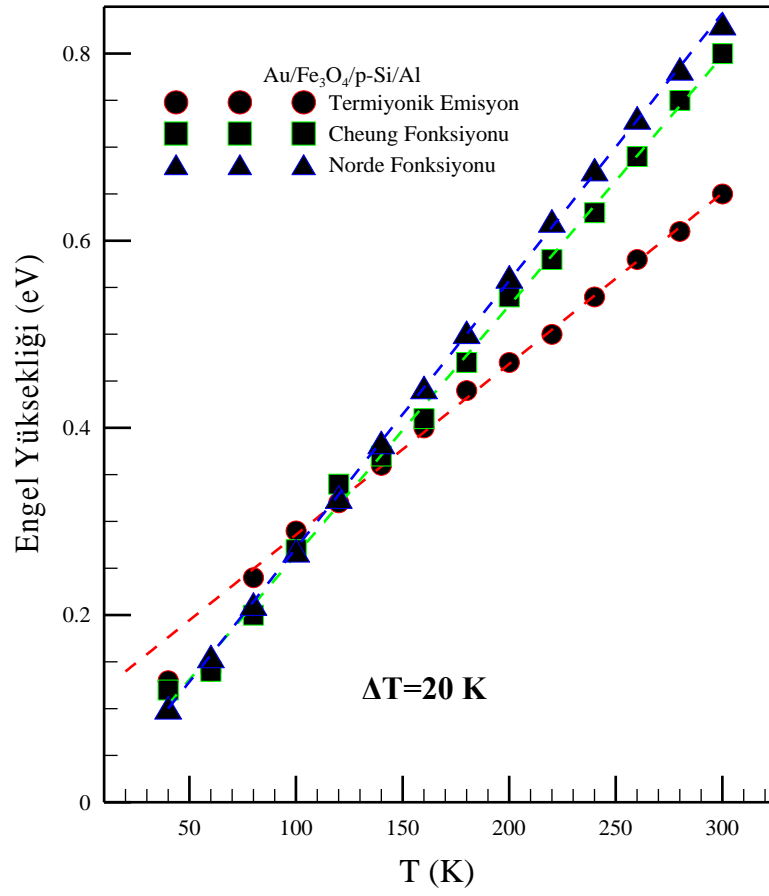


Şekil 4.29. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyoduna ait Norde fonksiyonundan elde edilmiş seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği

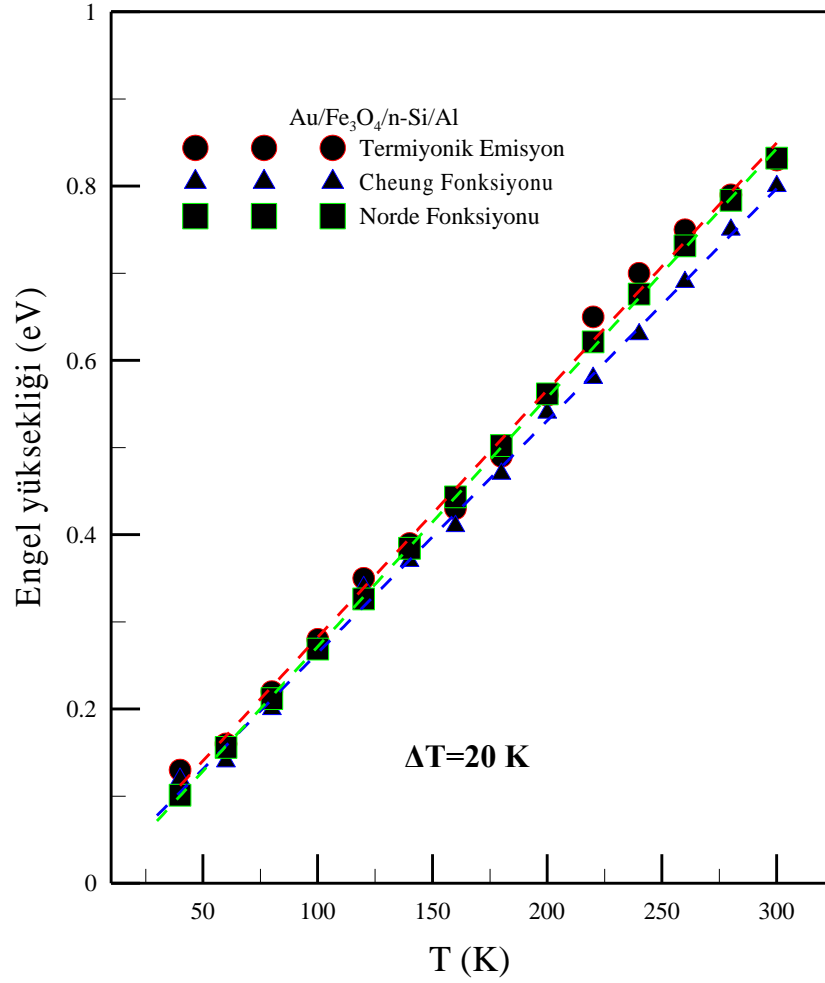


Şekil 4.30. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait Norde fonksiyonundan elde edilmiş seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği

Şekil 4.31. ve Şekil 4.32’de sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodları için Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Bu grafikten de görüldüğü üzere üç metottan da sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmış engel değerleri birbirine yakın ve sıcaklıkla uyumlu bir değişim göstermektedir.



Şekil 4.31. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri



Şekil 4.32. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodunun Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

4.4. Arayüzey Hâl Yoğunluğu (N_{ss})

Diyodun düz-beslem I - V karakteristiklerinden hesaplanan engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri yarıiletkende dengede olan arayüzey enerji halleri ile kontrol edilebilir. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun, arayüzey hal enerjisine karşı değişimleri görülmektedir.

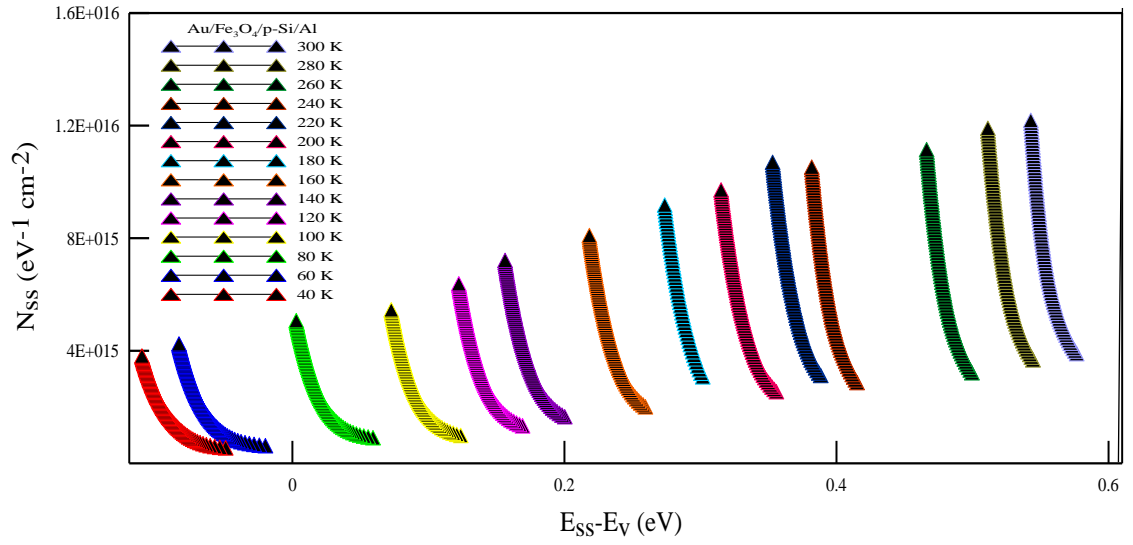
Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için N_{ss} değeri, artan enerji ve p-Si ’un valans bandının üst kısmına karşılık gelen bant ortasındaki arayüzey hal yoğunluğunun artışı ile azalır.

Arayüzey hal yoğunluğu, uygulanan voltaj ile ve silikonun bant aralığı içindeki bir pozisyona karşılık gelen her bir uygulama voltajı ile değişir. Bu değişimler rekombinasyon merkezindeki azalmaya ve *p*-Si yarıiletken ile Fe₃O₄ tabakanın arasındaki bir arayüzey tabakasının varlığına atfedilebilir (Yüksel *et al.* 2013).

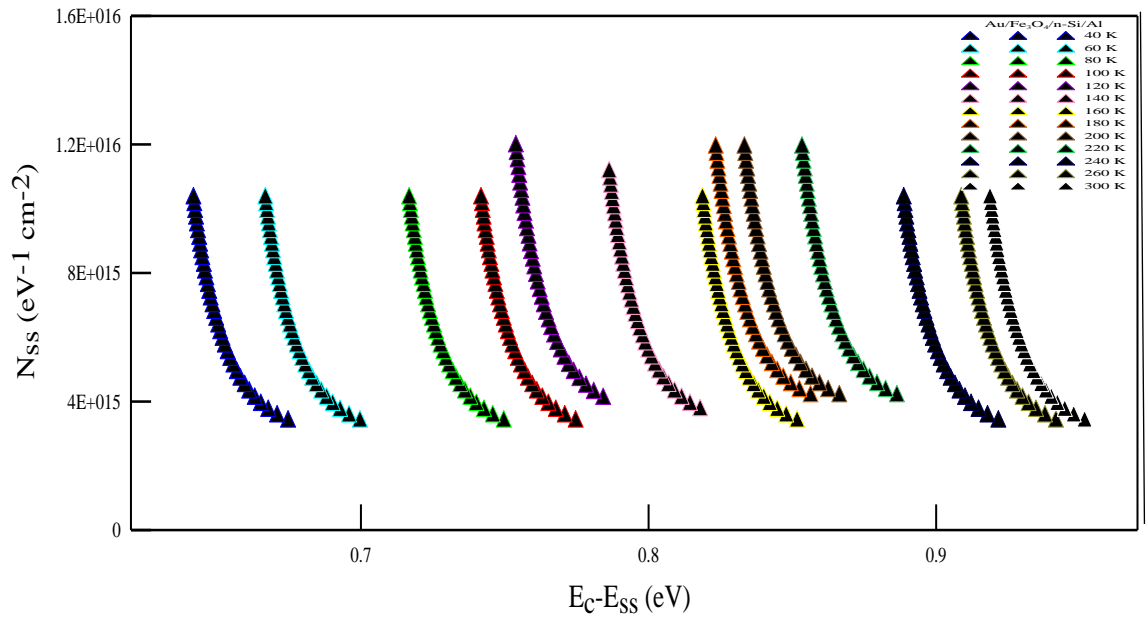
N_{ss} sıcaklık arttığında azalır. Bu durum sıcaklık etkisi altında metal-yarıiletken ara yüzeyinin yeniden düzenlenmesinin veya yeniden moleküler yapılanmasının bir sonucudur. Şekil 4.33'de Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al diyodu için valans bandının üst kısmına doğru arayüzey hal yoğunluğunun eksponansiyel artışı çok belirgindir. Dahası, arayüzey hal yoğunluğu dağılım eğrisi bir minimuma sahiptir. Farklı sıcaklıklardaki arayüzey tabakası nedeniyle N_{ss} eğrileri içinde valans bandına doğru kaymalar görülür (Altındal *et al.* 2003).

Azalan sıcaklık ile artan arayüzey hal yoğunluğunun artışı metal-yarıiletken arayüzeyindeki engel yüksekliğinin yanal homojensizliğiyle de açıklanabilir (Kumar *et al.* 2013)

Şekil 4.34'de görüldüğü üzere Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyodu için arayüzey hal yoğunluğunun iletkenlik bandının altına doğru eksponansiyel artışı oldukça belirgindir. Bu durum arayüzey hal yoğunluğunun uygulanan voltaj ile valans bandının üst kısmına doğru eksponansiyel bir artışa sahip olduğunu göstermektedir. Bu değişimler rekombinasyon merkezindeki azalmaya ve *n*-Si yarıiletken ile Fe₃O₄ tabakanın arasındaki bir arayüzey tabakasının varlığına atfedilebilir (Aydoğan *et al.* 2010).



Şekil 4.33. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri



Şekil 4.34. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri

4.5. C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri ve Yapılan Hesaplamalar

Diyotların I - V karakteristiklerinden elde edilen bazı temel diyot parametreleri, diyotların elektriksel özelliklerini incelemeye ve özellikle kullanılan ara yüzey malzemesinin diyodun elektriksel özelliklerinde yaptığı değişiklikleri anlamada tek başına yeterli olmayabilir. Bu yüzden $Au/Fe_3O_4/p$ -Si/Al ve $Au/Fe_3O_4/n$ -Si/Al diyotları için oda sıcaklığında 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerlerinde kapasite-voltaj ölçümleri -2 V ile +2 V aralığında HP 4192A LF Impedance Analyzer aleti yardımıyla yapıldı. C - V ölçümlerini almamızın başlıca sebebi, metal-yarıiletken kontağın bir kondansatör gibi davranmasıdır. Bu bölgenin kapasitesi metal-yarıiletken ara yüzeyinin oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Diyotların kapasitesinin ters beslem durumunda gerilime bağlı değişiminden, doğrultucu kontağın engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi diyot parametreleri hesaplanabilir. Bu hesaplamaları aşağıda elde edeceğimiz eşitlikler vasıtasıyla yapabiliriz. Bu tür yapılarda kapasitesi ifadesi

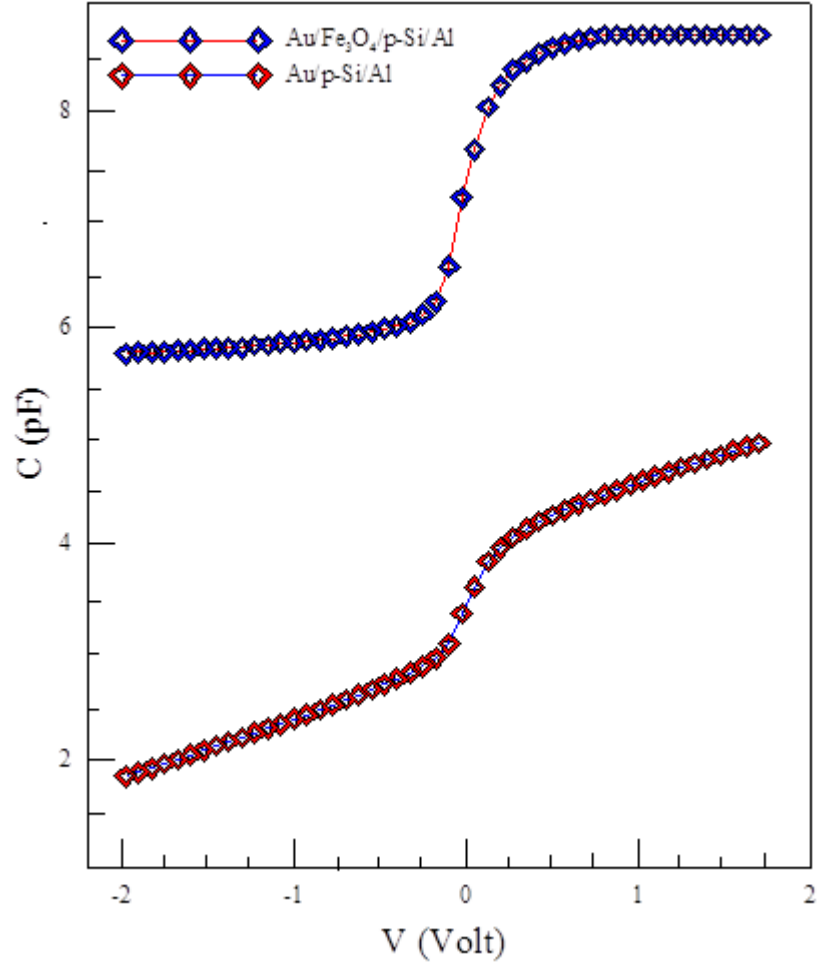
$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

ile verilir.

