



**METAL (Au, Ni, Cr) / GO-Fe₃O₄ (NP)/ n-Si /Al
HETEROYAPILARIN ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK
İNCELENMESİ**

İlknur GÜMÜŞ

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Doktora Tezi

Fizik Ana Bilim Dalı

2022

(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

**METAL (Au, Ni, Cr) / GO-Fe₃O₄ (NP)/ n-Si /Al HETEROYAPILARIN ÜRETİMİ VE
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK
İNCELENMESİ**

(Fabrication and Investigation of Electrical Properties of Metal/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al
Heterojunctions Dependent on Temperature)

DOKTORA TEZİ

İlknur GÜMÜŞ

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Erzurum
Haziran, 2022

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**METAL (Au/Ni, Cr)/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al HETEROYAPILARIN ÜRETİMİ VE
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK
İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında, İlknur GÜMÜŞ tarafından hazırlanan bu çalışma, 08/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof.Dr. Cabir TEMİRCİ
Van Yüzyüncü Yıl Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Prof.Dr. Emre GÜR
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Doç.Dr. Mehmet YILMAZ
Atatürk Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Jüri Üyesi: Doç.Dr. Abdülkerim KARABULUT
Erzurum Teknik Üniversitesi

Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

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



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak **Prof.Dr. Şakir AYDOĞAN** danışmanlığında sunulan “**Metal (Au, Ni, Cr)/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroyapıların Üretimi ve Elektriksel Özelliklerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak İncelenmesi**” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	22	30
Materyal ve Yöntem	21	35
Bulgular	18	20
Tartışma	13	20
Tezin Geneli	24	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
İlknur GÜMÜŞ	Prof.Dr. Şakir AYDOĞAN
20.6.2022	20.6.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde yapılmıştır.

Doktora yaptığım süre boyunca çalışmanın her aşamasında tecrübesi ve birikimiyle her türlü desteğini eksik etmeyen hem akademik hem de eğitimci kişiliğiyle örnek aldığım, değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin hazırlanması ile ölçümlerin alınmasında ve tüm tez çalışmalarımda emeği geçen başta Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zakir ÇALDIRAN olmak üzere, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıza DENİZ ve Sayın Dr. Hatice KAÇUŞ'a ayrı ayrı teşekkür ederim. Tez hazırlama süresince yardımlarını esirgemeyen, her zaman teşvik ve desteğini gördüğüm yakın arkadaşım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Esra CİNAN'a da ayrıca teşekkür ederim.

Tezimde kullanmış olduğum GO-Fe₃O₄ nanoparçacıkların sentezlenmesinde emeği olan Sayın Prof. Dr. Önder METİN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Melike SEVİM'e teşekkür ederim.

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

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

İlknur GÜMÜŞ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

METAL (Au, Ni, Cr) / GO-Fe₃O₄ (NP)/ n-Si /Al HETEROYAPILARIN ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

İlknur GÜMÜŞ

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Amaç: Bu çalışmada farklı metaller (Au, Ni, Cr) kullanılarak üretilen Metal/GO-Fe₃O₄ Nanoparçacık (NP)/n-Si/Al heteroyapıların üretimi ve sıcaklığın bu aygıtların karakteristikleri üzerine etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Yöntem: GO-Fe₃O₄ nanoparçacıkların yapısal ve morfolojik özellikleri XRD, TEM, SEM ve FTIR kullanılarak karakterize edildi. Nanoparçacıklar kullanılarak üretilen aygıtların metal/n-Si Schottky diyoduna göre daha iyi performans sergilediği görüldü. Ayrıca heteroeklemlerden Cr ile üretilen aygıtın daha iyi performans gösterdiği görüldü. Her üç metalle üretilen aygıtların geniş sıcaklık aralıklarında I-V (akım-voltaj) ve C-V (kapasite-voltaj) ölçümleri alındı. Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde fonksiyonları gibi farklı metotlarla, I-V ölçümlerinden idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi bazı temel diyot parametreleri hesaplandı.

Bulgular: Bu parametrelerin sıcaklığa bağlılığı incelendiğinde, her üç aygıt için de artan sıcaklıkla engel yüksekliğinin arttığı ve idealite faktörünün ise azaldığı gözlemlendi. Bu durum eklem bölgesindeki homojensizliğe atfedildi. Seri direncin ise Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemi için artan sıcaklıkla azaldığı, Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemleri için ise artan sıcaklıkla az miktarda arttığı gözlemlendi. Dirençteki değişimler taşıyıcı konsantrasyonunun durumuna atfedildi. Ayrıca, C-V ölçümlerinden Fermi enerji seviyesi, difüzyon potansiyeli, taşıyıcı konsantrasyonu ve engel yüksekliği gibi diyot parametreleri hesaplandı. Artan sıcaklıkla Fermi enerji seviyesinin artması ve difüzyon potansiyelinin azalması arayüzeydeki tuzaklara atfedildi. Sıcaklık artışıyla engel yüksekliğinin Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemi için artması engelin homojensizliği, Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemleri için azalması heteroeklemlerin bant aralığının azalmasıyla açıklandı.

Sonuç: Genel olarak her üç metalle üretilen aygıtların termoelektrik özelliklerinden termal sensör uygulama potansiyeli olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Heteroeklem, GO-Fe₃O₄ Nanoparçacık, metal/nanoparçacık/yarıiletken.

Haziran 2022, 138 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

FABRICATION and INVESTIGATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF METAL/GO-Fe₃O₄ (NP)/n-Si/Al HETEROJUNCTIONS DEPENDENT ON TEMPERATURE

İlknur GÜMÜŞ

Supervisor: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Purpose: In this study, the fabrication of metal/GO-Fe₃O₄ nanoparticles (NPs)/n-Si/Al heterostructures produced using different metals (Au, Ni, Cr) and the effects of temperature on the characteristics of these devices were investigated in detail.

Method: The structural and morphological properties of GO-Fe₃O₄ nanoparticles were characterized using XRD, TEM, SEM and FTIR. It was observed that the devices produced using nanoparticles performed better than the Metal/n-Si Schottky diode. In addition, it was observed that the device produced with Cr gave better performance with respect to the others. The current-voltage (I-V) and capacity-voltage (C-V) measurements were performed at wide temperature ranges for fabricated with three metals. Some basic diode parameters such as ideality factor (n), barrier height (Φ_b) and series resistance (R_s) were calculated from the I-V measurements with different methods such as Thermionic Emission, Cheung and Norde functions.

Findings: When the dependence of these parameters on temperature was examined, it was observed that the barrier height increased and the ideality factor decreased with increasing temperature for all three devices. This situation was attributed to the inhomogeneity of the junction. On the other hand, the series resistance decreased with increasing temperature for Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heterojunction, while it slightly increased with the temperature for Cr/GO-Fe₃O₄ (NP) /n-Si/Al and Ni/GO-Fe₃O₄ (NP) /n-Si/Al heterojunctions Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al and Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al for heterojunctions. These changes in resistance were attributed to the state of carrier concentration. In addition, diode parameters such as Fermi energy level, diffusion potential, carrier concentration and barrier height were calculated from the C-V measurements. The increase in Fermi energy level and decrease in diffusion potential with increasing temperature were attributed to traps at the interface. The increase in the barrier height for the Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heterojunction with the temperature increase was attributed the inhomogeneity of the barrier, while decrease in the barrier with temperature for Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al and Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al devices was explained by the reduction of the band gap of the heterojunctions.

Results: In general, it was seen that the thermoelectric properties of the devices produced with all three metals have the potential to apply thermal sensors.

Keywords: Heterojunction, GO-Fe₃O₄ nanoparticle, metal/nanoparticle/semiconductor.

June 2022, 138 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	9
Giriş.....	9
Metal/n-Tipi Yarıiletken Kontaklar	9
Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar	9
Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar	12
Difüzyon Teorisi	13
Tükenim bölgesinde taşıyıcı oluşması (Jenerasyon) ve tekrar birleşmesi (Rekombinasyon)	14
Termiyonik Emisyon ve Akım-Voltaj Karakteristiği	15
Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Heteroeklem Karakteristiklerinin İncelenmesi	17
Norde Modeline Göre Heteroeklem Karakteristiklerinin İncelenmesi	18
C-V (Kapasite – Gerilim) Karakteristikleri	19
Heteroeklemler	20
GO-Fe ₃ O ₄ Nanoparçacıkların Yapısal ve Elektriksel Özellikleri	22
MATERYAL ve YÖNTEM	27
Giriş.....	27
n-Si Kristallerinin Temizlenmesi ve Numunelerin Hazırlanması	27
GO- Fe ₃ O ₄ Nanoparçacıkların Sentezi	28
Heteroeklemlerin Üretimi.....	29
Deney ve Ölçüm Sistemleri	32
ARAŞTIRMA BULGULARI	34
Giriş.....	34
Filmlerin Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi	34

GO- Fe ₃ O ₄ (NP) ince filminin enerji bant aralığının belirlenmesi.....	34
XRD (X-Işını kırınımı) desenleri	36
SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri ve TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu).....	37
FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi).....	38
I-V (Akım -Voltaj) Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanımı	39
I-V (Akım-Voltaj) Ölçümlerinde Norde Fonksiyonlarının Kullanılması	75
Arayüzey Hal Yoğunluğu (Nss).....	81
C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri.....	84
TARTIŞMA VE SONUÇ	96
Sıcaklığa Bağlı I-V Ölçümleri.....	96
Sıcaklığa Bağlı C-V Ölçümleri.....	102
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	119

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Demir Oksitlerin Fiziksel ve Manyetik Özellikleri	24
Tablo 2. Numunelere Ait Simgeler	34
Tablo 3. Oda Sıcaklığında Aynı Şartlar Altında Hazırlanmış Referans, R_1 , R_2 ve R_3 ile D_1 , D_2 ve D_3 Heteroeklemlerine Ait I-V Grafiklerinden Geleneksel Metotla Elde Edilen n ve Φ_b Değerleri	42
Tablo 4. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait Sıcaklığa Bağlı I-V Grafiklerinden Geleneksel Metot ve Cheung Fonksiyonlarından Elde Edilen Temel Diyot Parametreleri.....	55
Tablo 5. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait Sıcaklığa Bağlı I-V Grafiklerinden Geleneksel Metot ve Cheung Fonksiyonlarından Elde Edilen Temel Diyot Parametreleri	57
Tablo 6. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait Sıcaklığa Bağlı I-V Grafiklerinden Geleneksel Metot ve Cheung Fonksiyonlarından Elde Edilen Temel Diyot Parametreleri	59
Tablo 7. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait $[(1/n)-1]$ ve Engel Yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye Karşı Değişim Grafiklerinden Elde Edilen Engel Yüksekliği, Standart Sapma ve Voltaj Katsayıları	68
Tablo 8. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait $[(1/n)-1]$ ve Engel Yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye Karşı Değişim Grafiklerinden Elde Edilen Engel Yüksekliği, Standart Sapma ve Voltaj Katsayıları	69
Tablo 9. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait $[(1/n)-1]$ ve Engel Yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye Karşı Değişim Grafiklerinden Elde Edilen Engel Yüksekliği, Standart Sapma ve Voltaj Katsayıları	70
Tablo 10. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroekleminin Norde Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Temel Parametreleri	76
Tablo 11. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroekleminin Norde Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Temel Parametreleri	77
Tablo 12. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroekleminin Norde Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Temel Parametreleri	78
Tablo 13. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroekleminin 500 kHz Frekans Değerinde Sıcaklığa Bağlı $1/C^2$ -V Grafiklerinden Elde Edilen Temel Parametreler	88
Tablo 14. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroekleminin 500 kHz Frekans Değerinde Sıcaklığa Bağlı $1/C^2$ -V Grafiklerinden Elde Edilen Temel Parametreler	89

Tablo 15. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/ <i>n</i> -Si/Al Heteroekleminin 500 kHz Frekans Değerinde Sıcaklığa Bağlı 1/C ² -V Grafiklerinden Elde Edilen Temel Parametreler.....	90
---	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Kontakdan önce metal ve n -tipi yarıiletken için enerji-bant diyagramları.....	10
Şekil 2. Kontakdan sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı	10
Şekil 3. Doğru beslem altında metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı.....	11
Şekil 4. Ters beslem altında metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı.....	12
Şekil 5. $\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal/ n -tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji bant diyagramı a) kontakdan önce, b) kontakdan sonra, c) düz beslem altında, d) ters beslem altında.....	13
Şekil 6. Geniş bant aralığı ve dar bant aralığı enerjileri arasındaki ilişki a) Üst üste binen b) kademeli c) kırık boşluk.....	21
Şekil 7. n - p heteroeklemin bant yapısının kontakdan önceki (a) ve kontakdan sonraki (b) enerji bant diyagramı	22
Şekil 8. Grafenin şematik olarak görünümü (Sarier 2018)	23
Şekil 9. Grafen ve grafen oksit yapısı	23
Şekil 10. Manyetit yapısı.....	25
Şekil 11. Grafen oksit yapısındaki fonksiyonel gruplara bağlı manyetit (Fe_3O_4) yapısının temsili gösterimi.....	26
Şekil 12. Grafitten grafen oksit eldesinin şematize edilmesi	28
Şekil 13. GO'nun Fe_3O_4 ile birleşimi	29
Şekil 14. VAKSİS termal buharlaştırma ünitesi	30
Şekil 15. Tavlama fırını.....	30
Şekil 16. VAKSİS sputtering cihazı.....	31
Şekil 17. Au/GO- Fe_3O_4 (NP) / n -Si/Al aygıtının şematik diyagramı.....	32
Şekil 18. Cr/GO- Fe_3O_4 (NP) / n -Si/Al aygıtının şematik diyagramı	32
Şekil 19. Ni/GO- Fe_3O_4 (NP) / n -Si/Al aygıtının şematik diyagramı	32
Şekil 20. Akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçüm sistemleri	33
Şekil 21. LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi ve kriostat	33
Şekil 22. GO- Fe_3O_4 nanoparçacıklarının UV-Vis spektrumu.....	35
Şekil 23. GO- Fe_3O_4 nanoparçacıklarının oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı değişim grafığı (a) Dolaylı bant aralığı için, (b) doğrudan bant aralığı için.....	35
Şekil 24. GO- Fe_3O_4 nanoparçacıkların XRD deseni.....	36
Şekil 25. GO- Fe_3O_4 nanoparçacıkların Literatürdeki XRD deseni (Neolaka <i>et al.</i> 2020).....	37

Şekil 26. GO-Fe ₃ O ₄ (NP)'nın SEM (a) ve TEM (b) görüntüleri	38
Şekil 27. GO- Fe ₃ O ₄ (NP)'nın FTIR spektrumu	38
Şekil 28. Metal/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Metal yapısının enerji-bant diyagramı	40
Şekil 29. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış referans Au/n-Si/Al ve Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemlerine ait I-V grafikleri	40
Şekil 30. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış referans Cr/n-Si/Al ve Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemlerine ait I-V grafikleri	41
Şekil 31. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış referans referans Ni/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemlerine ait I-V grafikleri	41
Şekil 32. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al, Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemlerine ait I-V grafikleri.....	43
Şekil 33. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı I-V grafikleri.....	44
Şekil 34. Cr/GOFe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı I-V grafikleri.....	45
Şekil 35. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı I-V grafikleri	46
Şekil 36. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemi için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	47
Şekil 37. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemi için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	48
Şekil 38. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemi için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği	48
Şekil 39. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al, Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemleri için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri	49
Şekil 40. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al, Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al heteroeklemleri için geleneksel metotla hesaplanmış engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri	50
Şekil 41. Farklı düz beslem akımlar için sıcaklığa karşı düz beslem voltaj grafikleri; (a) Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al, (b) Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al, (c)Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al. Farklı ters beslem voltajları için sıcaklığa karşı akım grafikleri; (d) Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al, (e) Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al, (f) Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al yapıları için.	51
Şekil 42. Düz beslem akımlara karşı sıcaklık hassasiyeti grafikleri; (a) Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al, (b) Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al, (c)Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP) /n-Si/Al	52

Şekil 43. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ -I grafikleri.....	54
Şekil 44. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ -I grafikleri	54
Şekil 45. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ -I grafikleri.....	56
Şekil 46. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ -I grafikleri	56
Şekil 47. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ -I grafikleri.....	58
Şekil 48. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ -I grafikleri	58
Şekil 49. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	60
Şekil 50. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	60
Şekil 51. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	61
Şekil 52. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al, Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemlerinin Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	61
Şekil 53. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	62
Şekil 54. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	62
Şekil 55. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	63
Şekil 56. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al, Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemlerinin Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	63
Şekil 57. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri	64

Şekil 58. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri	65
Şekil 59. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri	65
Şekil 60. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait [(1/n)-1] ve engel yüksekliğinin 1/2kT'ye karşı değişim grafikleri.....	68
Şekil 61. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait [(1/n)-1] ve engel yüksekliğinin 1/2kT'ye karşı değişim grafikleri.....	69
Şekil 62. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al Heteroeklemine ait [(1/n)-1] ve Engel Yüksekliğinin 1/2kT'ye Karşı Değişim Grafikleri	70
Şekil 63. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait ln(I ₀ /T ²)'nin 1000/T 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği	72
Şekil 64. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait ln(I ₀ /T ²)'nin 1000/T 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği	73
Şekil 65. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait ln(I ₀ /T ²)'nin 1000/T 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği	73
Şekil 66. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al, Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemlerinin T ₀ anomalisini gösteren T'nin bir fonksiyonu olarak nT grafiği.....	74
Şekil 67. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı F(V)-V grafikleri	76
Şekil 68. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı F(V)-V grafikleri	77
Şekil 69. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı F(V)-V grafikleri	78
Şekil 70. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al, Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroeklemlerinin Norde fonksiyonundan elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri	79
Şekil 71. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin TE, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	80
Şekil 72. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin TE, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	80
Şekil 73. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin TE, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri.....	81

Şekil 74. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri	83
Şekil 75. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri	83
Şekil 76. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri	84
Şekil 77. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı C-V grafikleri	85
Şekil 78. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı C-V grafikleri	86
Şekil 79. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı C-V grafikleri	86
Şekil 80. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı 1/C ² -V grafikleri	87
Şekil 81. Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı 1/C ² -V grafikleri	88
Şekil 82. Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı 1/C ² -V grafikleri	89
Şekil 83. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı difüzyon potansiyeli grafikleri	91
Şekil 84. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı donör yoğunluğu grafikleri	92
Şekil 85. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı fermi enerjisi grafikleri	93
Şekil 86. Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı engel yüksekliği grafikleri	94

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
C	Kapasite
$D1$	Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al
$D2$	Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al
$D3$	Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al
D_n	Elektron difüzyon sabiti
e	Elektronun yükü
E_c	İletkenlik bandının tabanı (minimumu)
E_v	Valans bandının tepesi(maksimumu)
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_{fm}	Metalin fermi enerji seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
E_{ss}	Arayüzey hallerinin enerjisi
h	Planck sabiti
J	Akım yoğunluğu
J_{SD}	Doyum akım yoğunluğu
J_{sT}	Ters-doyma akım yoğunluğu
J_g	Jenerasyon akımı
k	Boltzmann sabiti
n	İdealite faktörü
n_i	Asal taşıyıcı yoğunluğu
N_0	Termal denge durumunda n-tipi bir yarıiletkendeki taşıyıcı yoğunluğu
N_a	Akseptör yoğunluğu
N_c	İletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu
N_d	Donor yoğunluğu
NP	Nanoparçacık
N_{ss}	Arayüzey hal yoğunluğu
R_s	Seri direnç
T	Sıcaklık
I	Akım
I_0	Doyma akımı

V_d	Difüzyon potansiyeli
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Arayüzeyin dielektrik sabiti
Φ_{ap}	Görülen engel yüksekliği
Φ_b	Schottky engel yüksekliği
$\bar{\Phi}_b$	Ortalama engel yüksekliği
$\bar{\Phi}_{b0}$	Sıfır beslem ortalama engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
σ_s	Standart sapmasını
σ_{s0}	Sıfır beslem standart sapması
ρ_2	Ortalama engel yüksekliğinin voltaj katsayısı
ρ_3	Standart sapmanın voltaj katsayısı
δ	Arayüzey tabakasının kalınlığı
τ	Zaman sabiti
w	Uzay yükü bölgesinin genişliği
μ	Elektron mobilitesi

Kısaltmalar

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
ALD	Atomik katman biriktirme
C-V	Kapasite-gerilim
FCC	Yüzey merkezli kübik yapı
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
IC	Entegre Devre (Tümleşik Devre)
I-V	Akım-Gerilim
G-V	İletkenlik-Voltaj
LED	Işık Yayan Diyot
SCLC	Space Charge Limited Current
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TE	Termiyonik Emisyon
MOS	Metal -Oksit- Yarıiletken
MOSFET	Metal -Oksit- Yarıiletken alan etkili transistör
MIS	Metal-yalıtkan-yarıiletken
MY	Metal-yarıiletken
MPY	Metal-Polimer -Yarıiletken
NP	Nanoparçacık
XRD	X-ışını kırınımı
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu

GİRİŞ

Yarıiletkenler insanoğlunun yaptığı en önemli buluşlardan biridir. Yarıiletken teknolojisine olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Son yıllarda organik maddelerle yarıiletkenler birlikte kullanılarak, optik sensörler, güneş pili ve organik LED'ler gibi olumlu sonuçlar alınan aygıtlar yapılmıştır. Yarıiletken malzemelerin savunma sistemlerinden cep telefonu, uydu sistemlerine kadar birçok uygulama alanı vardır. Günümüzde Schottky diyotlar, dedektörler ve mikrodalga sistemler gibi yüksek frekanslı sistemler ile bilgisayar ve radyo frekans devreleri gibi yüksek anahtarlama hızına ihtiyaç duyan devrelerde genellikle doğrultma amacıyla kullanılır.

Elektronik sistemlerde diyotlarla, alternatif akımı doğru akıma çevirme işlemi “doğrultma” olarak adlandırılır. Metal-yarıiletken kontaklarda doğrultma işlemi yarıiletken tarafında oluşan uzay yükü bölgesinin uygulanan gerilim ile lineer olmayan bir davranış sergilemesi sonucunda oluşmaktadır. Braun, 1874'de metal-yarıiletken doğrultucu sistemler üzerine ilk araştırmayı yaparak toplam direncin yüzey durumlarına ve uygulanan gerilim polaritesine bağlı olarak değiştiğini ifade etmiştir (Braun, 1874). Metal-yarıiletken (MY) kontak diyotlarda doğrultma olayını ise 1938 yılında Schottky ve Mott açıklamıştır (Aydoğan 2011).

Wilson, Kuantum mekaniğinin de gelişmeye başladığı 1932 yılında doğrultma olayını kuantum mekaniksel tünelleme yoluyla açıklamaya çalışmış fakat; bu yolla kolay akım akışının yönünü yanlış belirlediğini daha sonra anlamıştır (Wilson 1931).

1938 yılında hem Mott hem de Schottky, doğrultmanın gözlenen yönünü elektronların potansiyel engeli üzerinden difüzyon ve sürüklenme ile geçiş yaptıklarını dile getirerek açıklamışlardır.

Schottky diyotlar veya Schottky kontaklar da denilen metal-yarıiletken doğrultucu kontaklardan ilk nokta kontak olarak da isimlendirilen metal-yarıiletken diyotlar, yarıiletken yüzeyine metal bir telin dokundurulması ile yapıldı. Nokta kontak diyotlarının en gelişmiş Schottky kontak diyotlarıdır. Schottky kontak diyotlar, nokta kontak diyotlara göre daha düşük seri dirence, daha yüksek güç kapasitesine ve daha düşük gürültü karakteristiğine sahiptir. Schottky kontak diyotların fabrikasyonlarının kolaylığı ve karakteristik özelliklerinin büyük ölçüde bilinmesi önemlerinin artmasını sağlamıştır. Ancak, MY diyotlar mekanik olarak güven vermediğinden 1950'lerde $p-n$ eklem diyotlara yönelim olmuştur.

Yapısal olarak p-n eklemi ve Schottky diyot birbirinden farklıdır. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcılarıyla, p-n eklemde akım azınlık taşıyıcılarıyla sağlanır. Schottky kontaklar düşük gerilim, yüksek akım doğrultucuları olarak çalışırken, p-n eklemi yüksek gerilim, düşük akım doğrultucuları olarak çalışmaktadır. Schottky yapıların anahtarlama hızlarının yüksek olması IC (Integrated Circuit -Tümleşik Devre) teknolojisi için avantajlı bir durumdur. 1950 ve 1960’larda yüksek vakum sistemlerinde metal filmlerin buharlaştırılmasıyla oluşturulan kontakların, nokta-kontaklara göre çok daha verimli oldukları anlaşılmış ve 1960’lı yıllarda Metal-Yarıiletken Schottky kontaklarla ilgili çalışmalar yoğunluk kazanmıştır (Rideout 1978; Rhoderick 1988). Günümüzde vakum teknolojisi kullanılarak yeniden üretilen ve güvenilir metal-yarıiletken kontaklar üretilmektedir.

Şekil 1’deki gibi metal ve yarıiletkenin temasıyla oluşturulan metal-yarıiletken kontaklarda yarıiletken ile metal arasında yük geçişleri oluşmaktadır. Şekil 2’de görüldüğü gibi yarıiletkenden metale, metalden yarıiletkene elektron geçişi termal denge sağlanana dek sürer. Bu durumda metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşit olur. Böylece MY ara yüzeyinde gerçekleşen yeniden bir yük dağılımıyla potansiyel engeli oluşur.

Yarıiletken tarafında, hareketli yüklerin bulunmadığı ve direnci yüksek bölgeye arayüzey bölgesi denir. Metal-yarıiletken (MY) arayüzeyinde bir potansiyel engelinin oluştuğu ilk kez Walter Schottky (1874) tarafından dile getirilmiştir. Daha sonra Mott, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının farklı olması sebebiyle eklemde böyle bir potansiyelin oluştuğunu açıklamıştır. Böylece Schottky-Mott teorisinde potansiyel engelinin metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığı ifade edilmiştir (Sharma 1984).

Metal-yarıiletken Schottky diyotların arayüzey özelliklerinin bilinmesi, kontak parametrelerini ciddi derecede etkilediği için devre elemanlarının üretiminde son zamanlarda oldukça önem kazanmıştır. Çeşitli elektriksel özellikleri bulunan daha kararlı Schottky diyotlar imal etmek için farklı kalınlıkta, çeşitli arayüzey tabakaları kullanılmaya başlanmıştır.

Son yıllarda Schottky diyotlarda önemli bir parametre olan Schottky engel yüksekliğinin arttırılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Metal ve yarıiletken arasının çok ince bir arayüzey tabaka ile kaplanmasıyla, metal ve yarıiletken birbirinden ayrılır ve yük geçişleri düzenli hale gelir. Kaplanan arayüzey tabakası yüzeyi pasivize ederek, sızıntı akımını en aza indirir ve böylece diyodun doğrultma özelliğine katkı sağlar.

Arayüzey tabakasını kaplamak için püskürtme, buharlaştırma, kimyasal biriktirme, saçtırma ve sol-jel yöntemleri gibi ince film büyütme yöntemleri kullanılmaktadır (Czapla *et al.* 1989; Chatelon *et al.* 1994; Bach and Krause 1997). Bu yöntemlerin her birinin kendine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri vardır. Örneğin bu yöntemlerden; sol-jel yöntemi ile

oluşturulan ince filmlerin optik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin tayini daha kolay yapılmakta ve daha nitelikli filmler elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntemde kullanılan düzeneğe daha ekonomiktir.

Heteroeklem, yasak enerji aralığı ve kristal yapısı birbirinden farklı iki yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile oluşan eklem türüdür. Heteroeklemler; eklem yapısına göre ani ve kademeli eklem olarak sınıflandırılırken, birleştirilen yarıiletkenlerin iletim tipine göre ise izotip ve anizotip eklem olarak adlandırılırlar. Ani eklemlerde bir yarıiletkendeki diğerine geçiş mesafesi $\leq 1 \mu\text{m}$ iken, kademeli eklem türünde geçiş mesafesi ani eklemlere göre daha fazladır. İletim tipleri aynı olan yarıiletkenlerin oluşturduğu eklem izotip heteroeklem denirken, farklı iletim tipine sahip yarıiletkenlerden oluşan heteroekleme anizotip heteroeklem denir (Sharma and Purohit 1974).

Heteroeklemler, farklı yarıiletkenlerin teknolojik olarak avantajlı kombinasyonlarının kullanımına imkan tanıyarak, genellikle tek bir yarıiletkenle elde edilemeyen özelliklere ulaşmamızı sağlar. Ayrıca heteroyapıların kullanımı, yarıiletken cihazların elektronik ve optoelektronik özelliklerini kontrol edebilmek için etkili bir yoldur (Sönmezoğlu 2011). Heteroeklemler optoelektronik aygıtlarda, enerji ve potansiyel değişimlerini kontrol ederek yük iletim denetimini sağlar (Kaplan *et al.* 2019).

Heteroeklemlerde ara yüzeylerin incelenmesi ve heteroeklemlerin I - V (akım-gerilim) davranışlarının daha iyi yorumlanabilmesi için birçok bilimsel araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmalar ile ideal I - V karakteristiği davranışlarına yaklaşan yarıiletken diyotların, transistörlerin oluşturulması amaçlanırken, daha uzun ömürlü ve daha hızlı anahtarlama yapabilme özelliği olan yapıların elde edilmesi gibi avantajlı durumlar istenmektedir.

Son yıllarda araştırmacılar arayüzey malzemesi olarak organik yarıiletken malzeme kullanımıyla Schottky kontakların elektriksel özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapmaktadır (Bartolomeo *et al.* 2016; Pathak *et al.* 2018; Chaudhary *et al.* 2019). Özellikle organik yarıiletkenlerin baskı ve spin kaplama gibi tekniklerle bir defada daha çok ve daha ucuz maliyetle üretilibilmeleri ve esnek olmaları gibi birçok özelliği araştırmacıları cezbetmiştir (Güllü ve ark., 2010). Elektronik malzemelerde aktif bileşenler olarak kullanılmaları gibi özellikleri sayesinde elektronik ve optoelektronik aygıt uygulamalarında organik yarıiletkenler sıkça kullanılmaktadır (Yahia *et al.* 2012).

Çaldıran *et al.* (2013), Au/Anthracene/ n -Si/Al yapısının I - V ve C - V (kapasite- voltaj) ölçümlerini alarak elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. C - V ölçümlerinden uygulanan frekansa bağlı olarak engel yüksekliğini (Φ_b) 0,92 eV-1,10 eV olarak bulmuşlardır. I - V ölçümlerinden Cheung metoduyla engel yüksekliği 0,83 eV; R_s (seri direnç) ise 59 k Ω olarak

bulunmuş olup, Norde metoduna göre ise engel yüksekliği 0,88 eV ve seri direnç 68 k Ω olarak hesaplanmıştır. C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin akım-voltaj ölçümlerinden farklı olması Au/Anthracene/n-Si/Al Schottky engelinde farklı özelliklere sahip I-V ve C-V tekniklerine atfedilmiştir. Bu çalışma Au/n-Si Schottky kontaklarının engel yüksekliklerini arttırmak için Au ve n-Si arasındaki Antrasen ince filmlerin kullanılabileceğini göstermiştir.

Kaçuş *et al.* (2014), Au/Anthracene/n-Si/Al MIS yapısının 140 K-300 K aralığında 20 şer Kelvin lik aralıklarla I-V ölçümleri alınmış, engel yüksekliği ve idealite faktörü (n) sırasıyla, 140 K'de 0,43 eV ile 3,00; 300 K'de 0,85 eV ve 1,88 arasında değiştiğini bulmuşlardır. Sıcaklık artışıyla engel yüksekliğinin arttığını, idealite faktörünün azaldığını gözlemlemişlerdir. Aktivasyon enerjisini 0,24 eV ve Richardson sabitini $7,57 \times 10^{-6} \text{cm}^{-2} \text{K}^{-2}$ olarak hesaplamışlardır. Sıcaklık düşmesiyle seri direnç artışını, düşük sıcaklıklara serbest taşıyıcı konsantrasyonunun az olmasına bağlamışlardır.

Akhlaghi *et al.* (2018), çalışmalarında Al/Cu-PVA/p-Si yapısı için (100) yönelimli, yaklaşık olarak 300 μm kalınlığında ve 1–10 $\Omega \text{ cm}$ öz direnci olan tek kristalli p-katkılı (p-Si) alttaş kullanmışlardır. Ayrıca Al/p-Si yapılarını da üretim oda sıcaklığında I-V ve C/G-V (kapasite/iletkenlik-voltaj) ölçümlerini kullanarak polimer tabakasının elektriksel özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ters doyma akımı, idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla MY için, $6,6 \times 10^{-10} \text{A}$; 3,67 ve 0,84 eV; Metal-polimer -yarıiletken (MPY) için, $1,82 \times 10^{-8} \text{A}$; 4,18 ve 0,76 eV olarak hesaplamışlardır. MPY yapısı MY yapısına kıyasla düşük sızıntı akımına sahip olduğundan iyi bir doğrultucu kontak özelliği gösterir. İki yapı için yüksek n değerleri Al/p-Si daki engel homojensizliğine, (Cu-PVA) /p-Si arayüzeyinde yoğunluk dağılımına (Nss) ve doğal SiO₂ tabakasının varlığına atfetmişlerdir. (Cu-PVA) polimer arayüzey tabakası MY yapısının performansını geliştirerek, iletim mekanizmasını önemli ölçüde değiştirdiğinden geleneksel MY yerine kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Aslan *ve ark.* (2015), tarafından yapılan çalışmada Al/CuPc/p-InP/Au-Zn diyodu için TE (termiyonik emisyon) teorisi ile engel yüksekliği değerini 1,03 eV, idealite faktörünü ise 1,52 olarak hesaplamışlardır. Diyodun idealite faktörünün 1'den büyük çıkmasını seri direnç etkisine, kullanılan ara tabakanın varlığına ve ara yüzey durumlarına dayandırmışlardır. Al/CuPc/p-InP/AuZn diyodunun $\ln I-V$ grafiğinin yüksek voltajlarda doğrusallıktan sapması da seri direnç etkisine atfedilmiştir. Norde metoduyla, $\ln I-V$ grafiğinin doğrusal olmayan kısmından faydalanılarak, sırasıyla seri direnç ve engel yüksekliği değerleri, 321 Ω ve 1,26 eV olarak hesaplanmıştır. Cheung metoduyla $dV/d(\ln I)$ grafiğinden seri direnç değeri 115 Ω ve idealite faktörü değeri 2,28 olarak hesaplanırken; H(I)-I grafiğinden seri direnç değeri 132 Ω ve engel yüksekliği değeri 1,60 eV olarak hesaplanmıştır. Cheung metoduyla hesaplanan

idealite faktörü değerinin Termiyonik emisyon metodu ile hesaplanan idealite faktöründen daha büyük çıkmasını ara yüzey durumlarına ve seri direnç etkisine bağlamışlardır.

Lintu Rajan *et al.* (2016), n-Si üzerine RF püskürtme metodu ile ZnO ince filmi kaplayarak altın kontaklarla Au/ZnO/n-Si/Al yapısında Schottky diyotlar üretmişlerdir. I-V ve C-V ölçümlerinden elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Termiyonik emisyon metoduyla I-V karakteristiklerinden Schottky diyodun idealite faktörü yaklaşık 6, engel yüksekliği 0.804 eV ve doyma akımı $1,37 \times 10^{-10}$ A olarak bulmuşlardır. Aynı zamanda, seri direncin etkisini içeren Cheung yöntemini kullanarak diyot parametrelerini de hesaplamışlardır. C-V ölçümlerinde, artan frekansla kapasitenin azalmasını arayüzey durumlarının varlığına atfetmişlerdir.

Koçyiğit *et al.* (2017), n-Si yarıiletkeni ve Au metali arasına yüksek bant aralığına sahip ZnO ince filmini atomik katman biriktirme (ALD) tekniği ile kaplayıp, Au/ZnO/n-Si aygıtının 20 K'lık adımlarla 100 K ile 380 K arasında I-V ölçümü almışlardır. Ayrıca ZnO ince filmini XRD ve SEM ile karakterize etmişlerdir. XRD ölçümleri ZnO ince filminin altıgen yapısından dolayı (002) ve (201) yönelim tepelerine sahip olduğunu, SEM ölçümleri ise yüzeyin pürüzsüz olduğunu göstermiştir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği TE metoduyla hesaplanmış olup, artan sıcaklıkla idealite faktörü değerlerinin azaldığı, engel yüksekliği değerinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca Cheung ve Norde metodlarıyla n , Φ_b ve R_s hesabı yapmışlardır. Artan sıcaklıkla seri direncin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlar diyodun geniş sıcaklık aralığında çalışabildiğini göstermiştir.

Turgut *et al.* (2013), sol-jel tekniği ile 150°C'de 300 rpm hızda döndürülerek ZnS ince filmi kaplanmış Al/ZnS/p-Si/Al heteroekleminin morfolojik, optik ve elektriksel karakterizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada AFM görüntüleri ile ince filmin oldukça pürüzsüz ve yaklaşık 2,17nm yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu göstermişlerdir. ZnS filminin optik bant aralığını 3,83 eV olarak bulmuşlar ve heteroeklem diyodun idealite faktörünü 2,34, engel yüksekliğini 0,77eV ve seri direnç değerini 12,3-12,5 k Ω olarak hesaplamışlardır. Bu sonuçlara göre sol-jel tekniği ile kaplanmış diyodun başarılı bir şekilde üretildiği kanısına varmışlardır.

Karbon elementinin allotroplarından biri olan, sp^2 hibritli bal peteği görünümünde iki boyutlu karbon nanomateryal olan grafen, tek atom kalınlığındaki yapısıyla araştırma konusu olmuştur. 2004 yılında Andre Geim ve Kostya Novoselov, düz bir levha yapısındaki grafeni, grafitin selobant ile pul pul soyulması metodu ile ilk kez elde etmişlerdir (Novoselov *et al.* 2014; Asif Iqbal *et al.* 2020). Araştırmacılar bu çalışma ile 2010'da Nobel Fizik Ödülü'nü kazanmışlardır.

Grafenin kimyasal kararlılığı, geniş yüzey alanı ve elektron taşıma özelliği katalizörler için iyi bir destek malzemesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

Aynı yapıya sahip olan grafen oksit (GO), yüksek derecede oksitlenmiş grafenin bir formudur. GO, hidroksil, epoksi ve karbosiklik asit gibi birçok fonksiyonel grup içerir. Bu fonksiyonel gruplar inorganik veya organik moleküllerin GO yapraklarına kolayca kimyasal modifikasyonu ile GO tabanlı çeşitli hibrit malzemelerin gelişimine izin verir (Yang *et al.* 2012; Haldorai *et al.* 2014; Mergen 2021).

Son yıllarda, heterojen katalizör olarak Fe_3O_4 (Manyetit) nanoparçacıkları, geliştirilmiş dağılıbilirliği, reaktifliği ve manyetik özellikleriyle ilgi odağı olmuştur. Demir oksitler, teknolojik olarak çok önemli geçiş metallere aittir. Doğada 16 fazda demir oksit vardır; oksihidroksitler ve hidroksitler bugüne kadar bilinenlerdir (Özel 2015). Bütün demir oksitler kristal yapıdadır. Demir oksit, demir iyonları ve O_2^- veya OH^- iyonları ile demir hidroksit ve demir oksihidroksit içerir.

Manyetit olarak da bilinen demir oksit (Fe_3O_4) nanoparçacıklar (NP), süperparamanyetik, biyouyumluluk, kolay sentezlenme ve toksik olmama gibi özelliklerinden dolayı dikkat çekici olmuştur (Schwertmann and Cornell 1991). Görünür ışığa duyarlı olan bir yarıiletkenidir.

Ortak çöktürme, mikroemülsiyon, hidrotermal sentez, termal parçalama gibi yöntemlerle sentezlenen Fe_3O_4 nanoparçacıklar diyet parametrelerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Fe_3O_4 nanoparçacıkların yarı metalik (half-metalic) ve elektriksel iletken bir malzeme olması, daha yüksek bir bariyer yüksekliği ve daha düşük bir idealite faktörü ile diyetlerin karakteristiğinde iyileştirme yaptığı görülmüştür (Çaldıran *et al.* 2013).

Günümüzde GO ve Fe_3O_4 tek bir yapıda birleşmesi, iki bileşenin de avantajlarını taşıdığı için yeni bir araştırma konusu olmuştur. Fe_3O_4 nanoparçacıklarının GO katmanlarına depolanmasıyla oluşturulan yapı ilaç dağıtımı (Wang *et al.* 2011), enerji depolama (Young *et al.* 2009) gibi birçok alanda uygulanmıştır.

Üstün özelliklerine ve avantajlarına rağmen grafenin bant aralığının sıfıra eşit olması birçok optik uygulamada ve mantık devresinde grafenin kullanımını sınırlamaktadır. Bu sebeple grafenden elde edilmiş indirgenmiş grafen oksit (rGO) ve GO gibi grafen bazlı malzemeler Fe_3O_4 gibi çeşitli inorganik malzemelerle birleştirilerek malzemenin bant aralığı değiştirilip kullanım amacına göre ayarlanabilir. Bu yapı birçok optoelektronik aygıt uygulamalarında geniş çapta incelenir (Velasco-Soto *et al.* 2015). GO ve Fe_3O_4 ayrı ayrı

elektronik ve optoelektronikte yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bu çalışmada GO: Fe₃O₄ farklı malzemelerle bir heteroyapı oluşturularak bant aralığı ayarlanabilir.

Metin *et al.* (2014), çalışmalarında p-Si üzerine GO-Fe₃O₄ (NP) ince film kaplayıp, üzerine de 10⁻⁵ torr' da Au buharlaştırmışlar, Si'un arka yüzeyine ise Al buharlaştırılarak omik kontaklar yaparak Au/GO-Fe₃O₄ (NP)/p-Si/Al yapısını elde etmişlerdir. Bu çalışma, GO-Fe₃O₄ nanokompoziti çözeltisinin kendiliğinden montaj yöntemi ile hazırlanması ve Schottky diyotunda bir eklem olarak kullanılması açısından diğer çalışmalardan ayrılır. (GO-Fe₃O₄) (NP) /p-Si eklemının I-V karakteristikleri 50K-350K sıcaklık aralığında 25 K'lik adımlarla incelenmiştir. Sıcaklığa bağlı ölçümlerde artan sıcaklıkla idealite faktörü azalırken engel yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Bariyer yüksekliğinin ve ideallik faktörünün hesaplanan değerleri sırasıyla 50 K'de 0,12 eV ve 11,24; 350 K'de 0,76 eV ve 2,49 olarak bulunmuştur. Sıcaklığa bağlı I-V özelliklerinden Richardson sabiti, engel homojensizlikleri nedeniyle ideal değerden daha düşük 1,806 Acm⁻²K⁻² olarak hesaplanmıştır. Au/(GO-Fe₃O₄) (NP) /p-Si/Al Schottky diyodunun düşük sıcaklıklarda bile voltaj kararlılığı göstermesi ve yüksek frekans için dedektör diyot olarak kullanılmak üzere umut verici potansiyele sahip olması açısından başarılı bir diyot elde edilmiştir.

Çaldıran *et al.* (2015), n-Si üzerine spin kaplama tekniği ile GO-Fe₃O₄ nanokompoziti kaplayıp, üzerine 17 tane Au kontak yapmışlardır. Bu farklı 17 kontak da GO-Fe₃O₄ nanokompoziti yüzey üzerine homojen bir şekilde kaplandığından aynı I-V karakteristiği göstermiştir. I-V karakteristiği ideal olmasa da tüm heteroeklem doğrultma özelliği göstermiştir. Oda sıcaklığında Au/GO-Fe₃O₄ (NP) /n-Si heteroeklemının idealite faktörü 4,20 ve engel yüksekliği 0,77 eV olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü değerinin 1'den çok büyük çıkmasına arayüzeyde doğal oksit tabakasının varlığı, bariyer boyunca elektron tünellemesi, nötral bölgedeki yüksek seri direnç ve aygıtın deplasyon bölgesindeki rekombinasyon yükleri neden olmuş olabilir, yorumunda bulunmuşlardır. Düz belsem I-V karakteristikleri GO-Fe₃O₄ (NP)/n-Si heteroekleminde akım iletiminde SCLC (Uzay Yüğü Sınırlayan Akım) iletiminin baskın olduğunu göstermiştir. Yani, düşük voltaj bölgesinde omik iletim ve yüksek voltaj bölgesinde SCLC gözlenmiştir. C-V ölçümlerinde aygıt kapasitansının yüksek voltajlarda düz belsemde keskin bir şekilde arttığı, ters belsemde ise monoton bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Buradan aygıtın difüzyon potansiyeli 0,76eV ve donör konsantrasyonu 6,73x10¹⁴cm⁻³, engel yüksekliği 0,81eV olarak hesaplanmıştır. I-V ve C-V ölçümlerinin farklı sonuçlar vermesini C-V karakteristiklerinin düz bant voltajı verirken I-V karakteristiklerinin engel yüksekliği etkilerini vermesine bağlamışlardır.

Doktora tezi olarak hazırladığımız bu çalışmanın birinci bölümü; konu ile ilgili kaynak tarama çalışması ile bu konunun amacı ve önemini açıklayan “giriş”, ikinci bölümü; “kuramsal temeller”, üçüncü bölümü; *Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al*, *Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al* ile *Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al* heteroeklem yapılarının yapım aşamalarını ve deney sistemini içeren “materyal ve yöntem”, dördüncü bölümü; “araştırma bulguları” ve beşinci bölümü; ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi ile elde edilen parametre ve bilgilerin yorumlandığı “tartışma ve sonuç” kısımlarından meydana gelmektedir.



KURAMSAL TEMELLER

Giriş

Alternatif akımı doğru akıma çevirme işlemi ‘doğrultma’ olarak adlandırılmaktadır. Bu işlem, elektronik sistemlerde diyotlar sayesinde gerçekleşir. Gündelik yaşamda kullandığımız birçok elektronik cihaz doğru akım ile çalıştığı için doğrultma işlemine ihtiyaç duyulur.

Doğrultma işlemi metal/yarıiletken kontaklarda, yarıiletkenin eklem tarafında bulunan deplasyon tabakası ile yapılır (Schottky 1938). Bir metal/yarıiletken kontak elde edebilmek için, ani bir ara yüzey oluşana dek yarıiletken ve metalin Fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesi gerekir (Mönch 1995).

Schottky diyot, bir yarıiletkenle bir metalin belli koşullarda bir araya getirilmesiyle oluşurken; p-n eklemi ise *p*-tipi yarıiletkenin bir tarafının *n*-tipi yarıiletkenle atomik boyutlarda üst üste getirilmesiyle elde edilir. Schottky diyotları ile p-n eklem diyodun karakteristikleri benzerlik gösterse de bazı uygulamalarda farklılıkları bulunmaktadır. Akım, Schottky diyotlarda çoğunluk taşıyıcılarıyla sağlanırken, p-n ekleminde azınlık taşıyıcıları ile sağlanır. Schottky yapılar düşük gerilim, yüksek akım doğrultucuları iken, p-n eklemi yüksek gerilim düşük akım doğrultuculardır. Schottky yapılar, azınlık taşıyıcılarının sayısının azlığı ve gecikme zamanının düşük olması (frekans tepkisinin yüksek olması) ile yüksek anahtarlama hızına sahip olduğundan IC teknolojisinde önemli bir yere sahiptirler.