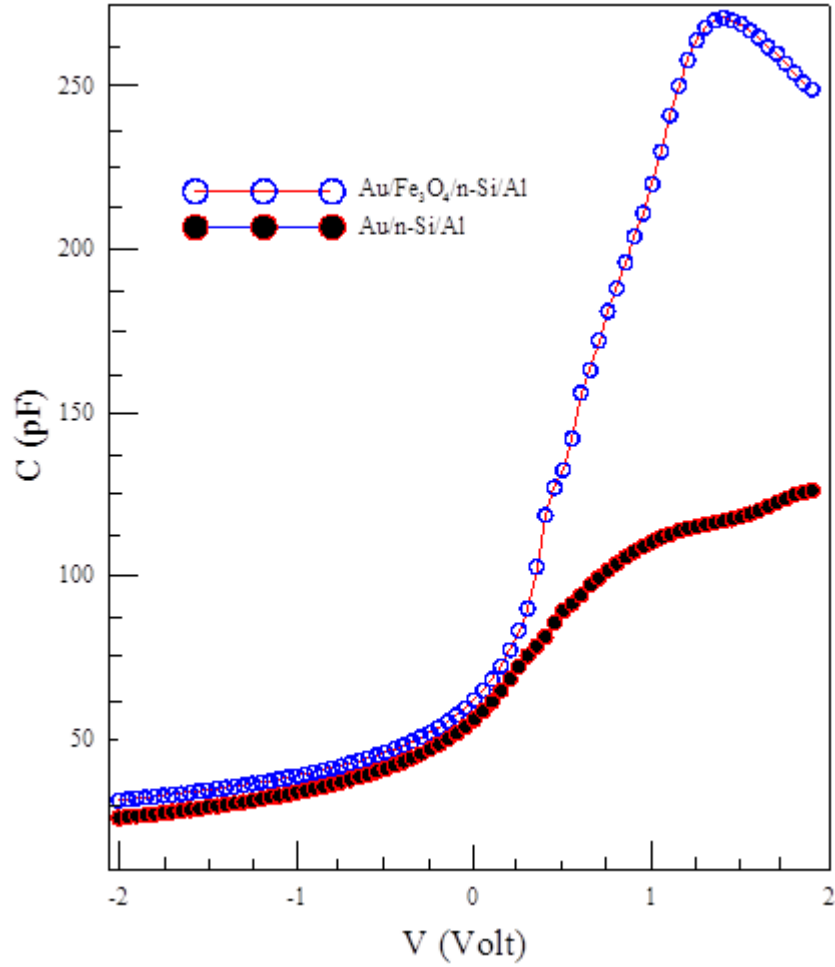
Burada, ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti (Si için $\epsilon_s=11,8$), $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm olup, boşluğun dielektrik sabiti, e , elektronun yükü, V_d , difüzyon potansiyeli, $k= 8,625 \times 10^{-5}$ eV/K (Boltzmann sabiti), N_d n -Si için iyonize olmuş donör konsantrasyonu, N_a p -Si için iyonize olmuş akseptör konsantrasyonu ve T , Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

Şekil 4.35’de referans Au/p -Si/Al diyodu ve $Au/Fe_3O_4/p$ -Si/Al diyodunun oda sıcaklığında 200 kHz frekanstaki C - V grafikleri verilmiştir. Aynı şekilde Şekil 4.36’da ise referans Au/p -Si/Al ve $Au/Fe_3O_4/p$ -Si/Al diyotlarının oda sıcaklığında 200 kHz frekanstaki C - V grafikleri verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde; aynı gerilim değerlerinde $Au/Fe_3O_4/p$ -Si/Al ve $Au/Fe_3O_4/n$ -Si/Al diyotlarının kapasitesinin referans

Au/*p*-Si/Al ve Au /*n*-Si/Al diyodlarının kapasitesinden daha büyük bir değere sahip oldukları görülmektedir. Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere kullanılan Fe₃O₄ malzemesi diyodun kapasitesini artırmaktadır.



Şekil 4.35. Aynı şartlar altında hazırlanmış Au/*p*-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al diyodlarının oda sıcaklığında $f=200$ kHz sabit frekansta düz ve ters beslem durumlarında *C-V* grafikleri



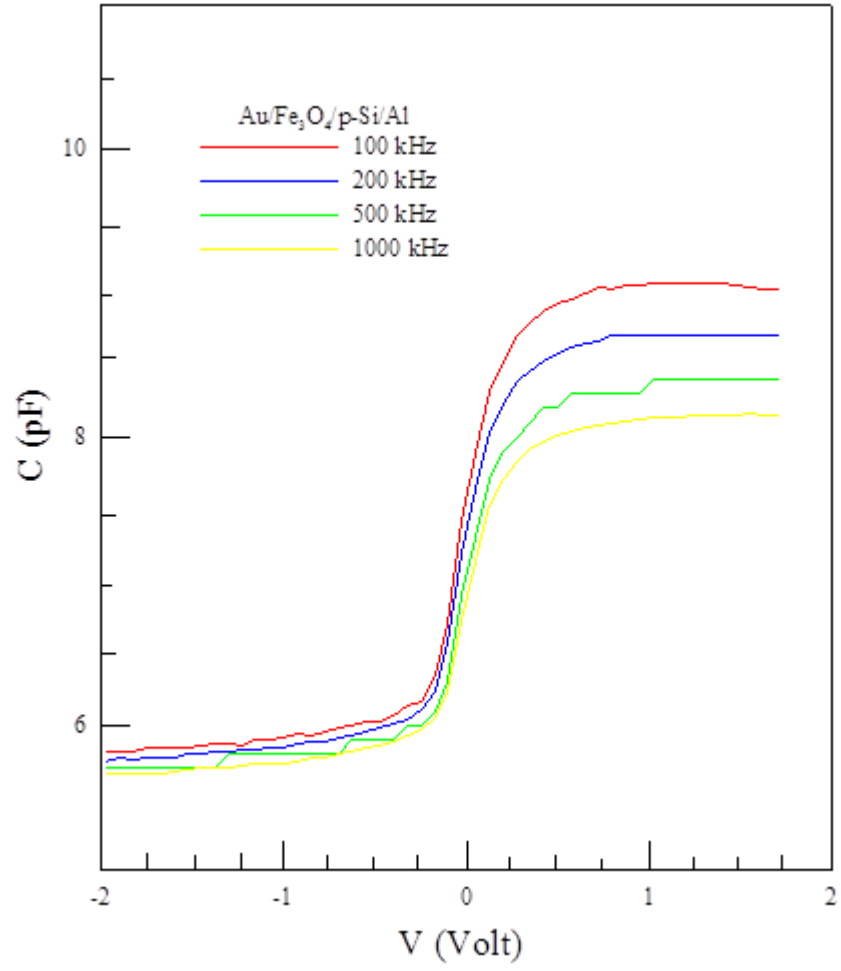
Şekil 4.36. Aynı şartlar altında hazırlanmış Au/n-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodlarının oda sıcaklığında $f=200$ kHz sabit frekansta düz ve ters beslem durumlarında C - V grafikleri

Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de sırasıyla oda sıcaklığında Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının farklı frekans değerlerindeki düz ve ters beslem durumunda C - V grafikleri verilmiştir. Şekil 4.39 ve Şekil 4.40’da ise oda sıcaklığında Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının farklı frekans değerlerinde ters beslem C - V grafiklerinden elde edilen $1/C^2$ - V grafikleri verilmiştir.

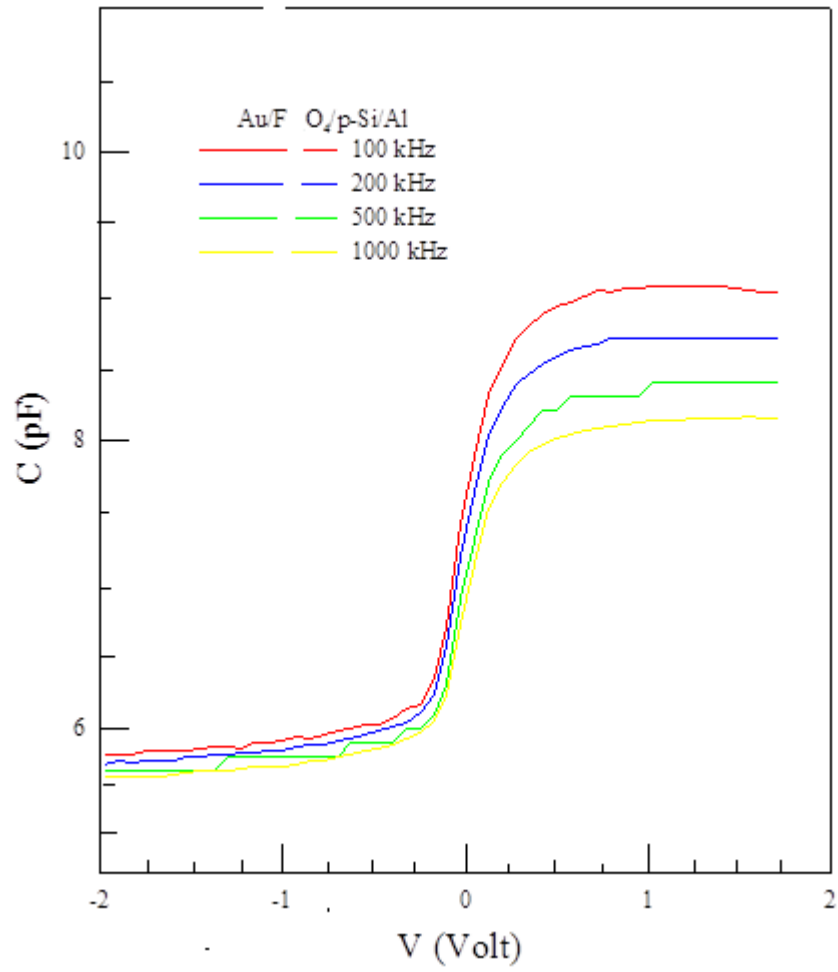
Ters beslem durumunda düşük negatif voltajlara doğru kapasite değerinin arttığı ve düz beslem durumunda yüksek voltajlara doğru kapasitenin keskin bir şekilde arttığı grafiklerden görülebilir. Diyot ters beslem altındayken deplasyon bölgesi genişleyeceği ve azalan gerilim ile N_d azalacağı için kapasitenin artması beklenir. (4.14) denkleminde

görüldüğü gibi donör konsantrasyonu ile kapasite ters orantılıdır. Grafiklerden görüldüğü üzere frekans değeri düştükçe kapasite artmaktadır. Düşük frekanslarda yüksek kapasitenin sebebi, alternatif akım sinyalinin takip edebilen p -Si ve n -Si ile dengedeki arayüzey hallerinden kaynaklanan aşırı kapasitedir. Yani arayüzey halleri düşük frekanslarda alternatif akım frekanslarını takip ederken yüksek frekanslarda alternatif akım frekanslarını takip edemeyebilirler. Yüksek frekanslarda kapasitenin değeri sadece uzay yükü kapasitesidir (Turut *et al.* 1995; Shah *et al.* 2010; Osiris *et al.* 2011; Çaldıran *et al.* 2013; Sağlam *et al.* 2013; Kumar *et al.* 2013; Gülnahar 2014).

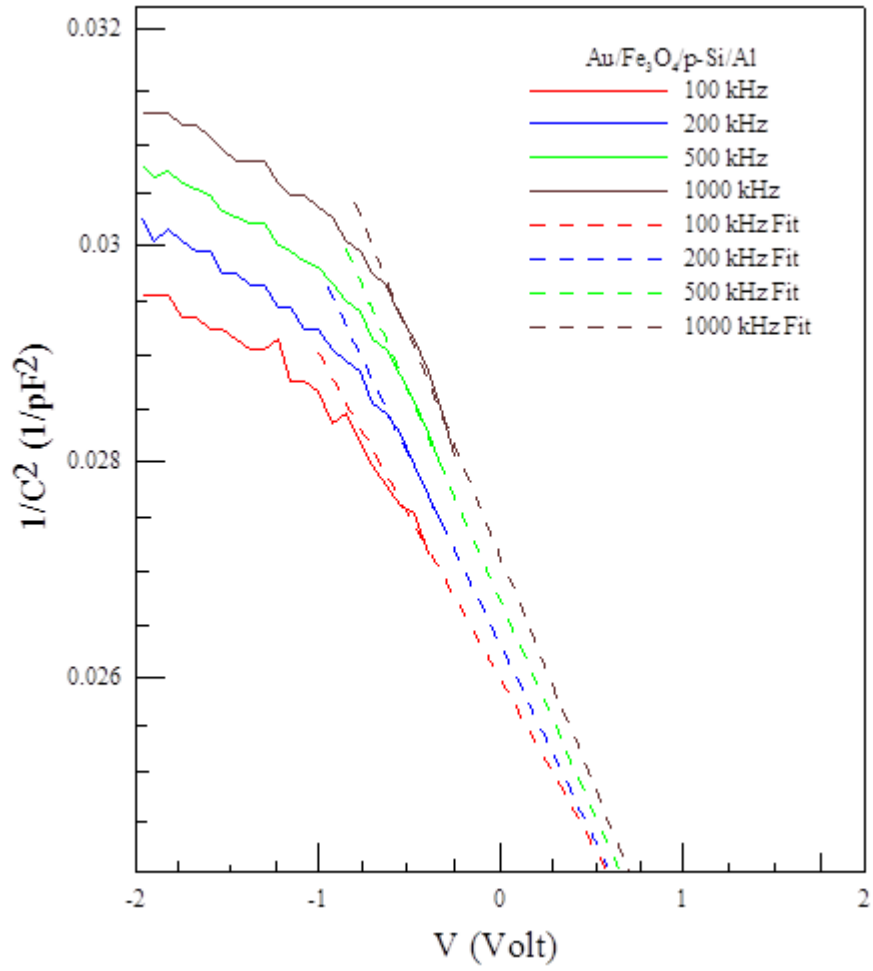
Genellikle, arayüzeyde ve yarıiletken tabaka arayüzeyinde farklı yaşama ömürlerine sahip farklı haller vardır. Düşük frekanslarda, uygulanan sinyal tarafından tüm arayüzey halleri yüklerin bu sinyale yanıt vermeyi kabul etmesinden veya vazgeçmesinden etkilenir. Arayüzey kapasitesi deplasyon kapasitesiyle doğrudan paralel bir ilişkiye sahiptir ve eğer arayüzey hallerinin hiçbiri mevcut değilse, Schottky diyotlar için kapasitenin toplam değeri daha büyüktür. Ara frekanslarda, bazı arayüzey hal yükleri küçük sinyal ölçümlerine katılacaktır ve kapasitenin değeri düşük ve yüksek frekans değerleri arasında olacaktır. Eğer kapasite ölçümleri yeterince yüksek frekanslarda yapılırsa, arayüzey hal yükleri diyot kapasitesine katkıda bulunmaz. Bu durum zaman sabitinin uygulanan bir sinyale yanıt verildiğinde arayüzey hallerinin içeri ve dışarı hareket yüklerine müsaade edecek kadar çok uzun olmasıyla gerçekleşir (Çakar *et al.* 2003).



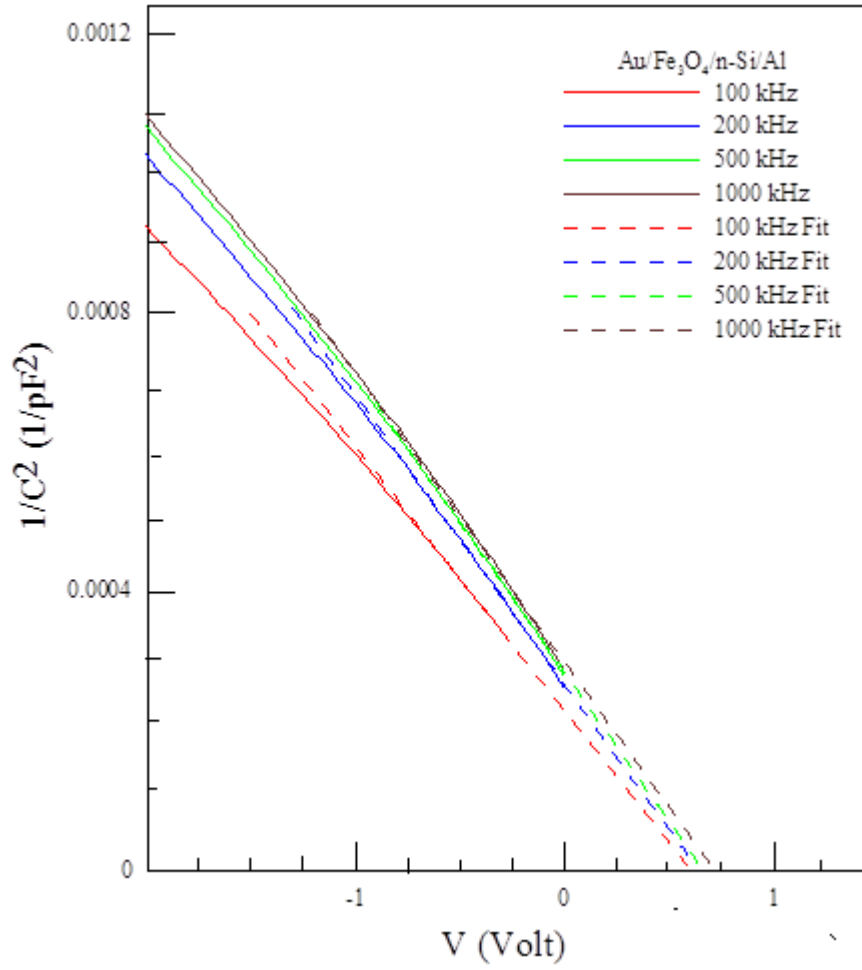
Şekil 4.37. Oda sıcaklığında $\text{Au/Fe}_3\text{O}_4/\text{p-Si/Al}$ diyodunun farklı frekans değerlerinde düz ve ters beslem durumlarında C - V grafikleri



Şekil 4.38. Oda sıcaklığında $\text{Au/Fe}_3\text{O}_4/\text{n-Si/Al}$ diyodunun farklı frekans değerlerinde düz ve ters beslem durumlarında C - V grafikleri



Şekil 4.39. Oda sıcaklığında $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodunun farklı frekans değerlerinde düz ve ters beslem durumlarında $1/C^2 - V$ grafikleri



Şekil 4.40. Oda sıcaklığında Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodunun farklı frekans değerlerinde düz ve ters beslem durumlarında $1/C^2 - V$ grafikleri

(4.13) denklemini düzenleyecek olursak;

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.14)$$

eşitliğini elde ederiz. Ters beslem ($C^{-2} - V$) grafiğine uygun lineer fit çizildiğinde $C^{-2}=0$ için difüzyon potansiyeli V 'ye eşit olur, yani $V_d=V$ olur. Çizilen bu grafikler yardımıyla elde edilen difüzyon potansiyelleri değerleri Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilmiştir. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al

diyoduna ait V_d değerleri 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerleri için sırasıyla 0,63 V, 0,65 V, 0,66 V ve 0,68 V olarak hesaplanmıştır. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait V_d değerleri ise 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerleri için sırasıyla 0,59 V, 0,61 V, 0,63 V ve 0,65 V olarak hesaplanmıştır.

(4.14) ifadesinin V 'ye göre türevi alınırrsa,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.15)$$

eşitliği elde edilir. (4.15) ifadesinden N_d ifadesi çekilirse,

$$N_d = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.16)$$

eşitliği elde edilir. Ters beslem (C^{-2} - V) grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonu değerleri Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için sırasıyla izelge 4.11 ve izelge 4.12'de verilmiştir. Çizelge 4.11'den görüldüğü üzere 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerleri için Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun N_a iyonize olmuş akseptör konsantrasyonları sırasıyla $1,2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $1,3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $1,4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ve $1,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Benzer Şekilde izelge 4.12'den görüldüğü üzere 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerleri için Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodunun N_d iyonize olmuş donör konsantrasyonları sırasıyla $4,5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $4,7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ve $5,2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Termal denge durumunda p -tipi ve n -tipi bir yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonlarını veren ifadeler sırasıyla,

$$p_0 = N_v \exp\left(\frac{E_f - E_v}{kT}\right) \quad (4.17)$$

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.18)$$

ile verilmektedir. (4.17) ifadesindeki, N_v , termal dengede valans bandındaki hal yoğunluğudur. Si için $N_v=1,04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, tür. p -tipi bir yarıiletken için $N_A \gg p_i$ olduğundan $p_o \cong N_A$ olur. Burada p_i , asal taşıyıcı konsantrasyonudur. (4.18) ifadesindeki, N_c , termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu olup, Si için $N_c=2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, tür. n -tipi bir yarıiletken için $N_d \gg n_i$ olacağı için $n_o \cong N_d$ olur (Neamen 1992). Burada n_i , asal taşıyıcı konsantrasyonudur. Her iki durum da dikkate alındığında, (4.17) ve (4.18) ifadeleri sırasıyla,

$$N_a = N_v \exp\left(\frac{E_f - E_v}{kT}\right) \quad (4.19)$$

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.20)$$

şeklinde elde edilir. (4.19) ve (4.20) ifadelerinin tabii logaritmaları alınıp, iletkenlik bandı referans seviye olarak ($E_c=0$) kabul edilirse,

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_A}{N_v}\right) \quad (4.21)$$

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (4.22)$$

Fermi enerji seviyesi ifadeleri elde edilmiş olur. Au/Fe₃O₄/ p -Si/Al ve Au/Fe₃O₄/ n -Si/Al diyotları için (4.21) ve (4.22) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan E_f değerleri sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilmiştir. E_f değerleri Au/Fe₃O₄/ p -Si/Al diyodu için 0,33 eV iken Au/Fe₃O₄/ n -Si/Al diyodu için 0,37 eV olarak hesaplanmıştır.

Diyotların C - V grafiklerinden ideal diyot için engel yüksekliği;

$$\Phi_b = E_f + V_d \quad (4.23)$$

eşitliği ile verilmektedir. İdeal olmayan diyot için bu ifade,

$$\Phi_b = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (4.24)$$

şeklinde verilir (Neamen 1992; Ateş *et al.* 2011; Reddy and Reddy 2012; Güzeldir *et al.* 2012; Huang *et al.* 2013). Bu ifadeden elde edilen engel yüksekliği değerleri düzeltilmiş engel yükseklikleri olarak adlandırılmaktadır. (4.24) eşitliğindeki n ifadesi diyodun I - V grafiğinden elde edilen idealite faktörü değeridir. Bu eşitlikten hesaplanmış ortalama engel yüksekliği değerleri Au/Fe₃O₄/ p -Si/Al ve Au/Fe₃O₄/ n -Si/Al diyodları için sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de verilmiştir. 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerleri için Au/Fe₃O₄/ p -Si/Al diyodunun ortalama engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0,96 eV, 0,98 eV, 0,99 eV ve 1,01 eV olarak hesaplanırken, aynı frekans değerleri için Au/Fe₃O₄/ n -Si/Al diyodunun ortalama engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0,96 eV, 0,98 eV, 1,00 eV ve 1,02 eV olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.11. Oda sıcaklığında Au/Fe₃O₄/ p -Si/Al diyoduna ait farklı frekans değerlerindeki (I/C^2 - V) değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri

Frekans (kHz)	V_d (V)	N_a (cm ⁻³)x10 ¹³	E_f (eV)	V_d+E_f (eV)
100	0,63	1,2	0,33	0,96
200	0,65	1,3	0,33	0,98
500	0,66	1,4	0,33	0,99
1000	0,68	1,5	0,33	1,01

Çizelge 4.12. Oda sıcaklığında Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyoduna ait farklı frekans değerlerindeki (I/C^2-V) değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri

Frekans (kHz)	V_d (V)	N_d (cm ⁻³)x10 ¹²	E_f (eV)	V_d+E_f (eV)
100	0,59	4,5	0,37	0,96
200	0,61	4,7	0,37	0,98
500	0,63	5	0,37	1,00
1000	0,65	5,2	0,37	1,02

Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de görüldüğü üzere Fermi enerji seviyesi (E_f) artan frekansla değişiklik göstermemiştir. Bu değer Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için 0,37 eV iken Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için 0,40 eV’ur.

Ayrıca, Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’de görüldüğü üzere ortalama engel yüksekliği değeri artan frekansla artmıştır. $C-V$ grafiğinden hesaplanan ortalama engel yüksekliği değerleri $I-V$ grafiğinden hesaplanan engel yüksekliği değerlerinden daha büyüktür. Bu farklılık engel yüksekliğinin doğal yapısından ve $C-V$ ile $I-V$ ölçüm tekniklerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. $I-V$ ve $C-V$ Schottky engel yüksekliği arasındaki farklar arayüzey oksit tabakası bileşimi içindeki engel anomalilerinden, tekdüze olmayan arayüzey tabakasının kalınlığından ve arayüzey yüklerinin dağılımından ortaya çıkar. Ayrıca $C-V$ ölçümlerinde sadece deplasyon bölgesinin kenarı modüle olmuştur ve eklemin potansiyel dalgalanmaları için duyarlı değildir (Singh 1985; Song *et al.* 1986; Shah *et al.* 2010; Osiris *et al.* 2011; Aydın and Yakuphanoglu 2012; Reddy *et al.* 2013; Gülnahar 2014; Jyothi *et al.* 2014).

Çizelgelerden görüldüğü üzere artan frekansla N_a , iyonize olmuş akseptör konsantrasyonu ve N_d , iyonize olmuş donör konsantrasyonu artmıştır. Bu davranış arayüzey hal yüklerinin diyot kapasitesine katkıda bulunup bulunmadığına veya

arayüzey hallerindeki yüklerin bir alternatif akım sinyalinin takip edebilmesiyle açıklanır (Tataroğlu and Altındal 2006,2008; Osiris *et al.* 2011).

4.6. X-Işını Radyasyonunun Au/Fe₃O₄/p-Si/Al Doğrultucu Konağının I-V (Akım-Voltaj) Karakteristikleri Üzerine Etkisi

Elektronik yarıiletken cihazlar radyasyon hasarına yatkındır. Pek çok yarıiletken malzeme kullanıldığı ortama göre radyasyon sonucu fotonlara veya parçacıklara maruz kalırlar. Yüksek enerjili foton veya parçacıklar enerjilerini yarıiletken malzemelere aktararak, yarıiletkende kusur oluşmasına neden olur. Yarıiletken malzemeler üzerinde radyasyon, iyonizasyon ve yerdeğiştirme zararları olmak üzere iki tip zarar oluşturur. Bu zararlar malzemelerin performansının azalmasına neden olur.