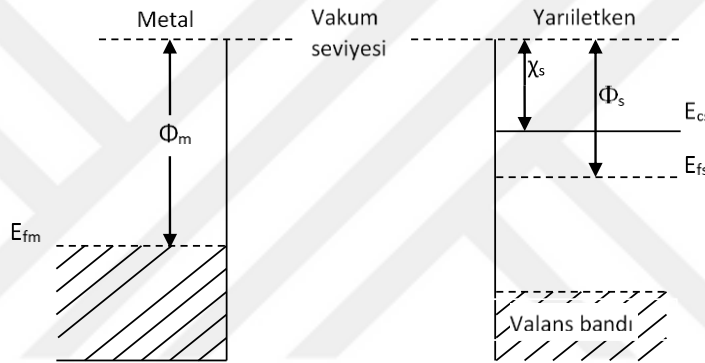
Metal/*n*-Tipi Yarıiletken Kontaklar

Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontaklar

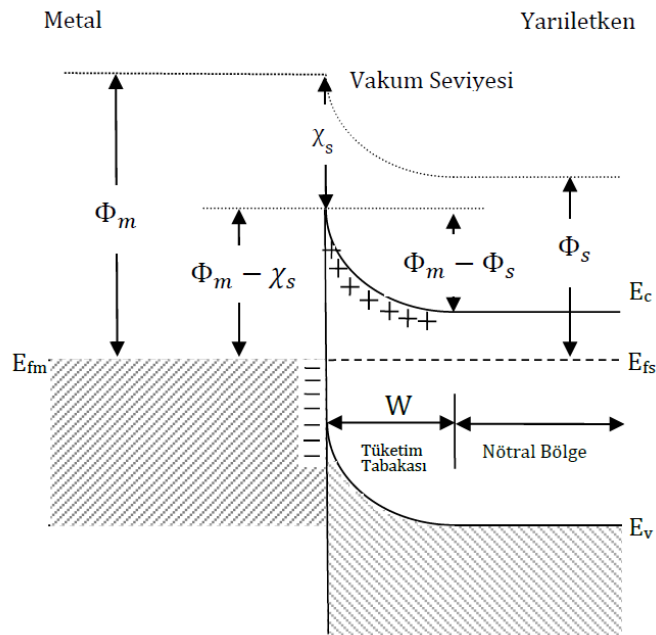
İki iletken, kontak oluşturmak üzere yan yana getirildikten sonra Fermi seviyeleri eşitlenene dek aralarında yük alışverişi devam eder ve denge durumu meydana gelir. Yük dağılımı sebebiyle kontak bölgesinde dipol tabakası oluşur. Bu durum sadece iki iletken arasındaki kontak durumunda değil, iki metal arasındaki kontak durumunda da meydana gelir. Bu durumda kontağın iki tarafında da bulunan yüzey yükleri sebebiyle dipol tabakası oluşur. Meydana gelen bu kontak, elektronların iki yönde de serbest olarak hareket etmesini sağladığından omik kontak adını alır. Eğer, kontağı meydana getiren maddelerden biri yarıiletken diğeri metal ise oluşan kontak omik kontak ya da doğrultucu kontak olabilir. Elektronlar doğrultucu kontak halinde bir yönde serbestçe hareket ederlerken, kontak

bölgesinde meydana potansiyel engeli sebebiyle ters taraftaki geçişlerde zorlanırlar. Bu durum iki maddenin enerji-bant diyagramına bağlıdır (Ziel 1968).

Bu olayı açıklayabilmek için Şekil 1’deki gibi bir metal ve bir n -tipi yarıiletkenin kontak durumunu inceleyelim. Yarıiletken içindeki bütün donörlerin oda sıcaklığında iyonize olduğunu varsayalım. χ_s yarıiletkenin elektron ilgisi, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu ve Φ_m metalin iş fonksiyonu olmak üzere $\Phi_m > \Phi_s$ olduğunda kontakta önceki durum, Şekil 1’de gösterilmiştir. Yarıiletkenin Fermi seviyesinin metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıda olduğu görülmektedir. Kontakta sonra yarıiletkenden metale doğru elektronlar geçer ve arkalarında iyonize olmuş donör atomları bırakırlar. Her iki tarafın Fermi seviyeleri eşitlenene kadar yük geçişleri devam eder. Bunun sonucunda yarıiletkenin enerji seviyelerinin Şekil 2’deki gibi $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar alçaldığı görülür.



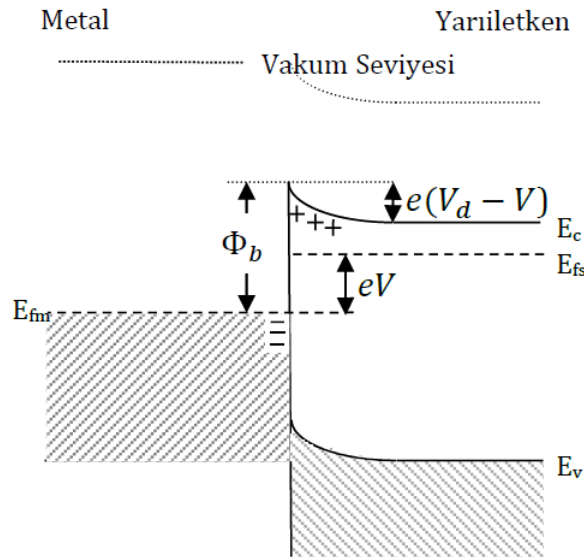
Şekil 1. Kontakta önce metal ve n -tipi yarıiletkene ait enerji-bant diyagramları



Şekil 2. Kontakta sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı

Metal tarafına geçen elektronlar ile yarıiletkende kalan iyonize olmuş donörler nedeniyle kontakta dipol tabakası meydana gelir ve bu dipol tabakası sebebiyle eklemde potansiyel engeli oluşur. Bu engelin yüksekliği metal tarafında $\Phi_m - \chi_s$ ve yarıiletken tarafında $(\Phi_m - \Phi_s)$ kadar olmaktadır.

Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronların metale geçerken karşılaştığı engel yüksekliği değeri, difüzyon potansiyeli ile $eV_{\text{dif}} = \Phi_m - \Phi_s$ olarak açıklanır. Kontakın yarıiletken tarafındaki pozitif yüklere, iyonize olmuş donörler sebep olur. Bu iyonize olmuş donörler yarıiletken içerisinde hareketsiz olduğundan yüzey yükü gibi değil, bir uzay yükü gibi değerlendirilir. Yüzey tabakası, kontakta bulunan potansiyel engel sebebiyle engel tabakası (W) olarak adlandırılır. İyonize olmuş donörlerin konsantrasyonu ve difüzyon potansiyelinin değeri bu tabakanın kalınlığını etkilemektedir. Metal ve yarıiletkendeki bazı elektronların termal olarak sahip oldukları enerji, potansiyel engelini aşmaya yetecek kadar olduğunda, kontakta zıt yönde ama eşit büyüklükte bir I_0 sızıntı akımı geçer. Yarıiletken tarafına bir $-V$ gerilimi uygulandığında metalden yarıiletkene geçen elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve dolayısıyla bu elektronların oluşturacakları akım değeri de değişmez. Ancak yarıiletken tarafında Şekil 3'te görüldüğü gibi, iletkenlik bandı eV kadar yükselirken yarıiletkenden metale geçen elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalır.



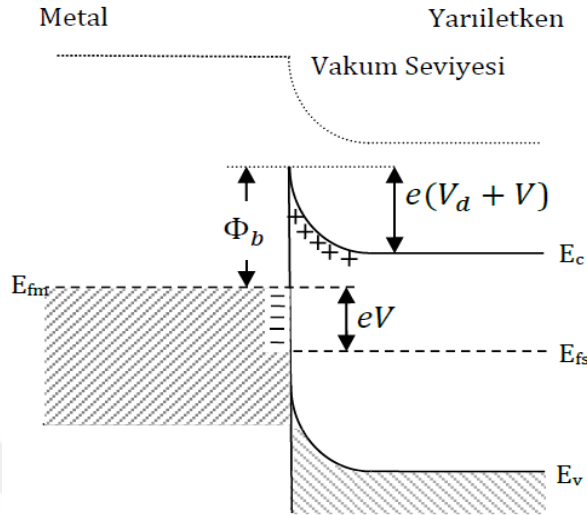
Şekil 3. Doğru beslem altında metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın enerji-bant diyagramı

Metalden yarıiletkene doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artar.

Bu durumda oluşan net akım,

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

ile verilir. I net akımı pozitifdir. Bu duruma ($V \gg kT/e$) düz beslem adı verilir. Şekil 4'teki gibi yarıiletken tarafına $+V$ gerilimi uygulandığında iletkenlik bandı eV kadar alçalırken yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği eV kadar artar. Oluşan net akım $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu beslem durumu da ($V \ll -kT/e$) ters beslem olarak adlandırılır.



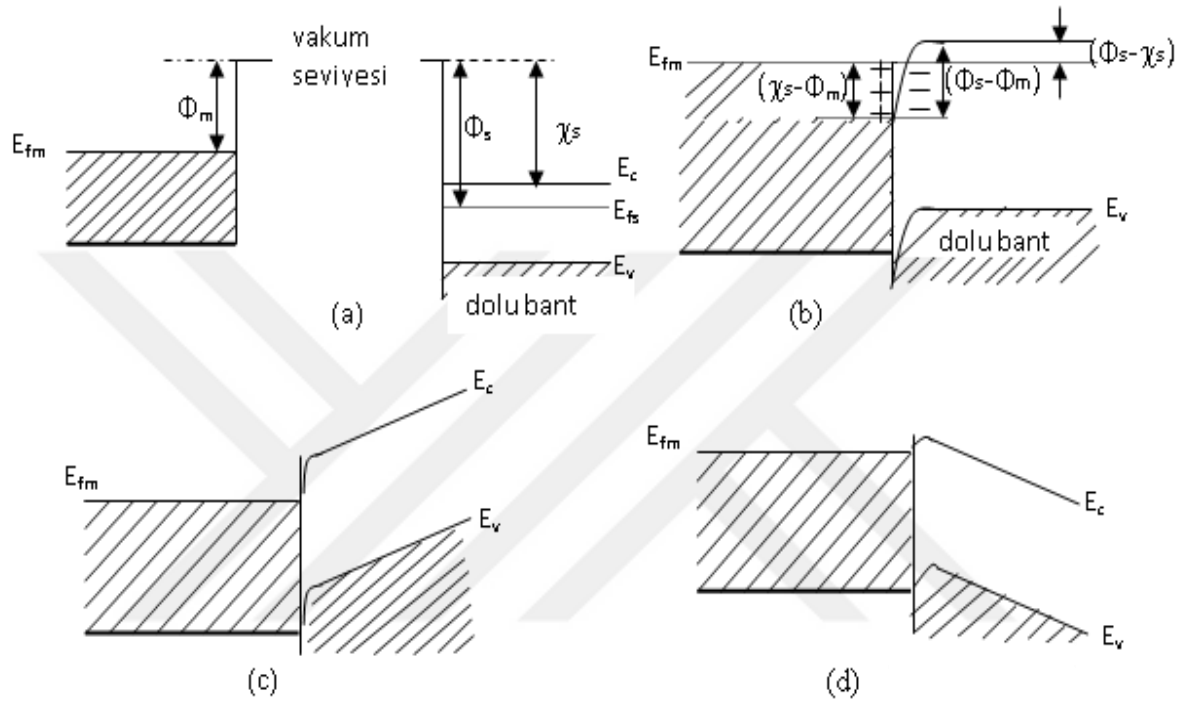
Şekil 4. Ters beslem altında metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı

Metal/ n -tipi yarıiletken omik kontaklar

Omik kontak, kendisine uygulanan gerilimden bağımsız olarak akımın her iki yönde de geçişine en az direnci göstererek geçişine izin veren bir metal/yarıiletken eklemidir (Brillson 1993, Neamen 1992). Omik kontaklarda akım-gerilim ilişkisi Ohm Kanunu ile ifade edilebilir. Omik kontağın üzerine düşen gerilimin akımla doğru orantılı olması ile sisteme lineer olmayan ve kontrol edilemeyen yeni bileşenlerin eklenmesi önlenir. Omik kontağın kalitesini kontak direncinin değeri belirler.

Bir metalle bir n -tipi yarıiletkeni $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda kontak haline getirelim. Kontakdan önceki metal ve yarıiletkene ait enerji-bant diyagramları Şekil 5.a'da görüldüğü gibidir. Kontakdan önceki durumda görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar aşağıda bulunmaktadır.

Kontaktan sonra oluşan termal denge durumunda, metalden yarıiletkenine geçen elektronlar arkalarında boşluklar bırakırlar. Aynı zamanda yarıiletken yüzeyin n -tipliliği de artar. Yarıiletken yüzeyde bulunan fazla elektronlar negatif yüzey yükü tabakası meydana getirilerken metalden kopan elektronlar ise arkalarında bir yüzey yükü tabakası (pozitif yük dağılımı) oluştururlar ve Şekil 5.b’de görüldüğü gibi kontakta bir dipol tabakası oluşur. Eğer $+V$ gerilimi metal tarafına uygulanırsa yarıiletkenden metale geçen elektronlar için engel oluşmaz ve elektronlar yarıiletkenden metale doğru serbestçe geçiş yapabilirler (Şekil 5.c).



Şekil 5. $\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal/ n -tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı a) kontak öncesi, b) kontak sonrası, c) düz beslem altında, d) ters beslem altında.

$+V$ gerilimi yarıiletken tarafına uygulandığında, elektronlar için engel yüksekliği yine çok küçük olur ve kolayca metalden yarıiletkenine doğru akarlar (Şekil 5.d).

Buradan, omik kontaklarda elektronların her iki yönde de serbestçe geçiş yapabileceği sonucuna varılmaktadır. $+V$ gerilimi omik kontakta uygulandığında, potansiyel yarıiletken boyunca yayılacaktır. Metale negatif bir ($-V$) gerilim uygulandığında ise elektronlar metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına doğru geçiş yapar ve bu tür kontaklar **enjeksiyon kontakları** adını alır (Ziel 1968).

Difüzyon Teorisi

Parçacık yoğunluğu farklı olan iki bölge arasında, yoğunluk farkından dolayı yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru yük geçişleri meydana gelir. Bu durum difüzyon veya difüzyon akımı olarak adlandırılır. Metal-yarıiletken kontaklarda da yük

geçişleri difüzyon ile meydana gelir. Schottky tarafından tanımlanan difüzyon teorisinin dayandığı varsayımlar aşağıdaki gibidir (Schottky 1938);

- a. Potansiyel engelin yüksekliği kT/q enerjisinden büyüktür,
- b. Tükenim bölgesindeki elektronların çarpışma etkisi ihmal edilir,
- c. $d=0$ ve $d=w$ 'daki taşıyıcı yoğunlukları akımdan etkilenmemiştir (yani onlar termal denge değerine sahiptir),
- d. Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir.

Varsayımlar doğrultusunda tükenim bölgesindeki akım, yoğunluk farkı ve bölgesel alana bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemi kullanılır.

Bu denklem metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için,

$$J_x = J_n = q[n(x)\mu E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x}] \quad (2.2)$$

$$J_x = qD_n \left[\left(\frac{-qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.3)$$

şeklindedir. Burada elektron yoğunluğu $n(x)$, elektron mobilitesi μ , elektron difüzyon sabiti D_n ve Schottky bölgesindeki elektrik alanını $E(x)$ ile ifade edilmektedir. Buna göre difüzyon kuramında akım ifadesi,

$$J_x = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

ile verilir. Burada J_{SD} doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_c D_n}{kT} \right) \left[\frac{q(V_d - V)}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.5)$$

olarak ifade edilir. Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik geçirgenliği, N_c iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu, V_d difüzyon gerilimi, ve N_d donör yoğunluğudur.

Tükenim bölgesinde taşıyıcı oluşması (Jenerasyon) ve tekrar birleşmesi (Rekombinasyon)

Sıfır beslemde Schottky engelin tükenim bölgesi termal dengededir yani birleşmenin hızıyla tükenim bölgesindeki elektron-boşluk çifti üretimi dengelenmiştir. Ancak beslem voltajı altında voltajının düz ya da ters olmasına göre net bir birleşme ya da net bir üretim meydana gelir.

Yu ve Snow (1968) tarafından uzay yükü bölgesindeki rekombinasyonun etkisi açıklanmıştır. Eğer n tipi yarıiletken ile oluşturulan Schottky engel diyoduna ters beslem uygulanırsa, tükenim bölgesinde termal denge değerlerinden daha fazla elektron-boşluk çiftleri üretilir. Bu çiftler engeldeki elektrik alan etkisiyle süpürülerek ters akıma sebep olurlar. Eğer

Schottky engel diyoduna düz beslem uygulanırsa, elektronlar nötr yarıiletken; boşluklar da metalden tükenim bölgesine enjekte olup birleşerek birleşme akımını meydana getirirler. Shockley-Read (1950) ve Hall teorilerine göre, bant aralığının ortasına yakın enerjilere sahip merkezler en etkin olan rekombinasyon merkezleridir. Schottky diyotlar ile p-n eklem diyodun akım iletim mekanizması rekombinasyonun olduğu durumlarda benzerlik göstermektedir. Düz beslem durumunda oluşan küçük akımlar için akım yoğunluğu yaklaşık olarak;

$$J_r = J_{r0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) [1 - \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)] \quad (2.6)$$

ile verilir (Sah *et al.* 1957). Burada $J_{r0} = \left(\frac{qn_i w}{2\tau_r}\right)$ dir. n_i , asal elektron konsantrasyonu olup $n_i \propto \exp\left(\frac{-qE_g}{2kT}\right)$ gibi bir orantı vardır. Burada τ_r , elektronların bu bölgeyi geçmesi için gereken zamanı, w , deplasyon bölgesinin genişliğini ifade etmektedir. Homojen dağılımı olan merkezler sebebiyle, holler ve elektron için yakalama tesir kesitleri eşit olur.

Jenerasyon olayı, Rekombinasyon olayının tersi olarak tükenim bölgesinde elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasıdır ve bu durum ters beslem halinde gözlenir. Jenerasyon olayındaki akım J_g olup, $J_g = qn_i w / 2\tau_r$ ile ifade edilir. Uygulanan ters gerilim ile tükenim bölgesinin genişliği doğru orantılı olduğundan, ters beslemde gerilimin artmasıyla jenerasyon akımı artar. Düşük sıcaklıkta etkisi daha fazla olmaktadır.

Termiyonik Emisyon ve Akım-Voltaj Karakteristiği

Schottky kontaklarda potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması olayı Termiyonik emisyon teorisi ile izah edilmektedir. Termiyonik emisyon sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların (elektronlar-holler) termal enerjilerinden dolayı yayınlanması anlamına gelir. Hans Albrecht Bethe'nin (1942) önerdiği termiyonik emisyon (TE) teorisi MS, MIS gibi yapılarda akım iletimini açıklayan bir teoridir. Bu teoriye göre akım iletimi sadece yük taşıyıcılarının sahip oldukları termal enerjiyle bariyer potansiyelini aşmalarıyla gerçekleşir. Metal/*n*-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda akım elektronlar ile sağlanırken, metal/*p*-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise akım boşluklar ile meydana gelir. Başka bir deyişle akım çoğunluk yük taşıyıcıları tarafından sağlanır. Bethe'nin termiyonik emisyon teorisinin temel varsayımları aşağıdaki gibidir;

- 1) Potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden fazlasıyla büyüktür,
- 2) Taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky tabakasının kalınlığından daha büyük olduğundan Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları yoktur,
- 3) Akım, engel yüksekliğine zayıf olarak bağlıdır ve görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmektedir.

Yapılan çalışmalarda Bethe'nin varsayımları üzerine başka ifadeler de eklenerek TE teorisinin bugünkü haline gelmesi sağlanmıştır. Buna göre; tükenim bölgesi civarında yük taşıyıcılarının dağılım fonksiyonu Maxwell dağılımına uyar, tükenim bölgesi boyunca yük taşıyıcılarının iletiminde yaşanan çarpışmalar ihmal edilebilecek değerdedir. Görüntü yüklerden kaynaklanan kuvvetlerin sebep olabileceği bariyer alçalmaları ihmal edilir ve yük taşıyıcılarının iletimi engel potansiyelinin yüksekliğine bağlıdır (Crowell ve Sze, 1966; Rhoderick ve Williams, 1988).

I - V karakteristiği Termiyonik Emisyon teorisin ile uyumlu olan kontaklar için akım ifadesi;

$$I = I_0 [\exp(\frac{eV}{kT}) - 1] \quad (2.7)$$

ile ifade edilir (Rhoderick and Williams 1988). Buradaki I_0 , doyma akımı;

$$I_0 = AA * T^2 \exp(\frac{-e\Phi_b}{kT}) \quad (2.8)$$

olarak verilir. Bu denklemde A , diyodun alanını; A^* , Richardson sabitini (n -Si için $112 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ 'dir); T , mutlak sıcaklığı; e , elektronun yükünü; Φ_b , sıfır gerilimde engel yüksekliğini; k , Boltzmann sabitini ifade etmektedir.

(2.7) denklemi ideal durumlar için geçerlidir ancak pratikte diyot yapımı sırasında metal ve yarıiletken arasındaki arayüzeyde doğal oksit tabakası oluşabilir. Doğal oksit tabakasından dolayı diyotun elektriksel karakteristikleri değişime uğrar ve ideal durumdan sapmaların olacağı tahmin edilir. İdeal durumdan sapmaları tanımlayabilmek için birimsiz sabit olan (n) idealite faktörü kullanılmıştır. Bu yüzden denklem;

$$I = I_0 [\exp(\frac{eV}{nkT}) - 1] \quad (2.9)$$

şeklinde düzeltilir. İdealite faktörü çeşitli dış etkenler sebebiyle kontağın ideal durumdan sapmasını ifade eden, ideal durumda değeri 1 olan birimsiz bir parametredir. $eV \gg nkT$ durumunda üstel ifadenin yanındaki '1' ihmal edilebileceğinden denklem;

$$I = I_0 [\exp(\frac{eV}{nkT})] \quad (2.10)$$

şeklinde yazılabilir. Logaritma alındıktan sonra V 'ye göre türev alınır ve idealite faktörü;

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (2.11)$$

olarak ifade edilir. (2.8)'de logaritma alınıp sonra $e\Phi_b$ ifadesi yalnız bırakılırsa;

$$e\Phi_b = kT \ln(\frac{AA^*T^2}{I_0}) \quad (2.12)$$

Φ_b engel yüksekliği değeri bulunur. Burada A , diyodun etkin alanı ($A=0,00785 \text{ cm}^2$); A^* , değer n -Si için $112 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ olan Richardson sabitidir (Özaydın 2018).

Kontakta oluşan net akım yoğunluğu (J);

$$J = J_{ST} = [\exp(\frac{eV}{kT}) - 1] \quad (2.13)$$

olarak ifade edilir, buradaki (J_{ST}) ters doyma akım yoğunluğu iken, imaj kuvveti sebebiyle düşen engel yüksekliği $\Phi_b = \Phi_{b0} - \Delta\Phi$ olarak verilmektedir. Bu sebeple,

$$J_{ST} = A^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\Phi}{kT}\right) \quad (2.14)$$

şeklinde yazılır.

Cheung Fonksiyonları Kullanılarak Heteroeklem Karakteristiklerinin İncelenmesi

Cheung (1986), metal/yarıiletken kontakların doğru beslem I - V karakteristiklerini kullanarak Schottky diyot parametrelerini hesaplamak amacıyla bir model önermiştir. Termionik emisyonla elde edilen akım yoğunluğu (J) ile diyodun etkin alanının (A) çarpılması ile diyottan geçen toplam akım;

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] [\exp(\frac{eV}{kT}) - 1] \quad (2.15)$$

olarak bulunur. Burada $eV \gg kT$ olduğunda, 1 ihmal edilir. Pratikte uygulanan gerilimin tamamının deplasyon bölgesine düşmediği göz önüne alınırsa, ideal durumdan sapmaların gözlenebilir. Bu sapmaları açıklayabilmek için idealite faktörünü de gözönüne alıp akım ifadesini eşitlik (2.16)'daki gibi yazabiliriz:

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] [\exp(\frac{eV}{nkT}) - 1] \quad (2.16)$$

Uygulanan gerilimin IR_s kadar olan miktarı seri direnç üzerine düşeceğinden denklem (2.16)'te V yerine ($V - IR_s$) yazılarak akım denklemi aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] [\exp(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}) - 1] \quad (2.17)$$

Son eşitlikten gerilim denklemi;

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.18)$$

İle verilir. (2.18) eşitliğinin $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.19)$$

ifadesi elde edilir. (2.19) eşitliğinde, $\frac{dV}{d(\ln I)}$ 'nın I 'ya göre grafiği bir doğruyu verir. Bu grafikten elde edilen doğrunun eğiminden seri direnç elde edilir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği yerden n değeri bulunur (Temirci 2000). Potansiyel engeli Φ_b 'yi hesaplayabilmek için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.20)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu kullanılır. (2.18) ve (2.19) eşitliklerinden;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.21)$$

yazılabilir. (2.21) eşitliğinde $H(I)-I$ grafiği doğru şeklinde olacağından bu doğrunun eğimi de seri direnci (R_s) verir. Doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği yerden de engel yüksekliği $e\Phi_b$ hesaplanır.

Norde Modeline Göre Heteroeklem Karakteristiklerinin İncelenmesi

Termiyonik emisyon teorisinde eklem sadece doğru beslem I-V karakteristiğinin doğrusal bölgesi kullanılmaktadır. Bu bölge, yüksek seri direnç nedeniyle $kT/q \ll V \ll IR_s$ aralığıyla sınırlanıp daralma göstermektedir. Bu aralık, seri direnç değeri büyük bir değer aldığında doyma akımı I_0 için oldukça küçülecektir. V geriliminin küçük olduğu aralıkta, yeniden birleşme akımlarının da toplam eklem akımı üzerinde etkisi olacaktır. Bu durumda bu bölgedeki doyma akım yoğunluğu (I_0) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri güvenilir olmadığından n , Φ_b ve R_s değerlerinin güvenilir sonuçları için Norde tarafından bir Norde fonksiyonu $F(V)$ sunulmuştur.

Norde fonksiyonuna göre idealite faktörünün 1 olduğu durumda kontakta oluşan engel yüksekliği ve seri direnç $F(V)$ fonksiyonuyla aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \left(\frac{kT}{2}\right) \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (2.22)$$

Fonksiyondaki $I(V)$, I-V grafiğinden bulunan akım değerini; γ , idealite faktöründen büyük bir tam sayı değerini ifade etmektedir. F 'nin V 'ye karşı grafiği çizildikten sonra $F(V)$ 'nin en küçük değeri aşağıdaki denklemde yerine yazılarak engel yüksekliği hesaplanır.

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (2.23)$$

Bu denklemde $F(V_0)$, $F(V)$ 'nin en küçük değeri iken V_0 ise $F(V_0)$ 'a karşılık gelen en küçük gerilim değeridir.

Seri direnç değeri ise denklem (2.24) ile bulunmaktadır. Burada I_0 ise V potansiyelinin minimum olduğu V_0 'a karşılık gelen akım değeridir (Akın *et al.* 2014; Soylu *et al.* 2014; Yıldırım ve Durumlu 2017; Akhlaghi *et al.* 2018).

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_0} \quad (2.24)$$

C-V (Kapasite – Gerilim) Karakteristikleri

Metal-yarıiletken arayüzeyinde bulunan yük taşıyıcıların dağılımı sonucu heteroeklemlerde direnci yüksek bir tükenim tabakası oluşmaktadır. Böyle bir heteroeklem bir kondansatöre benzediğinden ara bölgede bir kapasite meydana gelir (Kaya 2010).

Bu nedenle C-V ölçümleri heteroeklemler hakkında önemli bilgiler içermektedir. Ters beslem durumunda kapasitenin gerilime bağlı grafiğinden heteroyapının Fermi enerji seviyesi, engel yüksekliği, taşıyıcı yoğunluğu ve difüzyon potansiyeli gibi parametreler elde edilir. Bu heteroyapılar için kapasite ifadesi eşitlik (2.25)'teki gibidir.

$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

Burada boşluğun dielektrik sabiti ϵ_0 ($\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm), Si yarıiletkeninin dielektrik sabiti ϵ_s ($\epsilon_s =11,8$ F/cm), n -Si için iyonize olmuş donör yoğunluğu N_d , difüzyon potansiyeli V_d , ve sıcaklık T ile ifade edilmiştir.

(2.25) eşitliği düzenlenirse (2.26) eşitliğini elde edilir.

$$C^{-2} = \frac{2(V_d+V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (2.26)$$

Bu eşitlikteki V uygulama gerilimini ifade etmektedir. $C^{-2} - V$ grafiğine çizilen lineer fitin yatay eksenini kestiği yerden difüzyon potansiyeli bulunur, yani $V_d=V$ olur.

(2.26) eşitliğinin gerilime göre türevi alındığında;

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (2.27)$$

ifadesi elde edilir ve bu eşitlikten;

$$N_d = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (2.28)$$

elde edilir. n -tipi yarıiletkenin termal denge durumunda elektron konsantrasyonunu veren eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$N_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (2.29)$$

(2.29) eşitliğindeki N_0 , termal denge durumunda n -tipi bir yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonunu; N_c , ise iletkenlik bandında termal dengedeki hal yoğunluğunu ifade etmektedir (n -tipi Si yarıiletkeni için $N_c=2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). N_d ile n -tipi yarıiletkenlerde asal taşıyıcı

yoğunluğu (n_i) arasındaki ilişki $N_d \gg n_i$ şeklinde olduğu için N_0 yaklaşık olarak N_d 'ye eşit olur (Neamen 1992). Böylece (2.29) eşitliği,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (2.30)$$

olarak düzenlenir. (2.30) eşitliğinde logaritma alındıktan sonra iletkenlik bandındaki referans seviye sıfır olarak ($E_c=0$) kabul edilirse Fermi enerji seviyesi,

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (2.31)$$

eşitliği ile bulunur. Burada E_f , Fermi enerji seviyesidir. C-V grafikleri yardımıyla ideal ve ideal olmayan heteroeklemlerin engel yüksekliği değerleri sırasıyla;

$$\Phi_b = E_f + V_d \quad (2.32)$$

$$\Phi_b = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (2.33)$$

eşitlikleri ile verilir. Eşitlik (2.33) ile hesaplanan engel yüksekliğine düzeltilmiş engel yüksekliği adı verilir. Eşitlikteki n , I-V grafiği yardımıyla hesaplanan idealite faktörüdür.

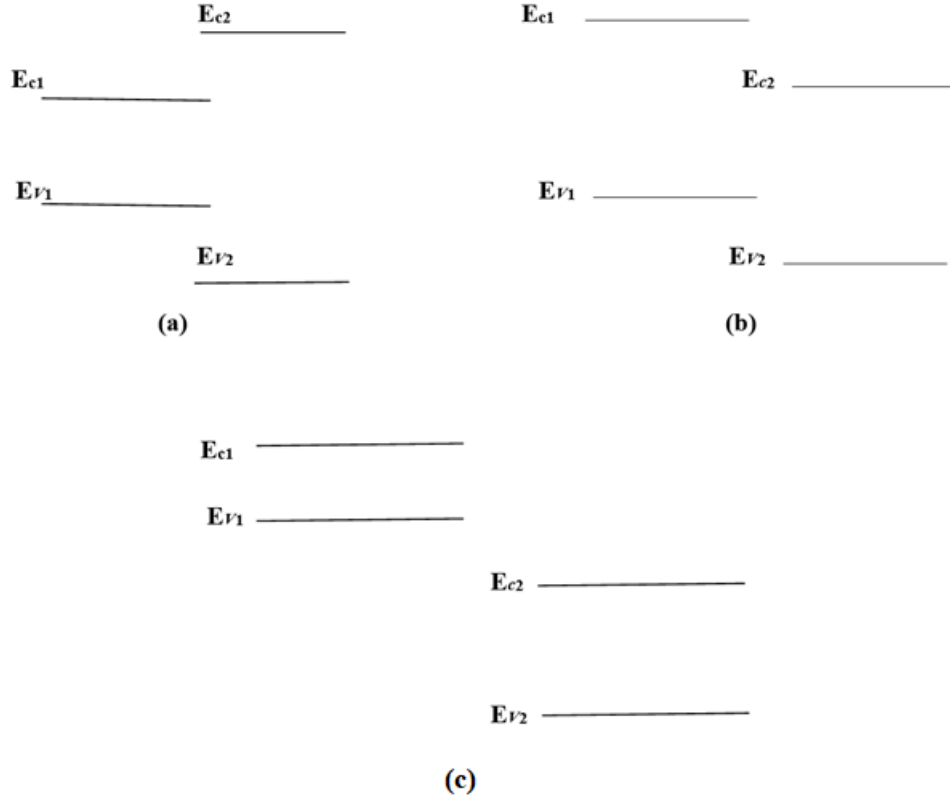
Heteroeklemler

Heteroeklemlerin, farklı enerji bant aralığı ve farklı kristal yapısı bulunan iki yarıiletken arasında meydana gelen eklemeler olduğu bilinmektedir. Kontak haline getirilen yarıiletkenlerin iletim tiplerine göre, izotip ve anizotip eklem olarak adlandırılırlar.

İzotip eklemeler aynı tipte katkılanmış (ikisi de p-tipi ya da ikisi de n-tipi) iki yarıiletken arasında gerçekleşirken, anizotip eklemeler ise farklı tipte katkıya sahip (biri n-tipi iken diğeri p-tipi) iki yarıiletken arasında meydana gelir.

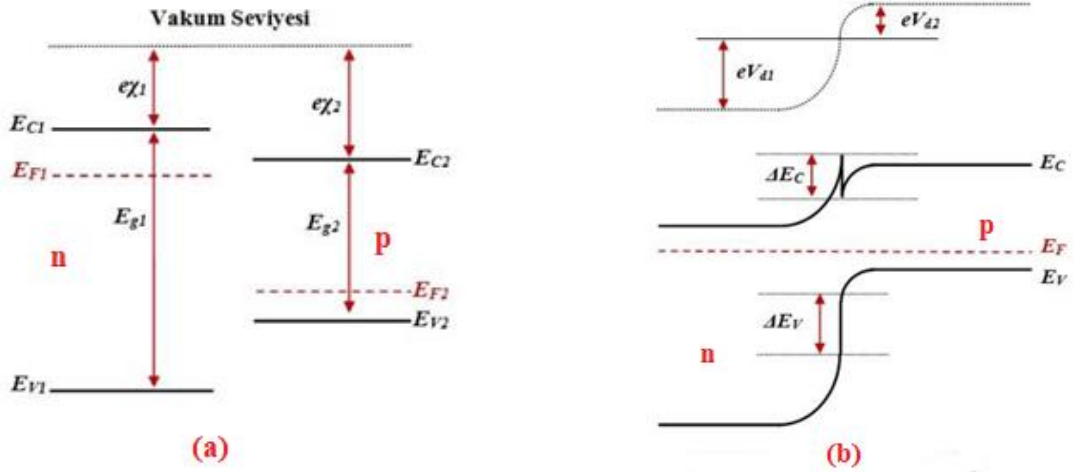
Heteroeklemlerin N_p , P_n , P_p ve N_n olmak üzere dört temel tipi vardır. Buradaki büyük harf, geniş band aralıklı materyali ifade etmektedir. Dar band aralıklı bir materyal ile geniş band aralıklı materyal heteroeklem haline getirilirken bant aralığı enerjilerinin hizası eklem karakteristiklerini belirlemede büyük öneme sahiptir. Heteroeklem oluşturulurken karşılaşılabilecek mümkün üç durum Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6.a'da gösterimi yapılan Tip-1 olarak bilinen üst üste binen boşluk tipi durum yani geniş band aralıklı materyalin yasak bant aralığının dar band aralıklı materyalin bant aralığını tamamen aştığı durum çoğu heteroeklemde uygulanmaktadır (Sağlam ve Ateş 2012). Bu tip heteroeklemler ışıkla uyarıldığı zaman elektron ve boşlukların daha verimli rekombinasyonuna imkan tanır. Şekil 6.b'de Tip-2, kademeli boşluk olarak bilinen bant uyumuna sahip heteroeklemlerde ikinci yarıiletkenin bant aralığının tamamı, birinci yarıiletkenin bant aralığının dışında kalmaktadır. Şekil 6.c'de

ise Tip-3 olarak da adlandırılan kırık boşluk bant uyumu gösterilmektedir. Bu tip heteroeklemler her iki yarıiletkenin bant aralıklarındaki tüm enerji değerlerinin üst üste gelmediği durumda gözlenir.



Şekil 6. Geniş bant aralığı ve dar bant aralığı enerjileri arasındaki ilişki a) Üst üste binen b)kademeli c) kırık boşluk

Şekil 7’de Tip-1 heteroeklemi için kontakta önce ve kontakta sonraki durum gösterilmiştir. Şekil 7(b)’deki çıkıntılı kısım deplasyon bölgesi sınırları içinde kaldığı müddetçe heteroeklemden istenilen verim alınabilmektedir. Çoğu heteroeklemde Tip-1 durumu uygulanmaktadır.



Şekil 7. n-p heteroeklemin bant yapısının kontakta önceki (a) ve kontakta sonraki (b) enerji bant diyagramı

Kaliteli heteroeklemler üretmek için kullanılan farklı iki materyalin kristal yapılarının ve örgü sabitlerinin uyumlu olması gerekmektedir. Aksi takdirde örgü uyuşmazlığından kaynaklı gerilmeler ve örgü kayması gibi kusurların varlığı eklem kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Epitaksiyal büyütme teknikleri ile bu gibi örgü kusurları önemli ölçüde azaltılarak faydalı heteroeklemler elde edilmektedir.

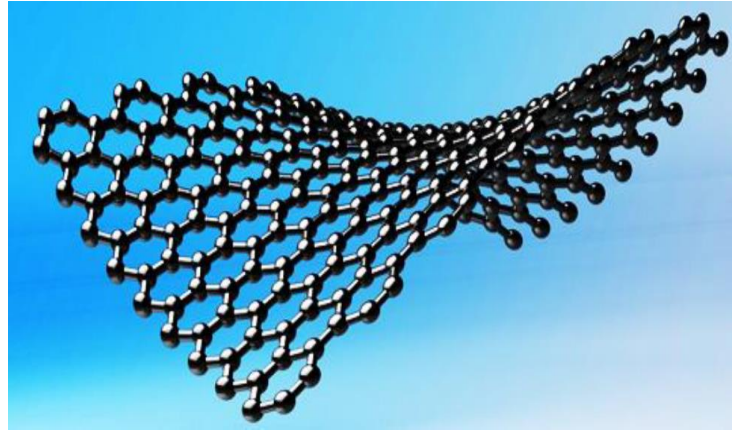
Heteroeklemlerin, enerji bariyerleri ve potansiyel değişimleri kontrol edilerek yük iletimi kontrol edilebildiğinden ve optik ışımaları hapsedebilme özelliğinden dolayı yarıiletken tabanlı diyot, transistör ve güneş pilleri, fotodetektörler ile LED teknolojisi gibi alanlarda kullanılmaktadırlar (Slassi *et al.* 2020).

GO-Fe₃O₄ Nanoparçacıkların Yapısal ve Elektriksel Özellikleri

GO-Fe₃O₄ nanoparçacıkların yapısal ve elektriksel özelliklerinin belirlenebilmesi için öncelikle grafen, grafen oksit (GO) ve demir oksit (Fe₃O₄) yapılarının yapı ve özelliklerinin bilinmesi gerekir.

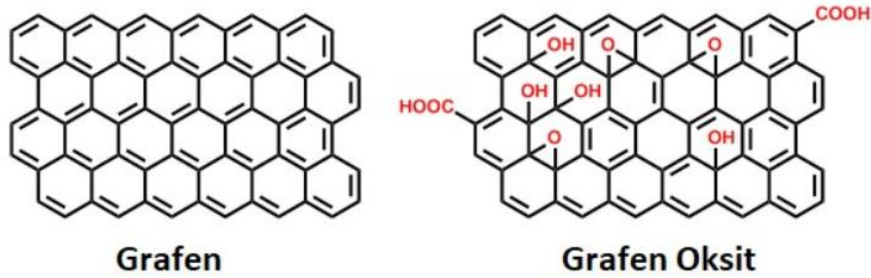
Tüm grafitik karbon formlarının anası olarak kabul edilen grafen, grafitin tek katmanlı halidir. Yani grafen, grafit tabakası olarak bilinir (Khairir *et al.* 2017). Dünyanın en ince, en güçlü ve en sert malzemesi olmasının yanında, olağanüstü mekanik, elektriksel ($\sim 5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, bakırdan 10 kat daha yüksek iletkenlik) (Olad *et al.* 2019), optik ve termal özelliklere sahip olan grafen, tek atom kalınlığında (0,345 nm kalınlığında) ve Şekil 8’de görüldüğü gibi düz bir levha halindedir. Grafenin petek kafesi görünümü, birbirine sigma bağları ile bağlanmış iki özdeş karbon atomunun alt örgülerinden meydana gelmektedir. Grafen sp^2 hibrit yapısında olan karbon atomlarından oluşan hegzagonal petek kristal örgü yapısına sahiptir. (Metin *et al.* 2014; Rastgar *et al.* 2018). Yapısı itibarıyla çelikten 200 kat daha güçlü olduğu bilinmektedir.

Grafen 2004 yılından beri elektronik cihazlar, güneş pilleri, sensörler, nanomalzemeler, piller, süperkapasitörler, hidrojen depolama gibi birçok potansiyel uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Xie *et al.* 2012; Zhang *et al.* 2018; Rawal *et al.* 2018).



Şekil 8. Grafenin şematik olarak görünümü (Sarier 2018)

Grafenin saf halinin farklı ürünlerle birleşmesi zor olduğundan, endüstriyel ürünlerde grafen oksit, indirgenmiş grafen oksit gibi işlenmiş türevleri kullanılır. Şekil 9’da grafen ve grafen oksit yapısı gösterilmektedir.



Şekil 9. Grafen ve grafen oksit yapısı

Hummers, grafit tabakalarını oksijen içeren fonksiyonel gruplar yardımıyla değiştirerek grafitten daha farklı özelliklere sahip olan grafit oksit tabakalarını meydana getirmiştir. (Hummers and Offeman 1958). Hummers yöntemi olarak adlandırılan yöntemle grafitte belli sıcaklıkta $K_2S_2O_8$, P_2O_5 ve H_2SO_4 eklenerek ön oksidasyonu yapılır ve kontrollü sıcaklıkta sırasıyla $NaNO_3$, H_2SO_4 , $KMnO_4$, saf su ve H_2O_2 ilavesi yapılır. Reaksiyon gerçekleştikten sonra süzme işlemi yapılarak saf su ile yıkanır. Daha sonra Etüvde $80^\circ C$ ’de kurutma işlemi yapılarak grafit oksit elde edilir. Grafit oksitin uygun bir çözücü içerisinde tabakalarına ayrıştırılması ile de GO elde edilir (Şenol 2018).

GO, saf grafene göre, oksijen içeren fonksiyonel gruplar içerdiğinden su içerisinde daha kolay dağılılabılır. Grafene eklenen fonksiyonel gruplar sayesinde bant aralığı 2,3eV ila 2,7eV arasında değişen GO oluşur. Bu özellik, grafenin farklı yarı iletkenlerle heteroeklem oluşturmasına imkân tanır. Grafenin oksitlenmiş grupları mekanik, optik, elektronik ve

elektrokimyasal özellikler üzerinde önemli ölçüde değişiklikler yapabilmektedir. İyi performans ve düşük maliyet nedeniyle grafen oksit, süperkapasitörlerde elektrot malzemesi olarak grafenden daha iyi bir alternatif olarak kullanılabilir.

Demir oksitler doğada hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ve manyetit (Fe_3O_4) şeklinde bulunmaktadır. Kimyasal, manyetik ve fiziksel özellikleri nedeniyle her üç demir oksit de araştırmalarda yaygın olarak kullanılırlar. Bunlardan manyetit, en önemli demir cevheridir. Geçiş metalleri arasında en güçlü manyetik maddedir.

En eski demir oksitlerden olan, topraklarda ve kayalarda bulunan Hematit, genellikle kan kırmızısı rengine olup, farklı renklerde de bulunabilir. Maghemit ise demir oksitlerin ısıtılmasıyla oluşabildiği gibi toprakta magnetitin havayla temasından da meydana gelebilir. Tablo 1’de demir oksitlere ilgili özellikler verilmiştir.

Tablo 1. Demir Oksitlerin Fiziksel ve Manyetik Özellikleri

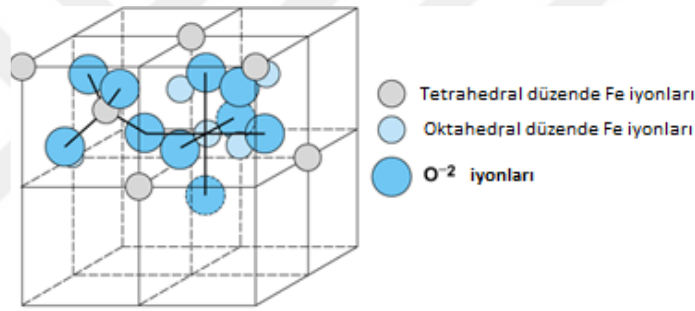
Özellikler	Hematit	Manyetit	Maghemit
Moleküler formül	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe_3O_4	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Yoğunluk (g/cm^3)	5.26	5.18	4.87
Erime sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)	1350	1583-1597	-
Sertlik	6.5	5.5	5
Manyetizma tipi	Zayıf ferromanyetikAntiferromanyetik	Ferromanyetik	Ferrimanyetik
Curie sıcaklığı (K)	956	850	820-986
300 K’ de doyum manyetizasyonu Ms değeri ($\text{A-m}^2/\text{kg}$)	0.3	92-100	60-80
Stanadart serbest enerji $\Delta G(\text{kJ/mol})$	-742.7	-1012.6	-711.1
Kristalografik sistem	RombohedralHekzagonal	Kübik	Kübik veya Tetrahedral

Üç demir oksitin de kristal yapısını, yapılarında bulunan boşluklara oktohedral ya da tetrahedral düzende yerleşmiş demir iyonları ve sıkı bir şekilde yerleşmiş oksijen iyonları oluşturur. Demir iyonlarının altı adet oksijenle çevrilmesiyle oktohedral düzen; dört adet oksijenle çevrilmesiyle de tetrahedral düzen oluşur. Hematit yapıda, oksijen iyonları hekzagonal sıkı istifli düzende iken, Fe^{+3} iyonları oktohedral bölgede ve düzlemler arasında antiferromanyetik olarak çiftlenmiştir. Maghemit ve manyetit yapılarında, oksijen iyonları kübik sıkı dizilimli düzlem içinde olduğundan bunlar benzer kristal yapıya sahiptirler (Can et

al. 2012). Alt örgü etkileşimlerinin varlığından dolayı manyetizasyon değerleri farklıdır. Maghemit malzemede Fe^{+3} katyonları, sırasıyla iki dolu bölge bir boş bölge olacak şekilde, alt örgüdeki boşluklara oktahedral ve tetrahedral yapıda yerleşmiştir. Manyetitte bulunan Fe^{+3} ve Fe^{+2} iyonlarından, Fe^{+2} iyonları sadece oktahedral düzende yerleşirken, Fe^{+3} iyonları hem oktahedral hem de terahedral düzende yerleşebilir.

Manyetit (Fe_3O_4), kübik ters spinel bir yapıya sahip olan bir manyetik demir oksittir. Fcc sıkı paket (Fd-3m uzay grubu ile) oluşturan oksijen, arayer tetrahedral ve oktahedral yerleri işgal eden Fe katyonlarını içerir (Schwertmann and Cornell 2003). Manyetit hem iki değerli hem de üç değerli durumda demir içerdiğinden, oktahedral bölgelerde Fe^{+2} ve Fe^{+3} arasındaki elektron iletimiyle benzersiz elektriksel ve manyetik özellikler sergilemektedir. Fe_3O_4 filminin iletkenliğinin, oktahedral kafes bölgelerinde demirli ve demirli iyonlar arasındaki elektron değişiminden kaynaklandığı bilinmektedir (Çaldıran *et al.* 2013).