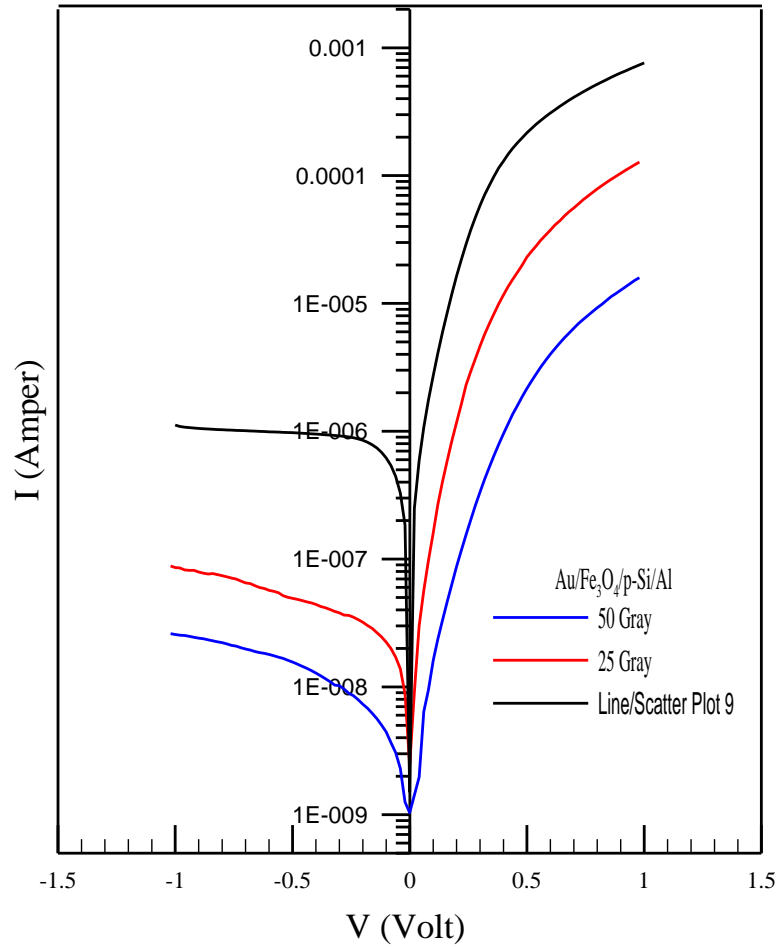
Bir atomdan veya molekülden bir ya da daha fazla elektron uzaklaştırılması işlemine **iyonizasyon** denir. İyonizasyonu sağlamak için gönderilen parçacık veya fotonun enerjisinin, atom veya molekülden bir elektron koparabilmesi için yeterli olması gerekir. İyonizasyona yüksek enerjili X ışınları ve gama ışınları neden olur.

Uygulanan radyasyon, kristal örgüden bir atomu sökerek boşluk oluşturabilir. Sökülen bu atom kristal içerisinde farklı bir konuma yerleşebilir. Böylece yarıiletken malzemelerde örgü uyumu bozulacağı için **örgü kusurları** oluşur. Yer değiştirmeden kaynaklanan kusurlar yarıiletkenin elektriksel ve optiksel özellikleri üzerinde değişimlere neden olur. Bu değişimler; radyasyon sonucu oluşan kusurlar nedeniyle meydana gelen elektron-hol çifti, radyasyon sonucu oluşan tuzak merkezleri tarafından elektron-hol çiftlerinin rekombinasyonu, donör ve akseptörlerin telafisi ve taşıyıcıların tünellemesi şeklinde gerçekleşebilir. Serbest taşıyıcı mobilitesi, yoğunluğu, direnci, oluşma ve yok olma ömürleri gibi önemli malzeme parametreleri yerdeğiştirmeden etkilenir.

Bu çalışmada radyasyon kaynağı olarak X ışını radyasyonu kullanılmıştır. X ışınları, yüksek enerjiye sahiptir, yarıiletken malzemelerin örgü yapısını değiştirebilirler, doz

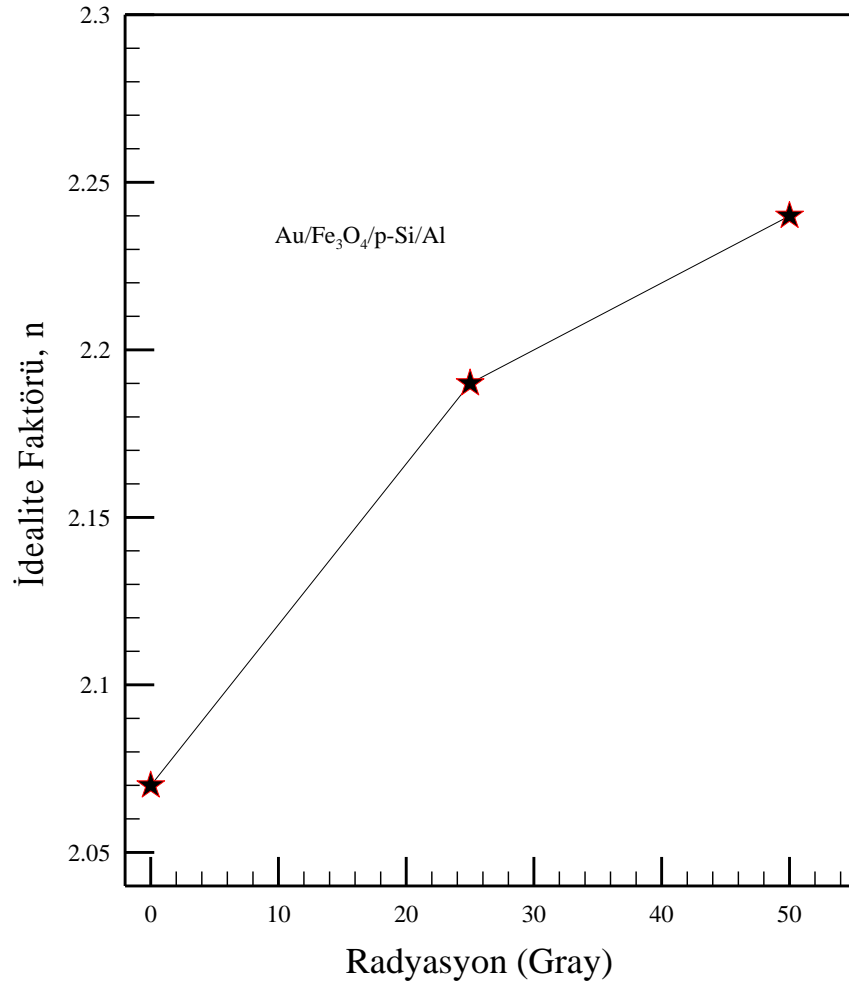
hızları yüksektir, homojen olarak ışınlanabilirler ve giricilikleri yüksektir. Bu nedenlerden dolayı X ışını radyasyonu tercih edilmiştir.

Yapılan çalışmada Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu 25 Gray ve 50 Gray olmak üzere iki farklı dozda ışınlamaya tabii tutuldu. Her bir ışınlama sonunda diyodun *I-V* ölçümleri alındı. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun ışınlamalardan önceki ve farklı dozlarda ışınlamaya tabii tutulduktan sonraki düz ve ters beslem *I-V* karakterisitikleri Şekil 4.41’de verilmiştir. Şekil 4.41’den görüldüğü üzere artan doz miktarı ile düz ve ters beslem akımlarının azaldığı görülmektedir. Fazladan oluşan saçılma merkezlerinden ve akseptör gibi tuzak seviyeleri içinde çoğunluk taşıyıcılarının artmasıyla elektron mobilitesinin azalmasından dolayı diyot için ters beslem akımı azalır.



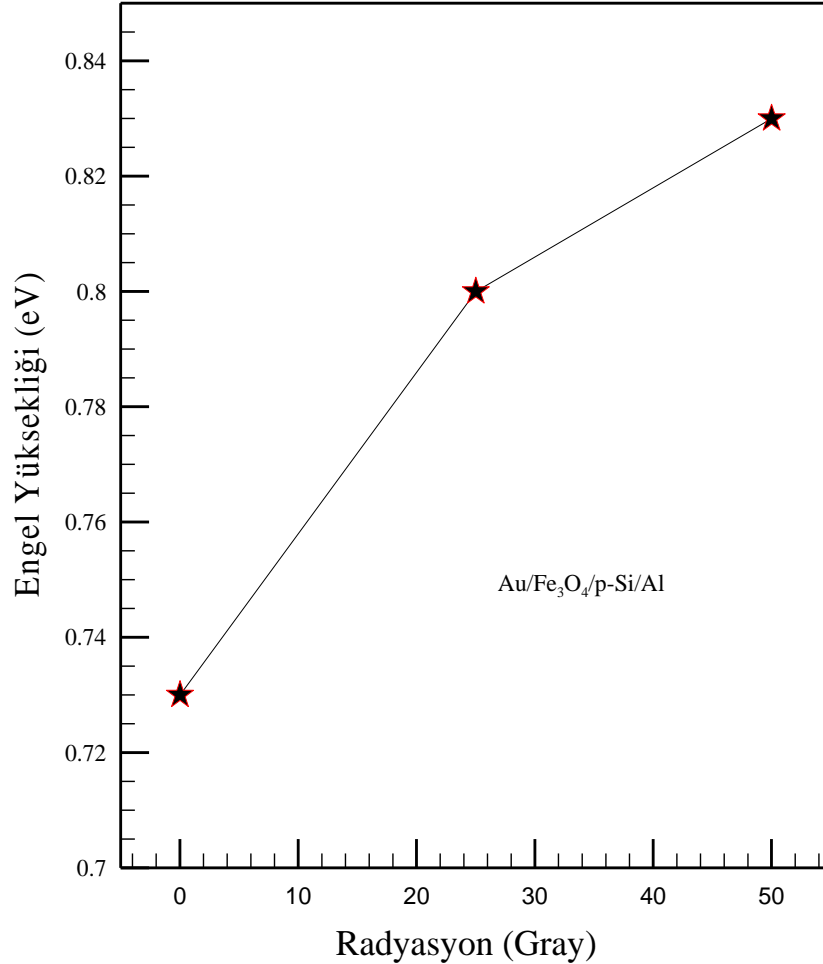
Şekil 4.41. Işınlamalar sonucu elde edilen Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun *I-V* grafikleri

Işınlatma yapılmadan önce Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için idealite faktörü değeri, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri sırasıyla 2,07, 0,73 eV ve 79 kΩ olarak hesaplandı. 25 Gray'lik ışınlamadan sonra bu değerler sırasıyla 2,19, 0,80 eV ve 93 kΩ olarak hesaplanırken, 50 Gray'lik ışınlatma sonrası için 2,24, 0,83 eV ve 196 kΩ olarak hesaplandı. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun radyasyona bağlı idealite faktörü değerlerinin değişim grafiği Şekil 4.42'de verilmiştir. İntrensik bölge içinde tuzak merkezlerinde taşıyıcıların rekombinasyon olasılığının artması nedeniyle diyodun idealite faktörü değeri artar. Artan doz ile idealite faktörünün artışı Şekil 4.43'den net bir şekilde görülmektedir.



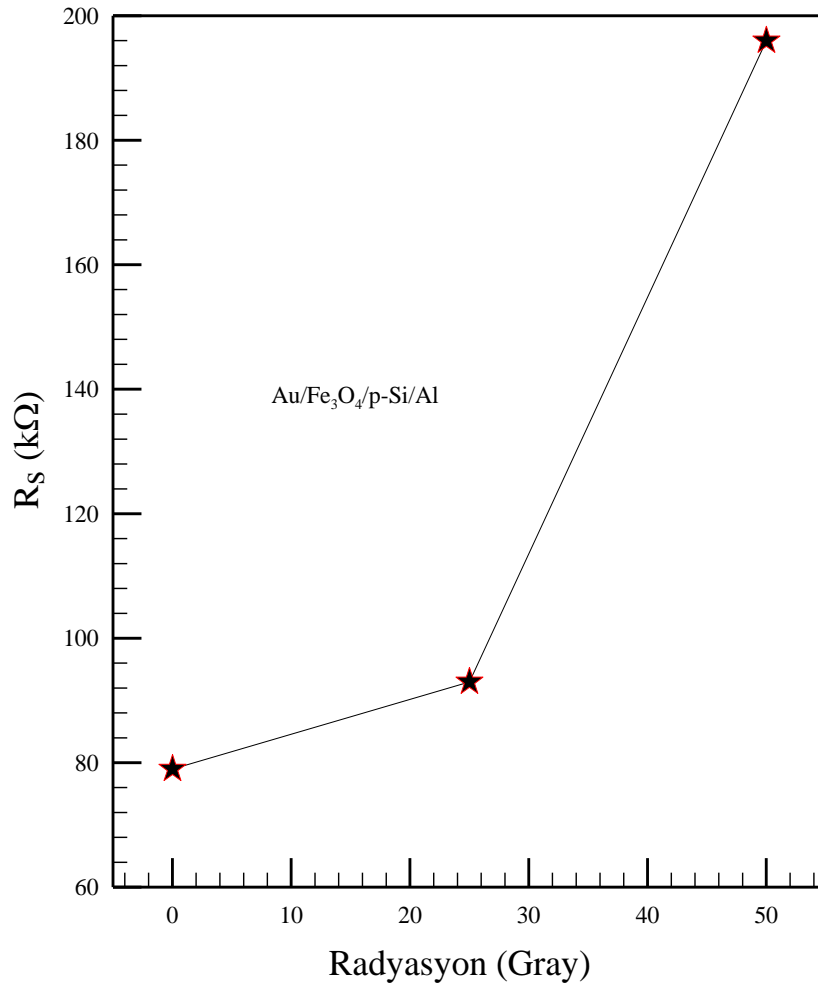
Şekil 4.42. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun radyasyona bağlı idealite faktörü değerlerinin değişim grafiği

Işınlamadan sonra Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun engel yüksekliğinin uygulanan doz miktarına göre değişimi Şekil 4.43’de verilmiştir. Şekil 4.43’den görüldüğü üzere artan doz miktarı ile engel yüksekliği değerinde artış meydana gelmiştir. Uygulanan doz ile engel yüksekliğinin artması Fe₃O₄/Si arayüzeyinde X ışının radyasyonu ile serbest taşıyıcı konsantrasyonunun değişimiyle ilişkilendirilebilir (Mamor *et al.* 2007) Ayrıca artan doz ile engel yüksekliği değerindeki artış, radyasyon zararları ile bağlantılı rekombinasyon merkezleri ve tuzakların oluşması nedeniyle aygıtın deplasyon bölgesindeki taşıyıcı konsantrasyonundaki azalmayla açıklanabilir (Çaldıran *et al.* 2013)



Şekil 4.43. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun radyasyona bağlı engel yüksekliği değerlerinin değişim grafiği

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun ışınlama dozuna bağlı olarak seri direnç değerlerindeki değişim Şekil 4.44’de verilmiştir. Şekil 4.44’de görüldüğü üzere artan doz miktarı ile seri direnç değerleri artmaktadır. Radyasyon sonrası seri dirençteki artış mobilitenin ve serbest taşıyıcı konsantrasyonunun azaldığını gösterir. Mobilitedeki azalma saçılma merkezi gibi davranan kusur merkezlerinden kaynaklanır. Eğer derin tuzaklar nokta kusur yerdeğiştirme hasarına bağlı olarak malzeme içine yerleşirse, serbest taşıyıcı konsantrasyonu azalacaktır. Kristal örgüdeki serbest taşıyıcılar taşıyıcı yoğunluğunun azalması sonucu oluşan kusur merkezlerinden dolayı tuzaklanır (Arshak *et al.* 2004; Pattabi *et al.* 2007).