Manyetitin yapısı Şekil 10'da verilmiştir (Özel 2015).

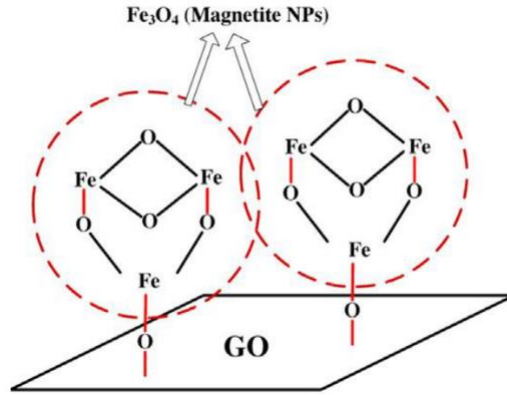


Şekil 10. Manyetitin yapısı

Manyetit (Fe_3O_4) nanopartiküllerini çekici kılan, biyouyumluluk, sentez kolaylığı ve süperparamanyetik özellikleridir. Fe_3O_4 kullanmanın bir diğer avantajı da havaya dirençli çok stabil bir film oluşturabilmesi ve böylece fotolitograf, dağlama ve elektrotların biriktirilmesi gibi son işlemler sırasında manyetik özelliklerini koruyabilmesidir (Deniz *et al.* 2013).

Son yıllarda elektriksel ve optik özelliklerinden dolayı demir oksitin ince film olarak kullanıldığı gelişmiş uygulamalar birçok araştırmaya konu olmuştur. Ek olarak, manyetik Fe_3O_4 nanopartikülün heterojen katalizör olarak etkisi, gelişmiş dağılıbilirliği, reaktivitesi ve manyetik özelliğiyle de dikkat çekmiştir (Balasubramanyan *et al.* 2018). Günümüzde, GO ve Fe_3O_4 'ün tek bir kompozite entegrasyonu, iki bileşenli malzemenin avantajlarını miras aldığı için ilgi çekici bir araştırma konusu olmuştur. İndirgenmiş grafen tabakaları van der Waals etkileşimleri nedeniyle dönüşümsüz olarak bir araya gelmeye eğilimlidir ve yeniden grafit yapısına dönüşebilir. Bazal düzlemde çok miktarda oksijenlenmiş fonksiyonel gruplar vardır ve bu gruplar çeşitli metal ve metal oksitler için destekçi görevi görürler. Böylece tabakaların bir araya toplanması da önlenmiş olur. GO ile Fe_3O_4 biraraya gelerek kompozit oluşturup

topaklanma engellenebilir ve GO tabakaları ile Fe_3O_4 arasındaki etkilere göre katalitik aktiviteyi artırabilir yani reaksiyonu hızlandırabilir. Şekil 11’de GO tabakalarına bağlanmış manyetik bileşiklerinin yapısı görülmektedir (Kırma 2017).



Şekil 11. Grafen oksit yapısındaki fonksiyonel gruplara bağlı manyetit (Fe_3O_4) yapısının temsili gösterimi.

Bu bağlamda, Fe_3O_4 NP'lerin sıvı faz kendi kendine montaj yöntemi ile GO nano yapraklara kontrollü yüklemesi, sulu çözeltiden organik boya çıkarımı için nanokompozitler ve birçok teknolojik uygulamada kullanılmaktadır (Meral and Metin 2014).

Fe_3O_4 NP'ler ile biriktirilen GO tabakaları, enerji depolama, ilaç dağıtımı gibi çeşitli alanlarda uygulanmıştır (Hu 2014). Ayrıca GO- Fe_3O_4 nanoparçacıklar metal-yarıiletken kontaklarda ince film olarak da kullanılmış olup aygıt parametrelerini olumlu yönde etkilediği görülmüştür (Metin *et al.* 2014; Çaldıran *et al.* 2015).

MATERYAL ve YÖNTEM

Giriş

Bu çalışmada heteroeklem fabrikasyonunda kullanılan farklı metallerin ve grafen oksit-demir oksit ($\text{GO-Fe}_3\text{O}_4$) nanoparçacıklarının aygıt performansı üzerine etkilerini araştırmak amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, heteroeklemleri üretmek için taban malzeme olarak inorganik yarıiletken madde olan (100) doğrultulu, $1-10 \Omega\text{-cm}$ öz direnci olan ve $400 \mu\text{m}$ kalınlıklı bir yüzeyi parlatılmış n-tipi Si, doğrultucu tarafında ise metal ile yarıiletken arasında grafen oksit-demir oksit malzemesi kullanılmıştır. Bu bölümde, referans Au/n-Si/Al , referans Cr/n-Si/Al ve referans Ni/n-Si/Al diyotları ile $\text{Au/GO-Fe}_3\text{O}_4(\text{NP})/\text{n-Si/Al}$, $\text{Cr/GO-Fe}_3\text{O}_4(\text{NP})/\text{n-Si/Al}$ ve $\text{Ni/GO-Fe}_3\text{O}_4(\text{NP})/\text{n-Si/Al}$ heteroeklemlerinin yapımı için gerekli olan üretim süreci bulunmaktadır. Ayrıca üretilen heteroeklemlerin $I-V$ (akım-voltaj), $C-V$ (kapasite- voltaj) ölçümünde kullanılan cihazlara ve tekniklere de bu kısımda yer verilmiştir.

n-Si Kristallerinin Temizlenmesi ve Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan n-Si kristalinin yüzeylerinde herhangi bir pürüz gözlemlenmediği halde diyot yapımında daha iyi netice alınması için numunenin organik ve metalik kirlilerden temizlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden numunelere kimyasal temizleme işlemi uygulanır. Kimyasal temizleme işleminde aşağıdaki adımlar sırasıyla uygulanmıştır. (Çözelti oranları hacimseldir)

- 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 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_3$; 6:1:1) çözeltisinde 60°C 'de 10 dakika kaynatıldı.
- 5- Seyreltik HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$; 10:1) çözeltisi ile 30 saniye yıkandı.
- 6- RCA2 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$; 6:1:1) çözeltisinin de 60°C 'de 10 dakika kaynatıldı.
- 7- Deiyonize su ile yeteri kadar yıkandı.
- 8- Seyreltik HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$; 10:1) çözeltisi ile 30 saniye yıkandı.
- 9- 15-20 dakika akan deiyonize su içerisine bekletildi.
- 10- Azot gazı altında el ile temas edilmemesine özen gösterilerek iyice kurutuldu.

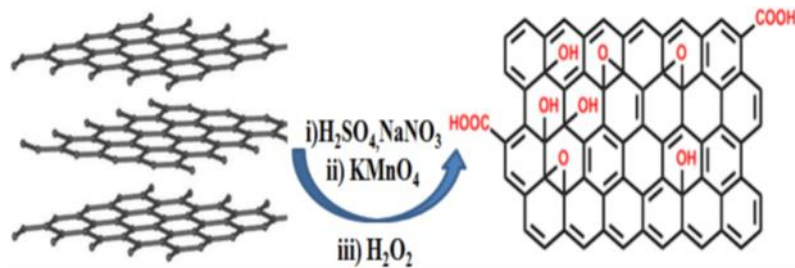
Ortam şartları ve kullanılacak malzemelerin temiz olması diyot parametrelerinin kirliliklerden olumsuz etkilenmesini önler. Bu nedenle kullanılan tüm malzemelerin ve ortamın temizliği büyük öneme sahiptir. Bunun için buharlaştırılacak olan Ni, Cr ve Al metalleri de aşağıdaki temizlik aşamalarından geçmiştir.

1. Aseton'da ultrasonik olarak 30 saniye yıkandı.
2. Metanol'de ultrasonik olarak 30 saniye yıkandı.
3. Deiyonize su ile iyice yıkandı ve Azot gazı ile kurutuldu.
4. Seyreltik HCl çözeltisinde (H_2O : HCl; 10:1) 30 saniye ultrasonik banyo içerisinde yıkandı.
5. Deiyonize su ile iyice yıkandı ve azot gazı ile kurutuldu.

GO- Fe_3O_4 Nanoparçacıkların Sentezi

Grafen, grafitin tek katmanlı hali olarak bilinmektedir. Grafit tabakalarının oksitlenerek tek katmanlı olarak birbirinden ayrılması ile grafen oksit elde edilmektedir (Bedeloğlu ve Taş 2016). Grafitten GO oluşumunun temsili gösterimi Şekil 12'de verilmiştir. Grafitten GO'nin sentezi esnasında çeşitli yükseltgeyici maddeler ilave edilerek yükseltgenme sağlanır. GO- Fe_3O_4 nanoparçacıklarının sentezi için öncelikle modifiye Hummers yöntemi kullanılarak GO hazırlandı. Bu yöntemle göre doğal grafitli pullar (5 g, 325 gözenekli), 12 ml konsantre edilmiş H_2SO_4 , 2,5 g $K_2S_2O_8$ ve 2,5 g P_2O_5 karışımına konuldu. Çözelti, $80^\circ C$ 'ye kadar ısıtılarak yağ banyosunda 5 saat karıştırıldı. Çözelti oda sıcaklığına soğutulup deiyonize su (500 ml) ile seyreltildi ve bir gece tutuldu. Daha sonra ürün, vakumlu filtre ile ayrılarak havada kurutuldu.

Önceden oksitlenmiş bu grafit pulları daha sonra Hummers yöntemi ile yeniden oksitlendi. Grafit pulları (1 g), 1.0 g $NaNO_3$ ile $2-3^\circ C$ 'de 50 ml konsantre edilmiş H_2SO_4 içine konuldu, iyice karıştırıldıktan sonra 6.0 g $KMnO_4$, bir buz banyosu içerisinde kuvvetli bir şekilde karıştırılarak ilave edildi. $35^\circ C$ 'de 4 saat daha karıştırıldıktan sonra sıcaklığı $60^\circ C$ 'nin altında tutarak 150 ml deiyonize su ile seyreltildi. Daha sonra karışıma 150 ml deiyonize su eklenerek ardından damla damla 8 ml %30'luk H_2O_2 eklendi. Karışımın rengi köpürme ile birlikte parlak sarıya dönüştü. Daha sonra karışım süzüldü ve metal iyonlarını çıkarmak için 1:10 HCl sulu çözelti ile ve ardından asidi çıkarmak için deiyonize suyla yıkandı ve havada kurutularak GO elde edildi.

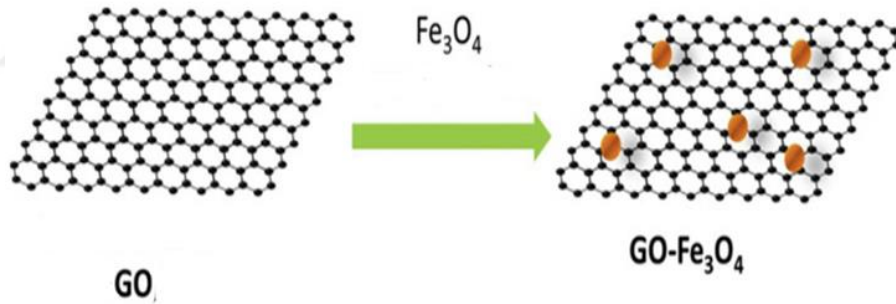


Şekil 12. Grafitten grafen oksit eldesinin şematize edilmesi

Fe_3O_4 nanoparçacıkları ise literatüre göre OAm(oleyamin) ve BE(benzil eter) varlığında Fe (acac) asetilasetonat 3'ün termal ayrışması ile sentezlendi (Metin *et al.* 2014). Sentezde, 3

mmol Fe (akas) 3, 15 ml (benzil eter) BE ve 15 ml (oleilamin) OAm içerisinde çözdürülerek çözelti, 110°C'de N₂ atmosferi altında 1 saat süreyle dehidre edildi. Daha sonra hızla 20°C / dakika ısıtma hızında 300°C'ye ısıtılarak bu sıcaklıkta 1 saat bekletildi. Reaksiyondan sonra solüsyonun oda sıcaklığına soğuması beklendi. 50 ml etanol ilave edildikten sonra Fe₃O₄ NP'ler çıkarıldı, ardından 8500 rpm'de 10 dakika süreyle santrifüjlendi. Yüksek sıcaklıkta termal ayrışma işlemine göre ortalama partikül büyüklüğü 10 nm olan Fe₃O₄ NP'ler elde edildi. Elde edilen Fe₃O₄ NP'ler, heksan ve kloroform gibi polar olmayan çözücüler içinde dağıtılarak saklandı.

GO-Fe₃O₄ nanokompoziti ise, sıvı faz kendi kendine birleştirme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır (Gümüş *et al.* 2020). 50 mg GO, oda sıcaklığında 2 saat sonikasyon yoluyla DMF (N, N-Dimetilformamid) (4.0 mL) içerisinde dağıtıldı ve daha sonra 6.0 mL kloroform içerisinde dağılmış 40 mg Fe₃O₄ NP, GO dispersiyonuna damla damla ilave edildi. Son olarak, oda sıcaklığında 3 saat yüksek frekansta ses dalgalarının etkisiyle karışımı gerçekleşen sonikasyon işleminden sonra GO-Fe₃O₄ nanokompozit harici bir mıknatıs ile ayrıldı ve elde edilen nanokompozit vakum altında kurutuldu. Şekil 13'te GO'nin Fe₃O₄ NP ile birleşimi gösterilmiştir.



Şekil 13. GO'nin Fe₃O₄ ile birleşimi

Heteroeklemlerin Üretimi

Çalışmada kullanılacak malzemeler ve Vakum cihazı temizlendikten sonra buharlaştırma işlemine geçilmiştir. Kullanılacak ısıtıcı vakum cihazındaki yerine yerleştirildi ve buharlaştırılacak olan, önceden kimyasal temizliği yapılmış Al metalinden küçük bir parça ısıtıcıdaki yerine konuldu. Metali oksitlenme türü kirliliklerden temizlemek için buharlaştırma işleminden önce vakum ortamında eritildi. Omik kontak yapmak için numunelerin omik kontak yapılacak yüzeyi yani mat tarafı aşağıda bulunan ısıtıcıya dönük olacak şekilde vakum sistemindeki tutucuya yerleştirildi. Kristalin üstte kalan parlak yüzeyi üzerine lamel konularak, buharlaşan metalin parlak yüzeyi kirletmesi önlenmiş oldu. Omik kontaklarda buharlaşacak metalin yarıiletken yüzeyine atomik boyutta daha yoğun kaplanabilmesi için buharlaştırılacak

metal ile numune arasındaki mesafenin Schottky kontaklara göre daha az olması gerekmektedir. Bu nedenle buharlaştırılacak metal ile yarıiletken malzemenin etkileşimi açısından numunenin bırakılacağı yükseklik önemlidir. Önceden çalıştırılan vakum sistemindeki basınç yaklaşık olarak 10^{-6} torr değerine düştüğünde, ısıtıcı üzerine yerleştirilen Al metali yüksek akımda buharlaştırılmıştır. Bu işlemlere ait VAKSİS termal buharlaştırma sistemimizin fotoğrafı Şekil 14'te gösterilmiştir. Kristal yüzeyine metal kaplandıktan sonra metalin yarıiletkene difüze olması gerekmektedir. Buharlaştırma işlemi tamamlanan n-Si yarıiletkeni kuartz pota içine yerleştirilerek önceden ısıtılmış Şekil 15'te görülen tavlama fırını içerisine koyulup, N_2 ortamında $450^{\circ}C$ 'de 10 dakika tavlanoarak n-Si/Al omik kontak yapımı tamamlanmıştır.



Şekil 14. VAKSİS termal buharlaştırma ünitesi



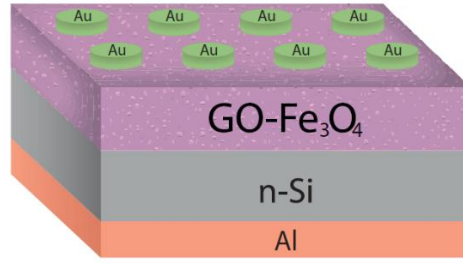
Şekil 15. Tavlama fırını

Sentezleme işlemi yapılan GO-Fe₃O₄ (NP) çözeltisi omik kontak işlemi tamamlanan *n*-Si yarıiletken kristallerinin parlak yüzeyine basit damlatma yöntemiyle film kalınlığı yaklaşık 120 nm (50mg GO ve 40mg Fe₃O₄) olacak şekilde kaplandı. Kaplama işlemi yapılırken kaplamanın olabildiğince homojen olmasına dikkat edildi. Kaplama işleminden sonra, GO-Fe₃O₄ nanoparçacıkları ile kaplanmış olan numunelerimiz oda sıcaklığında 12 saat kadar süreyle kurumaya bırakıldı ve GO-Fe₃O₄ kaplama işlemleri tamamlandı.

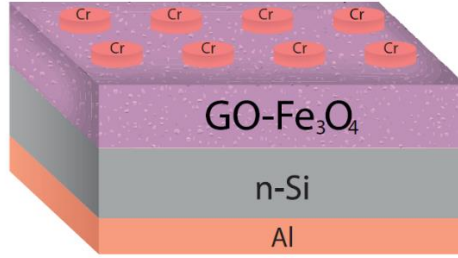
Omik kontağı yapılan referans *Au/n-Si/Al*, *Cr/n-Si/Al* ve *Ni/n-Si/Al* diyotları ile omik kontağı ve *GO-Fe₃O₄ (NP)* kaplaması yapılan *Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al*, *Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al* ve *Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al* heteroeklemlerinin metal kontaklarının yapılması için Şekil 16'daki VAKSİS sputtering (saçtırma) Cihazı kullanılarak GO-Fe₃O₄ (NP) üzerine nokta kontaklar yapıldı. Bu yöntemle nokta kontak yapmak için yüksek vakum ortamında yüksek elektrik gerilimi uygulandı ve katı metal hedeften atomlar koparıldı. Kaplama ünitesinin içindeki basınç $\approx 10^{-6}$ torr olunca, sisteme akım verildi. Bu işlemler her üç heteroeklem için yapıldı. GO-Fe₃O₄ (NP) kaplanmış yüzey üzerine herbirinin nokta kontak alanı $7.85 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ olan, yaklaşık 40 nm kalınlıkta Au, 60 nm kalınlıkta Cr ve yaklaşık 100 nm kalınlıkta Ni metalleri Şekil 16'daki Sputtering Cihazı kullanılarak ayrı ayrı buharlaştırıldı ve Şekil 17, Şekil 18, ve Şekil 19 gibi üç farklı heteroeklem elde edildi. Elde edilen referans aygıtların laboratuvar sıcaklığında; heteroeklemlerin ise geniş sıcaklık aralığında I-V ve C-V ölçümleri alındı. Alınan bu ölçümlerden farklı metotlarla bazı temel diyot parametreleri hesaplandı.



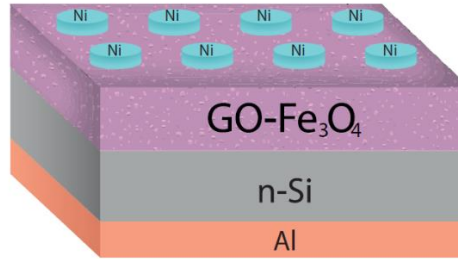
Şekil 16. VAKSİS sputtering cihazı



Şekil 17. Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al aygıtının şematik diyagramı



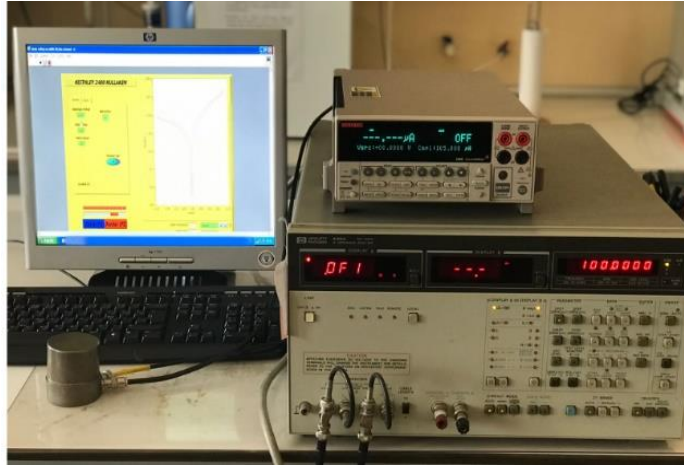
Şekil 18. Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al aygıtının şematik diyagramı



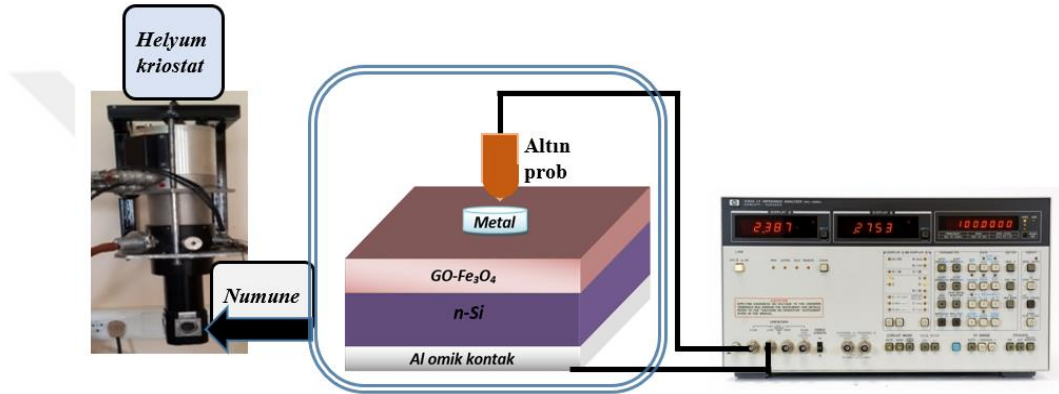
Şekil 19. Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al aygıtının şematik diyagramı

Deney ve Ölçüm Sistemleri

Fabrikasyonunu yaptığımız heteoreklemlerin “KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile I-V ve HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı ile de C-V ölçümleri alındı. I-V ve C-V ölçümlerinin alındığı sistemlerin düzeneği Şekil 20’de verilmiştir. Şekil 21’de heteroeiklemlerin sıcaklığa bağlı C-V ölçümlerinin alındığı düzenek gösterilmektedir. Sıcaklığa bağlı ölçümlerde, numune sıcaklığı LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi ile $\pm 0,1$ K hassasiyetle kontrol edildi.



Şekil 20. Akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçüm sistemleri



Şekil 21. LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi ve kriostat

ARAŞTIRMA BULGULARI

Giriş

Bu bölümde, GO-Fe₃O₄ nanoparçacıkların XRD, TEM, SEM ve FTIR kullanılarak karakterize edilen yapısal ve morfolojik özelliklerinin yanısıra üretimi tamamlanan *Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al* ve referans *Au/n-Si/Al*, *Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al* ve referans *Cr/n-Si/Al* ile *Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al* ve referans *Ni/n-Si/Al* aygıtlarının, laboratuvar sıcaklığı ve farklı sıcaklıklarda alınmış I-V ölçümleri ve farklı sıcaklıklarda alınmış C-V ölçümleri yer almaktadır. Bu ölçümler kullanılarak temel diyot parametrelerinin bir kısmının farklı metotlarla hesaplanması ve bunlara ait tablolar ile grafikler yer almaktadır. Hazırlanan numunelere ait anlatımda kullanılan simgeler Tablo 2’de verilmiştir.

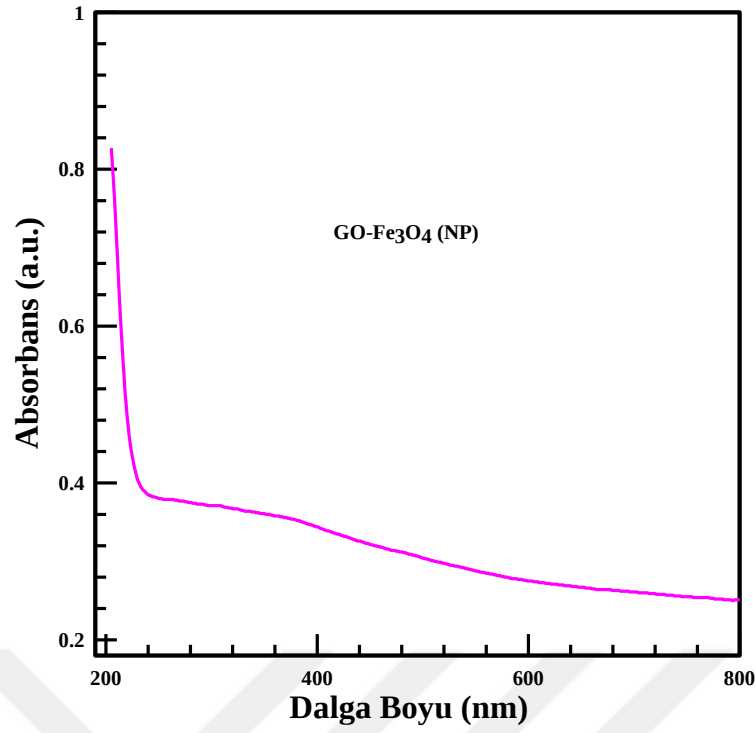
Tablo 2. Numunelere Ait Simgeler

Numune Adı	Simge
<i>Au/n-Si/Al</i>	<i>R1</i>
<i>Cr/n-Si/Al</i>	<i>R2</i>
<i>Ni/n-Si/Al</i>	<i>R3</i>
<i>Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al</i>	<i>D1</i>
<i>Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al</i>	<i>D2</i>
<i>Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al</i>	<i>D3</i>

Filmlerin Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

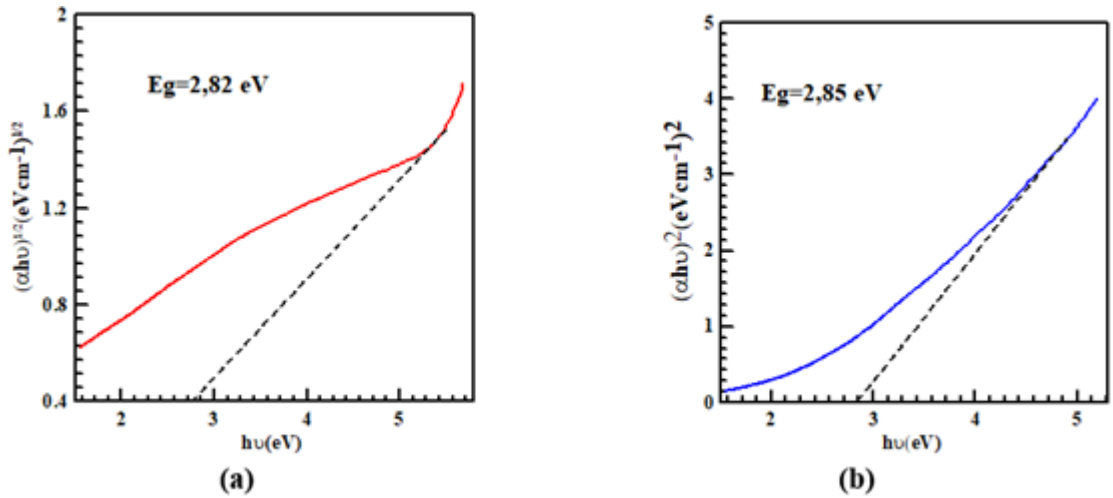
GO- Fe₃O₄ (NP) ince filminin enerji bant aralığının belirlenmesi

UV-Vis spektrumlarından yararlanılarak GO-Fe₃O₄(NP) ince filminin enerji bant aralığı hesaplanmıştır.



Şekil 22. GO- Fe₃O₄ nanoparçacıklarının UV-Vis spektrumu

GO-Fe₃O₄ (NP) için bant aralığı $\alpha h\nu = A (h\nu - E_g)^{n/2}$ formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlikte h Planck sabiti, ν frekans, α soğurma katsayısı, A oransal sabit ve E_g bant aralığıdır. n ise bir sabit olup, doğrudan geçişler için değeri $\frac{1}{2}$ iken dolaylı geçişlerde değeri 2'dir. Şekil 23'teki Tauc grafiklerinde yatay eksene düz bir çizgiyle fit çizildiğinde, fitin yatay eksenini kestiği noktadan filmin enerji bant aralığı elde edilir. Bu çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda GO-Fe₃O₄ (NP) filminin Şekil 23.(a) ve Şekil 23.(b)'de görüldüğü gibi dolaylı ve doğrudan enerji bant aralığı sırasıyla 2,82 eV ve 2,85 eV olarak hesaplandı. Elde edilen bu değerler literatürde GO-Fe₃O₄ (NP) için hesaplanmış ve doğrudan enerji bant aralığı 2,81 eV, dolaylı enerji bant aralığı 2,83 eV olarak bulunmuştur (Kamakshi *et al.* 2018).



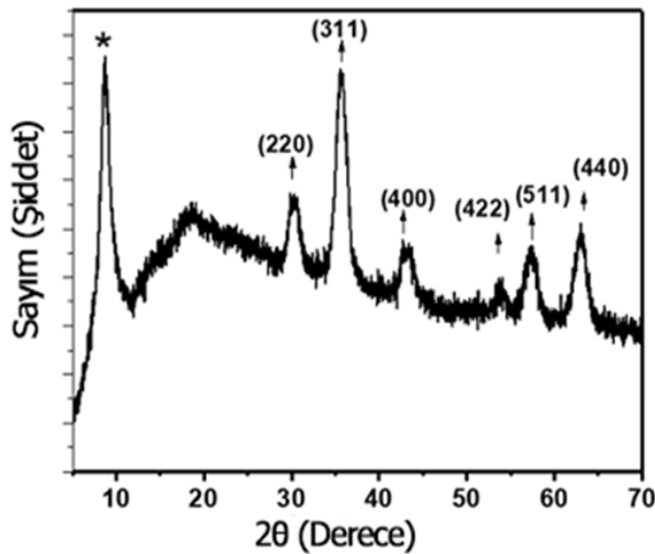
Şekil 23. GO-Fe₃O₄ nanoparçacıklarının oda sıcaklığında $(\alpha h\nu)^2$ 'nin $h\nu$ 'ye karşı değişim grafiği (a) Dolaylı bant aralığı için, (b) doğrudan bant aralığı için

XRD (X-Işını kırınımı) desenleri

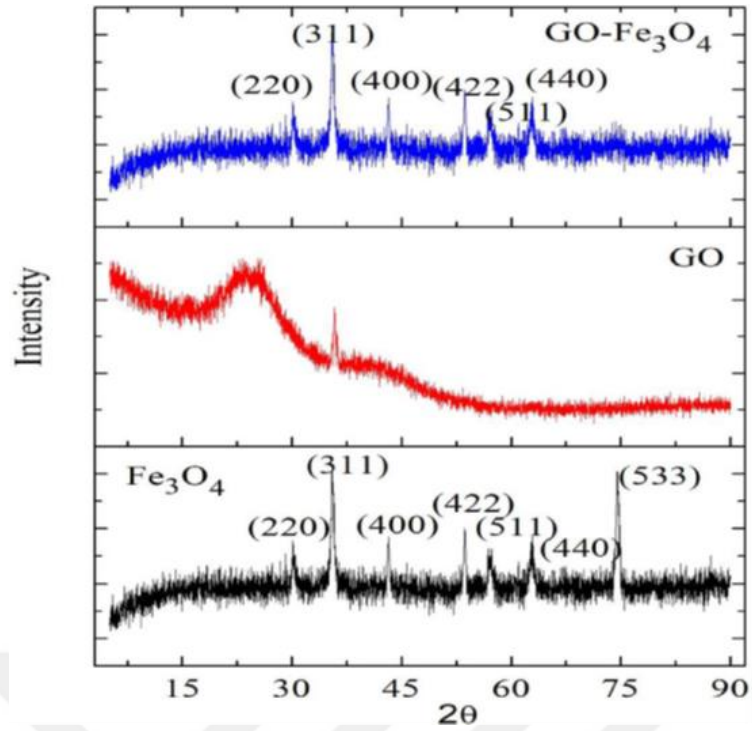
Malzemelerin yapısal karakterizasyonunda kullanılan XRD tekniği ile X-ışınlarının madde ile etkileşmesi sağlanarak kristalin yönelimi, yüzey gerilmeleri ve kristal yapısı hakkında bilgiler elde edilir. Ayrıca X-ışınlarının dalga boylarının atomlar arası mertebede olması, malzemeye yapısal bir zarar vermediğinden XRD tekniğinin kullanımı bir avantaja dönüşmektedir.

Şekil 24'te GO-Fe₃O₄ nanokompozitinin XRD deseni gösterilmiştir. $2\theta=12^\circ$ 'deki tepe, GO'nin karakteristik tepe noktasıdır (Balasubramanyan *et al.* 2018; Dehghan *et al.* 2019). Diğer tepe noktaları ($2\theta = 30.5^\circ$ (220); 36.1° (311); 43° (400); 53.9° (422); 57.3° (511); 63° (440)), Fe₃O₄ nanopartiküllerin spinel kristal yapısının karakteristik tepe noktalarına atfedilir (Kamakshi *et al.* 2018). Bu nedenle, Fe₃O₄ nanopartiküllerin partikül boyutlarını, morfolojilerini ve kristalliklerini koruyarak GO nano yapraklar üzerinde başarıyla bir araya getirildiği sonucuna varılabilir (Güney 2017).

Tüm kırınım piklerinin bağıl yoğunluğu ve pozisyonu literatürdeki GO-Fe₃O₄ nanoparçacıklarınki ile uyumludur (Ouyang *et al.* 2015; Kıрма 2017; Rastgar *et al.* 2018). Neolaka *et al.* (2020) tarafından yapılan çalışmada GO-Fe₃O₄ nanoparçacıkların kırınım pikleri Şekil 25'te görüldüğü üzere aynı açı değerlerinde aynı pikleri vermiştir. Burada GO-Fe₃O₄ malzemesi için kırınım tepe noktası 35.5002° 'de gözlenirken, 0.252877 nm d-aralığı değerine sahiptir. Fe₃O₄'ün varlığı, GO- Fe₃O₄ (NP) malzemesi için katmanlar arasındaki mesafenin (d aralığı) GO malzemesine kıyasla daha yüksek olmasına neden olur. Arttırılmış d-aralığı, daha fazla bağlanma bölgesi için çok faydalıdır, ağır metal iyonlarının difüzyonunu teşvik eder.



Şekil 24. GO- Fe₃O₄ nanoparçacıkların XRD deseni



Şekil 25. GO-Fe₃O₄ nanoparçacıkların Literatürdeki XRD deseni (Neolaka *et al.*2020)

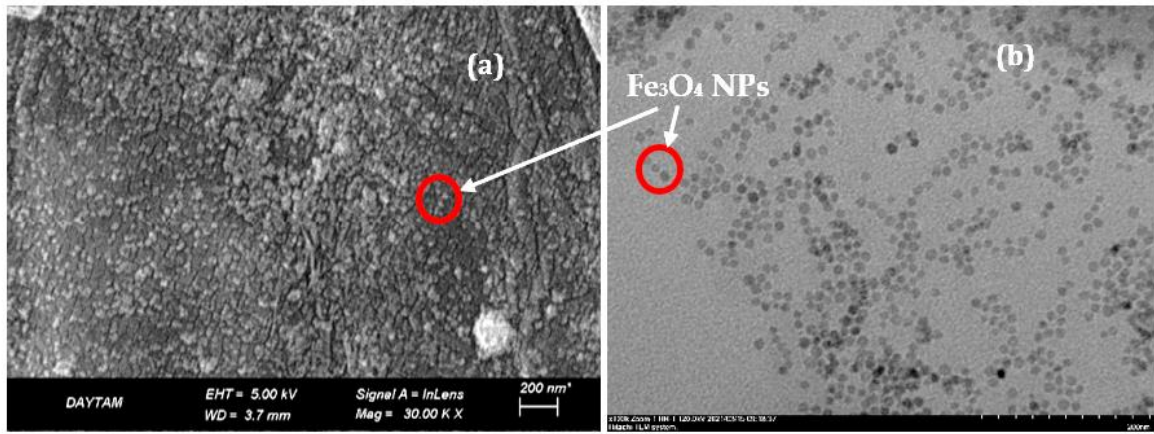
SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri ve TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu)

GO-Fe₃O₄ nanokompozit yüzeyinin daha büyük görüntüsünü elde etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Görüntü elde edilmesinde, katı yüzeyine yüksek enerjili bir elektron demeti gönderilmesiyle oluşan sinyal değişimi esas alınır. Bu sinyal değişimleri ile yüzeyin kristal yapısı, kimyasal bileşimi ve yüzeyin haritası gibi özellikler hakkında bilgi edinilir.

Şekil 26.(a)'da GO-Fe₃O₄ nanokompozit filminin SEM görüntülerinde Fe₃O₄ nanoparçacıklarının GO yapraklarına homojen dağılımı görülmektedir.

GO- Fe₃O₄ nanokompozit filminin küçük boyuttaki görüntülerini elektron demeti kullanarak elde eden geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılmıştır. TEM ile alınan ölçümlerde elektronların numune içinden geçmesiyle numunenin yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi ve kristal yapısı hakkında bilgi edinilir.

Şekil 26.(b)'de GO-Fe₃O₄ nanokompozit filminin TEM görüntülerinde görüldüğü gibi Fe₃O₄ nanoparçacıkları, ortalama 9 nm'lik bir partikül boyutu ile çok dar bir boyut dağılımı göstererek herhangi bir topaklanma olmaksızın GO nano yapraklara iyi bir şekilde dağılmıştır. GO nano yaprakları ise çok ince olduğundan, TEM görüntülerinde görülen gözlemlenebilir kırıksıklıkları ile tanınabilirler.

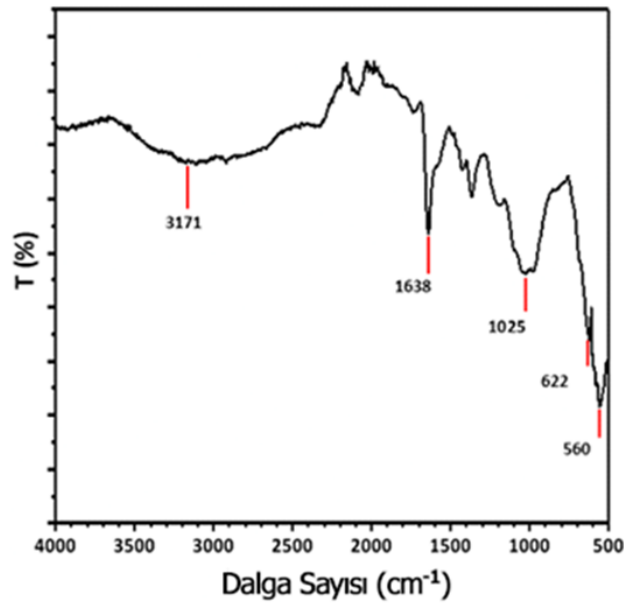


Şekil 26. GO-Fe₃O₄(NP)'nin SEM (a) ve TEM (b) görüntüleri

FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)

Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR), malzemelerin kimyasal bileşimini tanımlamak için kullanılan hassas, ucuz, hızlı ve güvenilir bir tekniktir. Grafiklerle desteklenen FTIR çalışmaları ile maddeyi oluşturan kimyasal bileşenlerin incelemesi yapılmaktadır. IR spektrumu, maddenin atomları arasındaki bağların titreşmesiyle meydana gelen frekanslarına karşılık absorpsiyon piklerini göstermektedir (Büyüksırt ve Kuleaşan 2014).

Şekil 27'de, GO-Fe₃O₄ nanoparçacıklarının FTIR ile 500-4000 cm⁻¹ aralığında spektrumları alınarak nitel olarak fonksiyonel grupları incelenmiştir. 560cm⁻¹ ve 622 cm⁻¹'de gözlenen zirveler, Fe₃O₄ nanopartikülünün kristalin kafesindeki Fe-O bağlarından kaynaklanır (Waldron 1955). 3171 cm⁻¹, 1638 cm⁻¹ ve 1025 cm⁻¹'de gözlenen zirveler ise GO'in hidroksil, C = C ve C- O bağ gerilmelerine atfedilir (Sharma *et al.* 2017).



Şekil 27. GO- Fe₃O₄(NP)'nin FTIR spektrumu

I-V (Akım -Voltaj) Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanımı

$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin $I-V$ ölçümleri sıcaklık kontrol ünitesi ile $D1$ heteroeklemi için 25K'lık adımlarla 75K- 350K aralığında, $D2$ heteroeklemi için 20K'lık adımlarla 100K-360K aralığında, $D3$ heteroeklemi için ise 20K'lık adımlarla 80K-340K aralığında alındı. Heteroeklemlerin idealite faktörleri ve engel yükseklikleri $I-V$ grafiğinin lineer davranış sergilediği düz beslem kısmından, seri direnç değerleri ise lineerliğin bozulduğu yüksek akım değerlerine karşılık gelen kısımdan hesaplandı.

Heteroeklemlerin idealite faktörünün hesaplanmasında Termiyonik Emisyon (TE) teorisine göre, daha önce 2.10'da verilen denklemin her iki tarafının tabii logaritmasını alıp, sonra da V 'ye göre türevi alınarak elde edilen (2.11) denkleminde yararlanıldı.

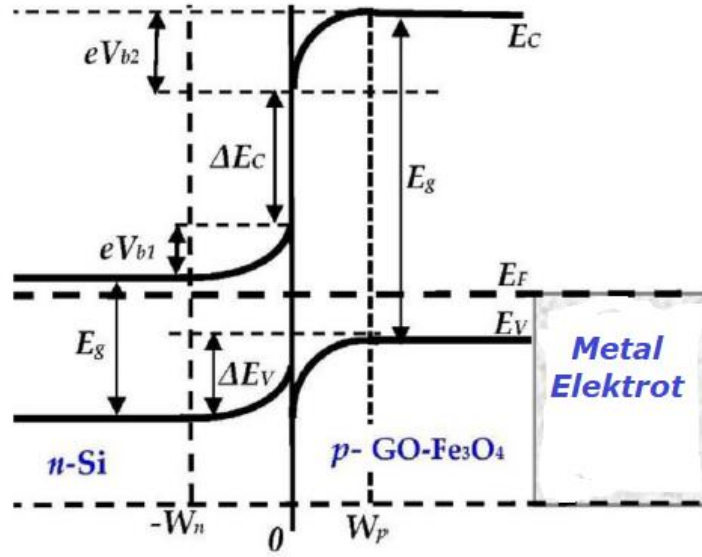
$I-V$ ölçümlerinden $\ln I$ 'nın V 'ye karşı çizilen grafiğin, düz beslem kısmındaki doğrusal bölgeye doğru bir fit çizilirse bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ ifadesine ulaşılır. Elde edilen bu değer ve sabitler (2.11) denkleminde yerine yazılarak her bir heteroeklem için belirtilen sıcaklık aralıklarında idealite faktörü değerleri hesaplanır.

I_0 doyma akım yoğunluğu, çizdiğimiz fitten elde edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksen kestiği noktadır ve (2.8) denklemindeki I_0 doyma akım yoğunluğu eşitliğinin iki tarafının da tabii logaritması alınıp $e\Phi_b$ ifadesi yalnız bırakılırsa, (2.12) eşitliği ile verilen engel yüksekliği ifadesi elde edilmiş olunur.

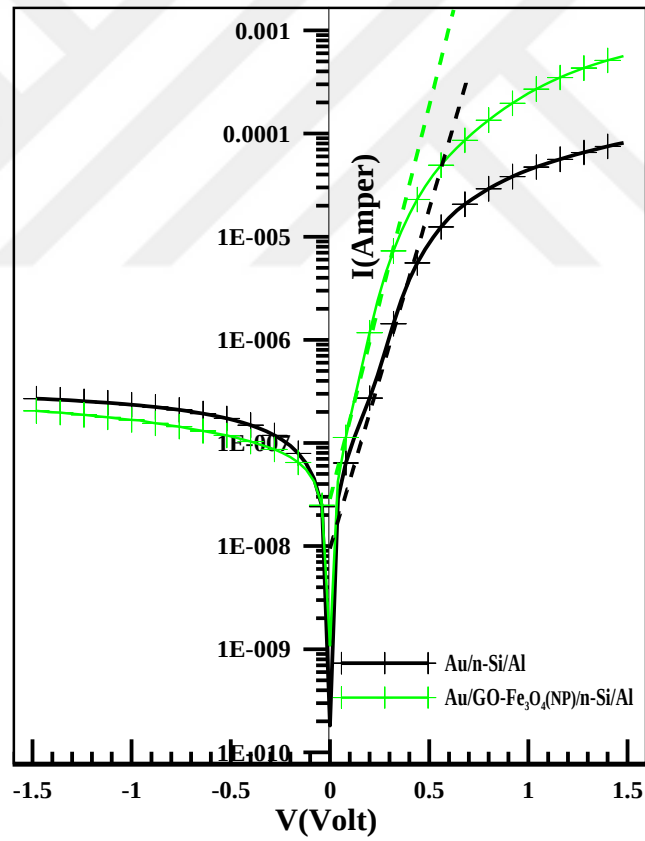
$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin ve aynı şartlar altında hazırlanmış olan referans $R1$, $R2$ ve $R3$ yapılarının oda sıcaklığında $I-V$ ölçümleri alınarak, grafikleri sırasıyla Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31'deki gibi çizilmiştir. Bu grafikler ile geleneksel metot (Termiyonik Emisyon) kullanılarak engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri hesaplanıp Tablo 3'te gösterilmiştir.

Metal/ $\text{GO-Fe}_3\text{O}_4$ (NP) /n-Si/Metal yapısının termal denge altında enerji-bant diyagramı Şekil 28'de gösterilmiştir. $\text{GO-Fe}_3\text{O}_4$ (NP) p-tipi olduğu için n-Si ile iyi performans verecektir (Gümüş and Aydoğan 2020).

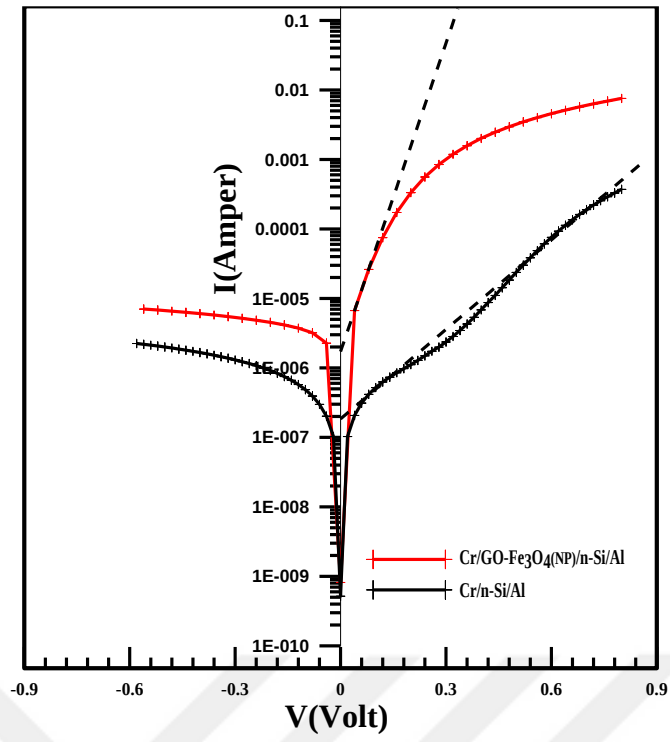
Bir yarıiletken (n-Si) diğer yarıiletken $\text{GO-Fe}_3\text{O}_4$ (NP) veya metal ile temas ettiğinde, yüklerin ayrılması nedeniyle metal-yarı iletken veya yarıiletken-yarı iletken ara yüzeyinde potansiyel engeli oluşur. Doğrultucu kontak durumunda iken elektronlar tek bir yönde kolayca geçiş yaparken, potansiyel engeli nedeniyle diğer yöndeki hareketi önlenir.