Şekil 4.44. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun radyasyona bağlı seri direnç değerlerinin değişim grafiği

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada tek düze dağılımlı Fe_3O_4 nanoparçacıklar sentezlendi ve XRD, TEM ile karakterize edildi. Sentezlenen bu nanoparacıkları *p*-Si ve *n*-Si üzerine kaplanarak, $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ heteroyapıları elde edilmiştir. Bu amaçla taban malzeme olarak kullanılan *p*-Si ve *n*-Si yarıiletken kristalleri [100] doğrultusunda büyütülmüş olup, 400 μm kalınlığında, 1-10 Ω -cm öz direncine sahiptirler. Elde $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ heteroyapılarının sıcaklığa bağlı olarak *I-V* ve *C-V* ölçümleri alındı. Bu ölçümlerden bazı temel diyot parametreleri hesaplanarak Fe_3O_4 malzemesinin ve sıcaklığın temel diyot parametreleri üzerindeki etkileri incelendi. Ayrıca $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyoduna farklı dozlarda radyasyon uygulanarak, radyasyonun diyodun *I-V* karakteristiği üzerindeki etkileri incelendi.

5.1. Sıcaklığa Bağlı *I-V* Ölçümleri

Hazırlanan $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyotlarının 300 K'den başlayarak 20 K'lik adımlarla 40 K'e kadar *I-V* ölçümleri alındı. Ayrıca bu diyotların oda sıcaklığında farklı frekans değerlerinde (100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz), oda sıcaklığında *C-V* ölçümleri alındı.

Aynı şartlar altında hazırlanmış referans $Au/p-Si/Al$ ile $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyotlarının oda sıcaklığındaki *I-V* karakteristikleri Şekil 4.1'de verilirken, yine aynı şartlar altında hazırlanmış referans $Au/n-Si/Al$ ile $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyotlarının oda sıcaklığındaki *I-V* karakteristikleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu diyotlar için Termiyonik Emisyon modeli kullanılarak hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir. Oda sıcaklığında referans $Au/p-Si/Al$ diyodu için idealite faktörü 1,58 bulunurken, engel yüksekliği değeri 0,61 eV olarak bulundu. Aynı şartlar altında hazırlanmış $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodu için idealite faktörü 1,17 bulunurken, engel yüksekliği 0,65 eV olarak bulundu. Bu durum *n*-Si taban malzemeli diyot için de benzer olup, $Au/n-Si/Al$ diyodu için idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri

sırasıyla 1,91 ve 0,74 eV iken, Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 1,18 ve 0,83 eV olarak bulundu. Hesaplanan diyot parametrelerinden Fe₃O₄ malzemesinin diyotların karakteristiğinde iyileştirme yaptığı net bir şekilde görülmektedir. Bu durumu Fe₃O₄'ün yarı metalik (half-metalic) ve elektriksel iletken bir malzeme olmasıyla açıklayabiliriz.

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının sıcaklığa bağlı (40 K-300 K) *I-V* grafikleri sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir. Bu diyotların sıcaklığa bağlı olarak geleneksel metot ile elde edilen temel diyot parametreleri Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de verilmiştir. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için 40 K ile 300 K arasında idealite faktörü değeri 1,17 ile 4,16 arasında iken, engel yüksekliği değeri 0,13 ile 0,65 eV arasında değişmektedir. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için 40 K ile 300 K arasında idealite faktörü değeri 1,18 ile 2,92 arasında iken, engel yüksekliği değeri 0,13 ile 0,83 eV arasında değişmektedir.

Bu değerlerden de anlaşıldığı üzere düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça idealite faktörü değeri azalmaktayken, engel yüksekliği değeri artmaktadır. Sıcaklığa bağlı bu değişimler Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. İdealite faktörünün $n > 1$ çıkması saf Termiyonik Emisyon teorisinden sapma olduğunu göstermektedir. Metal-yarıiletken ara yüzeyde akım iletimi sıcaklığa bağlı olduğundan dolayı düşük sıcaklıklarda elektronlar daha düşük bir engel ile karşılaştıklarından akım iletimi baskın olur ve idealite faktörü değeri de artar (Sullivan 1991; Tung 1992). Bu çalışmada büyük idealite faktörü değerleri Fe₃O₄ nanoparçacıkların arayüzeyindeki ikincil mekanizmalara ve arayüzey kusurlarının oluşturabileceği engel yüksekliğinin yanal olarak homojen olmayan dağılımına atfedilir (Deniz *et al.* 2013; Korucu and Turut 2013; Khurelbaatar *et al.* 2014; Lin and Lin 2014; Chand and Kumar 2014).

Geleneksel metottan farklı olarak Cheung fonksiyonları kullanılarak, Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının 300 K- 40 K sıcaklık aralıklarında engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri hesaplandı. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının sıcaklığa bağlı Cheung fonksiyonlarından elde edilmiş $dV/d(\ln I)-I$

grafikleri sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da, $H(I)-I$ grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Oda sıcaklığında Cheung fonksiyonlarından hesaplanmış olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri referans Au/*p*-Si/Al ve Au/*n*-Si/Al diyotları için sırasıyla Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir. Ayrıca Cheung fonksiyonlarından sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmış olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyotları için sırasıyla Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al diyodu için 40 K–300 K sıcaklık aralığında $dV/d(\ln I)-I$ grafiğinden hesaplanan idealite faktörü değerleri 2,74 ile 9,86 arasında azalan sıcaklıkla artarken, hesaplanan seri direnç değerleri 639 Ω ile 4841 Ω arasında azalan sıcaklıkla artış göstermektedir. Ayrıca bu diyot için $H(I)-I$ grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri azalan sıcaklıkla 769 Ω ile 2768 Ω arasında uyumlu bir şekilde artarken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,10 eV ile 0,62 eV arasında azalan sıcaklıkla uyumlu bir azalma göstermektedir.

Benzer şekilde Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyodu için 40 K–300 K sıcaklık aralığında $dV/d(\ln I)-I$ grafiğinden hesaplanan idealite faktörü değerleri 2,63 ile 9,82 arasında azalan sıcaklıkla artarken ve hesaplanan seri direnç değerleri 3913 Ω ile 28828 Ω arasında azalan sıcaklıkla artış göstermektedir. Ayrıca bu diyot için $H(I)-I$ grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri azalan sıcaklıkla 3730 Ω ile 24589 Ω arasında uyumlu bir şekilde artarken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,12 eV ile 0,80 eV arasında azalan sıcaklıkla uyumlu bir azalma göstermektedir.

Geleneksel metotla ve Cheung fonksiyonlarıyla sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin karşılaştırması Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de, idealite faktörü değerlerinin karşılaştırılması ise Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere artan sıcaklıkla artan engel yüksekliği değerleri geleneksel metotla sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan değerlerle benzer bir ilişki göstermektedir. Ancak Cheung metodundan hesaplanan idealite faktörü değerleri geleneksel metotla hesaplanan değerlerden daha büyüktür. Bu durum seri direnç etkisine, arayüzey

hallerine ve arayüzey tabakası üzerindeki gerilim düşüşüne atfedilebilir (Karataş and Turut 2006; Hamdaoui *et al.* 2014; Reddy 2014)

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere gerek Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için gerekse Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için $dV/d(\ln I) - I$ eğrisinden ve $H(I) - I$ eğrisinden elde edilen seri direnç değerleri birbirleriyle uyumludur. Bu şekillerde yüksek sıcaklıklara gidildikçe seri direnç değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu durum, sıcaklık arttıkça diyottan daha fazla akım geçmesi ile açıklanabilir. Sıcaklığın düşmesiyle seri direnç değerlerinin artması; yüksek sıcaklıklarda iyonizasyon ile serbest taşıyıcı yoğunluğunun artmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir (Peta *et al.* 2012; Kaçuş 2014; Dogan and Elagoz 2014; Hamdaoui *et al.* 2014; Çaldıran *et al.* 2014).

Geleneksel ve Cheung metottan farklı olarak seri direnç ve engel yüksekliği gibi diyot parametrelerini belirlemede kullanılan bir diğer metot Norde metodudur. Bu metot kullanılarak Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının sıcaklığa bağlı olarak seri direnç ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için sıcaklığa bağlı olarak $F(V)$ 'nin V 'ye karşı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir. Bu diyotların 40 K ile 300 K arasında sıcaklığa bağlı olarak, Norde fonksiyonlarıyla hesaplanan engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da verilmiştir. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için 40 K ile 300 K arasında engel yüksekliği değeri 0,75 eV ile 0,10 eV arasında değişirken, seri direnç değerleri ise 144 kΩ ile 8,01 kΩ arasında değişmektedir. Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için ise 40 K ile 300 K arasında engel yüksekliği değeri 0,83 eV ile 0,10 eV arasında değişirken, seri direnç değerleri ise 257 kΩ ile 9,93 kΩ arasında değişmektedir. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için Norde fonksiyonlarından elde edilen engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de verilmiştir. Her iki grafikte de görüldüğü üzere artan sıcaklıkla engel yüksekliği değerleri uyum içinde artmaktadır. Çünkü düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların düşük engelleri aşması mümkün olabileceğinden, metal-yarıiletken ara

yüzeyinden akım geçişi sıcaklıkla aktive olan bir süreçtir. Bu yüzden akım geçişi düşük Schottky engel yüksekliğinin yamaları içinden akan akım yoluyla olacaktır. Sıcaklık arttıkça daha çok elektron daha yüksek engelleri aşmak için yeterli enerjiye sahip olacaktır. Sonuç olarak baskın engel yüksekliği sıcaklık ve uygulama voltajı ile artacaktır (Deniz *et al.* 2013; Karataş *et al.* 2013)

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için Norde fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir. Her iki grafikte de görüldüğü üzere artan sıcaklıkla seri direnç değerleri uyum içinde azalmaktadır. Sıcaklık düşüşü ile seri direnç artışının, düşük sıcaklıklardaki serbest taşıyıcı konsantrasyonunun eksikliğinden kaynaklandığına inanılmaktadır (Deniz *et al.* 2013)

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için Termiyonik Emisyon., Cheung ve Norde metotlarından elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü üzere üç metottan da sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmış engel değerleri birbirine yakın ve sıcaklıkla uyumlu bir değişim göstermektedir.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'nin y eksenlerinden biri sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının engel yüksekliği değerlerinin $q/2kT$ 'ye karşı olan değişim grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.19'da ve Şekil 4.20'de sırasıyla 160 K ve 120 K sıcaklık değerlerinde kesişen lineer tek bir çizgi yerine metal-yarıiletken arayüzeyinde iki farklı engel yüksekliğinin varlığını gösteren iki lineer çizgi olduğu görülmektedir. Bu yüzden şekiller incelendiğinde metal-yarıiletken arayüzeyinde engelin çift Gauss dağılımı gösterdiği anlaşılmaktadır (Barış *et al.* 2013; Bobby *et al.* 2013; Beştaş *et al.* 2014).

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine lineer fit uygulanarak ortalama engel yüksekliği değerleri 40 K ile 160 K arasında 0,44 eV iken 160 K ile 300 K arasında 0,95 eV olarak hesaplanmıştır. Standart sapma

değerleri ise 40 K ile 160 K arasında 0,128 eV iken 160 K ile 300 K arasında 0,048 eV olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodunun engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine lineer fit uygulanarak ortalama engel yüksekliği değerleri 40 K ile 120 K arasında 0,34 eV iken 120 K ile 300 K arasında 1,21 eV ve standart sapma değerleri 40 K ile 120 K arasında 0,135 eV iken 120 K ile 300 K arasında 0,054 eV olarak hesaplanmıştır.

.Şekil 4.19’da gösterilen $[(1/n)-1]$ ’in $1/2kT$ ’ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları 40 K ile 140 K arasında $\rho_2 = -0,266$ ve 140 K ile 300 K arasında $\rho_2 = 0,092$, 40 K ile 140 K arasında $\rho_3 = -0,00385$ V ve 140 K ile 300 K arasında $\rho_3 = -0,0191$ V olarak bulunmuştur. Aynı şekilde Şekil 4.20’de gösterilen $[(1/n)-1]$ ’in $1/2kT$ ’ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları 40 K ile 130 K arasında $\rho_2 = -0,335$ ve 130 K ile 300 K arasında $\rho_2 = 0,037$, 40 K ile 130 K arasında $\rho_3 = -0,00469$ ve 130 K ile 300 K arasında $\rho_3 = -0,0227$ V olarak bulunmuştur.

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarına ait $\ln(I_0/T^2)$ ’nin $1/T$ ’ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafikleri sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir. Modifiye edilmiş Richardson grafiğinde çizilen lineer fitin y-eksenini kesen noktası modifiye edilmiş Richardson sabitini verir. Doğrunun eğiminden faydalanılarak elde edilen Richardson sabiti değeri Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodları için sırasıyla $A^* = 3,97$ A/K² cm² ve $A^* = 2,17$ A/K² cm² olarak hesaplandı. Hesaplanan bu değerler teorik olarak hesaplanan n-Si için 112 A/K²cm² değerinden ve p-Si için 32 A/K²cm² değerinden çok küçüktür. Bu durumun sebebi kontağın homojen olmayan etkisine, metal/yarıiletken arasında farklı kalınlıktaki oksit tabakalarının oluşumundan dolayı ara yüzeyde yüksek ve düşük engel alanlarının oluşacağına ve ara yüzeyde bu potansiyel dalgalanmalar nedeniyle diyot akımı potansiyel dağılımı içinde tercihen daha düşük engel boyunca akacak olmasına bağlanabilir (Durmuş and Yıldırım 2014; Mamor *et al.* 2014; Fiat *et al.* 2014; Ouennoughi *et al.* 2015).

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de sırasıyla Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotları için nT ’nin T ’ye karşı grafikleri verilmiştir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de görüldüğü gibi

artan sıcaklıkla idealite faktörünün değeri $n=1$ olan teorik değerine yaklaşmaktadır. Bu durum $n=1+(\ T_0/T)$ ilişkisiyle tanımlanabilir. İdealite faktörünün sıcaklığa bağlılığı Schottky engel yüksekliği içerisindeki homojensizliğin bir sonucudur. Ayrıca böyle bir durum engel boyunca taşıyıcıların tünellemesinden, imaj kuvvetinin azalmasından ve metal-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey hal yoğunluğundan kaynaklanabilir (Hamdaoui *et al.* 2014). Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de deneysel değerler üzerine fit edilen düz çizgi ideal Schottky kontak davranışını gösteren çizgiyle paralel değildir ve Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için 132,5 K iken Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için 141,5 K’ de lineerlikten bir sapma vardır. Bu durum Schottky engeli boyunca yanal homojensizliğinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyotlarının sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun, arayüzey hal enerjisine karşı değişimleri sırasıyla Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de verilmiştir. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için N_{ss} değeri, artan enerji ve p-Si ’un valans bandının üst kısmına karşılık gelen bant ortasındaki arayüzey hal yoğunluğunun artışı ile azalır. Arayüzey hal yoğunluğu, uygulanan voltaj ile değişir. Bu değişimler rekombinasyon merkezindeki azalmaya ve n-Si yarıiletken ile Fe₃O₄ tabakanın arasındaki bir arayüzey tabakasının oluşmasına bağlanabilir (Yüksel *et al.* 2013).

N_{ss} sıcaklık arttığında azalır. Bu durum sıcaklık etkisi altında metal-yarıiletken arayüzeyinin yeniden düzenlenmesinin veya yeniden moleküler yapılanmasının bir sonucudur. Şekil 4.33’de Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodu için valans bandının üst kısmına doğru arayüzey hal yoğunluğunun eksponansiyel olarak arttığı görünür. Farklı sıcaklıklardaki arayüzey tabakası nedeniyle N_{ss} eğrileri içinde valans bandına doğru kaymalar görünür (Altındal *et al.* 2003). Şekil 4.34’de görüldüğü üzere Au/Fe₃O₄/n-Si/Al diyodu için arayüzey hal yoğunluğunun iletkenlik bandının altına doğru eksponansiyel olarak arttığı görünür. Bu durum arayüzey hal yoğunluğunun uygulanan voltaj ile valans bandının üst kısmına doğru eksponansiyel artışa sahip olduğunu göstermektedir. Bu değişimler rekombinasyon merkezindeki azalmaya ve n-Si yarıiletken ile Fe₃O₄ tabakanın arasındaki bir arayüzey tabakasının oluşumuna atfedilebilir. (Aydoğan *et al.* 2010).

5.2. Oda Sıcaklığında Yapılan $C-V$ Ölçümleri

$Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyotları için oda sıcaklığında 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerlerinde $C-V$ (kapasite-voltaj) ölçümleri -2 V ile +2 V aralığında yapıldı. Metal-yarıiletken kontaklar bir kondansatör gibi davranır. Bu yüzden $C-V$ ölçümlerinin alınması metal-yarıiletken ara yüzeyinin oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Diyotların kapasitenin ters beslem durumunda gerilime bağlı değişiminden, doğrultucu kontakın engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi diyot parametreleri hesaplandı.

Aynı şartlar altında hazırlanmış referans $Au/p-Si/Al$ diyodu ve $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodunun oda sıcaklığında 200 kHz frekanstaki $C-V$ grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.35'de verilmiştir. Aynı şekilde aynı şartlar altında hazırlanmış referans $Au/n-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyotlarının oda sıcaklığında 200 kHz frekanstaki $C-V$ grafikleri Şekil 4.36'da verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, aynı gerilim değerlerinde $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyotlarının kapasitesinin sırasıyla referans $Au/p-Si/Al$ ve $Au/n-Si/Al$ diyotlarının kapasitesinden daha büyük bir değere sahip oldukları görülmektedir. Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere kullanılan Fe_3O_4 malzemesi diyodun kapasitesini arttırdığı sonucuna varılabilir.

Oda sıcaklığında $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyotlarının farklı frekans değerlerindeki düz ve ters beslem durumundaki $C-V$ grafikleri sırasıyla Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de verilmiştir. Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da ise sırasıyla oda sıcaklığında $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyotlarının farklı frekans değerlerinde ters beslem $C-V$ grafiklerinden elde edilen $1/C^2-V$ grafikleri verilmiştir. Diyot ters beslem durumunda negatif voltajlara doğru gidildikçe kapasite değerinin arttığı ve diyot düz beslem durumunda yüksek voltajlara çıkıldıkça kapasitenin belirgin bir şekilde arttığı belirlendi. Diyot ters beslem altındayken uygulanan voltaja bağlı olarak deplasyon bölgesi genişleyeceği ve azalan gerilim ile N_d azalacağı için kapasite artmaktadır. Frekans değeri düştükçe kapasite artmakta olduğu grafiklerden görülmektedir. Düşük

frekans değerlerinde yüksek kapasitenin sebebi, alternatif akım sinyalinin takip edebilen *p*-Si ve *n*-Si ile dengedeki arayüzey hallerinden kaynaklanan aşırı kapasitedir. Yani arayüzey halleri düşük frekanslarda alternatif akım frekanslarını takip edebilirken yüksek frekanslarda alternatif akım frekanslarını takip edemeyebilirler. Yüksek frekanslarda kapasitenin değeri sadece uzay yükü kapasitesidir (Shah *et al.* 2010; Osiris *et al.* 2011; Kumar *et al.* 2013; Gülnahar 2014).

I/C^2 - V grafikleri yardımıyla hesaplanan difüzyon potansiyeli değerleri Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyotları için sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilmiştir. Bu grafiklerden Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al diyoduna ait V_d değerleri 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerleri için sırasıyla 0,63 V, 0,65 V, 0,66 V ve 0,68 V olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyoduna ait V_d değerleri ise 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz frekans değerleri için sırasıyla 0,59 V, 0,61 V, 0,63 V ve 0,65 V olarak hesaplanmıştır.

(C^2 - V) grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonu değerleri Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyotları için sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilmiştir. Bu çizelgelerden görüldüğü üzere artan frekansla N_a iyonize olmuş akseptör konsantrasyonu ve N_d iyonize olmuş donör konsantrasyonu artmıştır. Bu davranış arayüzey hal yüklerinin diyot kapasitesine katkıda bulunup bulunmadığına veya arayüzey hallerindeki yüklerin bir alternatif akım sinyalinin takip etmesiyle açıklanır (Tataroğlu and Altındal 2006,2008; Osiris *et al.* 2013)

Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyotları için (4.21) ve (4.22) eşitlikleri kullanılarak hesaplanan E_f değerleri sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilmiştir. Bu çizelgelerden görüldüğü üzere Fermi enerji seviyesi (E_f) artan frekansla değişiklik göstermemiştir. Bu değer Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al diyodu için 0,33 eV iken Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyodu için 0,37 eV'dir.

Au/Fe₃O₄/*p*-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/*n*-Si/Al diyotları için hesaplanan ortalama engel yüksekliği değerleri sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilmiştir. Bu

çizelgelerden görüldüğü üzere ortalama engel yüksekliği değeri artan frekansla artmıştır. $C-V$ grafiğinden hesaplanan ortalama engel yüksekliği değerleri $I-V$ grafiğinden hesaplanan engel yüksekliği değerlerinden daha büyüktür. Bu farklılık engel yüksekliğinin doğal yapısından ve $C-V$ ile $I-V$ ölçüm tekniklerinin farklı teknikler olmasından kaynaklanmaktadır (Reddy *et al.* 2013; Gülnahar 2014; Jyothi *et al.* 2014).

Sonuç olarak heteroyapıların fabrikasyonunda kullanılan Fe_3O_4 nanoparçacıkları temel diyot parametrelerini iyileştirmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda Fe_3O_4 malzemesi kaplanarak elde edilen diyotların referans diyotlara göre daha düşük idealite faktörüne ve daha yüksek engel yüksekliği değerine sahip olması bu durumun en büyük kanıtıdır. $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ ve $Au/Fe_3O_4/n-Si/Al$ diyotlarının sıcaklığa bağlı $I-V$ ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden artan sıcaklıkla idealite faktörü ve seri direnç değerleri azalırken, engel yüksekliği değeri artmıştır.

5.3. X-Işını Radyasyonunun $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ Diyodunun $I-V$ Karakteristikleri Üzerine Etkisi

$Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyoduna sırasıyla 25 ve 50 Gray'lik X-ışını radyasyonu uygulandı. Her bir ışınlamadan sonra diyodun $I-V$ ölçümleri alındı. $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodunun ışınlamalardan önceki ve farklı dozlarda ışınlamadan sonraki düz ve ters beslem $I-V$ karakteristikleri Şekil 4.41'de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere artan doz miktarı ile diyodun düz ve ters beslem akımlarının azaldığı görülmektedir. Bunu sebebi fazladan oluşan saçılma merkezlerinden ve akseptör gibi tuzak seviyeleri içinde çoğunluk taşıyıcılarının artmasıyla elektron mobilitesinin azalmasıdır. $I-V$ ölçümlerinden diyodun ışınlamadan önceki ve ışınlamadan sonraki durumları için idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Işınlama yapılmadan önce $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodu için idealite faktörü değeri, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri sırasıyla 2,07, 0,73 eV ve 79 k Ω olarak hesaplandı. 25 Gray'lik ışınlamadan sonra bu değerler sırasıyla 2,19, 0,80 eV ve 93 k Ω olarak hesaplandı ve 50 Gray'lik ışınlama sonrası için sırasıyla 2,24, 0,83 eV ve 196 k Ω olarak hesaplandı. $Au/Fe_3O_4/p-Si/Al$ diyodunun radyasyona bağlı idealite faktörü değerlerinin değişim

grafiki Şekil 4.42’de gösterilmiş olup, artan doz miktarı ile idealite faktörünün artışı net bir şekilde görülmektedir.

Işınlamalar sonrası Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun engel yüksekliğinin uygulanan doz miktarına göre değişimi Şekil 4.43’de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü artan doz miktarı ile engel yüksekliği değerinde artış meydana gelmiştir. Diyoda uygulanan doz miktarı ile engel yüksekliğinin artması Fe₃O₄/Si arayüzeyinde X ışının radyasyonu ile serbest taşıyıcı konsantrasyonunun değişiminin bir sonucudur (Mamor *et al.* 2007).

Au/Fe₃O₄/p-Si/Al diyodunun ışınlama dozuna bağlı olarak seri direnç değerlerindeki değişim Şekil 4.44’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere artan doz miktarı ile seri direnç değerleri artmaktadır. Uygulanan radyasyon sonrası seri dirençteki artış mobilitenin ve serbest taşıyıcı konsantrasyonunun azaldığını gösterir. Mobilitedeki azalma saçılma merkezi gibi davranan kusur merkezlerinden kaynaklanmaktadır (Arshak *et al.* 2004; Pattabi *et al.* 2007).

Genel olarak elde edilen bu veriler dikkate alındığında yarı metalik özelliğe sahip Fe₃O₄ nanoparçacıkları Schottky diyotlarda avantaj sağlayan bir malzeme olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Afandiyeva, I.M., Demirezen, S., Altındal, Ş., 2013. Temperature dependence of forward and reverse bias current-voltage characteristics in Al-TiW-PtSi/*n*-Si Schottky barrier diodes with the amorphous diffusion barrier. *Journal of Alloys and Compounds*, 552, 423-429.
- Akın, S., Özel, F., Kuş, M., Sönmezoğlu, S., 2014. Improvement in electrical performance of half-metallic Fe₃O₄/GaAs structures using pyrolyzed film as buffer layer. *Philosophical Magazine*, 94(23), 2678-2691.
- Akkaya, A., Esmer, L., Karaaslan, T., Çetin, H., Ayyıldız, E., 2014. Electrical characterization of Ni/Al_{0,09}Ga_{0,91}N Schottky barrier diodes as a function of temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 127-134.
- Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Tataroğlu, A., 2003. 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, 1847-1854.
- Arshak, K. and Karastyrskaya, O., 2004. Thick film oxide diode structures for personal dosimetry application. *Sensors and Actuators A*, 113, 319-323.
- Ateş, A., Güzeldir, B., Sağlam, M., 2011. ZnS thin film and Zn/ZnS/*n*-Si/Au-Sb sandwich structure grown with SILAR method and defining the characteristic parameters. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14, 28-36.
- Aydın, M.E. and Yakuphanoglu, F., 2012. Electrical characterization of inorganic-organic diode based InP and poly (3,4-ethylenedioxythiophene)/poly (strenesulfonate) (PEDOT:PSS). *Microelectronics Reliability*, 52, 1350-1354.
- Aydın, M.E., Soylu, M., Yakuphanoglu, F., Farooq, W.A., 2011. Controlling of electronic parameters of GaAs Schottky diode by poly (3,4 ethylenedioxythiophene)-block-poly (ethylene glycol) organic interlayer. *Microelectronic Engineering*, 88(6), 867-871.
- Aydoğan, Ş., 2003. Polimer/inorganik yarıiletken kontakların karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı *I-V* (Akım-Voltaj), *C-V* (Kapasite-Voltaj) ve *C-f* (Kapasite-frekans) ölçümlerinden tayin edilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aydoğan, Ş., İncekara, Ü., Deniz, A.R., Türüt, A., 2010. Extraction of electronic parameters of Schottky diode based on an organic Indigotindisulfonate Sodium (IS). *Solid State Communications*, 150, 1592-1596.
- Aydoğan, Ş., İncekara, Ü., Türüt, A., 2011. The effects of the Au/Anilineblue/*p*-Si/Al device. *Microelectronics Reliability*, 51, 2216-222.
- Bach, H., Krause, D., 1997. *Thin Films on Glass*, Springer, Heidelberg.
- Barış, B., Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., Karadeniz, S., 2013. Double barrier height in 5,6,11,12-tetraphenylnaphthacene (rubrene) based organic Schottky diode. *Synthetic Metals*, 180, 38-42.
- Beştaş, A.N., Yazıcı, S., Aktaş, F., Abay, B., 2014. Double Gaussian distribution of barrier height for FeCrNiC alloy Schottky contacts on *p*-Si substrates. *Applied Surface Science*, 318, 280-284.
- Blood, P. and Orton, J. W., 1992. *The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States*. Academic Press, 734, London.