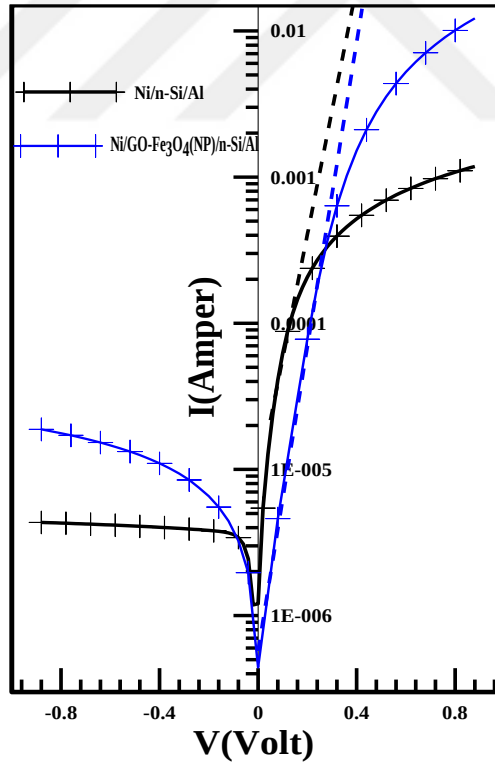
Şekil 28. Metal/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Metal yapısının enerji-bant diyagramı



Şekil 29. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış referans Au/n-Si/Al ve Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al heteroeklemlerine ait I-V grafikleri



Şekil 30. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış referans Cr/n-Si/Al ve $\text{Cr/GO-Fe}_3\text{O}_4(\text{NP})/\text{n-Si/Al}$ heteroeklemlerine ait I-V grafikleri



Şekil 31. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış referans referans Ni/n-Si/Al ve $\text{Ni/GO-Fe}_3\text{O}_4(\text{NP})/\text{n-Si/Al}$ heteroeklemlerine ait I-V grafikleri

Tablo 3. Oda Sıcaklığında Aynı Şartlar Altında Hazırlanmış Referans, $R1$, $R2$ ve $R3$ ile $D1$, $D2$ ve $D3$ Heteroeklemlerine Ait I-V Grafiklerinden Geleneksel Metotla Elde Edilen n ve Φ_b Değerleri

Sıcaklık (Laboratuvar Sıcaklığı 300 K)	I-V	
	n	$\Phi_b(eV)$
$R1$	2,57	0,70
$D1$	2,02	0,76
$R2$	3,91	0,69
$D2$	1,28	0,63
$R3$	1,98	0,59
$D3$	1,61	0,66

Tablo 3'te ifade edildiği gibi oda sıcaklığında $R1$ aygıtı için idealite faktörü 2,57; engel yüksekliği değeri 0,70 eV olarak bulunurken aynı şartlar altında hazırlanmış $D1$ heteroeklemi için idealite faktörü 2,02; engel yüksekliği 0,76 eV olarak bulundu. Benzer şekilde $R2$ aygıtı için idealite faktörü 3,91; engel yüksekliği 0,69 eV olarak hesaplanırken, $D2$ heteroeklemi için idealite faktörü 1,28; engel yüksekliği 0,63 eV olarak hesaplandı. $R3$ aygıtı ve $D3$ heteroeklemi için ise sırasıyla idealite faktörleri 1,98 ve 1,61 olarak bulunurken engel yüksekliği değerleri 0,59 eV ve 0,66 eV olarak bulundu.

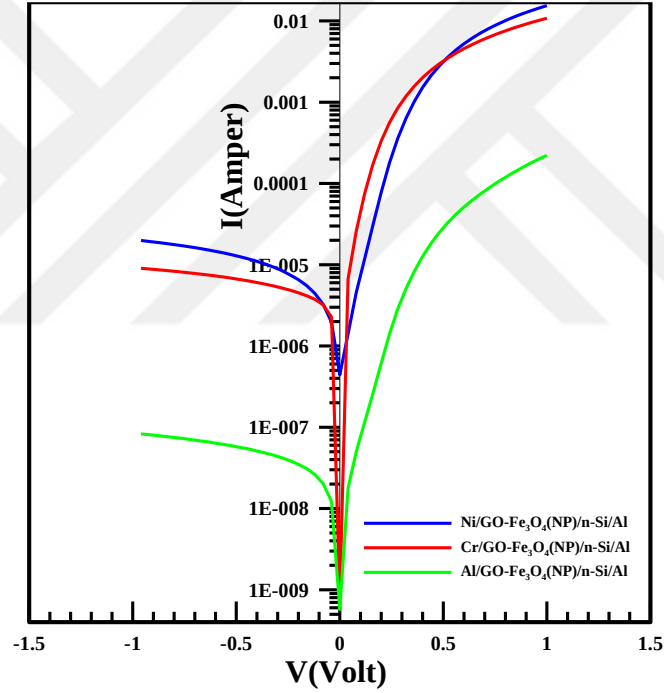
GO-Fe₃O₄ filmi, metal ile n-Si alt tabaka arasında fiziksel bir bariyer oluşturup metalin doğrudan n-Si yüzeyi ile temas etmesini önleyerek n-Si yüzeyinde pasivasyona sebep olmaktadır. (Bolognesi *et al.* 2003; Zahn *et al.* 2003; Çakar *et al.* 2006; Güllü and Türüt 2009)

Grafiklerden ve elde edilen diyot parametrelerinden görüldüğü üzere GO-Fe₃O₄ nanokompozit filminin, heteroeklemlerin karakteristiğinde iyileşme yaptığı görülmektedir. GO-Fe₃O₄ (NP) filmi aygıtların uzay yükü bölgesini etkileyerek engel yüksekliği değerlerini genel olarak olumlu yönde değiştirmiştir (Reddy *et al.* 2012).

GO-Fe₃O₄ nanokompozit filmi, heteroeklemlerin idealite faktörü değerini ideal değeri olan 1'e yaklaştırırken engel yüksekliği değerinin istenildiği üzere daha yüksek değerlere ulaşmasını sağlamıştır. Böylece Metal/n-Si arayüzeyinde GO-Fe₃O₄ (NP) filmi kullanarak istenilen özelliklerde aygıtların tasarlanabileceği sonucuna varılmıştır. Arayüzey tabakaları arayüzey durumlarını, yüzey hasarlarını ve dislokasyonları en aza indirmesi sebebiyle cihaz kalitesini arttırmak için kullanılabilir (Reddy 2014).

$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerine ait oda sıcaklığı için çizilmiş I-V grafikleri Şekil 32'de birlikte verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi heteroeklemlerin I-V eğrileri metal kontaklara

bağlı olarak değişmektedir. Örneğin *D1* heteroeklemi için ters öngerilim akımı yaklaşık 1×10^{-8} A iken *D3* heteroeklemi için 1×10^{-5} A olmuştur. Akım değerindeki bu değişimin GO-Fe₃O₄ (NP) filmi ve metal ile yarı iletken arasındaki Φ_m (metal iş fonksiyonu) farkından kaynaklandığı söylenebilir (Singh 1985; Orak *et al.* 2015; Yao *et al.* 2017). Kullanılan metallerin iş fonksiyonları Ni için 5,15 eV; Au için 5,1 eV; Cr için ise 4,5 eV'tur. Bir metal ve bir yarı iletken temas ettiğinde, arayüzeyde doğrultucu özelliklere sahip potansiyel bir engel oluşur. Kontak yapısındaki bu engel yüksekliği, çoğunlukla metalin Φ_m 'na ve yarı iletkenin χ_s 'ne bağlıdır (Çankaya *and* Uçar 2004). Engel yüksekliğinin bu bağımlılığı $\Phi_b = S(E_s - \Phi_m) + (1-S) \Phi_{cni}$ ifade edilir (Smith and Rhoderick 1971). Burada E_s elektronun iyonlaşma enerjisidir. Bu ifade yarıiletkenin elektronegatifliğinin (χ_s) ve bant aralığının (E_g) toplamına eşittir. Φ_{cni} yük nötrülüğü seviyesi ve S değeri 1 olan Schottky limitidir. Engel yüksekliği, farklı schottky metalleri kullanılarak kontrol edilebilir.

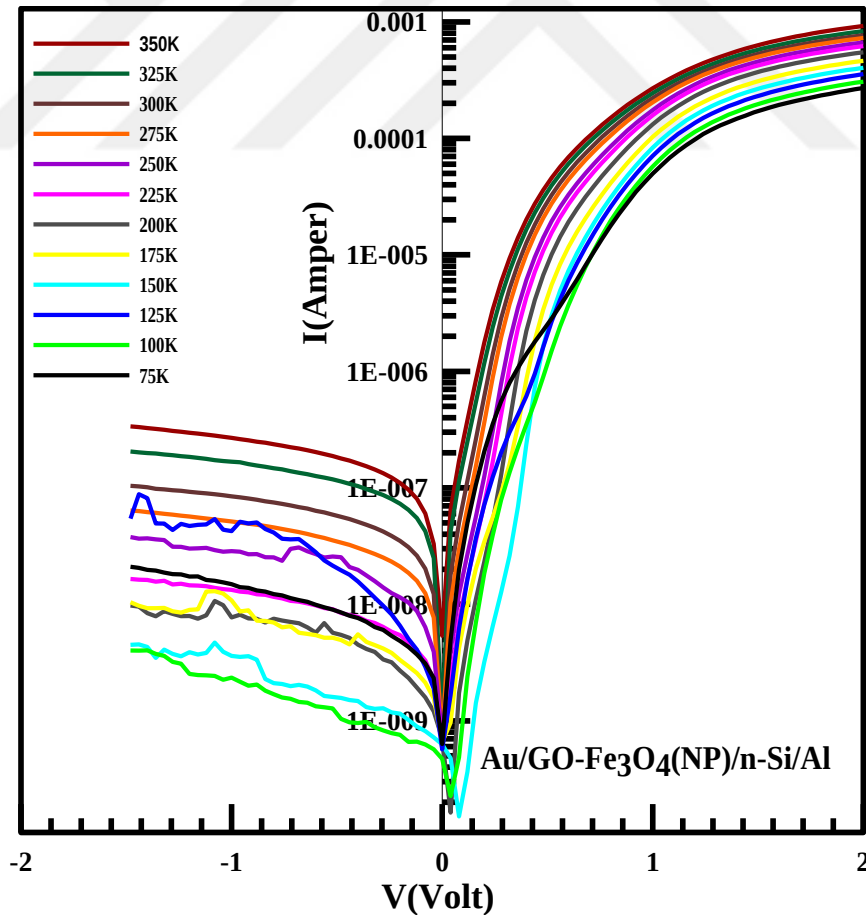


Şekil 32. Oda sıcaklığında aynı şartlarda hazırlanmış Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al, Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al heteroeklemlerine ait I-V grafikleri

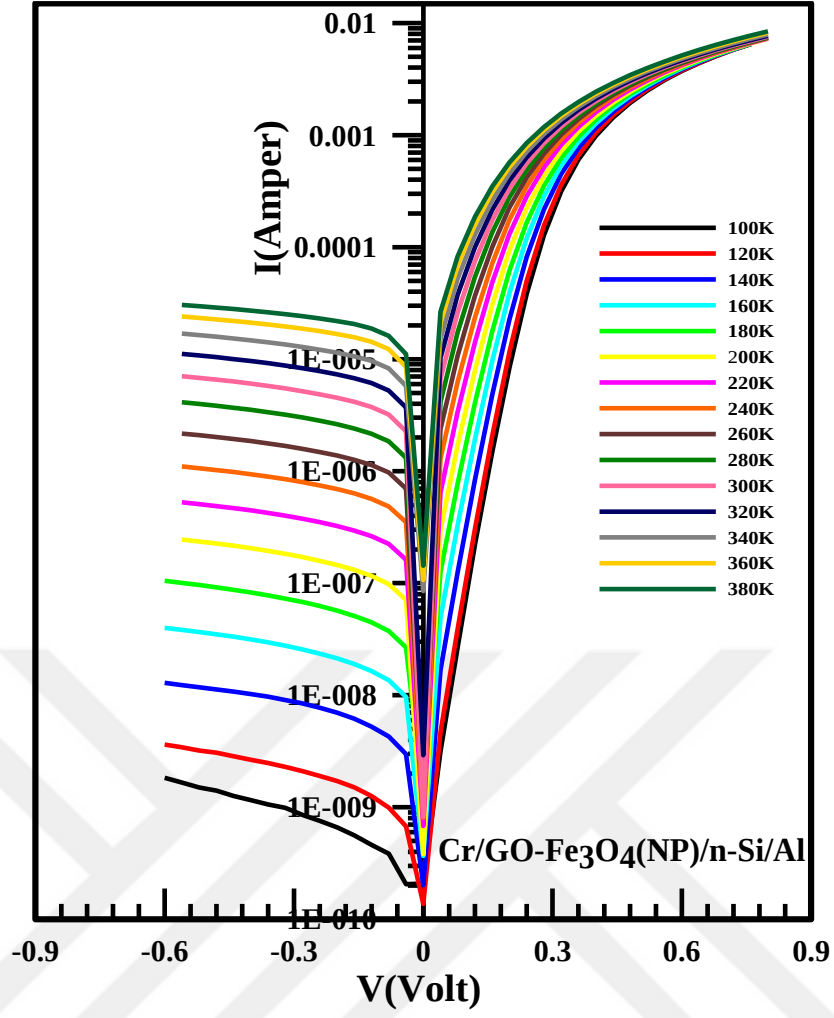
$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı I - V grafikleri sırasıyla Şekil 33, Şekil 34 ve Şekil 35'te gösterilmektedir.

Elde ettiğimiz heteroeklemler, grafiklerden de görüldüğü üzere ters beslem durumunda gerilime zayıf bir şekilde bağımlıdır. Bu, heteroeklemlerin iyi bir doğrultucu etkiye sahip olduğunu göstermektedir. İleri (düz) beslem yarı-logaritmik I - V grafiği düşük voltajlarda lineerlik göstermekte ancak yüksek voltajlarda lineerlikten sapmaktadır. Bunun sebebi seri direnç etkisi, arayüzey durumları ve arayüzeydeki tabakanın varlığına atfedilebilir (Deniz *et al.* 2014; Gülnahar *et al.* 2019).

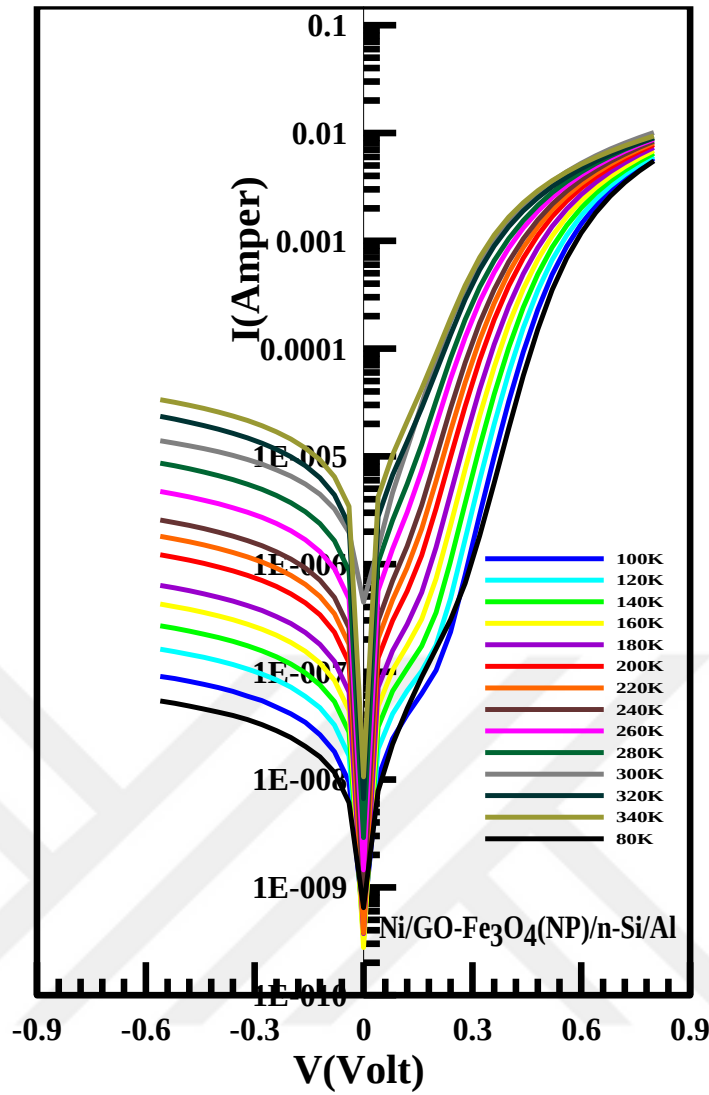
Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da ise her üç heteroeklemin sıcaklığa bağlı olarak geleneksel metot ile elde edilen temel diyot parametreleri yer almaktadır. $D1$ heteroeklemi için 75 K ile 350 K arasında idealite faktörü 6,78 ile 1,98 arasında değerler alırken, engel yüksekliği 0,18 ile 0,86 eV arasında değişmektedir. $D2$ heteroeklemi için 100 K ile 360 K arasında idealite faktörü 2,46 ile 1,28 arasında iken, engel yüksekliği 0,26 ile 0,73 eV arasında değişmektedir. $D3$ heteroeklemi için ise 80 K ile 340 K arasında idealite faktörü 6,30 ile 1,48 arasında iken, engel yüksekliği 0,20 ile 0,75 eV arasındadır.



Şekil 33. Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı I - V grafikleri



Şekil 34. Cr/GOFe₃O₄(NP) /n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı *I-V* grafikleri



Şekil 35. Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı *I-V* grafikleri

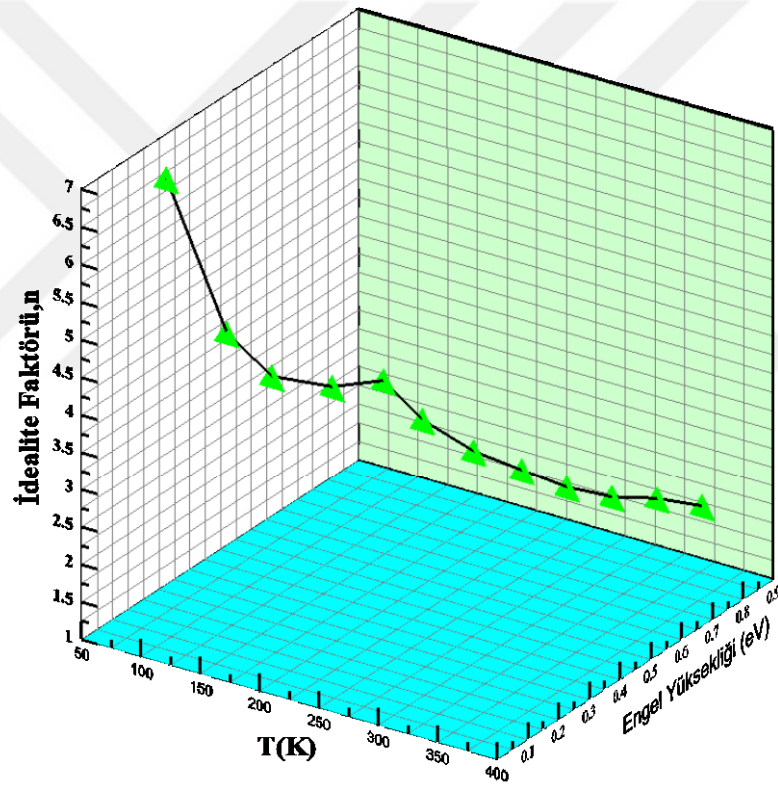
Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'dan da anlaşılacağı gibi düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça idealite faktörü değeri azalırken, engel yüksekliği değerinin arttığı görülmektedir. Buradan, bu iki parametrenin sıcaklığa kuvvetli bir biçimde bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Sıcaklık artarken idealite faktörünün azalıp engel yüksekliğinin artması TE teorisinden sapmayı gösterir. İdeal TE teorisinden sapma, eklem bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon akımına, TE alan emisyonuna ve anomalisine, arayüzey tabakasında tünelleme akımına bağlı olarak iletim mekanizmasının çeşitli etkilerine bağlanabilir (Güllü *et al.* 2019; Kumar *et al.* 2019). İdealite faktörü ve engel yüksekliği parametrelerinin genellikle ideal durumda voltajdan bağımsız olduğu varsayılır ancak arayüzey tabakası, arayüzey hal yoğunluğu, tükenme bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu ve bariyerde tünelleme varlığında voltaja bağlı hale gelir (Jyothi *et al.* 2013).

Bariyer homojensizlikleri; yüzey kusurlarının neden olduğu arayüzün kalitesizliği, arayüzey tabakasının stokiometrisi, düzgün olmayan arayüzey yük dağılımı, düzgün olmayan

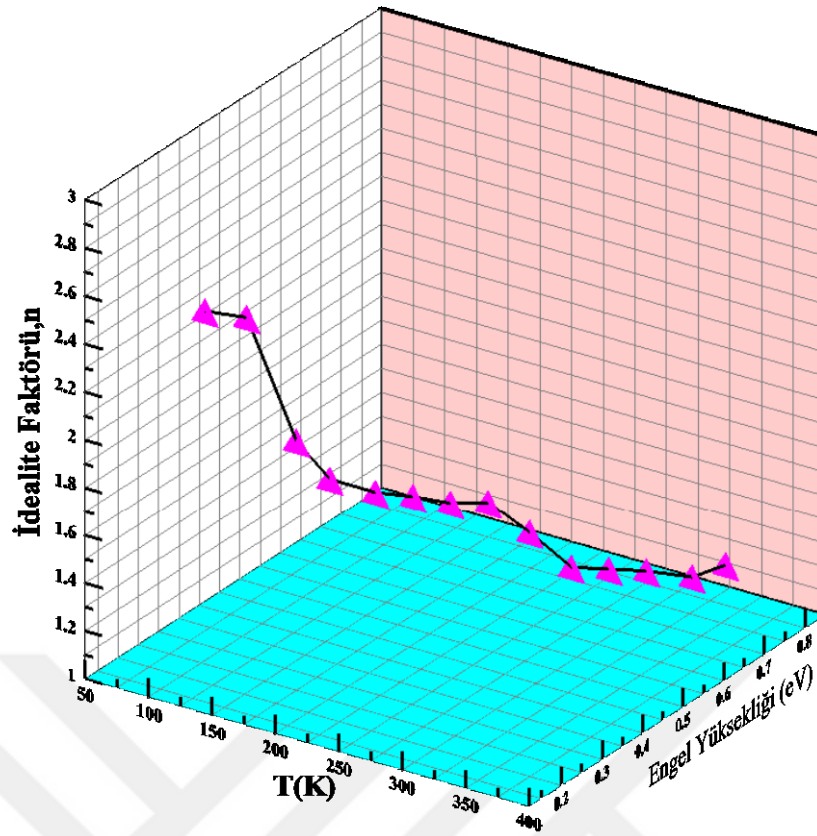
arayüzey tabaka kalınlığı ve doping atomlarının yerel dağılımı gibi çeşitli fiziksel nedenlerden kaynaklanabilir (Reddy *et al.* 2020).

Düşük sıcaklık bölgesinde taşıyıcılar yeterli enerjiye sahip olmadığından daha düşük engel yüksekliğine sahip bölgeleri geçer (Güllü 2019). Düşük sıcaklıklarda akım, düşük engel yüksekliğine sahip bölgeleri aşan elektronlarla oluştuğundan engel yüksekliği düşerken idealite faktörü yükselir (Sullivan *et al.* 1991; Tung 1992). Ayrıca sıcaklık değişimiyle engel yüksekliğinde ve idealite faktöründe meydana gelen sapmaların başka bir sebebi de ara yüzey hal yoğunluğu, ara yüzey bölgesinin homojen olmaması ve ara bölgede düzensiz yük dağılımlarının varlığı olabilmektedir (Quan and Hbib 1993; Biber 2003; Kumar *et al.* 2018).

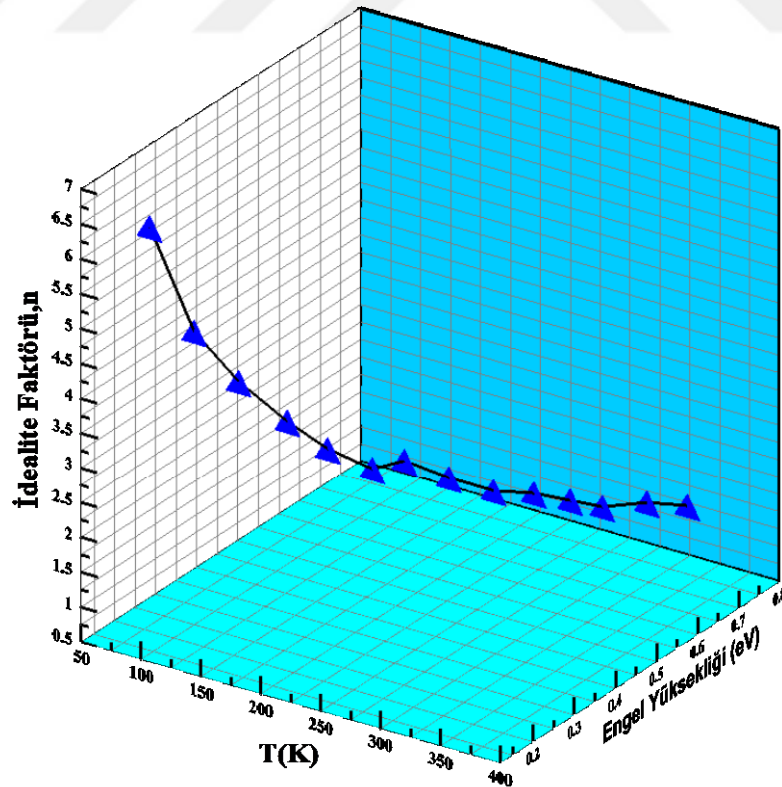
$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa karşı idealite faktörü ve engel yüksekliği grafikleri Şekil 36, Şekil 37 ve Şekil 38’de gösterilmiştir.



Şekil 36. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemi için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği



Şekil 37. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemi için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği

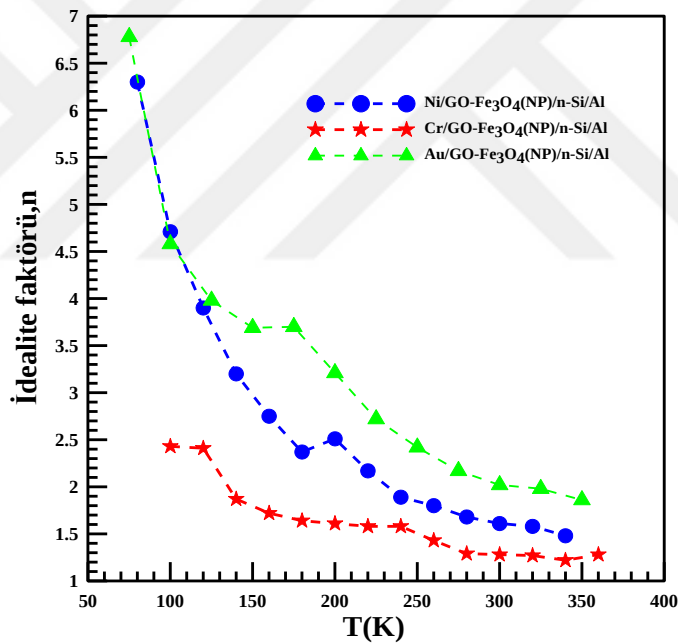


Şekil 38. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemi için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafiği

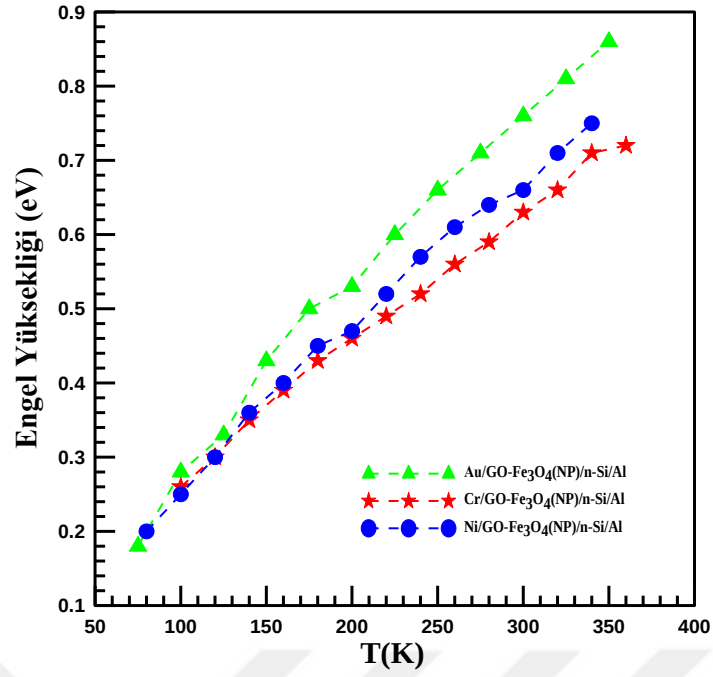
$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı idealite faktörü grafikleri ile sıcaklığa bağlı engel yüksekliği grafikleri sırasıyla Şekil 39 ve Şekil 40’da birlikte gösterilmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi üç aygıtın da sıcaklığa bağlı parametreleri benzer davranışı göstermektedir.

İdealite faktörü, düz beslemde bariyer bozulmasını ölçtüğünden saf termiyonik emisyon teorisine bağlılığın bir ölçüsüdür. Şekil 39’da 100 K civarındaki n değerleri, engel boyunca, jenerasyon-rekombinasyon akımı gibi diğer akım taşıma mekanizmalarının varlığını gösterirken, sıcaklık arttıkça termiyonik emisyon akımı baskın olur ve dolayısıyla 350K civarında 1 (bir) değerine daha yakındır (Gora *et al.* 2018).

Engel yüksekliğinin sıcaklık ile değişimi ise Werner and Guttler modelinde (1991) Gaussian fonksiyonuna göre engel yüksekliğinin hem sıcaklık hem de gerilime bağlı olmasıyla açıklanırken, Tung modeline (1992) göre ise farklı engel yüksekliklerinin oluşması homojen olmayan bölgelerden kaynaklanmaktadır.

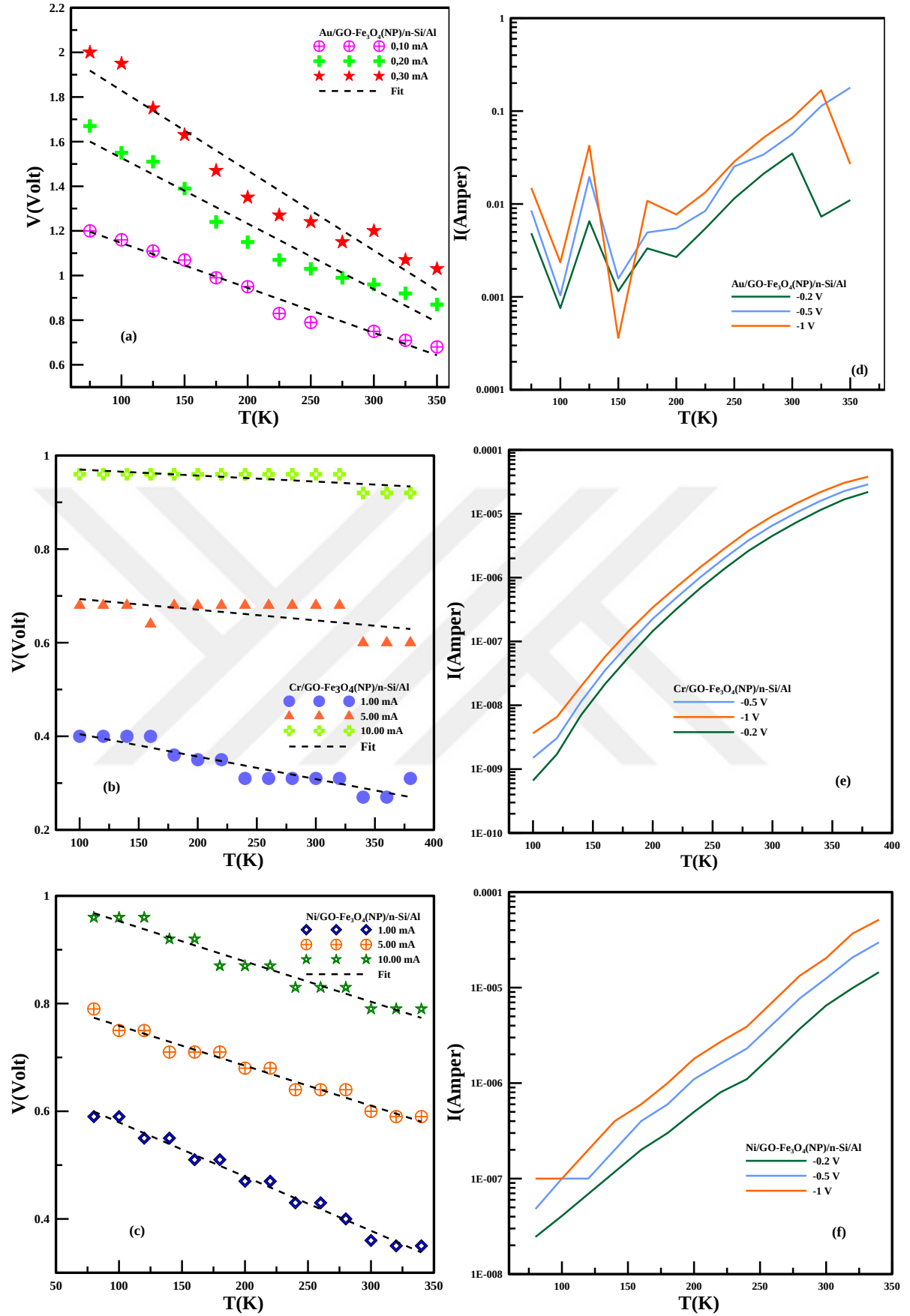


Şekil 39. Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al, Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al heteroeklemleri için geleneksel metotla hesaplanmış idealite faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri



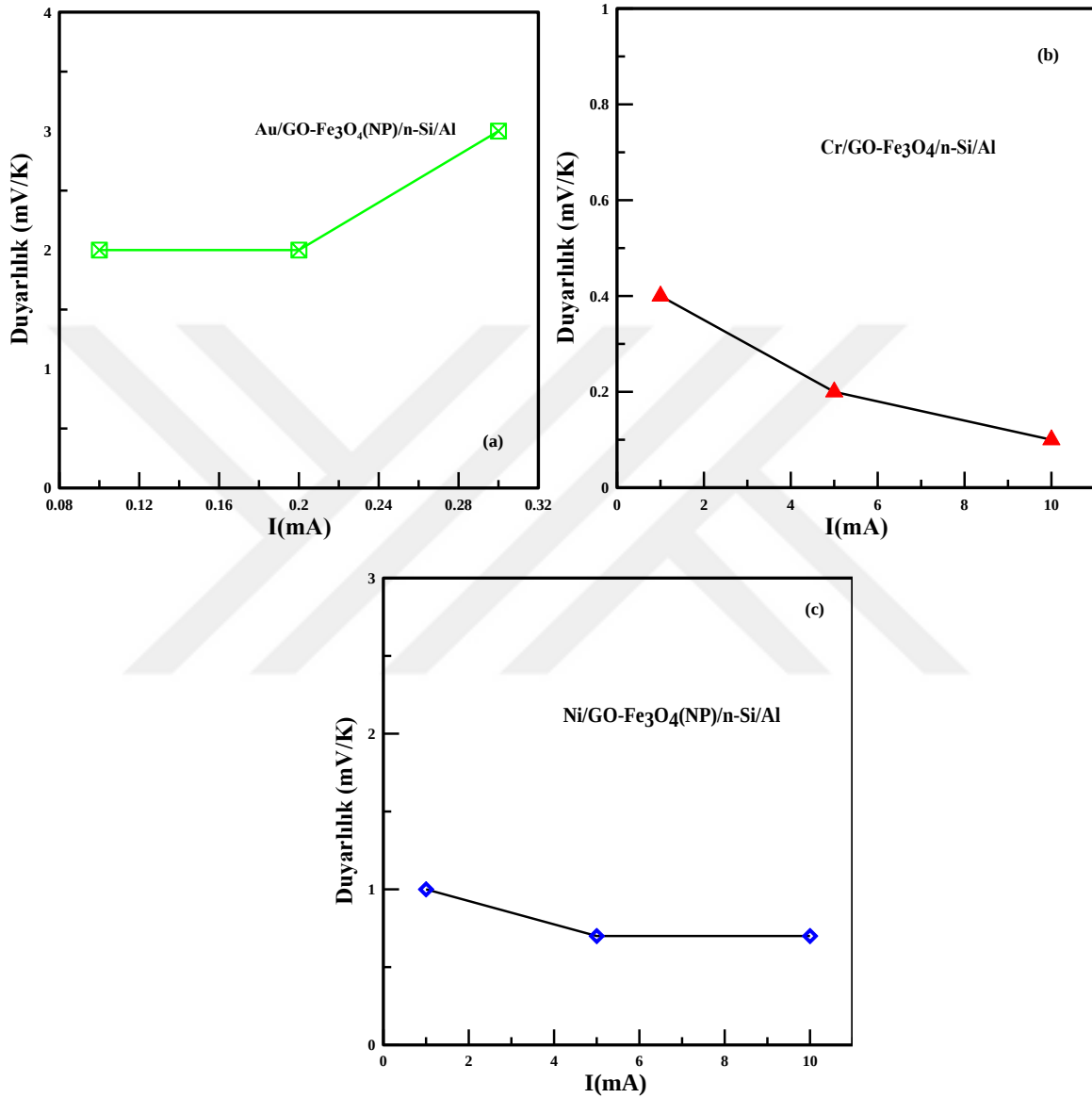
Şekil 40. Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al, Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al heteroeklemleri için geleneksel metotla hesaplanmış engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri

D1, *D2* ve *D3* heteroeklemlerinin belirli akım değerleri için V-T grafikleri ile belirli ters beslem voltajları için I-T grafikleri Şekil 41’de gösterildiği gibi çizilmiştir. Her üç heteroeklem için V-T grafiklerinde belirlenen düz beslem akım değerlerinde genel olarak doğrusal bir sıcaklık bağılılığı görülmektedir. Bu doğrusallıktaki dalgalanmalar GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si’ un homojensizliğine ve termal değişikliklerden dolayı kontakta meydana gelen değişimlere atfedilebilir. Hazırlanan heteroeklemlerin termal hassasiyetini belirlemek için çizilen voltaja bağlı log(I)-T grafiklerinde ise yine her üç heteroeklemin termal tepkisinin doğrusal bir davranış sergilediği görülmektedir.



Şekil 41. Farklı düz beslem akımları için sıcaklığa karşı düz beslem voltaj grafikleri; (a) Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al, (b) Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al, (c) Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al. Farklı ters beslem voltajları için sıcaklığa karşı akım grafikleri; (d) Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al, (e) Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al, (f) Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al yapıları için.

Şekil 42’de her üç heteroeklem için belirlenen ileri akım değerlerine karşı sıcaklık hassasiyeti grafikleri gösterilmektedir. Heteroeklemlerin sıcaklık duyarlılığı Şekil 41’deki eğrilerin eğimi ile belirlenmiştir. *D1* heteroeklemi için -2 mV/K (0,1 mA), -3 mV/K (0,3 mA); *D2* heteroeklemi için -0,4 mV/K (1 mA), -0,1 mV/K (10 mA) ve *D3* heteroeklemi için -1 mV/K (1 mA), -0,7 mV/K (10 mA) olarak bulunmuştur.



Şekil 42. Düz beslem akımlara karşı sıcaklık hassasiyeti grafikleri; (a) Au/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al, (b) Cr/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al, (c) Ni/GO-Fe₃O₄(NP) /n-Si/Al

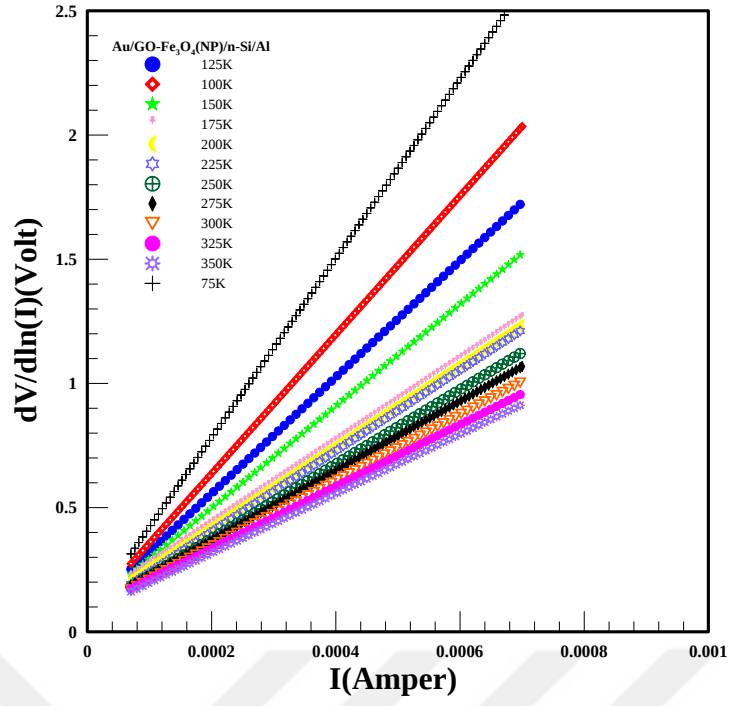
Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda omik kontak ile yarıiletken tarafındaki deplasyon bölgesi arasında kalan nötral bölgenin akıma karşı gösterdiği dirence seri direnç denir. Seri direnç gerilim değerinin yüksek olduğu durumlarda baskın olarak diyot akımının azalmasına sebep olur. Düz beslem *I-V* karakteristiğinin doğrusal olmayan kısmında seri direnç önemli iken arayüzey halleri, arayüzey yalıtkan tabakası *I-V* karakteristiğinin lineer ve lineer olmayan her iki bölgesinde de önemlidir. Arayüzey hal yoğunluğunun ve seri direncin düşük

olması, I - V eğrisinin daha büyük bir aralıkta düz bir çizgi vermesini sağlar. I - V grafiğinin lineer aralığı azaldıkça engel yüksekliği ve idealite faktörünün doğruluğunun belirlenmesi de zorlaşır (Karataş and Altındal 2005).

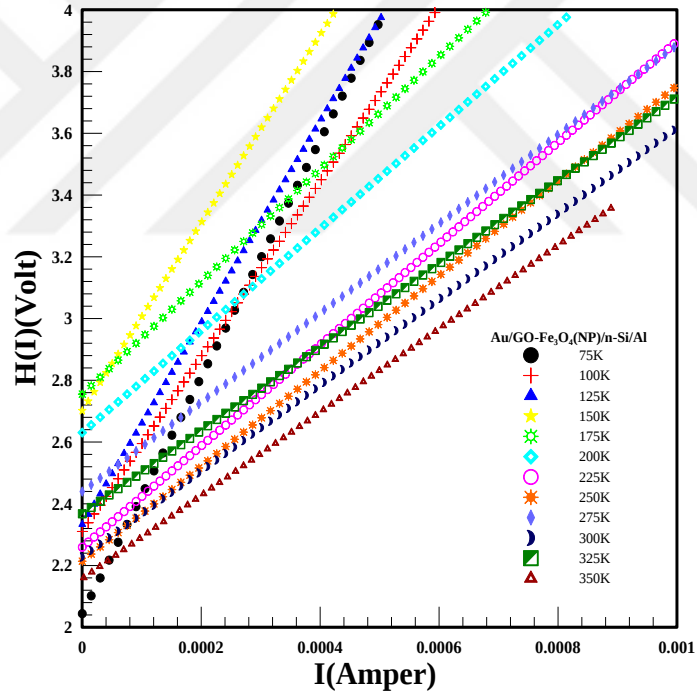
I - V grafiğinin düz beslem lineer kısmında termiyonik emisyon teorisi kullanılır. Bu bölge $kT/q \ll V \ll IR_s$ şeklinde yüksek seri direnç ile sınırlı olduğundan I_0 ve Φ_b 'nin değerlerini hesaplayabilmek için çok küçüktür. Düşük gerilim bölgesinde rekombinasyonların katkısı, yüksek gerilim bölgesinde ise seri direncin yüksek olması halinde, diyotun üzerine uygulanan gerilimin çoğu seri direnç üzerine düşeceğinden lineerlik bozulur. Bu nedenle tek başına termiyonik emisyon modeli yeterli gelmemektedir (Boy 2013).

$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin belirtilen sıcaklık aralıklarında I - V grafiklerinde bükülmenin olduğu yüksek voltaj bölgelerine çizilen uygun fitler ve (2.19) ve (2.21) (Cheung fonksiyonları) eşitlikleri yardımıyla, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri hesaplandı. (2.19) denkleminde bulunan $dV/d(\ln I)$ ifadesinin I 'ya karşı grafiği çizildi ve bu grafiklere her sıcaklık için ayrı ayrı fitler çizilerek elde edilen doğrunun eğimi ile seri direnç değerleri; doğrunun $I=0$ durumunda düşey eksenini kestiği yerden idealite faktörü elde edildi. (2.21) denkleminde elde edilen $H(I)$ - I grafiğine çizilen fitlerin eğimi ile seri direnç bulunurken; $I=0$ 'da bu fitlerin düşey eksenini kestiği yerden ise engel yüksekliği elde edildi (Cheung and Cheung 1986).

$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı, Cheung fonksiyonlarından elde edilmiş $dV/d(\ln I)$ - I ile $H(I)$ - I grafikleri sırasıyla $D1$ heteroeklemi için Şekil 43, Şekil 44; $D2$ heteroeklemi için Şekil 45, Şekil 46; $D3$ heteroeklemi için Şekil 47, Şekil 48'de verilmiştir. Ayrıca Cheung fonksiyonlarından $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin farklı sıcaklık değerleri için hesaplanmış olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi parametreleri sırasıyla Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 43. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ -I grafikleri

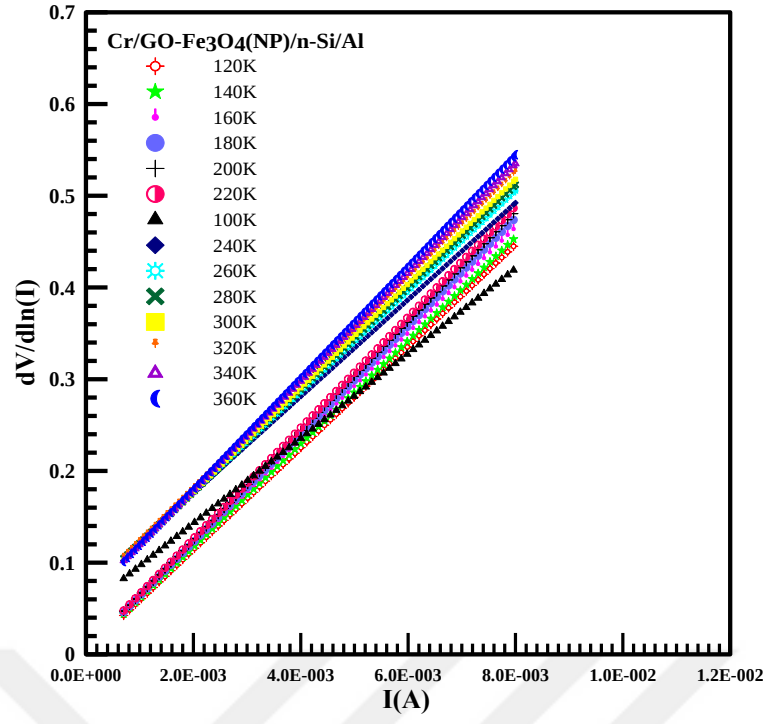


Şekil 44. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ -I grafikleri

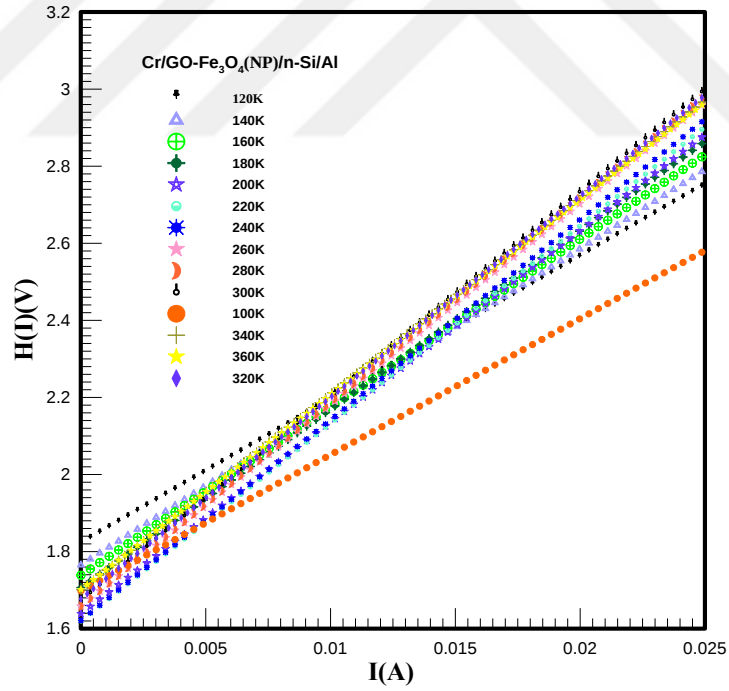
Tablo 4. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait Sıcaklığa Bağlı I-V Grafiklerinden Geleneksel Metot ve Cheung Fonksiyonlarından Elde Edilen Temel Diyot Parametreleri

Sıcaklık (K)	I-V		dV/d(lnI)		H(I)-I	
	n	Φ_b (eV)	n	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	R_s (Ω)
75	6,78	0,18	9,43	3607	0,19	3835
100	4,58	0,28	9,04	2794	0,25	2835
125	3,98	0,33	8,16	2342	0,28	3267
150	3,69	0,43	6,80	2051	0,39	3044
175	3,70	0,50	6,63	1654	0,41	1822
200	3,21	0,53	5,51	1631	0,47	1652
225	2,72	0,60	4,02	1626	0,55	1639
250	2,42	0,66	3,52	1498	0,62	1541
275	2,17	0,71	3,75	1399	0,64	1446
300	2,02	0,76	3,01	1326	0,73	1389
325	1,98	0,81	3,07	1246	0,76	1350
350	1,86	0,86	2,58	1195	0,83	1350

Tablo 4'te görüldüğü üzere *D1* heteroekleminin 75 K–350 K sıcaklık aralığında *dV/d(lnI)*-*I* grafiğinden elde edilen idealite faktörleri 9,43 (75K) ile 2,58 (350K) arasında sıcaklıkla azalırken, elde edilen seri direnç değerleri 3607 Ω (75K) ile 1195 Ω (350K) arasında artan sıcaklıkla azalma göstermektedir. Ayrıca bu heteroeklem için *H(I)*-*I* grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri artan sıcaklıkla 3835 Ω (75K) ile 1350 Ω (350K) arasında azalırken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,19 eV (75K) ile 0,83 eV (350K) arasında artan sıcaklıkla uyumlu bir artış göstermektedir.



Şekil 45. $\text{Cr}/\text{GO}-\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{NP})/\text{n-Si}/\text{Al}$ heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri

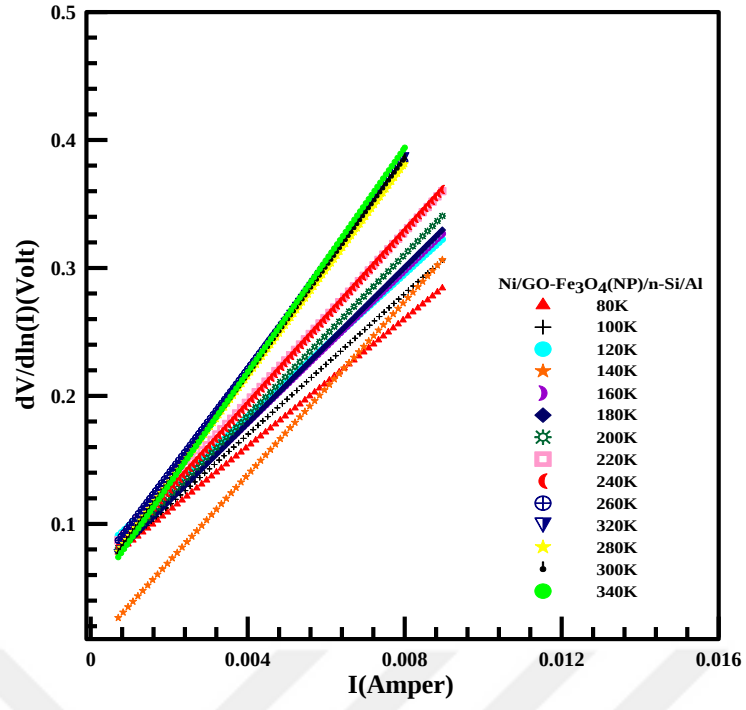


Şekil 46. $\text{Cr}/\text{GO}-\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{NP})/\text{n-Si}/\text{Al}$ heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ - I grafikleri

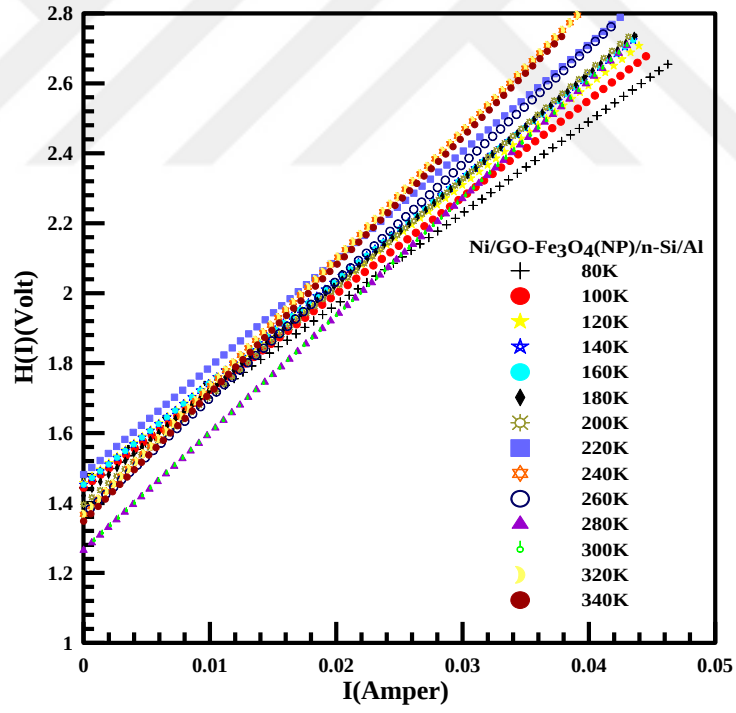
Tablo 5. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait Sıcaklığa Bağlı I-V Grafiklerinden Geleneksel Metot ve Cheung Fonksiyonlarından Elde Edilen Temel Diyot Parametreleri

Sıcaklık (K)	I-V		dV/d(lnI)		H(I)-I	
	<i>n</i>	$\Phi_b(\text{eV})$	<i>n</i>	$R_s(\Omega)$	$\Phi_b(\text{eV})$	$R_s(\Omega)$
100	2,46	0,26	9,62	40	0,17	35
120	2,42	0,30	8,70	41	0,20	37
140	1,87	0,36	7,37	43	0,23	41
160	1,72	0,38	6,16	45	0,28	43
180	1,64	0,43	5,35	46	0,31	46
200	1,62	0,46	4,70	48	0,34	50
220	1,59	0,49	4,06	49	0,39	51
240	1,59	0,52	3,43	54	0,47	52
260	1,45	0,56	2,99	55	0,55	52
280	1,29	0,60	2,69	56	0,61	53
300	1,28	0,63	2,43	57	0,68	53
320	1,27	0,66	2,32	57	0,72	52
340	1,22	0,71	2,05	59	0,76	51
360	1,28	0,73	1,87	61	0,91	51

Tablo 5'te görüldüğü üzere D2 heteroekleminin 100 K-360 K sıcaklık aralığında $dV/d(\ln I)$ -I grafiğinden elde edilen idealite faktörleri 9,62 (100K) ile 1,87 (360K) arasında ve elde edilen seri direnç değerleri 40 Ω (100K) ile 61 Ω (360K) arasında artan sıcaklıkla uyumlu bir artış göstermektedir. $H(I)$ -I grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri de artan sıcaklıkla 35 Ω (100K) ile 51 Ω (360K) arasında uyumlu bir artış gösterirken, yine bu grafikten elde edilen engel yükseklikleri 0,17 eV (100K) ile 0,91 eV (360K) arasında artan sıcaklıkla doğru orantılı bir artış göstermektedir.



Şekil 47. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ -I grafikleri



Şekil 48. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ -I grafikleri

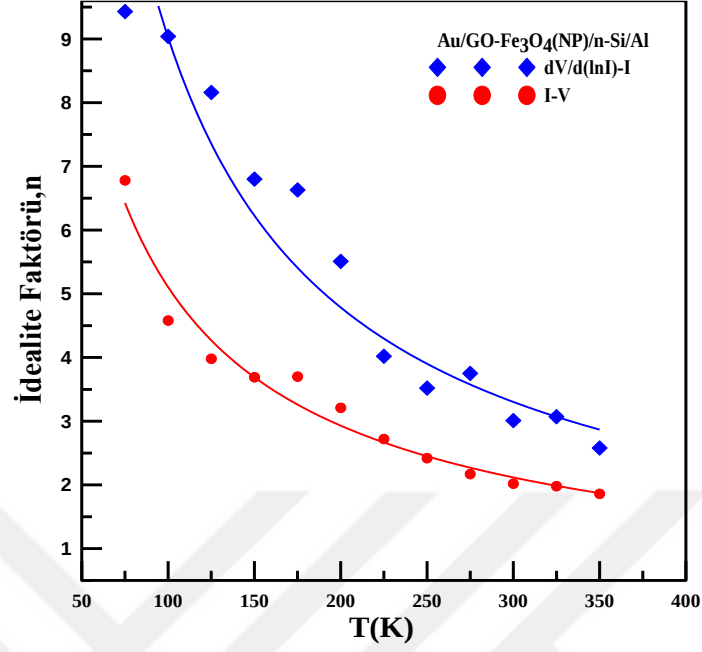
Tablo 6. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait Sıcaklığa Bağlı I-V Grafiklerinden Geleneksel Metot ve Cheung Fonksiyonlarından Elde Edilen Temel Diyot Parametreleri

<i>Sıcaklık</i> (K)	<i>I-V</i>		<i>dV/d(lnI)</i>		<i>H(I)-I</i>	
	<i>n</i>	$\Phi_b(\text{eV})$	<i>n</i>	$R_s(\Omega)$	$\Phi_b(\text{eV})$	$R_s(\Omega)$
80	6,30	0,20	8,99	25	0,17	26
100	4,71	0,25	7,07	27	0,22	28
120	3,90	0,30	6,76	28	0,26	28
140	3,20	0,36	5,96	29	0,30	29
160	2,75	0,40	4,28	30	0,33	31
180	2,37	0,45	3,61	30	0,39	32
200	2,51	0,47	3,42	31	0,40	34
220	2,17	0,52	3,32	33	0,43	34
240	1,89	0,57	2,80	34	0,48	39
260	1,80	0,61	2,59	41	0,52	38
280	1,68	0,64	2,03	41	0,61	38
300	1,61	0,66	1,82	42	0,68	39
320	1,58	0,71	1,70	42	0,78	39
340	1,48	0,75	1,47	44	0,91	38

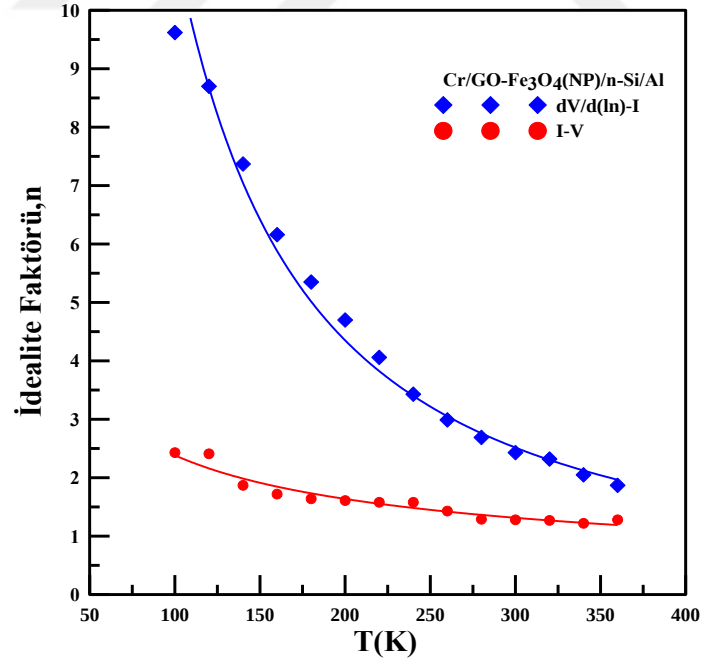
Tablo 6’da görüldüğü üzere *D3* heteroekleminin 80 K-340 K sıcaklık aralığında *dV/d(lnI)-I* grafiğinden elde edilen idealite faktörleri 8,99 (80K) ile 1,47 arasında ve elde edilen seri direnç değerleri 25 Ω (80K) ile 44 Ω (340K) arasında artan sıcaklıkla uyumlu bir artış göstermektedir. *H(I)-I* grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri de artan sıcaklıkla 26 Ω (80K) ile 38 Ω (340K) arasında uyumlu bir şekilde artarken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,17 eV (80K) ile 0,91 eV (340K) arasında artan sıcaklıkla doğru orantılı bir artış göstermektedir.

Şekil 49, Şekil 50 ve Şekil 51’de hem Cheung metoduyla hem de geleneksel metotla hesaplanan idealite faktörü değerleri arasındaki uyum görülmektedir. Grafikler incelendiğinde *D1*, *D2* ve *D3* heteroeklemleri için her iki metotla da hesaplanan idealite faktörü değerleri artan sıcaklıkla ters orantılı olarak azalmaktadır. Ancak, Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin, geleneksel metotla hesaplanan değerlerden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum ara yüzey durumlarının ve seri direncin etkisine bağlanabilir (Aslan vd. 2015). Genel olarak, idealite faktörünün yüksek voltaj bölgesindeki ideal diyot

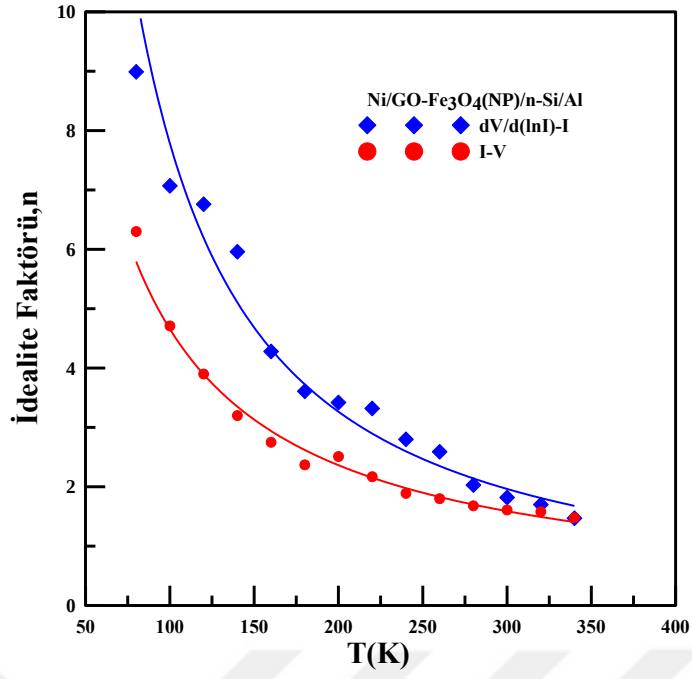
parametrelerinden uzak olması, bu bölgede bir voltaj düşüşünün olmasıyla da açıklanabilir (Demircioğlu *et al.* 2011).



Şekil 49. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

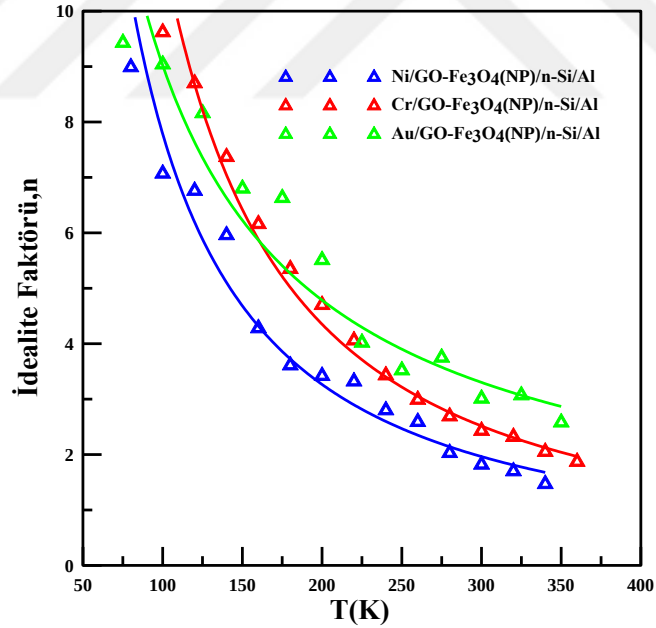


Şekil 50. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri



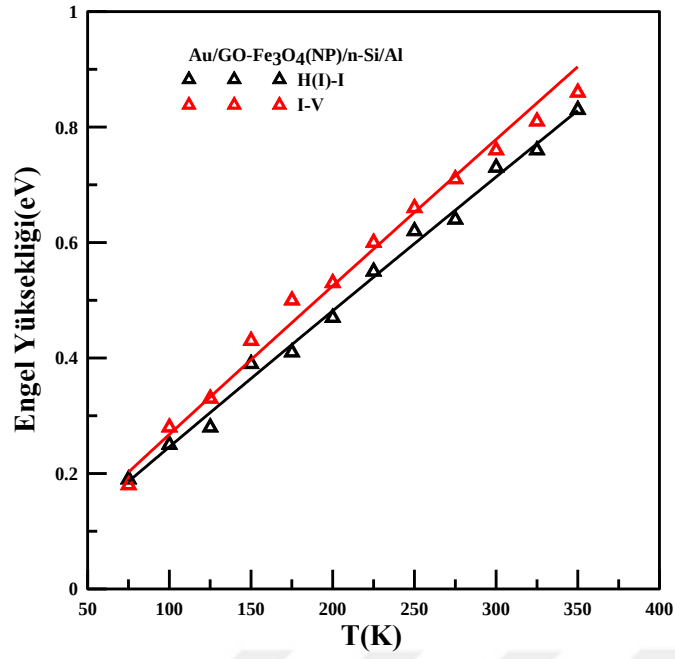
Şekil 51. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

D1, D2 ve D3 heteroeklemleri için Cheung metoduyla hesaplanmış idealite faktörü-sıcaklık grafikleri Şekil 52’de görülmektedir.

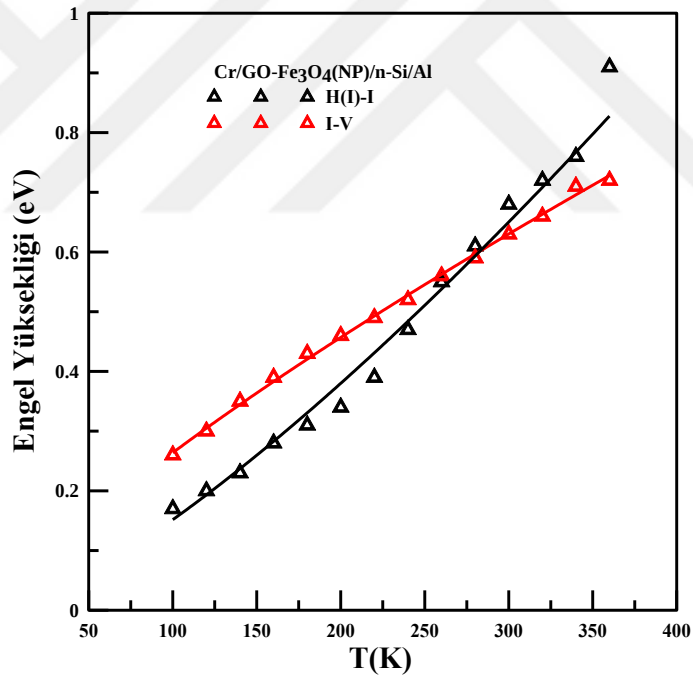


Şekil 52. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al, Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemlerinin Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

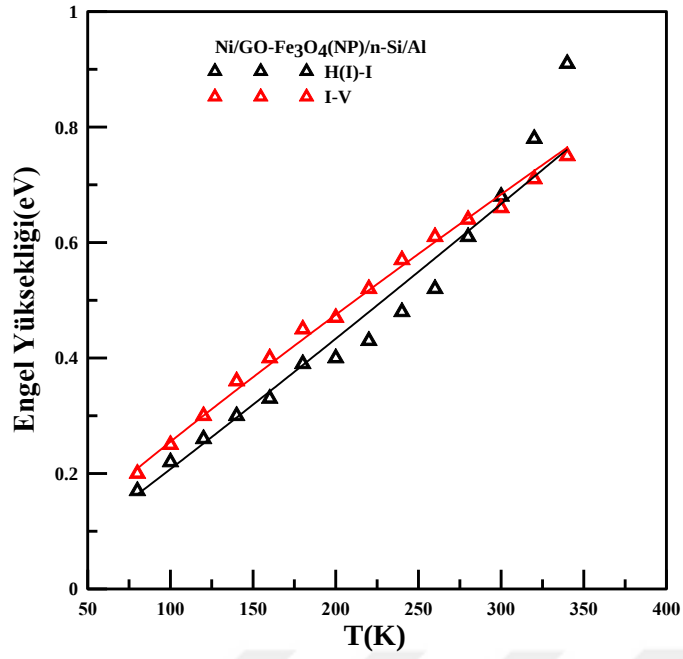
Geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan sıcaklığa bağlı engel yüksekliği değerlerindeki değişimler Şekil 53, Şekil 54 ve Şekil 55’te görüldüğü gibi sıcaklık artışıyla doğru orantılı olarak benzerlik göstermektedir.



Şekil 53. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

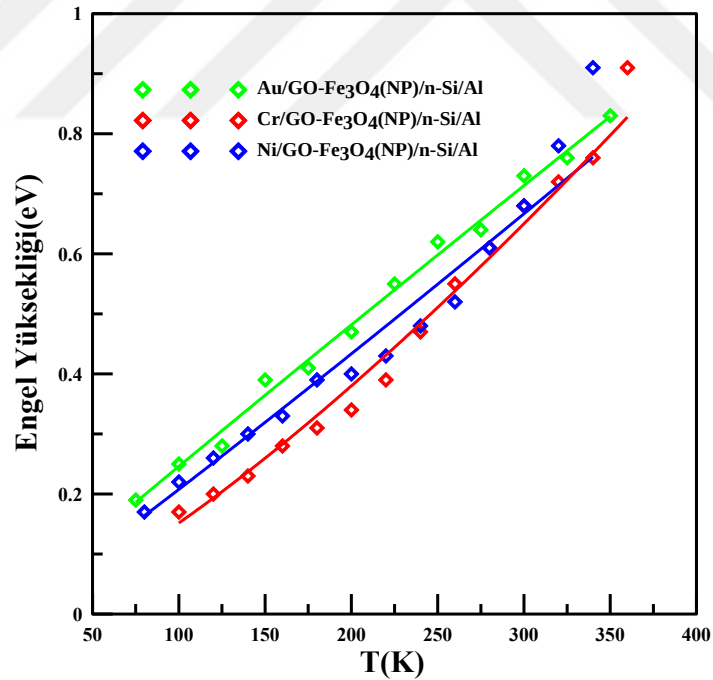


Şekil 54. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri



Şekil 55. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin geleneksel metot ve Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

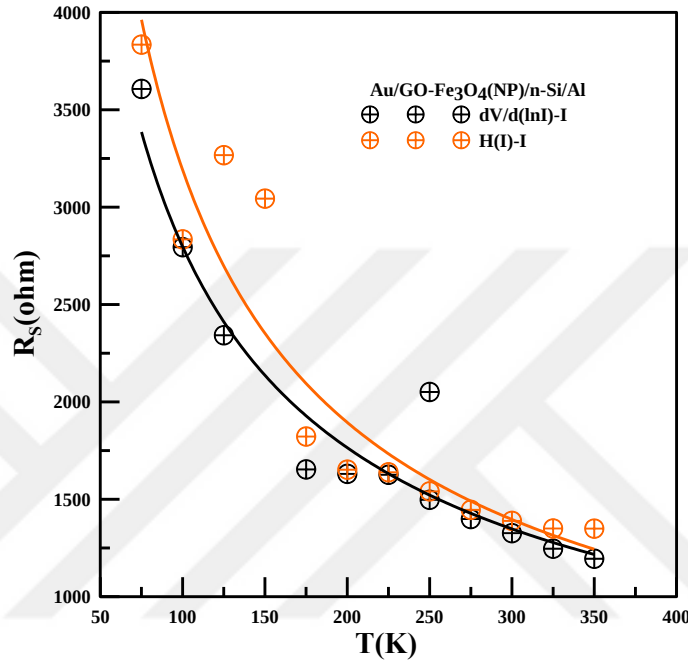
D1, D2 ve D3 heteroeklemleri için Cheung metoduyla hesaplanmış engel yüksekliği-sıcaklık grafikleri Şekil 56'da görülmektedir.



Şekil 56. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al, Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemlerinin Cheung metoduyla hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

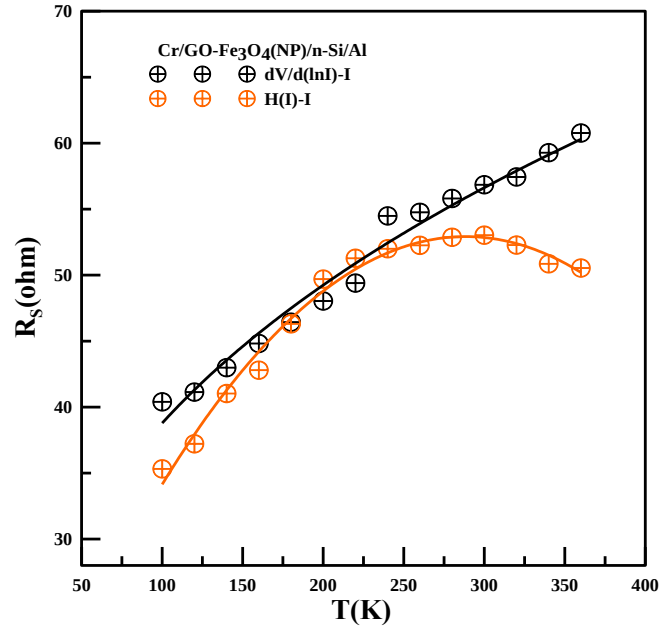
Seri direnç, aygıtların ısınmasına ve performansının zayıflamasına neden olan istenmeyen bir nicelik (Gora *et al.* 2018). Şekil 57'de görüldüğü gibi her iki Cheung fonksiyonundan elde edilen seri direnç değerleri birbirleriyle uyumludur ve D1 heteroeklemi için

seri direncinin artan sıcaklıkla birlikte kademeli olarak azaldığı açıktır. Seri direncin sıcaklığa bu şekilde bağımlılığı, kısmen idealite faktöründeki artışa ve düşük sıcaklıkta serbest taşıyıcı konsantrasyonunun eksikliğine atfedilir (Karataş *et al.* 2003; Jyothi *et al.* 2013; Deniz *et al.* 2014; Kaçuş *et al.* 2014; Kumar and Chand 2016). Başka bir deyişle düşük sıcaklıklarda çoğu taşıyıcı Schottky engelini geçmek için yeterli enerjiye sahip değildir. Ancak artan sıcaklıkla aktive olan taşıyıcılar engeli aşarak akımın artmasına ve seri direncin azalmasına neden olur (Reddy *et al.* 2020).

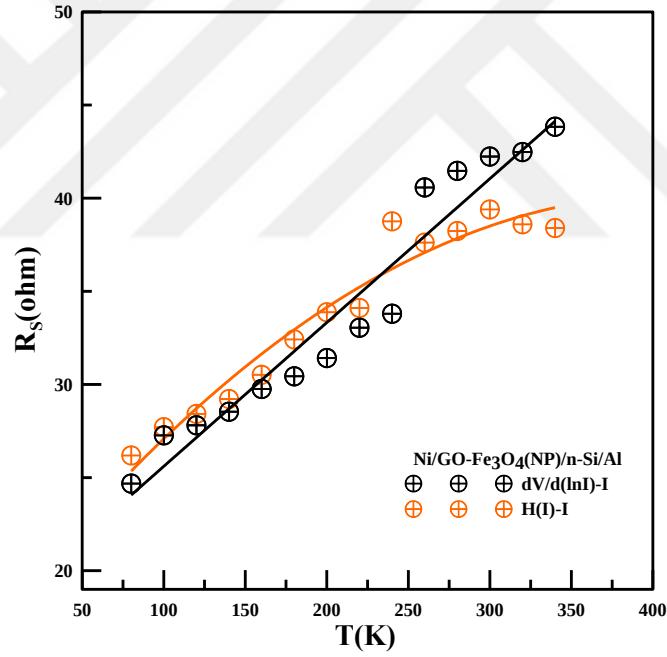


Şekil 57. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

Şekil 58 ve Şekil 59’da sırasıyla D2 ve D3 heteroeklemleri için Cheung fonksiyonları ile hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri gösterilmektedir. Her iki heteroeklem için Cheung fonksiyonları ile hesaplanan R_s ‘ler sıcaklık artışı ile artarak alışılmadık bir davranış sergilemektedir. Bu artış düşük sıcaklıklarda serbest yük eksikliğine bağlanabilir. (Tekeli *et al.* 2007; Tataroğlu and Altındal 2009; Saadaoui *et al.* 2014). Daha yüksek sıcaklıklarda, muhtemelen temas direnci ve dış bağlantıların direnci seri dirence sebep olabilir (Osvald and Horvath 2004). Seri direnç, sadece düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların aktifliklerini kaybettiği (freezing out) sıcaklık bölgesindeki yarıiletkenler için beklendiği gibi artan sıcaklıkla artar. Deneysel olarak benzer sıcaklık bağımlılıkları elde edilmiştir (Dökme *et al.* 2006; Hamdaoui *et al.* 2014). Ayrıca GO-Fe₃O₄ film ve GO-Fe₃O₄/n-Si kontak direnci de yüksek seri direncin olası nedenlerindendir (Azmi *et al.* 2018).



Şekil 58. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri



Şekil 59. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin Cheung fonksiyonlarıyla hesaplanan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

Akım-voltaj karakteristiklerinden bulunan engel yüksekliği dağılımının standart sapmasını ve $V=0$ 'da ortalama engel yüksekliği değerlerini hesaplamak için tekli Gauss denklemi (4.1) kullanılır.

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_b - \frac{e\sigma_s^2}{2kT} \quad (4.1)$$

Bu denklemde T , sıcaklık; e , elektronun yükü; k , Boltzmann sabiti; Φ_{ap} , görülen engel yüksekliği; $\bar{\Phi}_b$, ortalama engel yüksekliği ve σ_s , dağılımın standart sapmasını ifade etmektedir. σ_s 'nin sıcaklığa bağımlılığı küçük olduğunda genellikle ihmal edilir.

Φ_{ap} engel yüksekliğinin $1/T$ 'ye ya da $e/2kT$ 'ye karşı olan değişiminin eğimi dağılımın σ_s standart sapmasını ve y -eksenini kesen nokta ise $V=0$ 'da ortalama engel yüksekliği değerini (Φ_{b0}) vermektedir. σ_s standart sapması, dağılımın büyüklüğünü ve kontakta mevcut olan Schottky engel homojensizliklerinin etkisini ve büyüklüğünü göstererek dağılımının $V=0$ 'da ortalama engel yüksekliği değerini temsil etmektedir.

Schottky tipi kontaklar için düşük standart sapma değeri beklenmektedir. Yüksek standart sapma değeri homojen olmayan engel yüksekliğini doğrular (Hamdaoui *et al.* 2014; Çaldıran *et al.* 2015). Başka bir deyişle mevcut bir dağılımda σ_s standart sapmasının ve ortalama engel yüksekliği değerinin küçük olması; dağılımda mevcut homojensizliklerinin yeterince küçük olduğunu gösterir. σ_s 'nin büyük değerlere sahip olması ise kontak yapısında bu anormalliklerin büyük ve etkili olduğunu ifade etmektedir (Reddy *et al.* 2014; Metin *et al.* 2014).

Standart sapma engel homojenliğinin bir ölçüsü olduğundan, standart sapma ne kadar düşük olursa engel yüksekliği de o kadar homojen hale gelir. σ_{s0} değerlerinin Φ_{b0} 'ye nazaran küçük olması, ara yüzeyde homojen olmayan durumu ifade eder (Yazıcı 2015).

Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62'nin y eksenlerinden biri sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerin engel yüksekliği değerlerinin $1/2kT$ 'ye karşı olan değişim grafiklerini göstermektedir. Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62'de sırasıyla 225 K, 220 K ve 200 K sıcaklık değerlerinde kesişen lineer tek bir çizgi yerine metal-yarıiletken ara yüzeyinde iki farklı engel yüksekliğinin varlığını gösteren iki lineer çizgi olduğu görülmektedir. Bu lineer çizgilerin eğiminden standart sapma ve düşey eksen kestiği noktadan da ortalama engel yüksekliği üç farklı heteroeklem için engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine lineer fit uygulanarak hesaplanmıştır. Böylece metal-yarıiletken ara yüzeyinde engelin çift Gauss dağılımı gösterdiği anlaşılmaktadır (Özdemir *et al.* 2006; Reddy *et al.* 2020).

Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62'nin diğer y eksenlerinden diğeri sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerin idealite faktörünün 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 idealite faktörünün tersinin $q/2kT$ 'ye

karşı değişiminin de idealite faktörü değerlerinin ikili Gauss dağılımına uyduğunu göstermektedir (Deniz 2015).

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

$$\left(\frac{1}{n_{ap}} - 1 \right) = -\rho_2 + \frac{e\rho_3}{2kT} \quad (4.2)$$

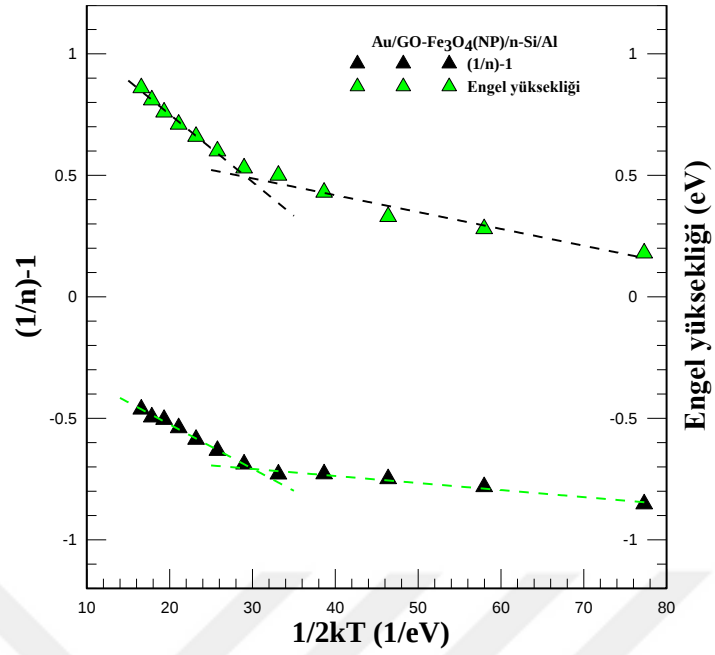
Werner ve Güttler eşitliği (Werner *and* Güttler 1991) ile elde edilir. Burada n_{ap} TE dan elde edilen görülen idealite faktörünü; ρ_2 , ortalama engel yüksekliğinin voltaj katsayısı ve ρ_3 , standart sapmanın voltaj katsayısıdır. Voltaj katsayıları idealde sıcaklıktan bağımsız olup, engel yüksekliği dağılımının voltaj değişimlerini ifade eden niceliklerdir. Voltaj katsayıları ile ortalama engel yüksekliği ve standart sapma arasında doğrusal bir ilişki vardır (Güzel *et al.* 2018).

$$\bar{\Phi}_b = \bar{\Phi}_{b0} + \rho_2 V \quad (4.3)$$

$$\sigma_S^2 = \sigma_{S0}^2 + \rho_3 V \quad (4.4)$$

$\bar{\Phi}_{b0}$ ve σ_{S0} sıfır beslem ortalama engel yüksekliği ve standart sapmasıdır.

İdealite faktörü değerlerinin voltaj katsayılarını hesaplamak ve Gauss dağılımlarını elde etmek için her dağılım bölgesinin voltaj katsayısı tekli Gauss denklemi olan (4.2) denklemi kullanılarak elde edilir. Bu denkleme göre $(1/n)-1$ 'in $1/T$ 'ye ya da $e/2kT$ '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 $V=0$ 'daki tersini 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 (Janardhanam *et al.* 2009; Naik and Reddy 2010).

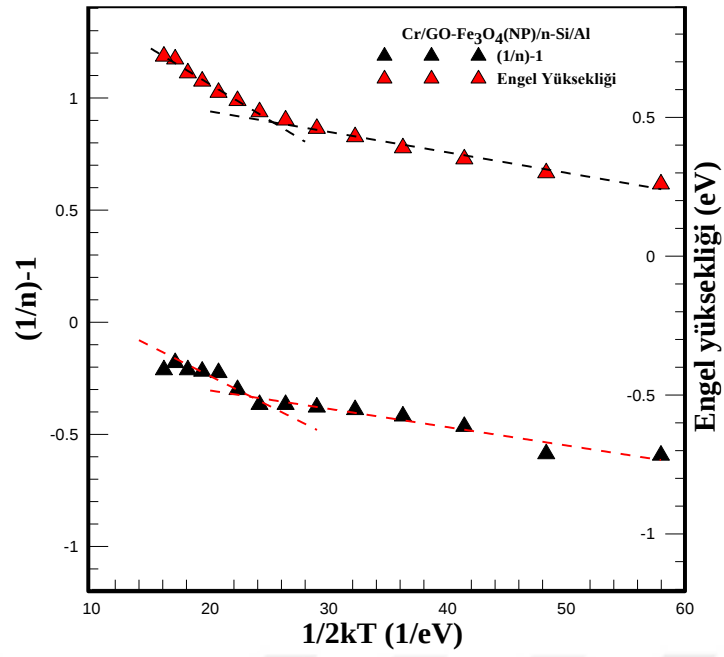


Şekil 60. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait [(1/n)-1] ve engel yüksekliğinin 1/2kT'ye karşı değişim grafikleri

D1 heteroekleminin engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine lineer fit uygulanarak ortalama engel yüksekliği değerleri ve standart sapma değerleri ile yine D1 heteroeklemine ait [(1/n)-1]'in 1/2kT'ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları Tablo 7' de verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 7. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait [(1/n)-1] ve Engel Yüksekliğinin 1/2kT'ye Karşı Değişim Grafiklerinden Elde Edilen Engel Yüksekliği, Standart Sapma ve Voltaj Katsayıları

Au/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al	$\bar{\Phi}_{b0}(\text{eV})$	$\sigma_s(\text{V})$	ρ_2	$\rho_3(\text{V})$
75 K- 225 K	0,69	0,083	-0,62	0,0028
225 K- 350 K	1,30	0,164	-0,16	0,018

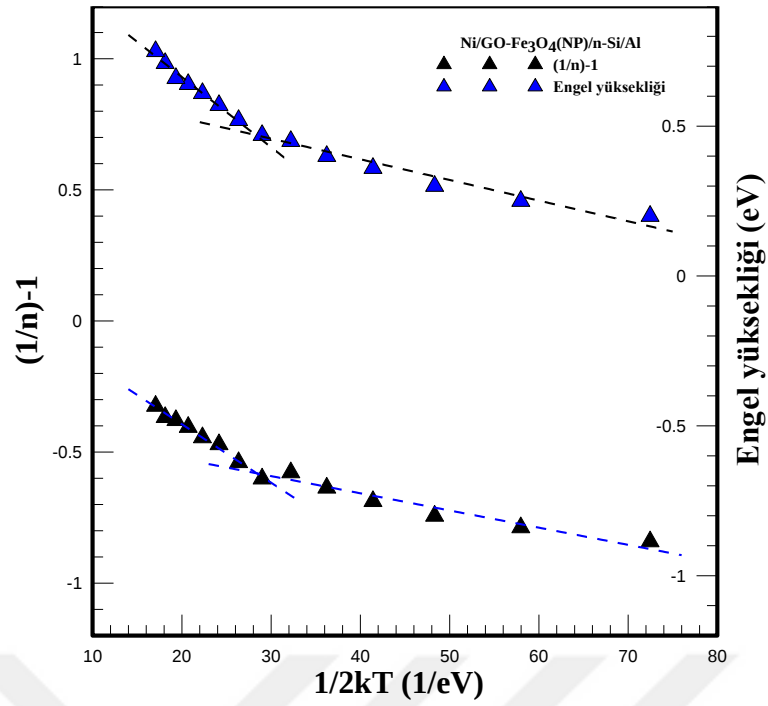


Şekil 61. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait [(1/n)-1] ve engel yüksekliğinin 1/2kT'ye karşı değişim grafikleri

D2 heteroekleminin ortalama engel yüksekliği değerleri, standart sapma değerleri ve Şekil 61'da gösterilen D2 heteroeklemine ait [(1/n)-1]'in 1/2kT'ye karşı çizilen grafiğinden bulunan voltaj katsayıları Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait [(1/n)-1] ve Engel Yüksekliğinin 1/2kT'ye Karşı Değişim Grafiklerinden Elde Edilen Engel Yüksekliği, Standart Sapma ve Voltaj Katsayıları

Cr/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al	$\bar{\Phi}_{b0}(\text{eV})$	$\sigma_s(\text{V})$	ρ_2	$\rho_3(\text{V})$
100 K- 220 K	0,66	0,085	-0,14	0,0081
220 K- 360 K	1,13	0,151	0,29	0,026



Şekil 62. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroeklemine ait [(1/n)-1] ve Engel Yüksekliğinin 1/2kT'ye Karşı Değişim Grafikleri

D3 heteroekleminin ortalama engel yüksekliği değerleri ve standart sapma değerleri ile Şekil 62'da gösterilen yine D3 heteroeklemine ait [(1/n)-1]'in 1/2kT'ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları hesaplanarak Tablo 9'da gösterilmiştir.

Tablo 9. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroeklemine Ait [(1/n)-1] ve Engel Yüksekliğinin 1/2kT'ye Karşı Değişim Grafiklerinden Elde Edilen Engel Yüksekliği, Standart Sapma ve Voltaj Katsayıları

Ni/GO-Fe ₃ O ₄ (NP)/n-Si/Al	$\bar{\Phi}_{b0}(\text{eV})$	$\sigma_s (\text{V})$	ρ_2	$\rho_3(\text{V})$
80 K- 200 K	0,66	0,082	-0,39	0,0065
200 K- 340 K	1,13	0,151	0,051	0,022

Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62'de çizilen grafiklerin doğrusal oluşu, idealite faktörünün gerçekten de Schottky engel yüksekliğinin Gauss dağılımının gerilim deformasyonunu ifade eder (Coşkun *et al.* 2003; Mayimele *et al.* 2016). Her üç heteroeklem için hesaplanan standart sapma miktarları ile ortalama engel yükseklikleri karşılaştırıldığında değerlerin küçük olmadığı açık olarak görülmektedir. Buradan engel dağılımının homojen olmadığına sonucuna varılabilir (Jyothi *et al.* 2013). Standart sapma değerlerinin ortalama engel yüksekliği değerlerine göre de küçük olmadığı görülmüş ve arayüzey homojensizliklerinin varlığına atfedilmiştir. Bu homojen olmama ve potansiyel dalgalanma durumu düşük sıcaklıklarda I-V özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir (Özer *et al.* 2007). Ayrıca her üç heteroeklemde

görüldüğü gibi daha düşük sıcaklık aralığında, tünelleme akımı baskın olduğundan $\bar{\Phi}_{b0}$ voltajla birlikte artar (Ahaitouf *et al.* 2012).

Metal-yarıiletken kontakların elektriksel davranışının homojen olmayan engel yüksekliğine sahip olması nedeniyle farklı araştırmacılar tarafından analitik bir potansiyel dalgalanma modeli önerilmiştir (Zhu *et al.* 2000). Metal-yarıiletken arayüzeyindeki Schottky engel homojensizliği özellikle düşük sıcaklıklarda Schottky engelli diyodun anormal davranışlarını açıklamada önemli bir parametredir. Metal-yarıiletken kontaklardaki Schottky engel yüksekliğini hesaplamada diğer önemli parametre yarıiletken yüzeyin etkin Richardson sabitidir.

Termiyonik emisyon teorisine uyan bir kontağın I-V ölçümlerinden elde edilen idealite faktörünün değeri yaklaşık 1(bir)'e eşit olmalıdır. Azalan sıcaklıkla Schottky engel yüksekliğinin anormal bir şekilde azalması ile idealite faktörünün artması $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $(1/T)$ 'ye karşı değişiminden lineer olmayan bir durum gözlenmesine ve ideal davranıştan sapmaya neden olur. Richardson grafikleri yüksek sıcaklıklarda doğrusallığa meyleder, ancak düşük sıcaklıklarda doğrusallıktan ayrılır. Richardson grafiğindeki doğrusal olmama durumu, tipik olarak (GO-Fe₃O₄)(NP)/n-Si aygıtının tükenme bölgesinde rekombinasyonun göstergesidir (Metin *et al.* 2014). Hem engel yüksekliği hem de idealite faktörü sıcaklığa bağlı olduğunda doğrusal olmayan Richardson eğrisi gözlenebilir. Bu duruma sebep olarak homojen olmayan engel yüksekliği gösterilebilir. 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).

Modifiye edilmiş Richardson grafiğinde yapılan lineer fitin y-eksenini kesen noktası modifiye edilmiş Richardson sabitini, grafiğin eğimi ise ortalama engel yüksekliğini ya da aktivasyon enerjisini vermektedir (Çaldıran 2013).