- Bobby, A., Verma, S., Asokan, K., Sarun, P.M., Antony, B.K., 2013. Phase transition induced double-Gaussian barrier height distribution in Schottky diode. *Physica B*, 431, 6-10.
- Bohlin, K.E., 1986. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. *J. Appl. Phys.*, 60, 1223.
- Brillson, L. J., 1982. *Sur. Sci. Reports*, 2, 123.
- Brillson, L. J., 1993. *Contacts To Semiconductors*, Noyes Publications, New Jersey.
- Bronstein, L.M., Huang, X., Retrum, J., Schmucker, A., Pink, M., Stein, B.D., Dragnea, B., 2007. Influence of iron oleate complex structure on iron oxide nanoparticle formation. *Chemical Matter*, 19, 3624-3632.
- Chand, S. and Kumar, J., 1996. Evidence for the double distribution of barrier heights in Pd₂Si/*n*-Si Schottky diodes from *I-V-T* measurements. *Semiconductor Science and Technology*, 11(1), 1203-1208.
- Chand, S. and Kumar, R., 2014. Electrical characterization of Ni/*n*-ZnO/*p*-Si/Al heterostructure fabricated by pulsed laser deposition technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 613, 395-400.
- Chatelon, J.P., Terrier, C., Bernstein, E., Berjoan, R. Roger, J.A. 1994. Morphology of SnO₂ thin films obtained by the sol-gel technique. *Thin Solid Films*, 247, 162.
- Cheung, S.K. and Cheung, W.N., 1986. *Applied Physic Letters*, 49, 85.
- Cimilli, F.E., Sağlam, M., Efeoğlu, H., Türüt, A., 2009. Temperature-dependent current-voltage characteristics of the Au/*n*-InP diodes with inhomogeneous Schottky barrier height. *Physica B*, 404, 1558-1562.
- Cornell, R.M. and Schwertmann, U., 2003. *The iron oxides: structure properties, reactions, occurrences and uses*. Wiley VCH.
- Coşkun, C., Biber, M., Efeoğlu, H., 2003. Temperature dependence of current-voltage characteristics of Sn/*p*-GaTe Schottky diodes. *Applied Surface Science*, 211, 360-366.
- Czapla, A., Kusior, E., Bucko, M., 1989. Optical properties of non-stoichiometric tin oxide films obtained by reactive sputtering. *Thin Solid Films*, 182, 15.
- Çakar, M., Biber, M., Sağlam, M., Türüt, A., 2003. Conductance and Capacitance-Frequency characteristics of Polypyrrole/*p*-type silicon structures. *Journal of Polymer Science*, 41, 1334-1338.
- Çaldıran, Z., 2013. Au/Antrakinon/*p*-Si/Al Schottky diyodun temel karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı *I-V* (Akım-Voltaj) ve *C-V* (Kapasite-Voltaj) ölçümlerinden tayin edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Erzurum.
- Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Coşkun, F.M., Aydoğan, Ş., Yeşildağ, A., Ekinci, D., 2014. *I-V-T* (current-voltage-temperature) characteristics of the Au/Anthraquinone/*p*-Si/Al junction device. *Journal of Alloys and Compounds*, 584, 652-657.
- Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Şahin, Y., Metin, Ö., Meral, K., Aydoğan, Ş., 2013. The electrical characteristic of the Fe₃O₄/Si junctions. *Journal of Alloys and Compounds*, 552,437-442.
- Deniz, A.R., Çaldıran, Z., Metin, Ö., Can, H., Meral, K., Aydoğan, Ş., 2014. Schottky diode performance of an Au/Pd/GaAs device fabricated by deposition of monodisperse palladium nanoparticles over a *p*-type GaAs substrate. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 27, 163-169.

- Deniz, A.R., Çaldıran, Z., Şahin, Y., Şinoforoğlu, M., Metin, Ö., Meral, K., Aydoğan, Ş., 2013. The synthesis of the Fe₃O₄ nanoparticles and the analysis of the current-voltage measurements on Au/Fe₃O₄/p-Si Schottky contacts in a wide temperature range. *Metallurgical and Materials Transactions A*.
- Doğan, H. And Elagöz, S., 2014. Temperature-dependent electrical transport properties of (Au/Ni)/n-GaN Schottky barrier diodes. *Physica E*, 63, 186-192.
- Dökme, İ. and Altındal, Ş., 2006. On the intersecting behaviour of experimental forward bias current-voltage (*I-V*) characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes at low temperatures. *Semiconductor Science and Technology*, 21, 1053-1058.
- Dökme, İ., Altındal, Ş., Bülbül, M.M., 2005. The barrier height inhomogeneity in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer. *Applied Surface Science*, 252, 7749-7754.
- Duran, J.D.G., Arias, J.L., Gallardo, V., Delgado, A.V., 2008. Magnetic colloids as drug vehicles. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 97, 2948-2983.
- Duret, A. and Gratzel, M., 2005. Visible light-induced water oxidation on mesoscopic alpha-Fe₂O₃ films made by ultrasonic spray pyrolysis. *Journal of Physical Chemistry B*, 109(36), 17184-17191.
- Durmuş, P. And Yıldırım, N., 2014. Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Au/n-Si (111) Schottky barrier diodes at low temperatures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 27, 145-149.
- Ejderha, K., Yıldırım, N., Abay, B., Turut, A., 2009. Examination by interfacial layer and inhomogeneous barrier height model of temperature-dependent *I-V* characteristics in Co/p-InP contacts. *Journal of Alloys and Compounds*, 484, 870-876.
- Ejderha, K., Yıldırım, N., Türüt, A., Abay, B., 2010. Influence of interface states on the temperature dependence and current-voltage characteristics of Ni/p-InP Schottky diodes. *Superlattices and Microstructures*, 47, 241-252.
- El-Ghandour, H., Zidan, H.M., Khalil, M.M.H., Ismail, M.I.M., 2012. Synthesis and some physical properties of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 5734-5745.
- El-Zohary, S., Shenoshen, M.A., Allam, N.K., Okamoto, T., Haraguchi, M., 2013. Electrical characterization of nanopolyaniline/Porous silicon heterojunction at high temperatures. *Journal of Nanomaterials*, 568175
- Evans-Freeman, J.H., El-Nahass, M.M., Fong, A.A.M., Elhaji, A., 2011. Current transport mechanisms and deep level transient spectroscopy of Au/n-Si Schottky barrier diodes. *Microelectronic Engineering*, 88, 3353-3359.
- Fan, Z.W., Li, P., Zhang, L.T., Mi, W.B., Jiang, E.Y., Bai, H.L., 2012. Electrical transport properties and room-temperature positive magnetoresistance of Fe₃O₄/a-C/n-Si junctions. *Thin Solid Films*, 520, 3641-3646.
- Fiat, S., Bacaksız, E., Kompitses, M., Çankaya, G., 2014. Temperature and tellerium (Te) dependence of electrical characterization and surface properties for a chalcopyrite structured Schottky barrier diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 585, 178-184.
- Ghosh, S., Srivastava, N., Srivastava, P.C., 2014. Injecting electrode controlling electrode transport across Fe₃O₄ film-Si interfacial structure. *Journal of Alloys Compounds*, 612, 418-424.

- Ghosh S. and Srivastava P.C., 2014. Interface states of Fe₃O₄/Si interfacial structure and effect of magnetic field. *Journal of Electronic Materials*, 43,11.
- Glasscock, J.A., Barnes, P.R.F., Plumb, I.C., Bendavid, A., Martin, P.S., 2008. Structural, optical and electrical properties of undoped polycrystalline hematite thin films produced using filtered ARC deposition. *Thin Solid Films*, 516(8), 1716-1724.
- Gupta, R.K. and Yakuphanoglu, F., 2012. Photoconductive Schottky diode based on Al/p-Si/SnS₂/Ag for optical sensor applications. *Solar Energy*, 86(5), 1539-1545
- Gupta, R.K., Cavas, M., Al-Ghamdi, A.A., Gafer, Z.H., El-Tantawy, F., Yakuphanoglu, F., 2013. Electrical and photoresponse properties of Al/p-CuFeO₂/p-Si/Al MTCOS photodiode. *Solar Energy*, 92, 1-6.
- Güler, G., Güllü, Ö., Bakkaloğlu, Ö.F., Türüt, A., 2008. Determination of lateral barrier height of identically prepared Ni/n-type Si Schottky diodes by electrodeposition. *Physica B*, 403 (13-16), 2211-2214.
- Güllü, Ö., 2008. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Gülnahar, M., 2008. Doktora Tezi , Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Gülnahar, M., 2014. Temperature dependence of current-voltage and capacitance-voltage characteristics of an Au/4H-SiC Schottky diode. *Superlattices and Microstructures*, 76, 394-412.
- Güzel T, 2006. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Güzeldir, B., Sağlam, M., Ateş, A., 2012. Some electrical and structural properties of Cd/CdS/n-Si/Au-Sb sandwich structure. *Superlattices and Microstructures*, 52, 416-419.
- Hamdaoui, N., Ajjel, R., Salem, B., Gendry, M., 2014. Distribution of barrier heights in metal/n-InAlAs Schottky diodes from current-voltage-temperature measurements. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 431-437.
- Henisch, H. K., 1989. *Semiconductor Contacts, An approach to ideas and models.* Clarendon Press, Oxford.
- Hsu, J-H., Chen, S-Y., Chang, C-R., 2002. Anomalous positive magnetoresistance in Fe₃O₄-Ag composite films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 242-245, 479-481.
- Huang, W-C., Lin, T-C., Horng, C-T., Li, Y-H., 2013. The electrical characteristics of Ni/n-GaSb Schottky diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16, 418-423.
- Jyothi, I., Janardhanam, V., Reddy, V.R., Choi, C-J., 2014. Modified electrical characteristics of Pt/n-type Ge Schottky diode with a pyronine-B interlayer. *Superlattices and Microstructures*, 75, 806-817.
- Kaçuş, H., Deniz, A.R., Çaldıran, Z., Aydoğan, Ş., Yeşildağ, A., Ekinçi, D., 2014. The analysis of the current-voltage characteristics of the high barrier Au/Anthracene /n-Si MIS devices at low temperatures. *Materials Chemistry and Physics*, 143, 545-551.
- Karataş Ş., 2003. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Karataş, Ş. and Altındal, Ş., 2005. Analysis of *I-V* characteristics on Au/n-type GaAs Schottky structures in wide temperature range. *Materials Science and Engineering*, 122, 133-139.

- Karataş, Ş., Altındal, Ş., Çakar, M., 2005. Current transport in Zn/p-Si (100) Schottky barrier diodes at high temperatures. *Physica B*, 357, 386-397.
- Karataş, Ş. and Türüt, A., 2004. The determination of interface state energy distribution of the H-terminated Zn/p-type Si Schottky diodes with high series resistance by the admittance spectroscopy. *Vacuum*, 74(1), 45-53.
- Karataş, Ş. and Türüt, A., 2006. The determination of electronic and interface state density distributions of Au/n-type GaAs Schottky barrier diodes. *Physica B*, 381, 199-203.
- Karataş, Ş., Yıldırım, N., Türüt, A., 2013. Electrical properties and interface state energy distributions of Cr/n-Si Schottky barrier diode. *Superlattices and Microstructures*, 64, 483-494.
- Khurelbaater, Z., Kil, Y-H., Yun, H-J., Shim, K-H., Nam, J-T., Kim, K-S., Lee, S-K., Choi, C-J., 2014. Modification of Schottky barrier properties of Au/n-type Ge Schottky barrier diode using monolayer graphene interlayer. *Journal of Alloys and Compounds*, 614, 323-329.
- Korkut, H., Yıldırım, N., Turut, A., 2009. Thermal annealing effects on *I-V-T* characteristics of sputtered Cr/n-GaAs diodes. *Physica B*, 404, 4030-4044.
- Korucu, D. and Duman, S., 2013. Current-voltage-temperature characteristics of Au/p-InP Schottky barrier diode. *Thin Solid Films*, 531, 436-441.
- Korucu, D. and Turut, A., 2014. Temperature dependence of Schottky diode characteristics prepared with photolithography technique. *International Journal of Electronics*, (101)11, 1595-1606.
- Korucu, D., Türüt, A., Efeoğlu, H., 2013. Temperature dependent *I-V* characteristics of an Au/n-GaAs Schottky diode analyzed using Tung's model. *Physica B*, 144, 35-41.
- Kotan, Z., 2008. Al/P₂ClAn (C₂H₅COOH)/p-Si/Al yapılarında elektriksel parametrelerin sıcaklığa bağlılığı. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kumar, A., Vinayak, S., Singh, R., 2013. Micro-structural and temperature dependent electrical characterization of Ni/GaN Schottky barrier diodes. *Current Applied Physics*, 13(6), 1137-1142.
- Kumar, A.A., Rao, L.D., Reddy, V.R., Choi, C-J., 2013. Analysis of electrical characteristics of Er/p-InP Schottky diode at high temperature range. *Current Applied Physics*, 13, 975-980.
- Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Elst, L.V., Muller, R.N., 2008. Magnetic iron oxide nanoparticles. *Chemical Review*, 108, 2064-2110.
- Lee, D.K., Kim, Y.H., Zhang, X., Kong, Y.S., 2005. Preparation of monodisperse Co and Fe nanoparticle using precursor of M⁺²-Oleate₂. *Current Applied Physic*.
- Lee, K.M., Sorensen, C.M., Klabunde, K.J., 1992. Synthesis of characterization of stable colloidal Fe₃O₄ particles in water-in-oil microemulsions. *IEEE*, 7803-0637.
- Li, T., Yong, C., Rao, X., Xiao, F., Wong, J., Su, X., 2015. Synthesis of magnetically recyclable Fe₃O₄@NiO nanostructures for styreneepoxidation and adsorption application. *Ceramics International*, 41 (2), 2214-2220.
- Lin, Y-J. and Lin, J-H., 2014. Annealing effect on Schottky barrier inhomogeneity of graphene/n-type Si Schottky diodes. *Applied Surface Science*, 311, 224-229.