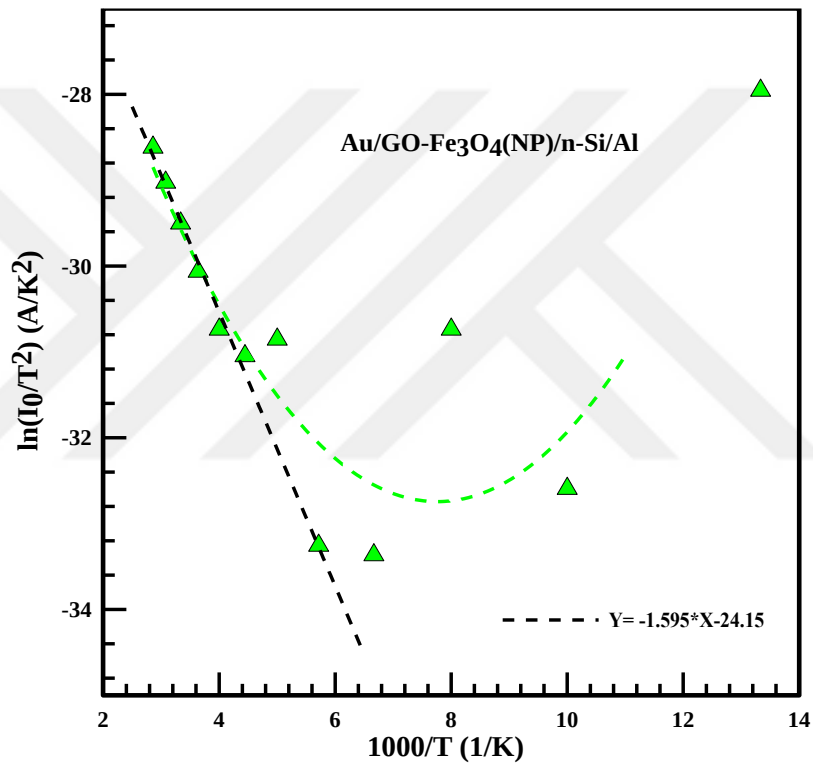
$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{ap}}{kT}\right) \quad (4.5)$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{e^2\sigma_0^2}{2kT^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\bar{\Phi}_b}{kT} \quad (4.6)$$

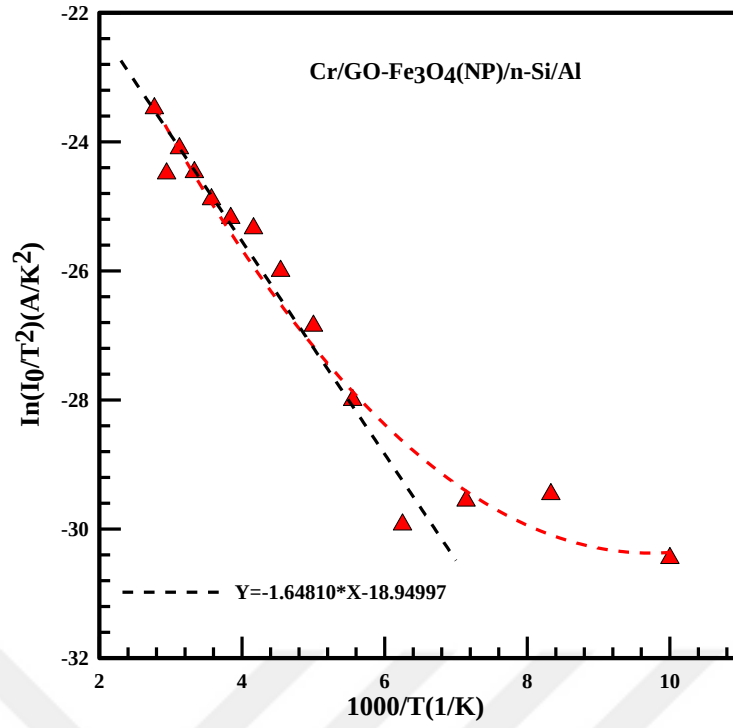
olarak (4.1) ve (4.5) denklemlerinin birleştirilmesiyle elde edildi.

Şekil 63, Şekil 64 ve Şekil 65'te sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerine ait $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafikleri yer almaktadır. $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1000/kT$ 'ye göre grafiği ile, yüksek sıcaklıklarda bir doğru meydana gelir ve doğrunun eğimi $q\Phi_b$ yi ve düşey eksen kestiği nokta ise $\ln(AA^*)$ verir. Doğrunun eğiminden

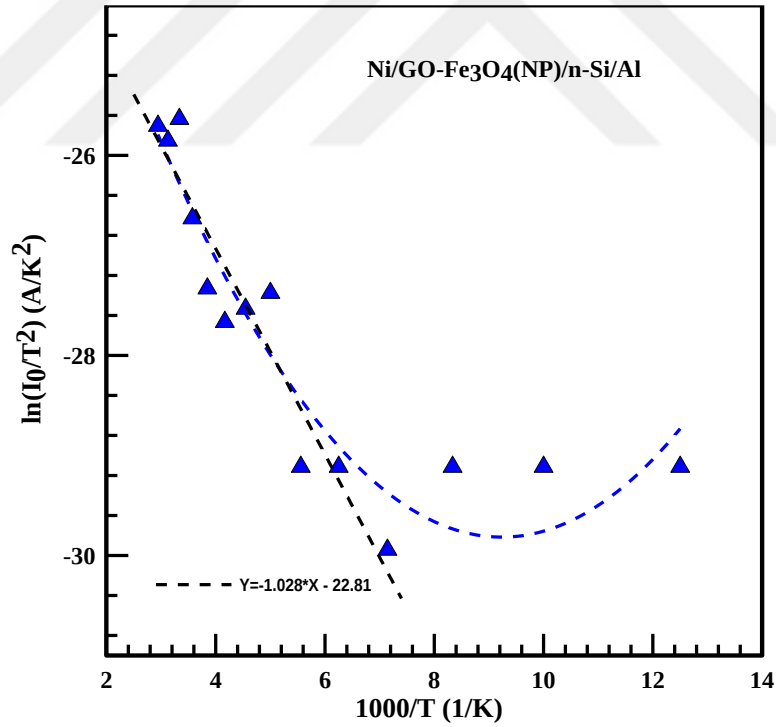
faýdalanılarak (4.6) eşitliğinden elde edilen Richardson sabitinin değeri üç numune için de ayrı ayrı hesaplanmıştır. Richardson sabiti değerleri sırasıyla *D1* heteroeklemi için $A^*=4.35 \times 10^{-6}$ A/K²cm², *D2* heteroeklemi için $A^*=7.5 \times 10^{-4}$ A/K²cm² ve *D3* heteroeklemi için $A^*=1.6 \times 10^{-5}$ A/K²cm² olarak hesaplandı. Hesaplanan Richardson sabitinin değerleri, n-Si için teorik olarak hesaplanan 112 A/K² cm² değerinden çok küçüktür. Bu durum, kontağın homojen olmayan karakteristiğine (Kocyigit *et al.* 2017; Mahato and Puigdollers 2018) ek olarak düşük ve yüksek engelli alanlardan oluşan ara yüzeydeki potansiyel dalgalanmalarına da atfedilebilir (Akkaya *et al.* 2014; Durmuş and Yıldırım 2014). Ara yüzeyde bu potansiyel dalgalanmalar nedeniyle diyot akımı potansiyel dağılımı içinde daha düşük engel boyunca akmayı tercih eder (Aydoğan 2003; Dökme *et al.* 2005; Mtangi *et al.* 2009).



Şekil 63. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait ln(I₀/T²)'nin 1000/T'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği



Şekil 64. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1000/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği

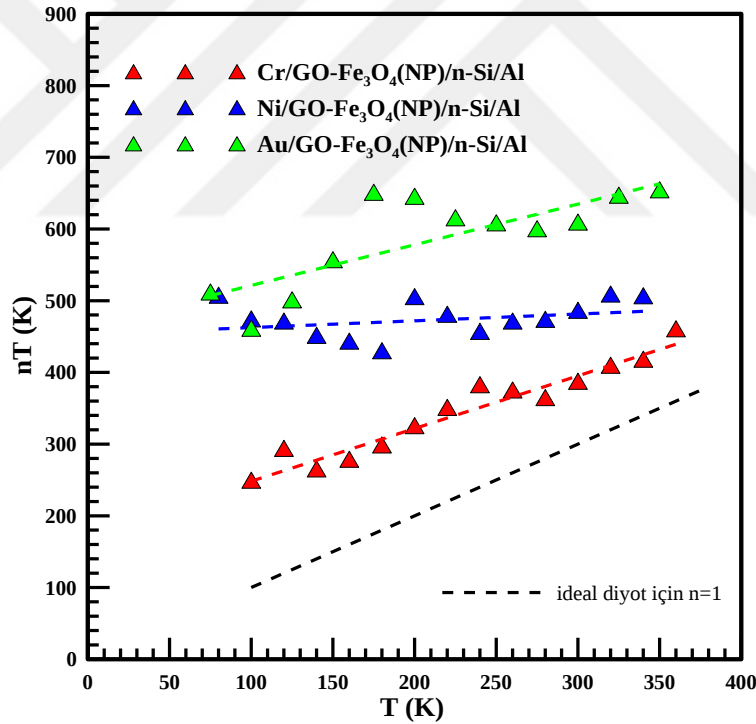


Şekil 65. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemine ait $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1000/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiği

Diyodu özgülleştiren önemli parametrelerden biri olan idealite faktörünün azalan sıcaklıkla artmasına “ T_0 etkisi” denir. İdealite faktörünün birden büyük olmasına imaj kuvvet ya da arayüzey durumları sebep oluyorsa n sıcaklıktan bağımsızdır. Fakat bu durum tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından ya da Termiyonik alan emisyonundan

kaynaklanıyorsa, n sıcaklığa bağlıdır. Schottky diyotların çoğunluğunda n sıcaklığa bağlıdır. Bir diyot idealse, saf termiyonik emisyon meydana gelir ve idealite faktörü değerleri artan sıcaklıkla değişmez (Koçyiğit *et al.* 2017). İdealite faktörünün yüksek çıkması TE teorisinden sapma olduğunu gösterir. Şekil 66'da $nT/q = (T + T_0)/q$ ve T/q ifadelerinin verilerinden de görülebileceği gibi ideal durumda ($n=1$ için) $T_0=0$ değerini göstermektedir. Buradaki T_0 sıcaklığa bağlı bir sabittir (Metin *et al.* 2014). T_0 değeri sıfıra yaklaştıkça diyotlar da ideal duruma yaklaşır. Bu durum $n=1+(T_0/T)$ denklemiyle de açıklanabilir ve bu denklemin $y=ax+b$ formunda olmasından faydalanarak T_0 değerleri hesaplanabilir.

Deneysel hesaplamalar sonucunda T_0 değeri $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için sırasıyla 464,5; 174,7 ve 453,1 olarak bulunmuştur. Bu durum homojen olmayan Schottky engelini varlığıyla açıklanabilir. Böyle bir heteroeklem için eklem akımı, sıcaklık düştüğünde, düşük Schottky engeline sahip bölgeler tarafından kontrol edilecektir (Deniz *et al.* 2014). Bu bölgelerin idealite faktörleri daha büyük ve etkin Schottky engeli değerleri ise daha düşüktür. T_0 'ın idealite faktörüne bağlılığı, katkılama seviyesiyle de ilgilidir (Göksu 2013).



Şekil 66. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al, Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemlerinin T_0 anomalisini gösteren T 'nin bir fonksiyonu olarak nT grafiği

Schottky diyotlar kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda genelde idealite faktörünün sıcaklığa bağlılığı görülmektedir. T_0 etkisi olarak bilinen bu etki Padovani ve Sumner (1965) tarafından ilk kez dile getirilmiştir. T_0 değerlerini bulmak için deneysel verilere fit yapılmıştır. Bu fitlerin ideal Schottky kontak davranışını gösteren çizgiyle paralel olması gerekmektedir (Saadaoui *et al.* 2014). Çizilen fitlerin ideal Schottky kontak davranışını gösteren

çizgiyle paralel olmadığı ancak; sıcaklık arttıkça her üç heteroeklem için çizilen fitlerin ideal durum çizgisine yaklaştığı Şekil 66'da görülmüştür.

I-V (Akım-Voltaj) Ölçümlerinde Norde Fonksiyonlarının Kullanılması

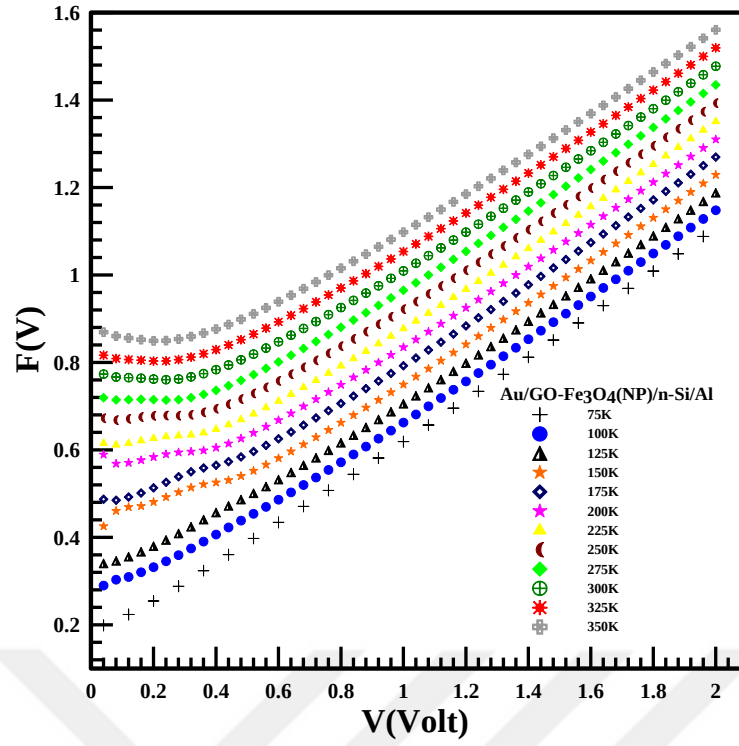
Seri direnç ve engel yüksekliği değerlerinin belirlenmesinde kullanılabilen bir diğer metot da Norde metodudur. Bu metot Norde tarafından 1979 yılında $n=1$ durumunda eşitlik (2.22)'deki gibi bir $F(V)$ fonksiyonun türetilmesi ile uygulanmıştır (Norde 1979).

F 'nin V 'ye karşı grafiği çizilerek bu grafikten $F(V)$ 'nin V 'ye karşı olan minimum değeri belirlenir. Buradan engel yüksekliği değeri (2.23) denklemiyle hesaplanır.

Seri direnç değerleri ise (2.24) denklemiyle hesaplanır (Stamataki *et al.* 2013; Pakma *et al.* 2017; Aksoy *et al.* 2019; Özkartal *et al.* 2019).

Şekil 67, Şekil 68 ve Şekil 69 sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için sıcaklığa bağlı olarak $F(V)$ 'nin V 'ye karşı değişim grafiklerini vermektedir. Her üç heteroeklem için Norde fonksiyonlarıyla farklı sıcaklıklarda hesaplanan engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Tablo 10, Tablo 11 ve Tablo 12'de görülmektedir. Tablo 10'da görüldüğü üzere $D1$ heteroeklemi için engel yüksekliği değeri 0,19 eV (75K) ile 0,86 eV (350K) arasında artarken, seri direnç değerleri ise 282,53 k Ω (75K) ile 64,11 k Ω (350K) arasında azalmaktadır. Tablo 11'de $D2$ heteroeklemi için engel yüksekliği değeri 0,27 eV (100K) ile 0,72 eV (360K) arasında artarken, seri direnç değerleri ise 21646,7 Ω (100K) ile 72,7 Ω (360K) arasında azalmaktadır. Tablo 12'de ise $D3$ heteroeklemi için engel yüksekliği değeri 0,20 eV (80K) ile 0,71 eV (340K) arasında artarken, seri direnç değerleri ise 615,02 k Ω (80K) ile 3,61 k Ω (340K) arasında azalmaktadır. Bu sonuçlara göre $\ln(I-V)$ grafiğinden hesaplanan engel yüksekliği değerleri, Cheung-Cheung yöntemi ve Norde yöntemi birbiriyle iyi uyum içindedir.

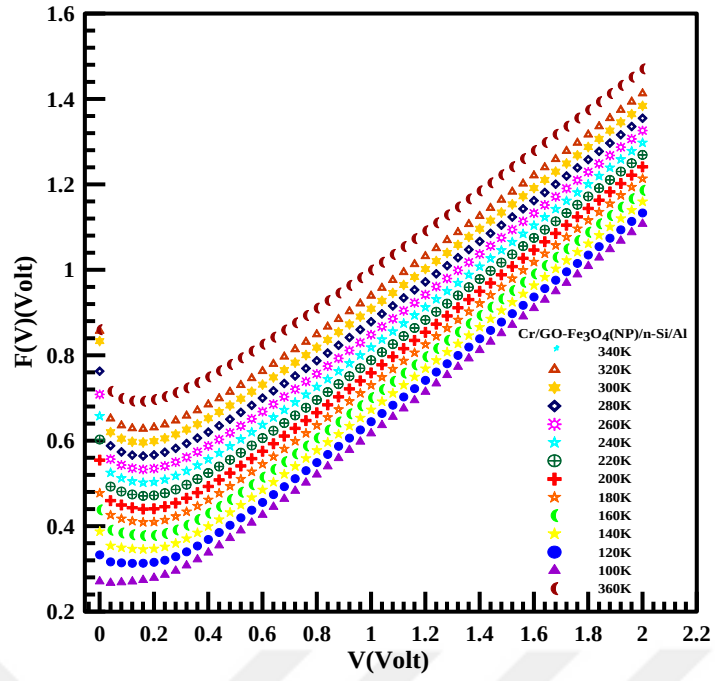
Heteroeklemlerin Norde metodu ile hesaplanan seri direnç değerlerinde ise artan sıcaklıkla bir düşüş görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda eklem malzemelerinin ara yüzeyinde yük taşıyıcılarının yakalanması sebebiyle yüksek seri direnç değeri ölçülürken, yüksek sıcaklıklarda, iyonlaşmanın ve ara yüzeydeki bağlardan kopan elektron sayısının artmasıyla düşük direnç değeri görülebilir (Karimov *et al.* 2005; Coşkun *et al.* 2015).



Şekil 67. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı F(V)-V grafikleri

Tablo 10. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroekleminin Norde Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Temel Parametreleri

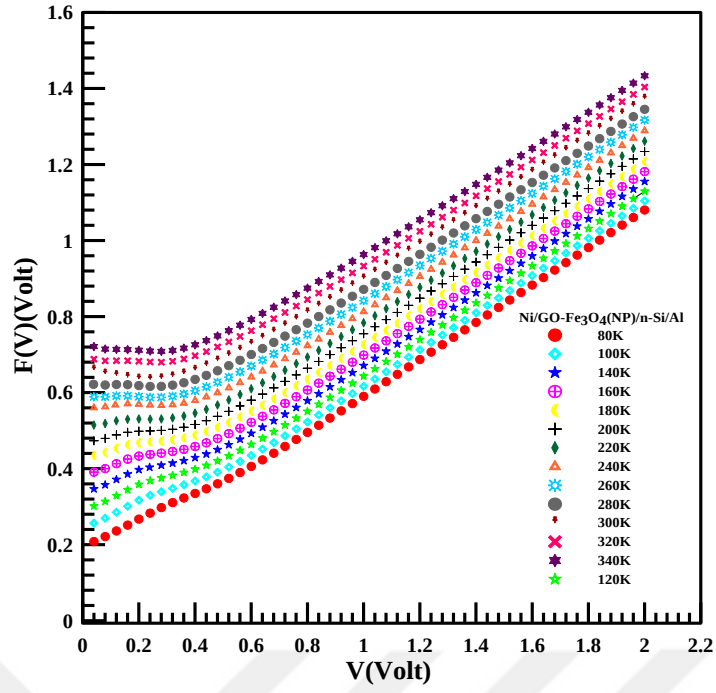
Sıcaklık (K)	$\Phi_b(eV)$	$R_s(k\Omega)$
75	0,19	282,53
100	0,28	16173,26
125	0,34	79,6
150	0,42	8234,66
175	0,48	4676,95
200	0,58	82615,81
225	0,61	2575,40
250	0,67	3148,40
275	0,71	1896,24
300	0,76	1422,96
325	0,81	14,90
350	0,86	64,11



Şekil 68. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı F(V)-V grafikleri

Tablo 11. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroekleminin Norde Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Temel Parametreleri

Sıcaklık (K)	$\Phi_b(eV)$	$R_s(\Omega)$
100	0,27	21646,7
120	0,32	19588,8
140	0,34	1810,6
160	0,38	396,4
180	0,42	310,3
200	0,45	219
220	0,48	161,7
240	0,51	118,8
260	0,55	126,1
280	0,59	126,7
300	0,62	107,4
320	0,65	93
340	0,69	87,8
360	0,72	72,7



Şekil 69. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı F(V)-V grafikleri

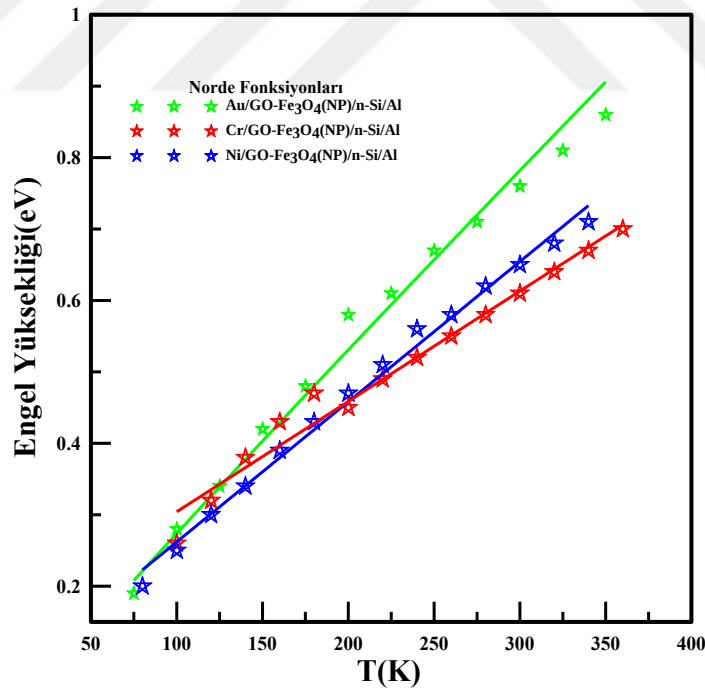
Tablo 12. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroekleminin Norde Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Temel Parametreleri

Sıcaklık(K)	$\Phi_b(eV)$	$R_s(k\Omega)$
80	0,20	615,02
100	0,25	233,77
120	0,30	51,06
140	0,38	311,78
160	0,39	69,34
180	0,43	134,98
200	0,47	61,51
220	0,51	76,73
240	0,56	9,64
260	0,58	7,76
280	0,62	7,65
300	0,65	7,09
320	0,68	4,11
340	0,71	3,61

Şekil 70'te $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin için Norde fonksiyonları kullanılarak hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri görülmektedir. Her üç grafikte de görüldüğü üzere artan sıcaklıkla engel yüksekliği değerleri uyum içinde artmaktadır. Türüt (2012)'e göre aygıtın asıl engel yüksekliğinden daha düşük engel yüksekliğine sahip küçük bölgelere sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu bölgenin alanı, diyodun toplam alanından çok daha küçük olabilir. Engel yüksekliği homojensizliğinde, mevcut mekanizmanın homojen olmayan bir engel üzerinde termiyonik emisyon olduğu varsayılmaktadır. Bu küçük bölgelerden geçen akışın tünel tipinden kaynaklandığı da varsayılabilir (Türüt 2012).

Bunun yanı sıra düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların düşük engelleri aşması mümkün olabileceğinden metal-yarıiletken ara yüzeyinden akım geçişi sıcaklıkla değişmektedir. Artan sıcaklıkla daha çok elektron yeterli enerjiye sahip olarak daha yüksek engelleri aşacaktır (Karataş *et al.* 2013).

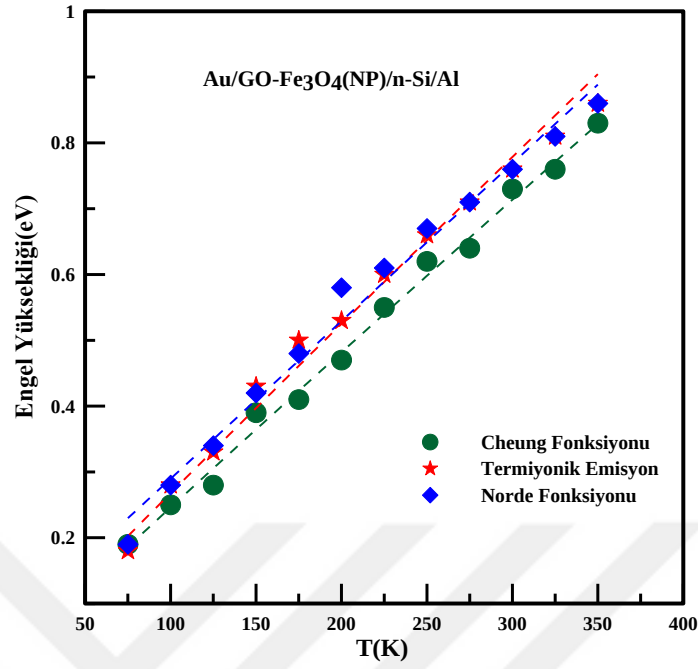
Engel yüksekliğinde artışa Schottky bariyer yüksekliği homojensizliklerinin varlığı neden olduğundan bu durum yük iletiminin paralel iletim modeli ile açıklanır (Kaçuş *et al.* 2014).



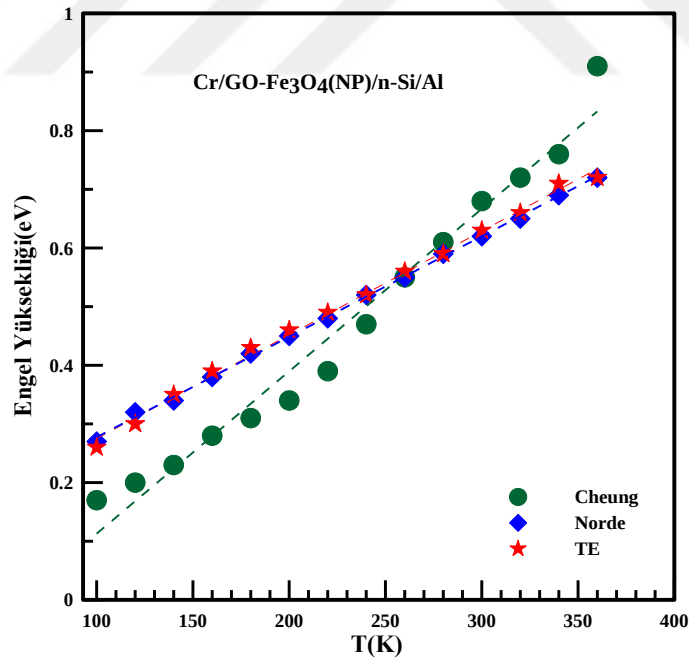
Şekil 70. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al, Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroeklemlerinin Norde fonksiyonundan elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri

Şekil 71, Şekil 72 ve Şekil 73'te sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Grafiklerden görüldüğü gibi üç metottan da sıcaklığa bağlı

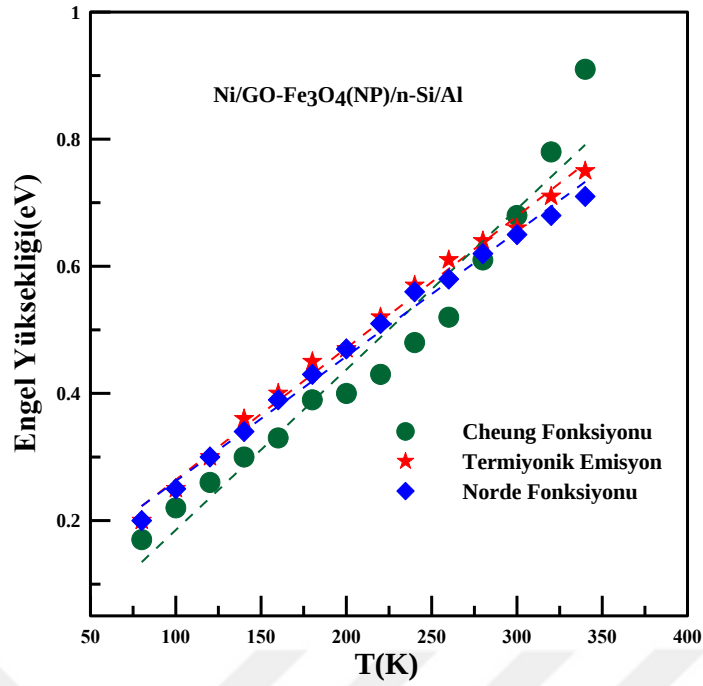
olarak hesaplanmış engel yüksekliği değerleri birbirine yakın ve sıcaklıkla uyumlu bir değişim göstermektedir.



Şekil 71. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin TE, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri



Şekil 72. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin TE, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri



Şekil 73. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin TE, Cheung ve Norde metotları kullanılarak elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri

Arayüzey Hal Yoğunluğu (N_{ss})

Akım iletim mekanizmasının yanı sıra, yarıiletkenin elektriksel parametrelerini de etkileyen diğer etkenler arasında arayüzey tabakasının kalınlığı ve arayüzey hal yoğunluğu da dikkate alınmalıdır. Özellikle de engel yükseliği (Φ_b) ve idealite faktörünün hesabında arayüzey hal yoğunluğu (N_{ss}) büyük rol oynar. Eğer arayüzey tabakası yeterince kalınsa metal ile yarıiletken arasında iletim ihtimali düşüktür. Bundan dolayı etkin engel yüksekliği (Φ_e) uygulanan gerilime bağlıdır (Türüt *et al.* 1995). Etkin engel yüksekliği (Φ_e) ifadesi;

$$\Phi_e = \Phi_{b0} \left(\frac{d\Phi_e}{dV} \right) = \Phi_{b0} + \beta V \quad (4.7)$$

şeklindedir. Burada β , voltajla birlikte etkin engel yükseliğinin değişimini ifade eder ve $\beta=1-(1/n(V))$ değerine eşittir. Yine voltajla birlikte değişen idealite faktörünü veren $n(V)$ değeri Güzel (2015) tarafından bildirildiğine göre Card ve Rhoderick (1971) tarafından denklem (4.8) gibi tanımlanmıştır.

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{W_d} + qN_{ss} \right] \quad (4.8)$$

Burada W_D tüketim gölgesinin genişliği, δ arayüzey tabakasının kalınlığı, ϵ_i ve ϵ_s sırası ile arayüzeyin ve yarıiletkenin dielektrik sabiti, N_{ss} ise arayüzey hal yoğunluğunu gösterir. Bu ifadeden arayüzey hal yoğunluğu;

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\delta}{\varepsilon_i} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{w_d} \right] \quad (4.9)$$

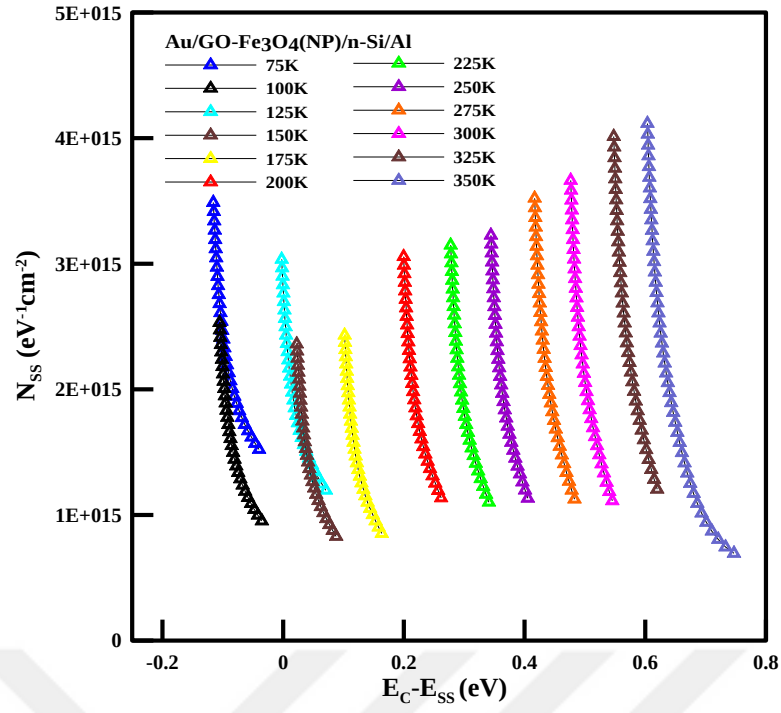
ile bulunur. İletkenlik bandının minimum enerjisi ile n-tipi bir yarıiletken için arayüzey hal yoğunluğu enerjisi E_{ss} arasındaki fark (Reddy *et al.* 2020; Çaldıran 2019):

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.10)$$

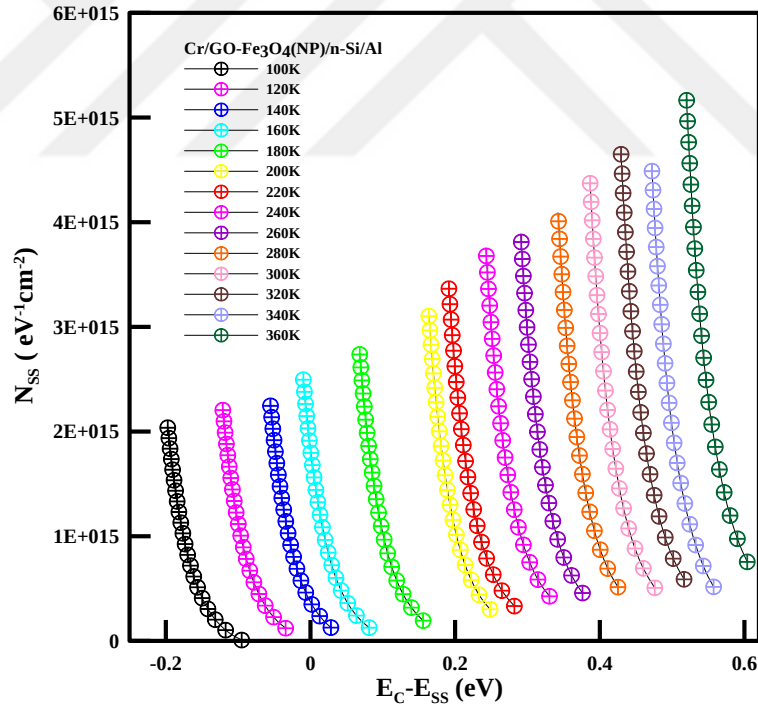
ile verilir. $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun, arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 74, Şekil 75 ve Şekil 76'da verilmiştir. Bu grafiklerde arayüzey hallerinin yoğunluğu artan $E_c - E_{ss}$ değerleriyle azalmaktadır. Bu değerler literatürdeki diğer çalışmalarla uyum içerisindedir (Akhlaghi *et al.* 2018; Güllü 2018). Bu şekillerden görüldüğü üzere N_{ss} sıcaklık arttığında azalır. Bu durum sıcaklık etkisi altında metal-yarıiletken ara yüzeyinin yeniden düzenlenmesinin veya yeniden moleküler yapılanmasının bir sonucudur. Azalan sıcaklık ile artan arayüzey hal yoğunluğunun artışı metal-yarıiletken arayüzeyindeki engel yüksekliğinin yanal homojensizliğiyle de açıklanabilir. Şekiller incelendiğinde her bir sıcaklıkta orta bölgede iletkenlik bandının alt kenarına doğru ara yüzey hal yoğunluğunun üstel bir biçimde arttığı görülmektedir. Ara yüzey yoğunluğundaki bu değişme metal yarıiletken arasındaki engelin homojen olmamasından dolayı ideale faktörünün sıcaklığa bağlılığıyla açıklanabilir (Acar *et al.* 2014; Reddy *et al.* 2020).

Ayrıca bu değişimler rekombinasyon merkezindeki azalmaya ve n-Si yarıiletken ile GO-Fe₃O₄ tabakasının arasındaki bir arayüzey tabakasının varlığına atfedilebilir (Çaldıran 2019).

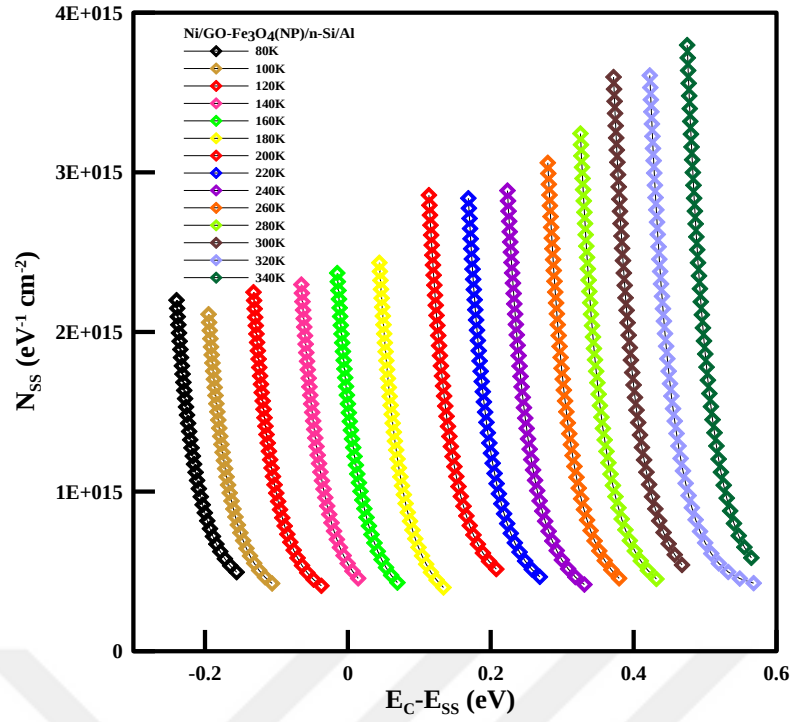
Ek olarak N_{ss} değerlerinin sıcaklıkla değişimine bakıldığında nispeten daha yüksek N_{ss} değerleri çok ince (10 nm) GO-Fe₃O₄(NP) arayüzüne atfedilebilir. Aynı zamanda N_{ss} değerleri cihazın özelliklerini belirleme ayırt edici parametreler olarak düşünülmektedir (Koçyiğit *et al.* 2017)



Şekil 74. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri



Şekil 75. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri



Şekil 76. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin sıcaklığa bağlı olarak arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri

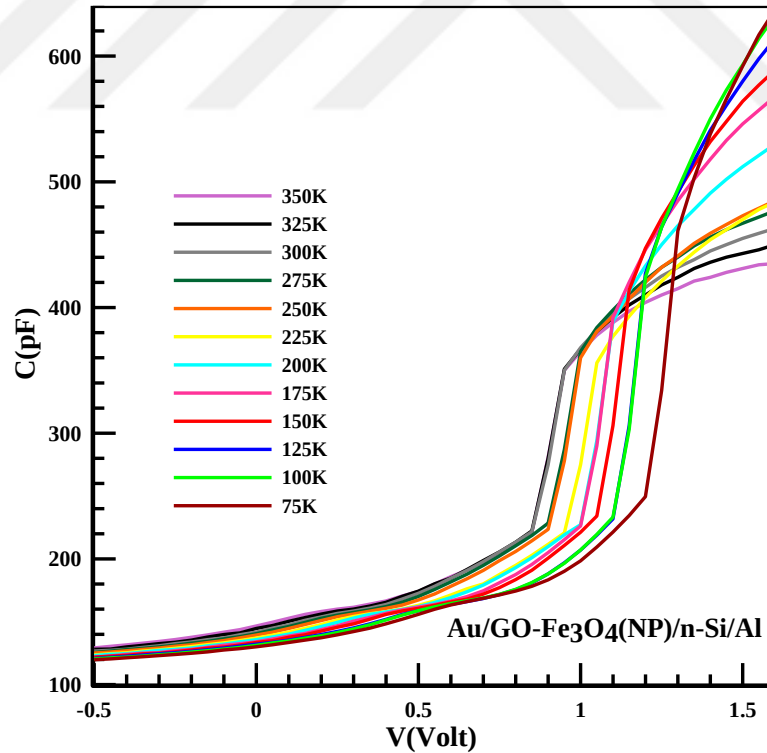
C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri

D1, *D2* ve *D3* heteroeklemleri için HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı kullanılarak, 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı C-V ölçümleri yapıldı. Heteroeklemlerin elektriksel özelliklerini incelemeye ve kullanılan ara yüzey malzemesinin heteroeklemin aygıt parametreleri üzerinde yaptığı değişiklikleri görebilmek için I-V ölçümleri yeterli olmayabilir. Ayrıca heteroeklem yapılar bir kondansatör gibi davrandığından C-V ölçümleri, arayüzey oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. Doğrultucu eklemlerde safsızlık konsantrasyonunu C-V ölçümleri ile elde edebiliriz. Heteroeklemlerin ters beslem durumunda kapasitesitelerinin voltaja bağlı değişim grafiklerinden Fermi enerji seviyesi, taşıyıcı yoğunluğu, difüzyon potansiyeli ve engel yüksekliği gibi parametreler hesaplanabilir. Bu heteroyapılar için kapasite ifadesi denklem (2.25)'te verilmektedir.

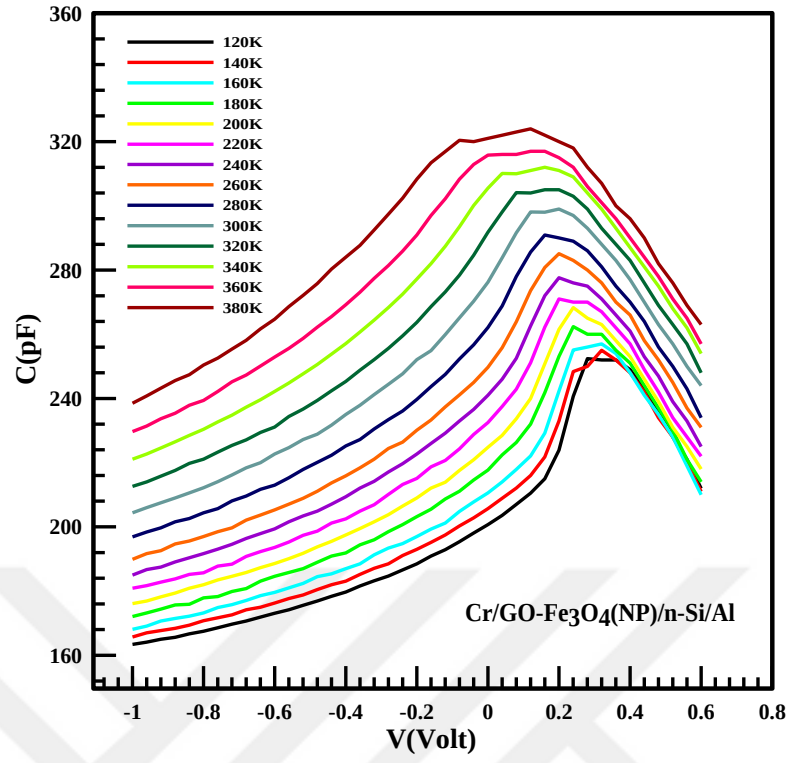
Şekil 77, Şekil 78 ve Şekil 79'da sırasıyla *D1*, *D2* ve *D3* heteroeklemlerinin 500 kHz ölçüm frekansında sıcaklığa bağlı C-V grafikleri görülmektedir. *D1* heteroeklemi için 75K-350K sıcaklık aralığında 25K'lik adımlarla; *D2* heteroeklemi için 100K-380K sıcaklık aralığında 20K'lik adımlarla ve *D3* heteroeklemi için 80K-360K sıcaklık aralığında 20K'lik adımlarla C-V ölçümleri alınmıştır.

D1 heteroekleminde ters beslem durumunda sıcaklık artışıyla kapasite değerlerinin arttığı görülmektedir. Fakat düz beslemde artan sıcaklıkla kapasitenin azaldığı görülmektedir. Bu durum arayüzey uzay yükü oluşumu ile sıcaklığa bağlı seri direnç etkisine atfedilebilir

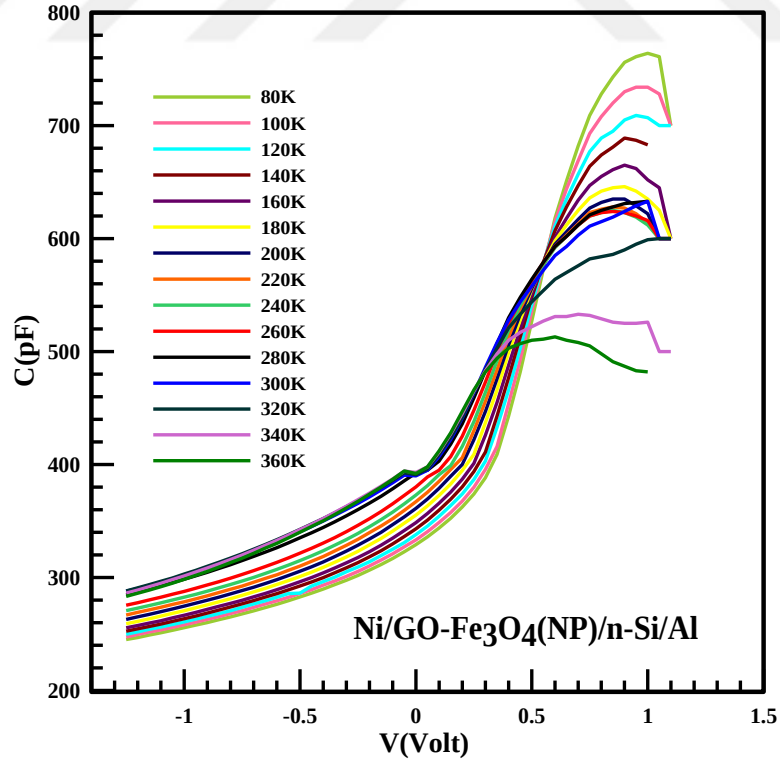
(Bülbül *et al.* 2006; Dökme *et al.* 2010). *D2* heteroeklemi için düşük sıcaklıklarda kapasite düşük iken, sıcaklık arttıkça kapasite artmaktadır. Yani yüksek sıcaklıklardaki kapasite, düşük sıcaklıklara göre daha yüksek değerdedir. Sıcaklıkla meydana gelen bu değişim taşıyıcıların aktifliklerini yitirmesi anlamına gelir. Yüksek sıcaklıklara doğru doping atomları iyonlaşmaya, yani iyonize yük taşıyıcı konsantrasyonu artmaya başlar (Gümüş and Aydoğan 2021). Bir başka deyişle bu davranış, rekombinasyon merkezleri olarak görev yapan arayüz durumlarında tuzaklama olaylarının dondurulmasıyla açıklanır (Deniz *et al.* 2018) ve artan numune sıcaklığı ile yüklerin artışına yorumlanır (Güzeldir *et al.* 2010). *D3* heteroekleminde de ters beslem durumlarında sıcaklık arttıkça kapasite değerlerinin arttığı fakat düz beslem durumunda kapasitenin artan sıcaklıkla beraber azaldığı görülmektedir. Her üç heteroeklemde de kapasite artan sıcaklık ile sistematik olarak artıp bir tepe noktası vermektedir. *D1* ve *D3* heteroeklemlerinin C-V grafiklerinde düşük sıcaklık değerlerinde kapasite değeri daha yüksek tepe noktası verirken, *D2* heteroekleminde sıcaklık arttıkça daha yüksek kapasite değerleri görülmüştür. Tepe noktalarının varlığı temel olarak, moleküler yeniden yapılandırılmayla arayüzey durumlarının ve seri direncinin yeniden düzenlenmesine atfedilir (Wu and Yang 1989; Bülbül *et al.* 2006; Yıldız and Altındal 2008).