- Lu, A., Salabas, E.L., Schüth, F., 2007. Magnetic nanoparticles: synthesis protection functionalization and application. *Angew. Int. Ed.*, 46, 1222-1244.
- Mamor, M., Bouziane, K., Tirbiyine, A., Alhamrashdi, H., 2014. On the electrical characteristics of Au/*n*-type GaAs Schottky diode. *Superlattices and Microstructures*, 72, 344-351.
- Mamor, M., Sellai, A., Bouziane, B., Al Hanthi, S.H., Al Busaidi, M., Gard, F.S., 2007. Influence of He-ion irradiation on the characteristics of Pd/*n*-Si_{0.90}Ge_{0.10}/Si Schottky contacts. *Journal of Physics D; Applied Physics*, 40, 1351-1356.
- Manikandan, A., Durka, M., Antony, S.A., 2014. A novel synthesis, structural, morphological, and opto-magnetic characterizations of magnetically separable spinel Co_xMn_{1-x}Fe₂O₄ (0 ≤ x ≤ 1) nano-catalysts. *J. Supercond Nov. Magn.*, 27, 2841-2857.
- Master, R., Choudhary, R.J., Phase, D.M., 2013. Modifications in junction diode properties of ZnO/*p*-Si heterojunction by Fe₃O₄ intermediate layer. *Thin Solid Films*, 542, 76-80.
- Metin, Ö., Aydoğan, Ş., Meral, K., 2014. A new route for the synthesis of graphene oxide-Fe₃O₄ (GO-Fe₃O₄) nanocomposites and their Schottky diode applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 585, 681-688.
- Mott, N.F., 1938. Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 34, 518.
- Mtangi, W., Auret, F.D., Nyamhere, C., Janse van Rensburg, P.J., Diate, M., Chawanda, A., 2009. Analysis of temperature dependent *I-V* measurements on Pd/ZnO Schottky barrier diodes and the determination of the Richardson constant. *Physica B*, 404, 1092-1096.
- Neamen, D. A., 1992. *Semiconductors Physics and Devices*, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.
- Norde, H., 1979. A modified forward *I-V* plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 7(50), 5052.
- Ogawa, Y., Daisuke, A., Sutou, Y., Kaike, J., 2013. The electrical and optical properties of F-O-N thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Materials Transactions*, 54(10), 2055-2058.
- Oh, E., Lee, B.W., Kim, J.M., Lee, S.J., Oh, J.D.S., 2012. Optical characterization of GaAs-based spin light emitting diodes using Fe₃O₄ spin injectors. *Current Applied Physics*, 12(5), 1244-1247.
- Ohdomari, I. and Tu, K. N., 1980. Parallel Silicide Contacts., *J. Appl. Phys.* 51, 3735.
- Osiris, W.G., Farag, A.A.M., Yahia, I.S., 2011. Extraction of the device parameters of Al/P₃OT/ITO organic Schottky diode using *J-V* and *C-V* characteristics. *Synthetic Metals*, 161, 1079-1087.
- Ouennoughi, Z., Toumi, S., Weiss, R., 2015. Study of inhomogenities using *I-V-T* characteristics of Mo/4H-SiC Schottky diode. *Physica B*, 456, 176-181.
- Özerli, H., Karteri, İ., Karataş, Ş., Altındal, Ş., 2014. The current-voltage and capacitance-voltage characteristics at high temperatures of Au Schottky contact to *n*-type GaAs. *Materials Research Bulletin*, 53, 211-217.
- Özmen, Ö.T. and Yağlıoğlu, E., 2014. Electrical and interfacial properties of Au/P3HT:PCBM/*n*-Si Schottky barrier diodes at room temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 448-454.

- Panda, J., Banarjee, P., Noth, N.K., 2014. Electrical spin extraction and giant positive junction magnetoresistance in a $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{MgO}/n\text{-Si}$ magnetic diode like heterostructure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47 (41), 415103-415111.
- Park, J., An, K., Hwang, Y., Park, J., Noh, H., Kim, J., Park, J., Hwang, N., Hyeon, T., 2004. Ultra large-scale syntheses monodisperse monocrystals.
- Park, J., Lee, E., Hwang, N., Kong, M., Kim, S.C., Huang, Y., Park, J., Noh, H., Kim, J., Park, J., Hyeon, T., 2005. One-nanometer-scale size-controlled synthesis of monodisperse magnetic iron oxide nanoparticles. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 44, 2872-2877.
- Pattabi, M., Krishnan, S., Gonesh, Mathew, X., 2007. Effect of temperature and electron irradiation on the *I-V* characteristics of Au/CdTe Schottky diodes. *Solar Energy*, 81, 111-116.
- Peta, K.R., Park, B-G., Lee, S.T., Kim, M-D., Oh, J-E., 2012. Temperature-dependent electrical properties of (Pt/Au)/Ga-polarity GaN/Si (111) Schotkky diode. *Microelectronic Engineering*, 93, 100-104.
- Qin, H., Wong, C.M., Dong, Q.Q., Zhang, X., Ma, Z.Y., Han, Q.R., 2015. Preparation and characterization of magnetic Fe_3O_4 -chitosan nanoparticles loaded with isonizaid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 381, 120-126.
- Reddy, V.R. and Reddy, N.N.K., 2012. Current transport mechanisms in Ru/Pd/*n*-GaN Schottky barrier diodes and deep level defect studies. *Superlattices and Microstructures*, 52, 484-499.
- Reddy, V.R., 2014. Electrical properties and conduction mechanism of an organic-modified Au/NiPc/*n*-InP Schottky barrier diode. *Applied Physics A*, 116, 1379-1387.
- Reddy, V.R., 2014. Electrical properties of Au/polyvinylidene fluoride/*n*-InP Schottky diode with polymer interlayer. *Thin Solid Films*, 556, 300-306.
- Reddy, V.R., Janardhanam, V., Leem, C-H., Choi, C-H., 2014. Electrical properties and the double Gaussian distribution of inhomogeneous barrier heights in Se/*n*-GaN Schottky barrier diode. *Superlattices and Microstructures*, 67, 242-255.
- Reddy, V.R., Reddy, M.S.P., Kumar, A.A., Choi, C-J., 2012. Effect of annealing temperature on electrical properties of Au/polyvinyl alcohol *n*-InP Schottky barrier structure. *Thin Solid Films*, 520, 5715-5721.
- Reddy, V.R., Umapati, A., Rao, L.D., 2013. Effect of annealing on the electronic parameters of Au/poly (ethylmethacrylate)/*n*-InP Schottky diode with organic interlayer. *Current Applied Physics*, 13, 1604-1610.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., 1988. *Metal semiconductor contacts*. 2nd ed. Oxford University Press.
- Roca, A.G., Morales, M.P., Serna, M.P., 2006. Synthesis of monodispersed magnetite particles from different organometallic precursors. *C.J., IEEE Transactions on magnetics*, 42.
- Sağlam, M., Güzeldir, B., Ateş, A., Buğur, E., 2013. Temperature dependence of current-voltage characteristics of the Cd/CdS/*n*-GaAs/In sandwich structure. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74, 370-376.
- Sah, C., Noyce, R. N., Shockley, W., 1957. *Proc. IRE.*, 45, 1228.
- Sato, K., Yasamura, Y., 1985. Study of Forward *I-V* Plot for Schottky Diodes with Series Resistance. *J. Appl. Phys.*, 58(3), 3655.

- Schottky, W., 1938. The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers. *Z. Phys*, 113, 367-414.
- Schwertmann, U. and Cornell, R.M., 1991. Iron oxides in the laboratory: preparation and characterization. VCH, Weinheim, Cambridge.
- Shah, M., Sayyad, M.H., Karimov, Kh.S., Maroof-Tarif, M., 2010. Investigation of electrical properties of a surface-type Al/NiPc/Ag Schottky diode using *I-V* and *C-V* characteristics. *Physica B*, 405, 1188-1192.
- Sharma, S. and Periasamy, C., 2014. A study on the electrical characteristic of *n-ZnO/p-Si* heterojunction diode prepared by vacuum coating technique. *Superlattices and Microstructures*, 73, 12-21.
- Shen, X., Ge, Z., Pong, Y., 2015. Conjugating folate on superparamagnetic Fe₃O₄@Au nanoparticles using click chemistry. *Journal of Solid State Chemistry*, 222, 37-43.
- Shockley, W., Read, W. T., 1950. Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons. *Phys. Rev.*, 87, 835.
- Sing, A., 1985. Characterization of interface states at Ni/*n*CdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. *Solid-State Electronics*, 28(3), 223-232.
- Song, Y.P., Van Meirhaege, R.L., Laflere W.H., Cardon, F., 1986. 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), 223-232.
- Soylu, M., 2007. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Enstitüsü, Erzurum.
- Sullivan, J.P., Tuna, R.T., Pinto, M.R., Graham, W.R., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *Journal Applied Physics*, 70(7), 403-740.
- Sze, S. M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, Second Edition, John Wiley and Sons.
- Tataroğlu, A. and Altındal, Ş., 2006. Characterization of current-voltage (*I-V*) and capacitance-voltage-frequency (*C-V-f*) features of Al/SiO₂/*p*-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectroning Engineering*, 85, 582-558.
- Tataroğlu, A. and Altındal, Ş., 2008. The interface states analysis of the MIS structure as a function of frequency. *Microelectroning Engineering*, 85, 542-547.
- Teja, A.S. and Koh, P., 2008. Synthesis, properties and application iron oxide nanoparticles. *Progress in Crystal Growth and Characterization Materials*, 1-24.
- Temirci, C., 2000. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Tsiarapas, C., Girginodi, D., Georgoulas, N., 2014. Electrical characteristics and deep level traps study of Au/ZnO:H Schottky diodes. *Superlattices and Microstructures*, 75, 171-182.
- Tung, R. T., 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering R*, 35, 1-138.
- Tung, R.T., 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces. *General Theory Physical Review B*, 45, 13509.
- Tung, R.T., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. *Applied Physich Letter*, 83, 2821-2823.

- Türüt, A., Sağlam, M., Efeoğlu, H., Yalçın, N., Yıldırım, M., Abay, B., 1995. Interpreting the nonideal reverse bias C - V characteristics and importance of the dependence of Schottky barrier height on applied voltage. *Physica B*, 205, 41-50.
- Uğurel, E., Aydoğan, Ş., Şerifoğlu, K., Türüt, A., 2008. Effect of 6 MeV electron irradiation on electrical characteristics of the Au/ n -Si/Al Schottky diode. *Microelectronic Engineering*, 85, 2299-2303.
- Wang, S.B., Min, Y-L., Yu, S-H., 2007. *A. Chem. Soc.*
- Werner, J.H., and Gütter, H.H., 1991. Barrier inhomogenities at Schottky contacts. *Journal Applied Physich*, 69(3), 1522-1532.
- Yan, H., Zhang, M., Yan, H., 2009. Electrical transport, magnetic properties of the half-metallic Fe₃O₄-based Schottky diode. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321, 2340-2344.
- Yang, K., Kim, D.H., Dho, J., 2011. Schottky barrier effect on the electrical properties Fe₃O₄/ZnO and Fe₃O₄/Nb: SrTiO₃ heterostructures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(35), 355301-355306.
- Young, S.J., Chang, S.J., Ji, L.W., Meen, T.H., Hsiao, C.H., Liu, K.W., Chen, K.J., Hu, Z.S., 2011. Thermally stable Ir/ n -ZnO Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 88, 113-116.
- Yu. A. Y. C., Snow, E. H., 1968. Surface Effects on Metal-Silicon Contacts. *J. Appl. Phys.* 39, 3008.
- Yu-Long, J., Guo-Ping, R. U., Fang, L. U., Xin-Ping, Q. U., Bing-Zong, L. I., Wei, L. I., Ai-Zhen, L. I., 2002. Schottky Barrier Height Inhomogeneity of Ti/ n -GaAs Contact Studied by the I - V - T Technique. *Chin. Phys. Lett.*, 19(4), 553-556.
- Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., Gülveren, B., Şafak, H., Kuş, M., 2013. Electrical properties of Au/perylene-monoimide/ p -Si Schottky diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 577, 30-36.
- Zhang, X., Zhai, J., Yu, X., Ding, L., Zhang, W., 2013. Fabrication and characterization of flexible Ag/ZnO Schottky diodes on polyimide substrates. *Thin Solid Films*, 548, 623-626.
- Ziel, A., 1968. *Solid-state physical electronics*. Prentice-Hall, Inc., 7, 136-144, New Jersey.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Giresun'da doğdu. İlköğretimini ve orta öğretimini Bulancak'ta tamamladı. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Fizik öğretmenliği bölümünden mezun oldu. Mezun olduktan sonra yaklaşık bir yıl Bulancak'ta dershanede çalıştı. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda doktora başladı. 2010 yılında Araştırma Görevlisi oldu ve halen bu görevine devam etmektedir.