Şekil 77. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı C-V grafikleri

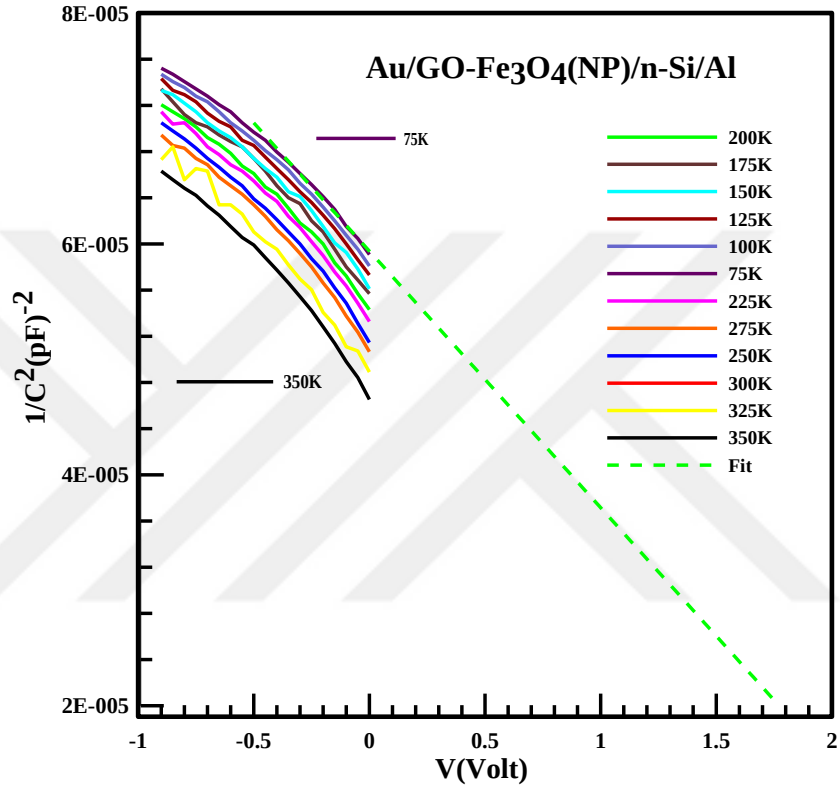


Şekil 78. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı C-V grafikleri



Şekil 79. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı C-V grafikleri

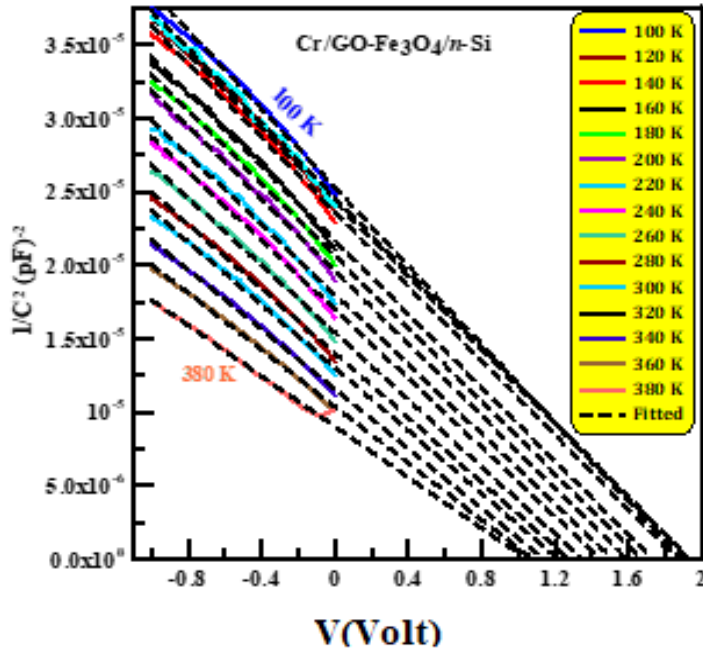
Şekil 80, Şekil 81 ve Şekil 82’de $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için ters beslemde ölçülen kapasite-voltaj değerleri kullanılarak çizilen C^{-2} - V grafikleri görülmektedir. Ters beslem C^{-2} - V grafiğine lineer fit çizildiğinde denklem (2.26)’ya göre $C^{-2}=0$ için difüzyon potansiyeli V' ye eşit ($V_d = V'$) olur. Çizilen doğruların eğimleri kullanılarak N_d (donor konsantrasyonu) verici yoğunlukları hesaplandı. Eşitlik (2.31) ile fermi enerji seviyeleri ve eşitlik (2.33) ile de ideal olmayan diyot için engel yüksekliği değerleri $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için hesaplanmış ve sırasıyla Tablo 13, Tablo 14 ve Tablo 15’te verilmiştir.



Şekil 80. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı $1/C^2$ - V grafikleri

Tablo 13. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı $1/C^2$ -V grafiklerinden elde edilen temel parametreler

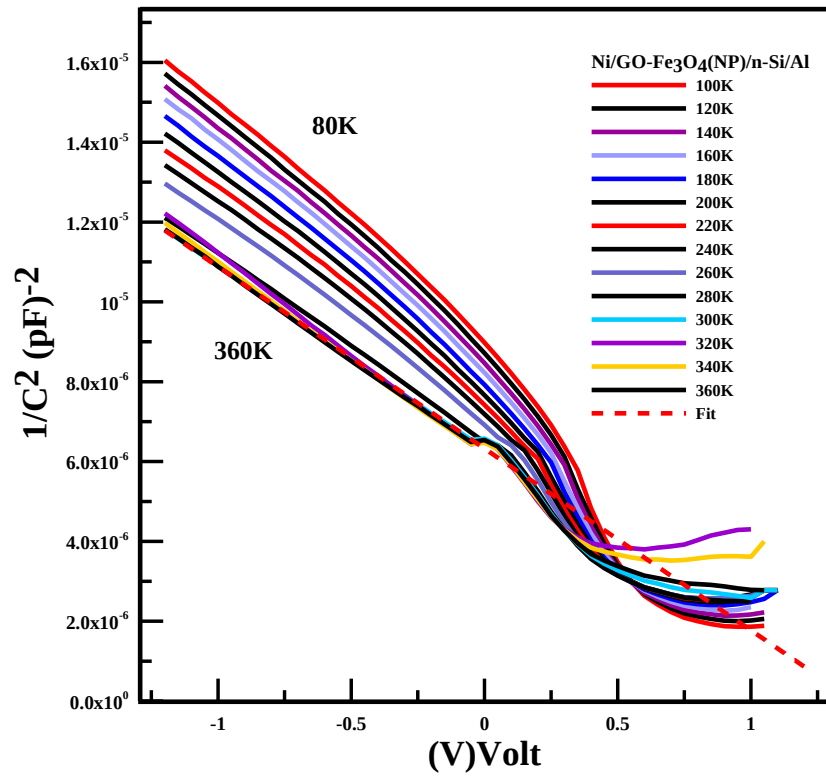
Sıcaklık(K)	V_d (eV)	N_d (cm ⁻³) $\times 10^{15}$	E_f (eV)	Φ_b (eV)
75	1,76	5,78	0,05	0,30
100	1,70	5,67	0,07	0,44
125	1,65	5,55	0,09	0,50
150	1,59	5,5	0,11	0,54
175	1,54	5,43	0,12	0,53
200	1,48	5,32	0,14	0,60
225	1,44	5,29	0,17	0,69
250	1,42	5,38	0,18	0,76
275	1,42	5,49	0,2	0,85
300	1,37	5,43	0,22	0,89
325	1,31	5,24	0,24	0,90
350	1,28	5,36	0,26	0,94



Şekil 81. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı $1/C^2$ -V grafikleri

Tablo 14. Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroekleminin 500 kHz Frekans Değerinde Sıcaklığa Bağlı 1/C²-V Grafiklerinden Elde Edilen Temel Parametreler

Sıcaklık(K)	V_d (eV) (düzeltilmiş)	N_d (cm ⁻³)x10 ¹⁶	E_f (eV)	Φ_b (eV)
100	1,08	0,79	0,07	1,15
120	1,04	0,77	0,08	1,12
140	1,07	0,80	0,09	1,16
160	1,01	0,82	0,11	1,12
180	0,88	0,90	0,12	1
200	0,81	0,94	0,13	0,95
220	0,74	1	0,15	0,89
240	0,65	1,18	0,15	0,81
260	0,59	1,15	0,17	0,77
280	0,49	1,27	0,18	0,68
300	0,42	1,39	0,19	0,62
320	0,36	1,50	0,20	0,57
340	0,28	1,69	0,21	0,50
360	0,22	1,88	0,22	0,45
380	0,19	2,17	0,23	0,42

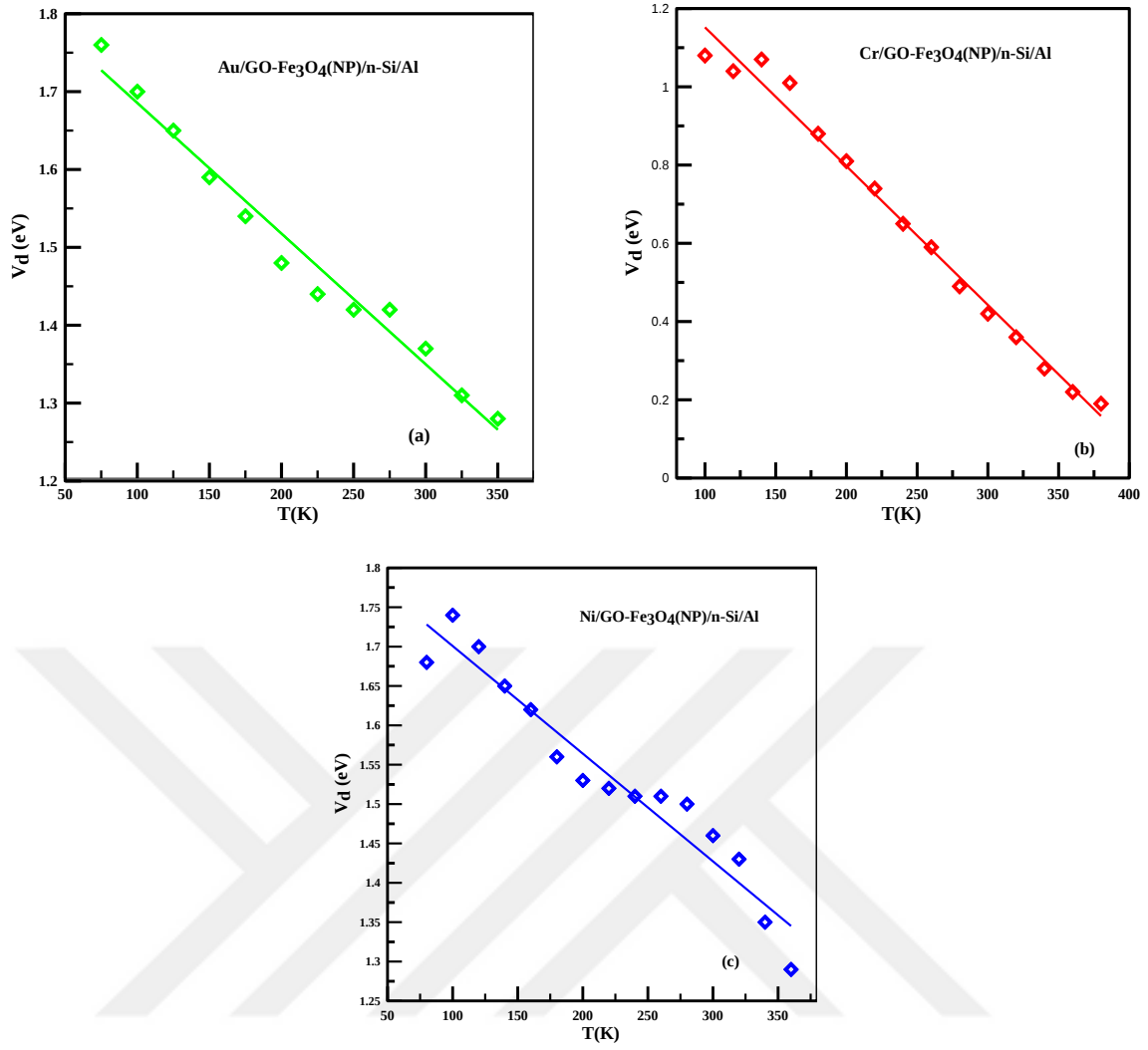


Şekil 82. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al heteroekleminin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı 1/C²-V grafikleri

Tablo 15. Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al Heteroekleminin 500 kHz Frekans Değerinde Sıcaklığa Bağlı 1/C²-V Grafiklerinden Elde Edilen Temel Parametreler

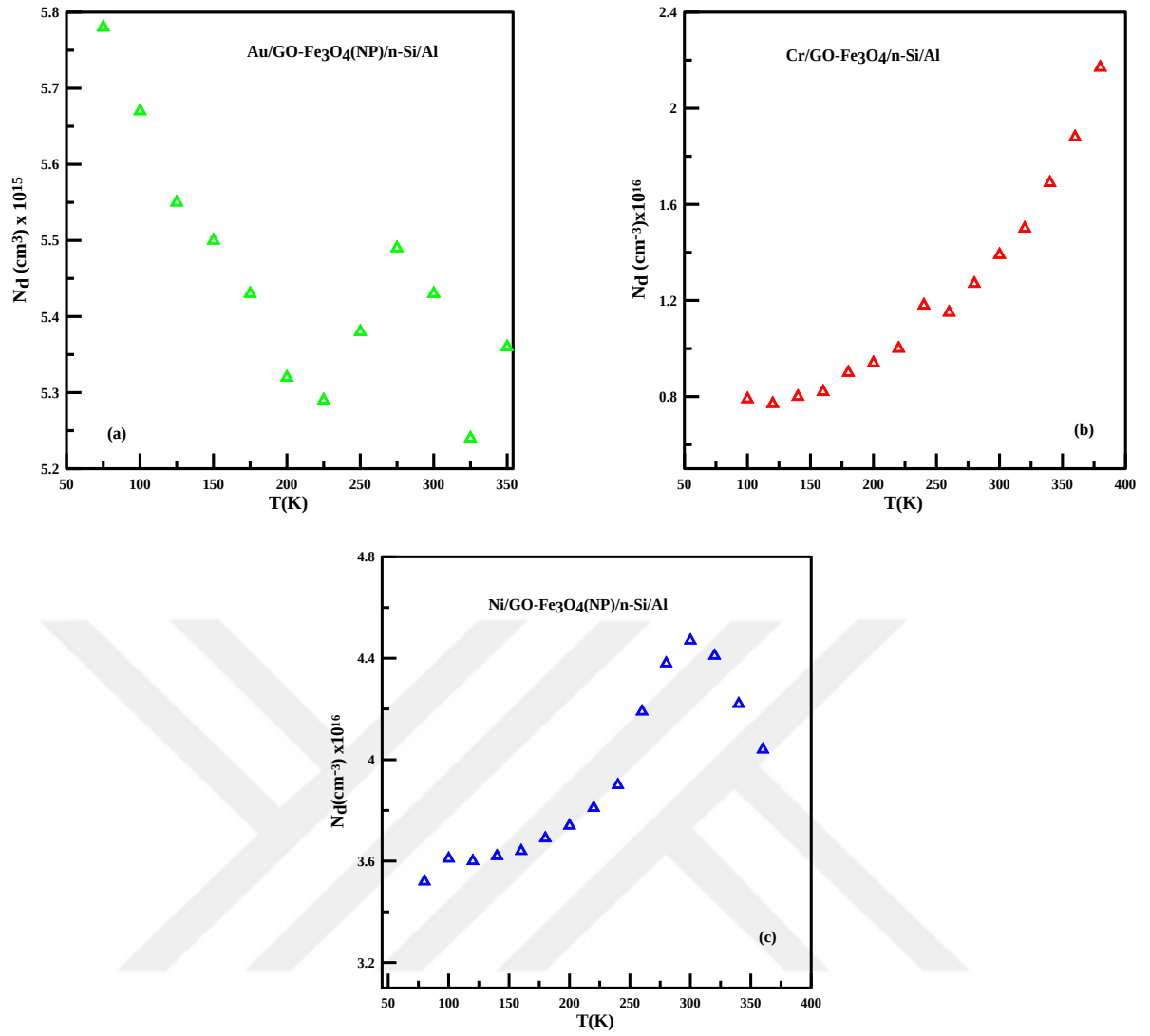
<i>Sıcaklık(K)</i>	<i>V_d(eV)</i> <i>(düzeltilmiş)</i>	<i>N_d(cm⁻³)x10¹⁶</i>	<i>E_f(eV)</i>	<i>Φ_b (eV)</i>
80	1,68	3,52	0,04	1,72
100	1,74	3,61	0,05	1,80
120	1,70	3,60	0,06	1,77
140	1,65	3,62	0,08	1,73
160	1,62	3,64	0,09	1,71
180	1,56	3,69	0,10	1,66
200	1,53	3,73	0,11	1,64
220	1,52	3,81	0,12	1,64
240	1,51	3,90	0,13	1,65
260	1,51	4,19	0,14	1,66
280	1,50	4,38	0,15	1,66
300	1,46	4,47	0,16	1,63
320	1,43	4,41	0,17	1,61
340	1,35	4,22	0,19	1,54
360	1,29	4,04	0,20	1,49

Şekil 83'te Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı difüzyon potansiyeli (V_d) grafikleri verilmiştir. D2 ve D3 heteroeklemi için de düzeltilmiş difüzyon potansiyeli değeri (V_d/n) kullanılmıştır. Grafiklerden görüldüğü üzere her üç heteroeklem için sıcaklık arttıkça V_d değeri azalmaktadır. Düşük sıcaklıklarda yüksek V_d değeri heteroeklemlerdeki düşük taşıyıcı konsantrasyonuna bağlanır. Bu durum taşıyıcı yoğunluğunun yüksek sıcaklıklarda artması gerektiğini gösterir (Li *et al.* 2020).



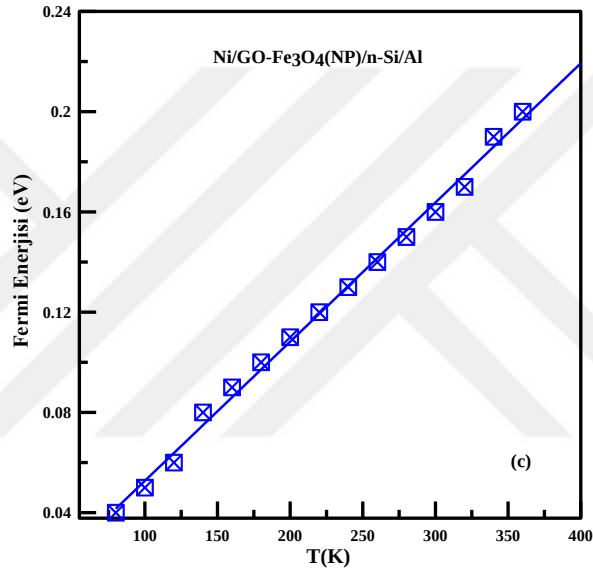
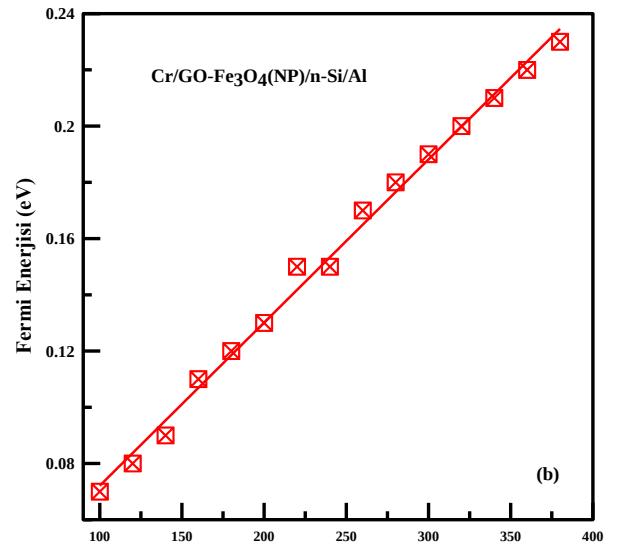
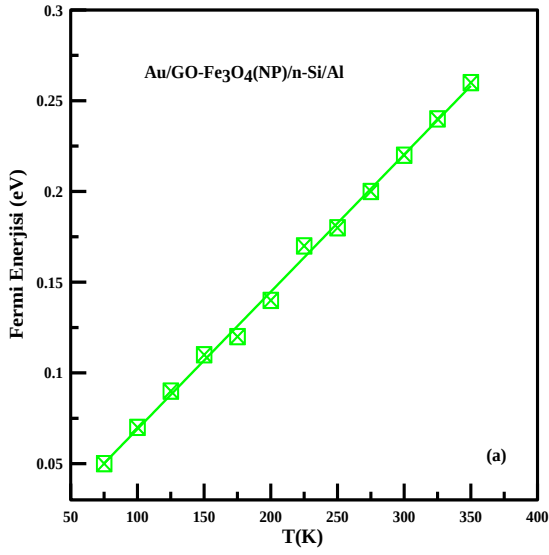
Şekil 83. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı difüzyon potansiyeli grafikleri

$1/C^2$ - V grafiklerinden elde edilen parametrelerin genellikle lineer davrandıkları görülmektedir. Ancak Şekil 84’te görüldüğü gibi Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin donör yoğunluğundaki lineer olmayan değişimler göze çarpmaktadır. İyonize olmuş taşıyıcı konsantrasyonlarının sıcaklıkla değişimindeki küçük dalgalanmaların sebebi olarak GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si arayüzünde taşıyıcıların tuzaklar tarafından yakalanmasıyla yük taşıyıcıların yoğunluğu azalması ve artan sıcaklıkla yeterli termal enerjiye ulaşan doping atomlarının iyonlaşması nedeniyle yük taşıyıcıların sayısının artması gösterilmektedir (Cola *et al.* 1995)



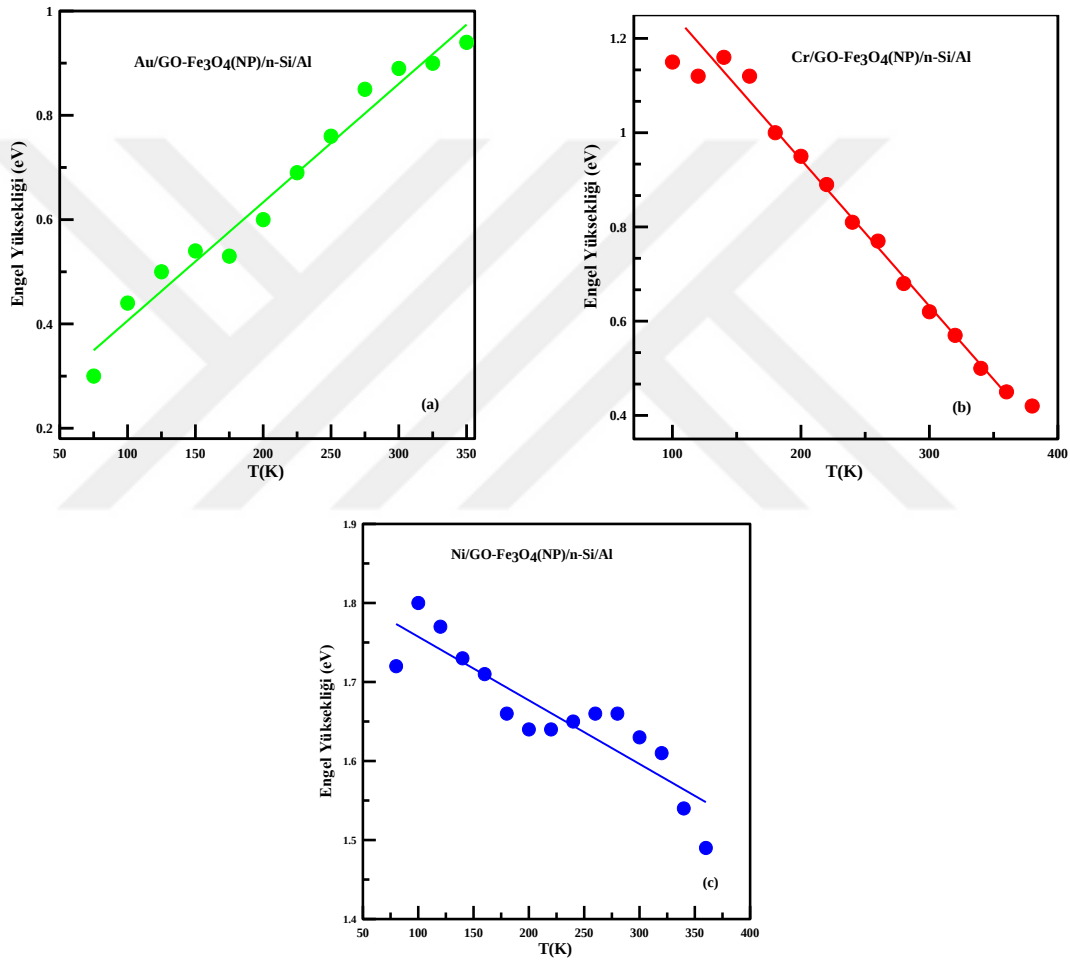
Şekil 84. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı donör yoğunluğu grafikleri

Şekil 85'te sırasıyla Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin Fermi enerji seviyelerinin artan sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Bu değişim arayüzeydeki tuzaklar ve homojensizliklerden kaynaklanmaktadır (Naik and Reddy 2010). Fermi enerji seviyesinin sıcaklıkla artması iyonize taşıyıcı yoğunluğunun artışına atfedilir.



Şekil 85. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı fermi enerjisi grafikleri

Şekil 86'da sırasıyla Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin C-V ölçümleri ile hesaplanan düzeltilmiş engel yüksekliği değerlerinin artan sıcaklıkla değişimi görülmektedir. D1 heteroeklemi için engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla artması arayüzeyin varlığına, yüksek kapasitansa ve engelin homojensizliğine atfedilir (Kumar *et al.* 2018). D2 ve D3 heteroeklemlerinde artan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu azalma artan sıcaklıkla D2 ve D3 heteroeklemlerinin bant aralığının azalmasıyla açıklanabilir (Aboelfotoh 1989; Korucu *et al.* 2009; Korucu *et al.* 2015). Engel yüksekliğindeki bu değişim deplasyon bölgesindeki tuzakların varlığına da atfedilir (Fritah *et al.* 2016).



Şekil 86. Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al (c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı engel yüksekliği grafikleri

Tablolara bakıldığında C-V tekniğinden hesaplanan engel yüksekliği değerinin, I-V tekniği ile bulunan engel yüksekliği değerlerinden farklı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak I-V ve C-V karakteristiklerini ölçmek için kullanılan yöntem farklılıkları gösterilebilir. C-V ölçüm tekniği düz bant engel yüksekliği değerini verirken, I-V ölçüm tekniği, imaj-kuvvet engel düşmesi sebebiyle düz bant değerinden daha düşük bir engel yüksekliği değerini verir

(Taşer 2012). Homojen olmayan eklemlerde akım iletiminde düşük engel yüksekliği bölgeleri baskın olduğundan I-V ölçüm tekniği ile tüm eklem aritmetik ortalamasından daha düşük engel yüksekliği değerleri görülür. Yüksek sıcaklıklarda, I-V engeli yüksektir, çünkü daha yüksek engel bölgelerinden daha fazla akım geçer. Daha düşük sıcaklıklarda ise akımın çoğu düşük engel bölgelerinden akar, böylece I-V engelini önemli ölçüde azaltırlar. C-V ölçümü akım değişimini dikkate almadan, tüm eklem için ortalama bir engel yüksekliği verir (Coşkun *et al.* 2004; Güllü 2018). Engeli homojen olan bir devre elemanında kapasite deplasyon bölgesinin genişliği ile orantılı olduğundan C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği, deplasyon bölgesinin büyüklüğünün bir ölçüsüdür (Asubay 2017).



TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, heteroeklemleri üretmek için taban malzeme olarak [100] doğrultusunda büyütülmüş, 400 µm kalınlıkta ve 1-10 Ω-cm öz direnci olan n-Si yarıiletkeni kullanılmıştır. Yarıiletkenin mat tarafına omik kontak yapıldıktan sonra, daha önceden sentezleme işlemi yapılan GO-Fe₃O₄ çözeltisi n-Si yarıiletken kristallerinin parlak yüzeyine basit damlatma yöntemiyle kaplandı. Üzerine GO-Fe₃O₄(NP) kaplanmış ve omik kantağı yapılmış olan numunelerin metal kontakları da yapılarak *D1*, *D2* ve *D3* heteroeklemlerinin fabrikasyonu tamamlandı. Elde edilen bu yapıların sıcaklığa bağlı *I-V* ve *C-V* ölçümleri alındı. Bu ölçümlerden bazı temel aygıt parametrelerinin hesaplanmasıyla, GO-Fe₃O₄(NP) malzemesinin ve sıcaklığın bu parametreler üzerindeki etkileri incelendi. Ayrıca Au, Cr ve Ni metallerinin heteroeklem uygulamalarındaki etkisi de kıyaslandı.

UV-Vis spektrumu kullanılarak, Şekil 22'deki grafikler yardımıyla GO-Fe₃O₄(NP) ince filminin indirekt enerji bant aralığı 2,82 eV ve direkt enerji bant aralığı 2,85 eV olarak bulundu.

Ayrıca GO-Fe₃O₄(NP)'ın yapısal özelliklerini incelemek için XRD analizi yapıldı ve GO-Fe₃O₄(NP) filmin morfolojisi (Geçirimli Elektron Mikroskobu)TEM ile incelendi. FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi) ile GO-Fe₃O₄(NP)'ın kimyasal bileşimi karakterize edildi. GO-Fe₃O₄(NP)'ın XRD ölçümleri Şekil 24'te verilmiştir. Şekildeki kırınım pikleri literatürle uyumludur (Metin *et al.* 2014; Jedrzejczak 2017). GO-Fe₃O₄ nanoparçacıklarına ait XRD kırınım desenlerindeki piklerin şiddetleri büyük ve yarı pik genişlikleri dar olduğundan iyi bir kristalleşmenin olduğu görüldü. Şekil 26'da GO-Fe₃O₄(NP) filminin TEM ve SEM görüntülerine bakıldığında Fe₃O₄ nanoparçacıklarının GO nano yapraklara iyi bir şekilde dağıldığı gözlemlendi. GO-Fe₃O₄ nanoparçacıkları için yapılan FTIR ile Şekil 27'de gözlenen zirveler yapılan diğer çalışmalarla benzer sonuçları içermektedir (Kamakshi *et al.* 2018; Neolaka *et al.* 2020).

Sıcaklığa Bağlı *I-V* Ölçümleri

D1, *D2* ve *D3* heteroeklemlerinin üretim aşamaları ayrıntılı olarak 3. bölümde verilmiştir. *D1* heteroeklemi için 25'K lik adımlarla 75K- 350K aralığında, *D2* heteroeklemi için 20K'lik adımlarla 100K-360K aralığında, *D3* heteroeklemi için ise 20K'lik adımlarla 80K-340K aralığında *I-V* ölçümleri alındı. Ek olarak elde edilen her üç heteroeklemin ve aynı şartlar altında hazırlanmış referans *R1*, *R2* ve *R3* yapılarının oda sıcaklığında *I-V* ölçümleri alınarak,

grafikleri sırasıyla Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31'deki gibi çizilmiştir. Bu grafiklerden geleneksel metot kullanılarak hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla Tablo 3'de verilmiştir.

Oda sıcaklığında referans $R1$ yapısı için idealite faktörü 2,57 bulunurken engel yüksekliği değeri 0,70 eV olarak bulundu. Aynı şartlar altında hazırlanmış $D1$ heteroeklemi için idealite faktörü 2,02 bulunurken engel yüksekliği 0,76 eV olarak bulundu. Benzer şekilde $R2$ yapısı ve $D2$ heteroeklemi için engel yükseklikleri ve idealite faktörleri sırasıyla 0,69 eV; 0,63 eV ve 3,91;1,28 olarak hesaplandı. $R3$ yapısı ve $D3$ heteroeklemi için ise sırasıyla engel yükseklikleri ve idealite faktörleri 0,59 eV ;0,66 eV ile 1,98;1,61 olarak bulundu. Hesaplanan aygıt parametrelerinden idealite faktörü değerlerinin 1'e yaklaşması ve engel yüksekliği değerlerinin artması GO- Fe_3O_4 (NP) malzemesinin heteroeklem karakteristiğinde iyileştirme yaptığı göstermektedir. Bu durum metal ile yarıiletken arasına film büyütülmesi ile engel yüksekliğinin artması filmin fiziksel bir bariyer oluşturması, metalin iş fonksiyonunda ve yarıiletkenin elektron ilgisinde önemli değişiklikler yapmasıyla da açıklanabilir (Balaram *et al.* 2018). Bu çalışmada 1'den büyük idealite faktörü değerleri metal/GO- Fe_3O_4 (NP) ve GO- Fe_3O_4 (NP) /n-Si arayüzeyindeki arayüzey kusurlarına ve n-Si yüzeyinin yakınındaki bazı yüzey durumları veya rekombinasyon merkezleri arasındaki arayüz katmanlarının varlığına atfedilebilir (Metin *et al.* 2014).

$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı $I-V$ grafikleri sırasıyla Şekil 33, Şekil 34 ve Şekil 35'te gösterilmektedir. Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da ise her üç heteroeklemin sıcaklığa bağlı olarak geleneksel metot termiyonik emisyon metodu ile elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri yer almaktadır. $D1$ heteroeklemi için idealite faktörü değeri 6,78 (75 K) ile 1,98 (350 K) arasında iken, engel yüksekliği değeri 0,18 (75 K) ile 0,86 eV (350 K) arasında değişti. $D2$ heteroeklemi için idealite faktörü değeri 2,46 (100 K) ile 1,28 (360 K) arasında iken, engel yüksekliği değeri 0,26 (100 K) ile 0,73 eV (360 K) arasında değişti. $D3$ heteroeklemi için ise ile arasında idealite faktörü değeri 6,30 (80 K) ile 1,48 (340 K) arasında iken, engel yüksekliği değeri 0,20 (80 K) ile 0,75 eV (340 K) arasında değiştiği görüldü.

Artan sıcaklıkla idealite faktörü değeri azalırken, engel yüksekliği değerinin her üç numune için de arttığı görüldü. $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve engel yüksekliği grafikleri Şekil 36, Şekil 37 ve Şekil 38'de gösterilmiştir. Ayrıca heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı idealite faktörü grafikleri ile sıcaklığa bağlı engel yüksekliği grafikleri sırasıyla Şekil 39 ve Şekil 40'ta birlikte gösterilmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi üç aygıtın da sıcaklığa bağlı parametreleri uyumludur. Yüksek sıcaklıklarda idealite

faktöründeki belirgin bir azalma ve engel yüksekliğindeki artış, kalınlığın homojensizliği ile arayüzey yüklerinin homojensizliği gibi etkilere kaynaklanmaktadır (Chung *et al.* 2005).

Şekil 41’de $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin belirlenen akım değerleri için voltaj-sıcaklık ve belirlenen ters beslem voltaj değerleri için akım-sıcaklık grafikleri yer almaktadır. V-T grafiklerinde yüksek akım, yüksek voltaj bölgelerinde görülürken; I-T grafiklerinde ters beslem voltajı arttıkça daha büyük akım değerleri görülmüştür. Her iki grafikte de hazırlanan heteroeklemlerin sıcaklığa bağlılık gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 42’de ise $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için duyarlılık-akım grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiklerden de her üç heteroeklemin termal hassasiyetinin iyi olduğu gözlenmiştir.

$D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı, Cheung fonksiyonlarından elde edilmiş $dV/d(\ln I)$ -I ile $H(I)$ -I grafikleri sırasıyla $D1$ heteroeklemi için Şekil 43, Şekil 44; $D2$ heteroeklemi için Şekil 45, Şekil 46; $D3$ heteroeklemi için Şekil 47, Şekil 48’de verilmiştir. Ayrıca Cheung fonksiyonlarından $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmış olan seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6’da verilmiştir.

$D1$ heteroeklemi için $dV/d(\ln I)$ -I grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerleri 9,43 (75K) ile 2,58 (350K) arasında sıcaklıkla azalırken, elde edilen seri direnç değerleri 3607Ω (75K) ile 1195Ω (350K) arasında artan sıcaklıkla azalma göstermektedir. Ayrıca bu heteroeklem için $H(I)$ -I grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri artan sıcaklıkla 3835Ω (75K) ile 1350Ω (350K) arasında azalırken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,19 eV (75K) ile 0,83 eV (350K) arasında artan sıcaklıkla uyumlu bir artış göstermektedir.

$D2$ heteroeklemi için sıcaklık aralığında $dV/d(\ln I)$ -I grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerleri 9,62 (100K) ile 1,87 (360K) arasında ve elde edilen seri direnç değerleri 40Ω (100K) ile 61Ω (360K) arasında artan sıcaklıkla uyumlu bir artış göstermektedir. $H(I)$ -I grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri de artan sıcaklıkla 35Ω (100K) ile 51Ω (360K) arasında uyumlu bir şekilde artarken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,17eV (100K) ile 0,91eV (360K) arasında artan sıcaklıkla doğru orantılı bir artış gösterdi.

$D3$ heteroeklemi için $dV/d(\ln I)$ -I grafiğinden elde edilen idealite faktörü değerleri 8,99 (80K) ile 1,47 (340K) arasında ve elde edilen seri direnç değerleri 25Ω (80K) ile 44Ω (340K) arasında artan sıcaklıkla uyumlu bir artış göstermektedir. $H(I)$ -I grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri de artan sıcaklıkla 26Ω (80K) ile 38Ω (340K) arasında uyumlu bir şekilde artarken, yine bu grafikten elde edilen engel yüksekliği değerleri 0,17 eV (80K) ile 0,91 eV (340K) arasında artan sıcaklıkla doğru orantılı bir artış gösterdi. Sıcaklığın artmasıyla daha çok

elektron yüksek engelleri aşmak için yeterli enerjiye sahip olacağından etkin engel yüksekliği sıcaklıkla ve uygulama gerilimiyle artarken idealite faktörü azalır. Bu durum literatürde yapılan çoğu çalışmada gözlenmiştir (Hardikar 1999; Coşkun *et al.* 2003).

Şekil 49, Şekil 50 ve Şekil 51’de hem Cheung metoduyla hem de geleneksel metotla hesaplanan idealite faktörleri artan sıcaklıkla ters orantılı olarak azalmaktadır. Ancak, Cheung metoduyla hesaplanan idealite faktörü değerlerinin, geleneksel metotla hesaplanan değerlerden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum arayüzey hallerine, arayüzey tabakası üzerindeki gerilim düşmelerine ve seri direnç etkisine atfedildi.

$dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri ile elde edilen seri direnç değerlerinin de birbiri ile uyumlu olduğu görüldü. $D1$ heteroeklemi için seri direnç artan sıcaklıkla birlikte Şekil 57’deki gibi kademeli olarak azaldığı görüldü. Bu durum kısmen idealite faktöründeki artışa ve düşük sıcaklıkta serbest taşıyıcı konsantrasyonunun eksikliğine atfedildi. Artan sıcaklıkla aktive olan taşıyıcılar engeli aşarak akımın artmasına ve seri direncin azalmasına neden olabilmektedir (Osvald *et al.* 2004).

Şekil 58 ve Şekil 59’da sırasıyla $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için Cheung fonksiyonları ile bulunan seri direnç değerlerinin sıcaklığa karşı değişim grafikleri gösterilmektedir. Her iki heteroeklem için Cheung fonksiyonları ile hesaplanan R_s ’ler sıcaklık artışı ile artarak beklenmeyen bir durum ortaya çıkarmışlardır. Seri direnç, sadece düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların aktifliklerini yitirdiği (freezing out) sıcaklık bölgesindeki yarıiletkenler için beklendiği gibi artan sıcaklıkla artabilmektedir. Ayrıca bu durum düşük sıcaklıklarda serbest taşıyıcının olmamasına atfedildi.

Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62 sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerin engel yüksekliği değerlerinin $1/2kT$ ’ye karşı olan değişim grafiklerini göstermektedir. Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62’de sırasıyla 225 K, 220 K ve 200 K sıcaklık değerlerinde kesişen lineer tek bir çizgi yerine metal-yarıiletken ara yüzeyinde iki farklı engel yüksekliğinin varlığını gösteren iki lineer çizgi olduğu görülmektedir. Bu durum metal-yarıiletken ara yüzeyinde engelin çift Gauss dağılımına sahip olmasına atfedildi.

$D1$ heteroekleminin engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine lineer fit uygulanarak ortalama engel yüksekliği değerleri 75K ile 225 K arasında 0,69 eV iken 225K ile 350K arasında 1,30 eV olarak hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri ise 75K ile 225K arasında 0,083 V iken 225 K ile 350 K arasında 1,64 V olarak hesaplanmıştır. $D2$ heteroekleminin ortalama engel yüksekliği değerleri 100 K ile 220 K arasında 0,66 eV iken 220 K ile 360 K arasında 1,13 eV ve standart sapma değerleri 100 K ile 220 K arasında 0,085 V iken 220 K ile 360 K arasında 0,151 V olarak hesaplanmıştır. $D3$ heteroekleminin ortalama

engel yüksekliği değerleri 80 K ile 200 K arasında 0,66 eV iken 200 K ile 340 K arasında 1,13 eV ve standart sapma değerleri 80 K ile 200 K arasında 0,0082 V iken 200 K ile 340 K arasında 0,151V olarak hesaplanmıştır.

Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62'deki grafikler aynı zamanda $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerin idealite faktörünün tersinin $q/2kT$ 'ye karşı değişimini göstermektedir. Bu yüzden engel yüksekliği değerinin $q/2kT$ 'ye karşı olan değişiminde olduğu gibi idealite faktörünün tersinin $q/2kT$ 'ye karşı değişiminin de idealite faktörü değerlerinin ikili Gauss dağılımına uyduğunu göstermektedir (Deniz,2015). Şekil 60, Şekil 61 ve Şekil 62'deki grafiklerde çizimlerin lineer davranışı, idealite faktörünün sıcaklıkla değişimine Gauss dağılımlı engeldeki voltaj deformasyonun sebep olduğu söylenebilir. İdealite faktörü değerlerinin voltaj katsayılarını hesaplamak ve Gauss dağılımlarını elde etmek için her dağılım bölgesinin voltaj katsayısı tekli Gauss denklemi kullanılarak elde edildi. Şekil 59'da gösterilen $D1$ heteroeklemine ait $[(1/n)-1]$ 'in $1/2kT$ 'ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları 75K ile 225 K arasında $\rho_2 = -0,62$ ve 225 K ile 350 K arasında $\rho_2 = -0,16$; 75K ile 225 K arasında $\rho_3 = -0,0028$ V ve 225 K ile 350 K arasında $\rho_3 = 0,018$ V olarak bulundu. Şekil 60'ta gösterilen $D2$ heteroeklemine ait voltaj katsayıları 100K ile 220 K arasında $\rho_2 = -0,14$ ve 220 K ile 360 K arasında $\rho_2 = -0,29$; 100 K ile 220 K arasında $\rho_3 = 0,0081$ V ve 220 K ile 360 K arasında $\rho_3 = 0,026$ V olarak bulunmuştur. Şekil 61'de gösterilen $D3$ heteroeklemine ait voltaj katsayıları ise 80K ile 200 K arasında $\rho_2 = -0,39$ ve 200 K ile 340 K arasında $\rho_2 = 0,051$; 80 K ile 200 K arasında $\rho_3 = 0,0065$ V ve 200 K ile 340 K arasında $\rho_3 = 0,022$ V olarak bulunmuştur. Bu hesaplamalarda ρ_2 katsayısının negatif olması, uygulama gerilimi arttıkça engel yüksekliğinin ve dolayısıyla onun standart sapmasının azalmasına atfedildi. Yani, artan uygulama voltajının etkin engelin maksimumunu yarıiletken gövde içine doğru kaydırarak engel yüksekliğindeki dalgalanmaların azalmasına ve dolayısıyla engelin daha homojen bir dağılıma sahip olmasına yol açmıştır.

Şekil 63, Şekil 64 ve Şekil 65'te sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerine ait $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1000/T$ 'ye karşı çizilen modifiye edilmiş Richardson grafikleri yer almaktadır. Grafikler kullanılarak Richardson sabiti değerleri sırasıyla $D1$ heteroeklemi için $A^* = 4.35 \times 10^{-6}$ A/K²cm², $D2$ heteroeklemi için $A^* = 7.5 \times 10^{-4}$ A/K²cm² ve $D3$ heteroeklemi için $A^* = 1.6 \times 10^{-5}$ A/K²cm² olarak hesaplandı. Hesaplanan Richardson sabitinin değerleri, n-Si için teorik olarak hesaplanan 112 A/K² cm² değerinden çok küçüktür. Bu durum, düşük ve yüksek engelli alanlardan oluşan ara yüzeydeki potansiyel dalgalanmalarına yorumlandı.

Şekil 66'da $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemlerine ait nT 'nin T 'ye karşı grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde çizgilerin belirli bir sıcaklığa kadar lineere yakın olduğu ve eğimi 1 olan doğruya yaklaşık paralel olduğu görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda ise bu durum gözlenememektedir. Bu

durum T_0 'ın sıcaklıktan bağımsız olmadığını göstermektedir. T_0 değerlerini bulmak için deneysel verilere fit yapılmıştır. Deneysel hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler üzerine fit edilen düz çizginin ideal Schottky kontak davranışını gösteren çizgiyle paralel olmadığı ancak; sıcaklık arttıkça her üç heteroeklem için çizilen fitlerin ideal durum çizgisine yaklaştığı görülmüştür. Bu durum engel yüksekliğinin homojen olmamasına, engeldeki taşıyıcıların tünellemesine, görüntü kuvvetinin azalmasına ve arayüzey hal yoğunluğuna atfedilebilir (Özer *et al.* 2007; Karabulut *et al.* 2018). $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için T_0 değerleri sırasıyla 464,5; 180,9 ve 325,9 olarak bulunmuştur. Bu durum Schottky engeli boyunca yanal homojensizliğin varlığıyla açıklanabilir. İdeal durumda ($n=1$ için) T_0 , sıfır değerini almaktadır. Bu değeri sıfıra yaklaştıkça diyotlar da daha ideal hale gelir. Homojen olmayan Schottky engeli kuramına göre sıcaklığın azalmasıyla, homojen olmayan bir Schottky diyot akımı T_0 etkisine yönelik iki davranış sergiler. Birincisi, beslemdeki bir artışın ölçülen idealite faktöründe artışa neden olmasıdır. İkinci durumda ise, rastgele bir dağılımla, düşük Schottky engeli bölgeleri bulunduran bir Schottky diyodunun olduğu kabul edilir. Sıcaklık azaldığında, eklem akımının düşük Schottky engeli olan bölgeler tarafından kontrol edilmesiyle idealite faktörü daha büyük ve etkin Schottky engeli değeri daha düşük değerler almaktadır.

Seri direnç ve engel yüksekliği değerlerini belirleyebilmek için geleneksel yöntem ve Cheung fonksiyonlarının yanı sıra Norde metodu da tercih edilmektedir. Şekil 67, Şekil 68 ve Şekil 69 sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için sıcaklığa bağlı $F(V)$ 'nin V 'ye karşı değişim grafiklerini vermektedir. Tablo 10, Tablo 11 ve Tablo 12'de bu heteroeklemler için Norde fonksiyonlarıyla hesaplanmış sıcaklığa bağlı engel yüksekliği ve seri direnç değerleri görülmektedir. Tablo 10'da görüldüğü üzere engel yüksekliği değeri $D1$ heteroeklemi için 0,19 eV (75 K) ile 0,86 eV (350 K) arasında artarken, seri direnç değerleri ise 282,53 k Ω (75 K) ile 64,11 k Ω (350 K) arasında azaldı. Tablo 11'de $D2$ heteroeklemi için engel yüksekliği değeri 0,27 eV (100 K) ile 0,72 eV (360 K) arasında artarken, seri direnç değerleri ise 21646,7 Ω (100 K) ile 72,7 Ω (360 K) arasında azaldı. Tablo 12'de ise $D3$ heteroeklemi için engel yüksekliği değeri 0,20 eV (80 K) ile 0,71 eV (340 K) arasında artarken, seri direnç değerleri ise 615,02 k Ω (80 K) ile 3,61 k Ω (340 K) arasında azaldı. Sıcaklık artışıyla taşıyıcılar daha fazla termal hıza sahip olur ve iletkenlik bandındaki taşıyıcı yoğunluğu artar. Bunun sonucu olarak da seri dirençte azalma gözlenir. Artan sıcaklıkla seri direnç değerlerindeki bu azalma taşıyıcı sayısındaki artışa atfedildi (Chand and Kumar 1996).

Şekil 70'te sırasıyla $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için Norde fonksiyonları ile hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere artan sıcaklıkla engel yüksekliği değerleri uyum içinde artmaktadır. $D1$, $D2$ ve

D3 heteroeklemleri için Norde fonksiyonları ile elde edilen seri direnç değerleri ise artan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda iyonlaşma sebebiyle elektron sayısının artması olarak yorumlandı.

D1, D2 ve D3 heteroeklemleri için Termiyonik Emisyon, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilmiş engel yüksekliği değerlerinin karşılaştırılması sırasıyla Şekil 71, Şekil 72 ve Şekil 73'te gösterilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi her üç heteroeklem için üç metottan da sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmış engel yüksekliği değerleri birbirine yakın ve sıcaklıkla uyumlu bir değişim göstermektedir. Schottky bariyeri, farklı engel yüksekliklerinde homojen olmayan yamalardan meydana gelmektedir. Metal/yarı iletken arayüzü boyunca akım aktarımı sıcaklıkla aktifleşen bir süreç olduğundan düşük sıcaklıkta elektronlar daha düşük engelleri aşabilir ve bu nedenle mevcut taşımaya, daha düşük Schottky engel yüksekliğindeki yamalar boyunca akan akım hakim olacaktır (Raynaud *et al.* 2002; Pattabi *et al.* 2007). Artan sıcaklıkla engel yüksekliğindeki artış, enerjisi artan elektronların daha yüksek engelleri aşma isteğine yorumlandı (Rao *et al.* 2015).

Heteroeklemlerin düz-beslem I-V karakteristiklerinden hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri yarıiletkende dengede olan arayüzey enerji halleri ile kontrol edilebilir. D1, D2 ve D3 heteroeklemlerinin farklı sıcaklıklarda arayüzey hal yoğunluğunun, arayüzey hal enerjisine karşı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 74, Şekil 75 ve Şekil 76'da gösterilmiştir. Her üç şekilde de arayüzey hal yoğunluğunun iletkenlik bandının altına doğru eksponansiyel olarak arttığı görülmektedir. Bu durum da arayüzey hal yoğunluğunun valans bandının üstüne doğru eksponansiyel olarak arttığını göstermektedir. Buradaki artışların sebebi rekombinasyon merkezlerindeki azalmaya ve n-Si yarıiletken ile GO-Fe₃O₄ (NP) tabakasının arasındaki bir arayüzey tabakasının varlığına atfedildi.

Sıcaklığa Bağlı C-V Ölçümleri

D1 heteroeklemi için 75K-350K sıcaklık aralığında 25K'lik adımlarla; D2 heteroeklemi için 120K-380K sıcaklık aralığında 20K'lik adımlarla ve D3 heteroeklemi için 80K-300K sıcaklık aralığında 20K'lik adımlarla 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı C-V ölçümleri alınmıştır. Şekil 77, Şekil 78 ve Şekil 79'da D1, D2 ve D3 heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı C-V grafiklerinin ters ve düz beslem grafikleri görülmektedir. Ters beslem durumunda ters beslem voltajı arttıkça kapasite değeri azalırken, düz beslem halinde voltajın artmasıyla kapasitenin arttığı grafiklerde görülmektedir. Ters beslem durumunda gerilimin artmasıyla taşıyıcı yoğunluğu arttığı için kapasite değerinde azalma gözlenir (Taşyürek 2020). Şekil 80, Şekil 81 ve Şekil 82'de D1, D2 ve D3 heteroeklemleri için ters beslemde ölçülen kapasite-voltaj karakteristiğinden elde edilen C⁻²-V grafikleri görülmektedir.

Ters beslem $1/C^2$ -V grafiklerine çizilen lineer doğruların eğimleri kullanılarak N_d (donor konsantrasyonu) verici yoğunlukları hesaplandı. Ayrıca fermi enerjisi seviyeleri, ideal olmayan diyot için engel yüksekliği değerleri $D1$, $D2$ ve $D3$ heteroeklemleri için hesaplanmış ve sırasıyla Tablo 13, Tablo 14 ve Tablo 15'te verilmiştir. C-V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliklerinin I-V ölçümlerinden elde edilenden daha farklı olduğu görülmüştür. Bu durum engelin homojen olmamasına, arayüzey tabakasının varlığına ve yarıiletkendeki tuzak seviyelerine atfedilir (Rhoderick *et al.* 1988; Balaram *et al.* 2018). Homojen olmayan bir arayüzeylerde bant bükülmesi ve engel yüksekliğinde bölgesel değişimler olduğundan kapasite ve akım için farklı engel yüksekliği değerleri görülmektedir (Brillson 1982).

Şekil 83'de Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(c) heteroeklemlerinin 500 kHz frekans değerinde sıcaklığa bağlı difüzyon potansiyeli grafikleri verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere her üç heteroeklem için sıcaklık arttıkça V_d değeri azalmaktadır. Bu durum rekombinasyon merkezi görevi yapan arayüzey hallerindeki tuzaklanma durumları ve tuzakların iyonizasyonunun olmamasına atfedildi (Çakıcı *et al.* 2015; Aydoğan *et al.* 2017). Düşük sıcaklıklarda V_d için hesaplanan yüksek değerler, heteroeklemlerin düşük taşıyıcı konsantrasyonuna bağlanabilir (Li *et al.* 2020). Bazı doğrultucu kontaklarda engel yüksekliğinin homojen olmaması da idealliği bozan sebeplerdendir. Yük taşıyıcıları, düşük sıcaklıklarda düşük engel alanlarından ve yüksek sıcaklıklarda yüksek engel alanlarından geçerek farklı difüzyon potansiyellerine yol açabilmektedir (Güllü and Yıldız 2019).

Şekil 84'te Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(c) heteroeklemlerinin sıcaklığa bağlı donor yoğunluğunda lineer olmayan değişimler gözlenmektedir. Bu durum arayüzeydeki hal yoğunluğunun varlığından kaynaklanan artık kapasite ile açıklanmaktadır (Türüt *et al.* 1992). Ayrıca temas direnci, paralel iletkenlik-kapasitans gibi ölçüm sisteminin parazitik unsurları da bu değişimlere neden gösterilmektedir (Gümüş and Aydoğan 2020).

Şekil 85'te sırasıyla Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(c) heteroeklemlerinin Fermi enerjisi seviyelerinin artan sıcaklıkla arttığı görülmektedir. Bu artış iyonize taşıyıcı yoğunluğunun artmasıyla ilişkilendirilmiştir (Koçyiğit *et al.* 2017).

Şekil 86'da sırasıyla Au/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(a), Cr/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(b) ve Ni/GO-Fe₃O₄(NP)/n-Si/Al(c) heteroeklemlerinin engel yüksekliği değerlerinin artan sıcaklıkla değişimi görülmektedir. C-V grafiğinden hesaplanan engel yüksekliği değerleri I-V grafiğinden hesaplanan değerlerden daha farklı çıkmıştır. Potansiyel engelin uzaysal dağılımı sebebiyle I-

V ve C-V ölçümleri farklı durumlardan etkilenir ve her iki ölçümden elde edilen engel yüksekliği farklı değerler alır. Metal/yarıiletken arayüzeyindeki akım, Φ_b 'ye üstel olarak bağlı olduğu için engel yüksekliğindeki herhangi bir uzaysal değişim, akımın daha çok minimum engelden geçmesine sebep olur. Bu durumdan dolayı, Schottky diyotlarda C-V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin, I-V karakteristiklerinden elde edilenlerinkinden daha büyük olması beklenir (Rhoderick ve Williams 1988, Werner ve Güttler 1991). Bu sonuç aynı zamanda yapının akım iletim mekanizmasının çok basamaklı tünelleme/yeniden birleşme olduğuna atfedildi (Yıldırım 2009).

Bu çalışmada elde ettiğimiz ölçüm, grafik ve hesaplamalara göre öncelikle oda sıcaklığında referans R_1 , R_2 ve R_3 yapıları ile D_1 , D_2 ve D_3 heteroeklemlerinin I-V ölçümlerinden termiyonik emisyon metoduyla hesaplanan elektriksel parametreleri karşılaştırılmıştır. Buradan GO-Fe₃O₄ filminin, tünelleme akımlarını en aza indirip, metal ve yarı iletken arasında fiziksel bir bariyer oluşturarak ve engel yüksekliği değerlerini genel olarak arttırdığı sonucuna varılmıştır (Bati 2016; Baltakesmez *et al.* 2019).

Ayrıca sıcaklığa bağlı I-V ölçümlerinde de artan sıcaklıkla idealite faktörü değerlerindeki azalma ve engel yüksekliği değerlerindeki artışla GO- Fe₃O₄ (NP) ince filminin aygıt parametreleri üzerinde iyileştirme yaptığı açıkça gözlenmiştir.

Yapısında oksijen bazlı fonksiyonel gruplar barındıran Grafen oksit, oksidasyon derecesine göre yarı iletken veya yalıtkan bir malzeme gibi davranabilir. Bu özelliği ile iletkenliği kontrol edilebilir ve bu durum grafen oksiti enerji depolama, elektronik cihazlar, biyo-sensörler, kaplama, biyomedikal gibi birçok alanda kullanıma sunmaktadır.

GO'nin bu özelliklerine Fe₃O₄'in manyetik ve elektrik özellikleri de eklenince GO- Fe₃O₄ (NP) ince filminin heteroeklemlerde oldukça avantajlı bir malzeme olduğu sonucuna varılır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, uygulanan gerilime, metalin iş fonksiyonuna, yarıiletkenin elektron ilgisine ve GO-Fe₃O₄(NP) filminin varlığına bağlı olarak doğrultma oranının değiştiği söylenebilir (Farag and Yahia 2011; Çetinkaya *et al.* 2013; Taşer *et al.* 2017). Tüm cihaz yapılarında aynı tip yarıiletken kullanıldığından, yarıiletkenin elektron ilgisi sabit kabul edilebilir. GO-Fe₃O₄(NP) filmi, üç cihaz yapısının tümü için benzer sonuçlar verdi. Bu nedenle, GO-Fe₃O₄(NP) filmi ile doğrultma hızındaki fark, büyük ölçüde metalin iş fonksiyonundan kaynaklanmaktadır. Engel yüksekliğinin büyüklüğü metalin iş fonksiyonu ve yarı iletkenin elektron ilgisine göre değişir (Çankaya and Uçar 2004; Çetinkaya *et al.* 2013; İslam *et al.* 2014; Yao *et al.* 2017).

Şekil 41’de *D1*, *D2* ve *D3* heteroeklemlerine ait Termiyonik Emisyon yöntemiyle hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişim grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiklere göre Cr kontak metali ile yapılan *D2* heteroeklemi daha kararlı bir davranış göstermiş ve idealite faktörü değeri 100 K ile 300 K sıcaklık aralığında sırasıyla 2,46 ile 1,28 arasında değişmiştir. Ayrıca bu değerler elde edilen aygıtlar arasında en düşük idealite faktörü değerleridir. Aygıtın idealite faktöründeki bu değişim Cr ile GO-Fe₃O₄(NP) filmi arasındaki düşük kontak direncine atfedildi (Norde 1979; Deniz *et al.* 2016). Bu heteroeklemi sırasıyla *D1* ve *D3* heteroeklemleri takip etmektedir. Heteroeklemlerin fabrikasyon sürecinde Cr metalinin kullanılması heteroeklemin idealite faktörü değerini Ni ve Au metali kullanımına göre *n*’ in ideal değeri olan 1’e daha da yakınlaştırmıştır. Cr metalinin kullanılması diyodu daha ideal hale getirmiştir. Ancak *D3* heteroekleminin idealite faktörü değerlerinin *D2* heteroekleminin idealite faktörü değerlerine yakın olduğu da göz ardı edilmemelidir.

Şekil 52’de ise *D1*, *D2* ve *D3* heteroeklemlerine ait Cheung yöntemiyle hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Bu şekilde ise sıcaklığa bağlı olarak *D3* heteroekleminin idealite faktörü değerlerinin diğer heteroeklemlere göre daha düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Bu heteroeklemi sırasıyla *D2* ve *D1* heteroeklemleri takip etmektedir. Bu iki şekil arasındaki sıralama farklılığının sebebi idealite faktörü değerlerini hesaplamadaki yöntemlerin farklılığına atfedilebilir. Termiyonik Emisyon yöntemi diyotların düz beslem I-V grafiğinin tamamına uygulanırken, Cheung fonksiyonları diyotların düz beslem I-V grafiğindeki yüksek voltaj yani grafikte bükülmelerin başladığı seri direnç bölgesine uygulanır. Bu durumu göz önünde bulundurduğumuzda *D3* heteroeklemi için seri direnç etkisinin daha az olduğunu söyleyebiliriz. Cheung fonksiyonlarından hesaplanan seri direnç değerleri bu durumu desteklemektedir. Sıcaklığa bağlı olarak *D3* heteroeklemi için hesaplanan seri direnç değerleri diğer heteroeklemlere göre daha düşüktür.

Genel olarak sıcaklığa bağlı I-V karakteristikleri incelendiğinde sıcaklığa bağlı olarak temel aygıt parametrelerinin değiştiği gözlenmiştir. Aygıt sıcaklığı arttıkça, aygıtların engel yüksekliği artmış ve aygıtlar daha ideal bir davranış sergilemiştir.

Hazırlanan heteroeklemlerin metal (Au, Cr, Ni) kısımlarının farklı oluşunun heteroeklemlerin elektriksel parametreleri üzerinde benzer olumlu davranışlar sergilediği hesaplamalar ve karşılaştırmalı grafiklerden anlaşılmıştır.

Sonuç olarak çalışmamız *D1*, *D2* ve *D3* heteroeklemlerinin elektronik/optoelektronik malzemeler ve cihazlar, sensörler gibi elektronik aygıt uygulamalarında avantajlı malzemeler olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Aboelfotoh, M.O., 1989. Electrical characteristics of W-Si(100) Schottky barrier junctions. *Journal of Applied Physics*, 66, 262.
- Acar, S., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N, Selçuk, A.B., Kasap, M., 2004. Gaussian distribution inhomogeneous barrier height in Ag/p-Si (100) Schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 233,373-381.
- Ahaitouf, A., Srour, H., Ould Saad Hamady, S., Fressengeas, N., Ougazzaden A., Salvestrini, J.P., 2012. Interface state effects in GaN Schottky diodes. *Thin Solid Films*, 522, 345–351.
- 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.
- Akhlaghia, E., Badalic, Y., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaraghe, Y., 2018. Preparation of mixed copper/PVA nanocomposites as an interface layer for fabrication of Al/Cu-PVA/p-Si Schottky structures. *Physica B: Condensed Matter*, 546, 93–98.
- 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.
- Aksoy, Ö., Uzun, İ., Topal, G., Ocak, Y.S., Çelik, Ö., Batibay, D., 2019. Schottky Diodes Based on the New Chitin Derivatives. *Polymer Science, Series A*, 61, (3),242–252.
- Asif Iqbal, A.K.M., Sakib, N., Parvez Iqbal, A.K.M., Nuruzzaman, D.M., 2020. Graphene-based nanocomposites and their fabrication, mechanical properties and applications. *Materialia*,12, 100815.
- Aslan, F., Güllü, Ö., Ocak, Y.S., Rüzgar, Ş., Tombak, A., Özaydın, Ö., Pakma, O., Arsel, İ., 2015. Organik Arayüzey Tabakalı Al/CuPc /p-InP Kontakların Fabrikasyonu ve Elektriksel Parametrelerinin İncelenmesi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*,5:2,263-275.
- Asubay, S., 2008. Metal/p-InP/Metal Schottky Kontakların Akımkapasite-Gerilim Karakteristiklerinin Metal İş Fonksiyonuna Bağımlılığının İncelenmesi. *Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır*.
- 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., Güllü, Ö., and Türüt, A., 2009. Fabrication and electrical characterization of a silicon Schottky device based on organic material. *Physica Scripta*, 79, 035802.
- 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., 2011. Katıhal Fiziği. Nobel yayın dağıtım, 615, Türkiye.

- Aydoğan, Ş., Grilli, M.L., Yılmaz, M., Çaldıran, Z., Kaçuş, H., 2017. A facile growth of spray based ZnO films and device performance investigation for Schottky diodes: Determination of interface state density distribution. *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 55-66.
- Azmi, S.N.C., Abd Rahman, S.F., Nawabjan, A., Hashim, A.M., 2018. Junction properties analysis of silicon back-to-back Schottky diode with reduced graphene oxide Schottky electrodes *Microelectronic Engineering*, 196, 32–37.
- Balaram, N., Reddy, V.R., Sekhar Reddy, P.R., Janardhanam, V., Choi, C., 2018. Microstructural, chemical states and electrical properties of Au/CuO/n-InP heterojunction with a cupric oxide interlayer. *Vacuum*, 152, 15-24.
- Balasubramanyan, S., Arayathody, S., Sugunan, S., Narayanan, B.N., 2018. Selective liquid phase oxidation of cyclohexene over magnetic Fe₃O₄/graphene oxide nanocomposite. *Materials Chemistry and Physics*, 211, 23-33.
- Baltakesmez, A., Taser, A., Kudas, Z., Guzeldir, B., Ekinici, D., Saglam, M., 2019. Barrier Height Modification of n-InP Using a Silver Nanoparticles Loaded Graphene Oxide as an Interlayer in a Wide Temperature Range, *Journal of Electronic Materials*, 48, 3169-3182.
- Bach, H., Krause, D., 1997. *Thin Films on Glass*, Springer, Heidelberg.
- Bartolomeo, A., 2016. Graphene Schottky diodes: An experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction. *Physics Reports*, 606, 1–58.
- Bati, B., 2016. The Electrical Properties of Al/Methylene-Blue/n-Si/Au Schottky Diodes. *Journal of Modern Physics*, 7, 1-6.
- Bedeloğlu, A., Taş, M., 2016. Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 544-554.
- Bethe, H. A., 1942. Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers. MIT, Radiat. Lab. Rep., 43, 12.
- Biber, M., 2003. Low-temperature current–voltage characteristics of MIS Cu/n-GaAs and inhomogeneous Cu/n-GaAs Schottky diodes. *Physica B*, 325, 138–148.
- Bolognesi, A., Di Carlo, A., Lugli, P., Kampen, T. and Zahn, D.R.T., 2003. Experimental investigation and simulation of hybrid organic/inorganic Schottky diodes. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 15, 2719–2728.
- Boy, F., 2013. Organik Arayüzeyli GaAs Schottky Diyodların Elektriksel Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Braun, F., 1874. On the current conduction through metal sulphides. (in German) *Ann. Physics Chemistry*, 153, 556.
- Buğur, E., 2010. Sıkar Metoduyla Elde Edilen Cd/Cds/N-GaAs/In Yapının Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bülbül, M.M., Zeyrek, S., Altındal, S., Yüzer, H., 2006. On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 83, 577–581.
- Büyüksırt, T., Kuleaşan, H., 2014. Fourier Dönüştürümlü Kızılötesi (Ftir) Spektroskopisi ve Gıda Analizlerinde Kullanımı. *DergiPark, Gıda*, 39, 235-241.

- Can, M.M., Coşkun, M., Fırat, T., 2012. A comparative study of nanosized iron oxide particles; magnetite (Fe₃O₄), maghemite (c-Fe₂O₃) and hematite (a-Fe₂O₃), using ferromagnetic resonance. *Journal of Alloys and Compounds*, 542, 241-247.
- Card, H. C. and Rhoderick, E. H., 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Scottky diodes, *Journal of Physics D.4* (10), 1589–1601.
- Chaudhary, V., Kumar, N., Kumar Singh, A., 2019. Solubility dependent trap density in poly (3-hexylthiophene) organic Schottky diodes at room temperature. *Synthetic Metals*, 250, 88–93.
- 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.
- Chung, S.F., Wen, T.C., Gopalan, A., 2005. Influence of dopant size on the junction properties of polyaniline. *Materials Science and Engineering: B*, 116, 125-130.
- Cola, A., Vasanelli, L., Muret P., 1995. A method for the determination of barrier heights from the capacitance-voltage characteristics of a Schottky junction containing bulk deep traps. *Solid-State Electronics*, 38, 989-995.
- 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.
- Coşkun, E., Güllü, H.H., Candan, İ., Bayraklı, Ö., Parlak, M., Erçelebi, Ç., 2015. Device behavior of an In/p-Ag (Ga, In) Te₂/n-Si/Ag heterojunction diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 34, 138-145.
- Crowell, A.M. and Sze S. M., 1966. Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers. *Solide State Electron.*, 9, 1035-1042.
- Crowell, C R. and Sze, S. M., 1966. Quantum-Mechanical Reflection of Electrons at Metal-Semiconductor Barriers: Electron Transport in Semiconductor-Metal Semiconductor Structures. *J. Appl. Phys.*, 37, 2685.
- Czapla, A., Kusior, E., Bucko, M., 1989. Optical properties of non-stoichiometric tin oxide films obtained by reactive sputtering. *Thin Solid Films*, 182, 15.
- Chand, S. and Kumar, J., 1996. Current transport in Pd₂Si/n-Si(100) Schottky barrier diodes at low temperatures. *Applied Physics A*, 63, 171-178.
- Çakar, M., Yıldırım, N., Karataş, Ş., Temirci, C., Türüt, A., 2006. Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Sn/rhodamine-101/n-Si and Sn/rhodamine-101/p-Si Schottky barrier diodes. *Journal Of Applied Physics*, 100, 074505.
- Çakıcı, T., Güzeldir, B., Sağlam, M., 2015. Temperature dependent of electrical characteristics of Au/n-GaAs/In Schottky diode with In₂S₃ interfacial layer obtained by using spray pyrolysis method. *Journal of Alloys and Compounds*, 646, 954-965.
- Çaldıran, Z., 2013. Au/Antrakınon/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., Aydoğan, Ş., Yesildağ, A., Ekinci, D., 2013. The barrier height enhancement of the Au/n-Si/Al Schottky barrier diode by electrochemically formed an organic Anthracene layer on n-Si. *Superlattices and Microstructures*, 56, 45–54.

- 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.
- Çaldıran, Z., Şinoforoğlu, M., Metin, Ö., Aydoğan, Ş., Meral, K., 2015. Space charge limited current mechanism (SCLC) in the graphene oxide-Fe₃O₄ nanocomposites/n-Si heterojunctions. *Journal of Alloys and Compounds*, 631, 261-265.
- Çaldıran, Z., 2019. Pentacene/n-Si Heteroeklem Aygıtlarının Yapımı ve Karakterizasyonu. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 581-592.
- Çankaya, G. and Uçar, N., 2004. Barrier Height Dependence on the Metal Work Function for p-type Si Schottky Diodes. *Z. Naturforsch.* 59a, 795-798.
- Çetinkaya, H.G., Tecimer, H., Uslu, H. Altındal, Ş., 2013. Photovoltaic characteristics of Au/PVA (Bi-doped) /n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) at various temperatures. *Current Applied Physics*, 13, 6, 1150-1156.
- Dehghan, S., Jafari, A.J., FarzadKia, M., Esrafil, A., Kalantary, R.R., 2019. Visible-light-driven photocatalytic degradation of Metalaxyl by reduced graphene oxide/Fe₃O₄/ZnO ternary nanohybrid: Influential factors, mechanism and toxicity bioassay. *Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry*, 375, 280-292.
- Demircioğlu, Ö., Karataş, S., Yıldırım, N., Bakkaloğlu, Ö.F. 2011. Effects of temperature on series resistance determination of electrodeposited Cr/n-Si/Au-Sb Schottky structures. *Microelectronic Engineering*, 88, 2997-3002.
- 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*, 44A, 3809-3814.
- Deniz, A.R., 2015. Au/Fe₃O₄/p-Si/Al ve Au/Fe₃O₄/n-Si /Al Heteroyapıların Elektriksel Özelliklerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak İncelenmesi. *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Erzurum.*
- Deniz, A.R., Çaldıran, Z., Metin, Ö., Meral, K., Aydoğan, Ş., 2016. The investigation of the electrical properties of Fe₃O₄/n-Si heterojunctions in a wide temperature range. *Journal of Colloid and Interface Science*, 473, 172-181.
- Deniz, A.R., Çaldıran, Z., Biber, M., İncekara, U., Aydoğan, Ş., 2018. Investigation of electrical properties of Ni/Crystal Violet (C₂₅H₃₀ClN₃) /n-Si/Al diode as a function of temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 763, 622-628.
- Doğan, H., 2006. Isıl Olarak Tavlanmış Ni/n-GaAs/In Schottky Diyotların Karakteristiklerinin Engel İnhomojenlik Modeline Göre Belirlenmesi. *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Erzurum.*
- 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.
- 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., Tunç, T., Uslu, İ., 2010. Temperature dependent electrical and dielectric properties of Au/polyvinylalcohol (Ni,Zn-doped)/n-Si Schottky diodes. *Microelectronics Reliability*, 50, 39-44.

- 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.
- Farag, A.A.M., Yahia, I.S., (2011). Rectification and barrier height inhomogeneous in Rhodamine B based organic Schottky diode. *Synthetic Metals*, 161, 32-39.
- Fritah, A., Saadoune, A., Dehimi, L. and Abay, B., 2016. Investigation on the non-ideal behaviour of Au/n-InP Schottky diodes by the simulation of I - V - T and C - V - T characteristics. *Philosophical Magazine-Part A: Materials Science*, 96-19.
- Gora, V.E., Chawanda, A., Nyamhere, C., Auret, F.D., Mazunga, F., Jaure, T., Chibaya, B., Omotoso, E., Danga, H.T., Tunhuma, S.M., 2018. Comparison of nickel, cobalt, palladium, and tungsten Schottky contacts on n-4H-silicon carbide. *Physica B: Condensed Matter*, 535, 333-337.
- Göksu, T., 2013. Schottky Metal Kalınlığına Bağlı Olarak Hazırlanan Ti/N-GaAs Schottky Kontakların Sıcaklık Bağımlı Karakteristiklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Güllü, Ö. and Türüt, A., 2009. Electrical analysis of organic interlayer based metal/ interlayer/ semiconductor diode structures. *Journal of Applied Physics*, 106, 103717.
- Güllü, Ö., Asubay, S., Aydoğan, Ş., Turut, A., 2010. Electrical characterization of the Al/new fuchsin/n-Si organic-modified device. *Physica E*, 42, 1411-1416.
- Güllü, Ö., 2018. Al/Nigrosin/p-Si Yapıların Fabrikasyonu ve Temel Diyot Parametrelerinin Hesaplanması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9:2, 689-700.
- Güllü, H.H., Sürücü, Ö. B., Terlemezoğlu, M., Yıldız, D.E., Parlak, M., 2019. Investigation of electrical characteristics of Ag/ZnO/Si sandwich structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 15371–15378.
- Güllü, H. H., 2019. Investigation of electrical properties of In/ZnIn₂Te₄/n-Si/Ag diode. *Bull. Mater. Sci.*, 42:89.
- Güllü, H.H. and Yıldız, D.E., 2019. Analysis of forward and reverse biased current–voltage characteristics of Al/Al₂O₃/n-Si Schottky diode with atomic layer deposited Al₂O₃ thin film interlayer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 19383–19393.
- Gülnahar, M., Karacali, T., Efeoglu, H., 2019. Characterization of electrical transport and properties of an Al/porous Si (PS)/p-Si/Al heterojunction. *Journal of Alloys and Compounds* 797, 859-864.
- Gümüş, İ., Metin, Ö., Sevim, M., Aydoğan, Ş., 2020. Analysis on the temperature dependent electrical properties of Cr/Graphene oxide- Fe₃O₄ nanocomposites/ n-Si heterojunction device. *Diamond & Related Materials*, 108, 107933.
- Gümüş, İ. and Aydoğan, Ş., 2020. On the studies of capacitance–voltage and impedance spectroscopy of an Ni/ (GO-Fe₃O₄) / n-Si heterojunction device over a wide temperature range. *Semiconductor Science and Technology*, 35, 105012.
- Gümüş, İ. and Aydoğan, Ş., 2021. The electrical and dielectric properties of the magnetite nanoparticles supported graphene-oxide/n-Si MOS type device that operates across a wide temperature range. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112989.
- Gümüş, İ. and Aydoğan, Ş., 2021. Thermal sensing capability of metal/composite-semiconductor framework device with the low barrier double Gaussian over wide temperature range. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 332, 113117.

- Güney, T.E., 2017. Fe₃O₄/Grafen Oksit Nanokompoziti ile Metilen Mavisinin Fotokatalitik Giderimi.Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Güzel, T.,2015. 6H-SiC Tabanlı Schottky Diyotların Hazırlanması ve Geniş Sıcaklık Aralığında Elektriksel Parametrelerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Güzel, T., Bilgili, A.K., Özer, M., 2018.Investigation of inhomogeneous barrier height for Au/n-type 6HSiC Schottky diodes in a wide temperature range. Superlattices and Microstructures,124, 30–40.
- Güzeldir, B., Sağlam, M., Ateş, A., 2010. Analysis of the electrical characteristics of Zn/ZnSe/n-Si/Au–Sb structure fabricated using SILAR method as a function of temperature. Journal of Alloys and Compounds, 506, 388-394.
- Haldorai, Y., Kim, B.-K., Jo, Y.-L. and Shim, J.-J., 2014. Ag@graphene oxide nanocomposite as an efficient visible-light plasmonic photocatalyst for the degradation of organic pollutants: A facile green synthetic approach. Materials Chemistry and Physics, 143 (3), 1452-1461.
- 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.
- Hardikar, S., Hudait, M. K., Modak, P., Krupanidhi, S. B., and Padha, N., 1999. Anomalous current transport in Au/low-doped n-GaAs Schottky barrier diodes at low temperatures. Applied Physics A Mat. Sci. & Proc., 68, 49-55.
- Hu, J., Dong, Y., Chen, X., Zhang, H., Zheng, J., Wang, Q., Chen, X., 2014. A highly efficient catalyst: In situ growth of Au nanoparticles on graphene oxide– Fe₃O₄ nanocomposite support. Chemical Engineering Journal, 236, 1–8.
- Hummers, W. and Offeman, R.E.J., 1958. Preparation of graphitic oxide. Am. Chem. Soc., 80, 1339.
- Islam, R., Shine, G., Saraswat, K. C., 2014. Schottky barrier height reduction for holes by Fermi level depinning using metal/nickel oxide/silicon contacts. Applied Physics Letters 105, 18, 10.1063/1.4901193.
- Janardhanam, V., Kumar, A.S., Reddy, V.R., Reddy, P.N., 2009. Study of current-voltage-temperature (I-V-T) and capacitance-voltage-temperature (C-V-T) characteristics of molybdenum Schottky contacts on n-InP (100). Journal of Alloys and Compounds, 485, 467-472.
- Jedrzejczak, M., 2017. Cytotoxicity and genotoxicity of GO-Fe₃O₄ hybrid in cultured mammalian Cells. Polish Journal of Chemical Technology, 19(1), 27-33.
- Jyothi, I., Seo, M., Janardhanam, V., Shim, K., Lee, Y., Ahn, K., Choi, C.,2013. Temperature-dependent current–voltage characteristics of Er-silicide Schottky contacts to strained Si-on-insulator. Journal of Alloys and Compounds,556 ,252–258.
- Kaçuş, H., Deniz, A.R., Çaldıran, Z., Aydoğan, Ş., Yeşildağ, A., Ekinci, 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.
- Kamakshi, T., Sunita Sundari, G., Erothu, H., Rao, T. P., 2018. Synthesis And Characterization Of Graphene Based Iron Oxide (Fe₃O₄) Nanocomposites. Rasayan J. Chem., 11:3,1113 – 1119.

- Kaplan, H.K., Akay, S.K., 2019. ZnSe/Si Heteroeklem Yapının Fotoelektrik Özelliklerinin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 24, Sayı 1, 265-275.
- Karabulut, A., Orak, İ., Canlı, S., Yıldırım, N., Turut, A., 2018. Temperature-dependent electrical characteristics of Alq3/p-Si heterojunction. Physica B: Condensed Matter, 550, 68-74.
- Karataş, Ş., Altındal, Ş., Turut, A., Özmen, A., 2003. Temperature dependence of characteristic parameters of the H-terminated Sn/p-Si(1 0 0) Schottky contacts. Applied Surface Science, 217, 250-260.
- 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., Yıldırım, N., Turut, A., 2013. Electrical properties and interface state energy distributions of Cr/n-Si Schottky barrier diode. Superlattices and Microstructures, 64, 483-494.
- Karimova, Kh. S., Ahmed, M.M., Moiz, S.A., Fedorov, M.I., 2005. Temperature-dependent properties of organic-on-inorganic Ag/p-CuPc/n-GaAs/Ag photoelectric cell. Solar Energy Materials & Solar Cells, 87, 61-75.
- Kaya, İ., 2010. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotların Elektriksel Karakteristiklerin Frekans ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Khairir, N.S., Hussin, M.R.M., Khairir, M.İ., Uz-Zaman, A.S.M.M., Abdullah, W.F.H., Mamat, M.H., Zoolfakar, A.S., 2017. Schottky behavior of reduced graphene oxide at various operating temperatures. Surfaces and Interfaces, 6, 229-236.
- Kırma, F., 2017. Metronidazol ve Kloramfenikol Antibiyotiklerinin Fe²⁺ Tuzu, Grafen Oksit-Magnetit (Fe₃O₄), Grafen Oksit-Amorf FePO₄ Katalizörleri Kullanılarak Elektro-Fenton Yöntemi ile Oksidasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Koçyiğit, A., Orak, İ., Ş. Aydoğan, Ş., Çaldıran, Z., Türüt, A., 2017. Temperature-dependent C-V characteristics of Au/ZnO/n-Si device obtained by atomic layer deposition technique. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 28, 5880-5886.
- Koçyiğit, A., Orak, I., Çaldıran, Z., Türüt, A., 2017. Current-voltage characteristics of Au/ZnO/n-Si device in a wide range temperature. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 28, 17177-17184.
- Kumar, R., Chand, S., 2016. Fabrication and electrical characterization of nickel/p-Si Schottky diode at low temperature. Solid State Sciences, 58, 115-12.
- Kumar, A., Sharma, K.K., Chand, S., Kumar, A., 2018. Investigation of barrier inhomogeneities in I-V and C-V characteristics of Ni/n-TiO₂/p-Si/Al heterostructure in wide temperature range. Superlattices and Microstructures, 122, 304-315.
- Kumar, A., Kumar, A., Sharma, K.K., Chand, S., 2019. Analysis of anomalous transport mechanism across the interface of Ag/p-Si Schottky diode in wide temperature range. Superlattices and Microstructures, 128, 373-381.
- Korucu, D., Altındal, Ş., Mammadov, T.S., Özçelik, S., 2009. On the temperature dependent anomalous peak and negative capacitance in Au/n-InP Schottky barrier diodes. Optoelectronics and Advanced Materials- Rapid Communications, 3-1, 56-59.

- 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., Duman, S., Turut, A., 2015. The origin of forward bias capacitance peak and voltage dependent behaviour of gold/p-type indium phosphide Schottky barrier diode fabricated by photolithography. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 30, 393-399.
- Li, W., Wang, X., Li, M., He, S.A., Ma, Q. and Wang, X., 2020. Construction of Z-scheme and p-n heterostructure: three-dimensional porous g-C₃N₄/graphene oxide-Ag/AgBr composite for high-efficient hydrogen evolution. *Applied Catalysis B: Environmental*, 268, 118384.
- Mahato, S., Puigdollers, J., 2018. Temperature dependent current-voltage characteristics of Au/n-Si Schottky barrier diodes and the effect of transition metal oxides as an interface layer. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 530, 327–335.
- Mayimele, M., A., Janse van Rensburg, J., P., Auret, F., D., Diale, M., 2016. Analysis of temperature-dependant current-voltage characteristics and extraction of series resistance in Pd/ZnO Schottky barrier diodes. *Physica B*, 480, 58–62.
- Meral, K., Metin, Ö., 2014. Graphene oxide-magnetite nanocomposite as an efficient and magnetically separable adsorbent for methylene blue removal from aqueous solution. *Turkish Journal of Chemistry*, 38, 775 – 782.
- Mergen, Ö.B., 2021. CS/PVA/GO Hibrit Kompozitlerin Hazırlanması ve Optik Bant Boşluğu Enerjilerinin Belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21, 46-55.
- 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.
- 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.
- Naik, S.S., Reddy, V.R., 2010. Analysis of current_voltage_temperature (*I-V-T*) and capacitance_voltage_temperature (*C-V-T*) characteristics of Ni/Au Schottky contacts on n-type InP. *Superlattices and Microstructures*, 48, 330-342.
- Neamen, D. A., 1992. *Semiconductors Physics and Devices*, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.
- Neolaka, Y.A.B., Lawa, Y., Naat, J. N., Riwu, A.A.P., Iqbal, M., Darmokoesoemo, H., Kusuma, H.S., 2020. The adsorption of Cr (VI) from water samples using graphene oxide-magnetic (GO-Fe₃O₄) synthesized from natural cellulose-based graphite (kusambi wood or Schleicheria oleosa): Study of kinetics, isotherms and thermodynamics. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6544–6556.
- Norde, H., 1979. A modified forward *I-V* plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 7(50), 5052.
- Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V., Firsov, A. A., 2004. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306: 666–669.

- Olad, A., Hagh, H.B.K., 2019. Graphene oxide and amin-modified graphene oxide incorporated chitosan-gelatin scaffolds as promising materials for tissue engineering. *Composites Part B*, 162, 692-702.
- Onganer, Y., Sağlam, M., Türüt, A., Efeoglu, H., Tüzemen, S., 1996. High barrier metallic polymer/p-type silicon Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 39, 677-680.
- Orak, İ., Türüt, A., Toprak, M., 2015. The comparison of electrical characterizations and photovoltaic performance of Al/p-Si and Al/azure c/p-Si junctions devices. *Synthetic Metals*, 200, 66-73.
- Osvold, J., Horvath, Zs.J., 2004. Theoretical study of the temperature dependence of electrical characteristics of Schottky diodes with an inverse near-surface layer. *Applied Surface Science*, 234, 349-354.
- Ouyang, K., Zhub, C., Zhao, Y., Wang, L., Xie, S., Wang, Q. 2015. Adsorption mechanism of magnetically separable Fe₃O₄/grapheneoxide hybrids. *Applied Surface Science*, 355, 562–569.
- Özaydın, C., 2018. Düşük Sıcaklıklarda Au/Organometalik Kompleks/n-Si MIS Yapısının Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18, 1190-1202.
- Özdemir, A.F., Türüt, A., Kökçe, A., 2006. The double Gaussian distribution of barrier heights in Au/n-GaAs Schottky diodes from $I-V-T$ characteristics. *Semicond. Sci. Technol.*, 21, 298–302.
- Özel, F., 2015. Süperparamanyetik Demir Oksit Nanoparçacıklar: Sentezi, Yüzey Modifikasyonu, Yapısal ve Manyetik Karakterizasyonu İle Toksik Etkinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Özer, M., Yıldız, D.E., Altındal, Ş., Bülbül, M.M., 2007. Temperature dependence of characteristic parameters of the Au/SnO₂/n-Si (MIS) Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 51, 941-949.
- Özkartal, A., Hamad Ameen, R. H., Temirci, C., Türüt, A., 2019. Electrical properties of Sn/Methyl Violet/p-Si/Al Schottky diodes. *Materials Today: Proceedings*, 18, 1811-1818.
- Padovani, F. A., Sumner, G. G., 1965. Experimental Study of Gold-Gallium Arsenide Schottky Barriers. *J. Appl. Phys.*, 36, 3744.
- Pakma, O., Çavdar, Ş., Koralay, H., Tuğluoğlu, N., Yüksel, Ö.F., 2017. Improvement of diode parameters in Al/n-Si Schottky diodes with Coronene interlayer using variation of the illumination intensity. *Physica B*, 527, 1–6.
- Pathak, C. S., Garg, M., Singh, J. P., Singh, R., 2018. Current Transport Properties of Monolayer Graphene/n-Si Schottky Diodes. *Semicond. Sci. Technol.*, 33, 055006.
- Quan, D.T., Hbib, H., 1993. High barrier height Au/n-type InP Schottky contacts with PO_xN_yH_z interfacial layer. *Solid-state Electron.*, 36, 339-344.
- Rajan, L., Periasamy, C., Sahula, V., 2016. Electrical characterization of Au/ZnO thin film Schottky diode on silicon substrate. *Perspectives in Science*, 8, 66-68.
- Rao, L.D., Latha, K.S., Reddy, V.R., Janardhanam, V., Kang, Choi, C-J., 2015. Effect of thermal annealing on the electrical and structural properties of Au/Y/p-type InP Schottky structure. *Vacuum*, 119, 276-283.

- Rastgar, M., Shakeri, A., Bozorg, A., Salehi, H., Saadattalab, V., 2018. Highly-efficient forward osmosis membrane tailored by magnetically responsive graphene oxide/Fe₃O₄ nanohybrid. *Applied Surface Science*, 441, 923–935.
- Rawal, N., Solanki, S., Shah, D., 2020. Green Synthesis of Reduced Graphene Oxide with *in situ* Decoration of Metal Nanoparticles for Charge Storage Application. *Materials Today: Proceedings*, 21, 2066–2071.
- Raynaud, C., Isoird, K., Lazar, M., Johnson, C. M. and Wright, N., 2002. Barrier height determination of SiC Schottky diodes by capacitance and current–voltage measurements. *Journal Applied Physics*, 91, 9841.
- Reddy, V.R., Reddy, M.S.P., Kumar, A.A., Choi, C., 2012. Effect of annealing temperature on electrical properties of Au/polyvinyl alcohol/n-InP Schottky barrier structure. *Thin Solid Films*, 520-17, 5715-5721.
- 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, P.R.S., Janardhanam, V., Shim, K., Reddy, V. Rajagopal, Lee, S., Park, S., Choi, C., 2020. Temperature-dependent Schottky barrier parameters of Ni/Au on n-type (001) β -Ga₂O₃ Schottky barrier diode. *Vacuum*, 171, 109012.
- Rhoderick, E. H., 1982. Metal-Semiconductor Contacts. *IEE Proceedings-I Solid-State and Electron Devices*, 129(1), 1 – 14.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*. 2nd ed., Oxford University Press, Clarendon, Oxford. 1-257.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., 1988. *Metal Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press, 257–264.
- Rideout, V.L., 1978. A Review of Theory, Technology and Applications of Metal Semiconductor Rectifiers. *Thin Solid Films*, 48, 261-19.
- Saadaouil, S., Salem, M.M.B., Fathallah, O., Gassoumi, M., Gaquière, C., Maaref, H., 2014. Investigation of barrier inhomogeneity induced by a non-uniform distribution and traps in (Ni-Au)/Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN/SiC heterostructures with various Schottky contact areas. *International Journal of Materials Engineering and Technology*, 12, 75-102.
- Sağlam M. ve Ateş A., 2012. Yarıiletken Fiziği. *Aktif Yayınları*.
- Sah, C., Noyce, R. N., Shockley, W., 1957. Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics. *Proceedings of the IRE*, 45, 1228-1243.
- Sarıer, N., 2018. Grafenin öyküsü. Herkese bilim ve teknoloji, İstanbul Kültür Üniversitesi, <https://www.herkesebilimteknoloji.com/haberler/teknoyasam/grafenin-oykusu> (21.08.2021).
- Schwertmann, U. and Cornell, R.M., 1991. Iron oxides in the laboratory: preparation and characterization. VCH, Weinheim, Cambridge.
- Schottky, W., 1938. The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers, *Z. Phys.* 113, 367-414.
- Schottky, W., 1938 “Halbleitertheorie der Sperrschicht,” *Naturwissenschaften*, 26, 843.

- Sharma, B.L., and Purohit, R.K., 1974. Semiconductors Heterojunctions. Pergamon Press, 5, 1-36.
- Sharma, B.L. 1984. "Metal Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications", Plenum Press, New York and London.
- Sharma, N., Sharma, V., Jain, Y., Kumari, M., Gupta, R., Sharma, S.K., Sachdev, K., 2017. Synthesis and characterization of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (rGO) for gas sensing application. Macromol. Symp., 376, 1700006.
- Shockley, W., Read, W. T., 1950. Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons. Phys. Rev., 87, 835.
- Singh, A., 1985. Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. Solid-State Electronics, 28, 3, 223-232.
- Slassi, A., Sorokin, P.B., Pershin, A., 2020. Ohmic/Schottky barrier engineering in metal/SnP₃ heterostructures. Journal of Alloys and Compounds, 831, 154800.
- Smith, B. L., Rhoderick, E. H., 1971. Schottky barriers on p-type silicon. Solid-State Electronics, 14, 71-75.
- Soylu, M., Al-Ghamdi, A.A., Al-Hartomy, O. A., El-Tantawy, F., Yakuphanoglu, F., 2014. The electrical characterization of ZnO/GaAs heterojunction diode. Physica E, 64, 240–245.
- Stamatakis, M., Tsamakis, D., Xanthakis, J.P., Ali, H.A., Esmaili-Sardari, S., Iliadis, A.A., 2013. Electrical characterization of Cr Schottky contacts on undoped and Ni-doped p-ZnO films grown by pulsed laser deposition on Si (100) substrates. Microelectronic Engineering, 104, 95-99.
- Sönmezoğlu, S., 2011. Current Transport Mechanism of n-TiO₂/p-ZnO Heterojunction Diode. Appl. Phys. Express, 4, 104104.
- 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.
- Şenol, A.M., 2018. Gümüş/Grafen Oksit Nanokompozitlerinin Sentezi ve Pyronin Y Bileşiği İle Etkileşimi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Tataroğlu, A. and Altındal, Ş., 2009. The analysis of the series resistance and interface states of MIS Schottky diodes at high temperatures using *I-V* characteristics. Journal of Alloys and Compounds, 484, 405–409.
- Taşer, A., 2012. SILAR metoduyla elde edilen Cd/CdSe/n-GaAs/In yapının karakteristiklerinin numune sıcaklığına bağlı olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Taşer, A., Güzelidir, B., Sağlam, M., 2017. The stability of electrical characteristics of Ti/n-Si/Ag, Ti/n-Si/Cu and Ti/n-Si/AgCu diodes prepared under the same conditions with respect to increasing aging time. Materials Science in Semiconductor Processing, 68, 186-192.
- Taşyürek, L.B., 2020. SrTiO₃ Nanoküplerin Sentezi, Yapısal Karakterizasyonu Ve Heteroeklem Uygulamaları. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Tekeli, Z., Altındal, Ş., Çakmak, M., Özçelik, S., 2007. The behavior of the *I-V-T* characteristics of inhomogeneous (Ni/Au)-Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN/GaN heterostructures at high temperatures. Journal of Applied Physics, 102, 54510.

- Temirci, C., 2000. Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p-Si Schottky Diyotların Fabrikasyonu. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Türüt, A., Yalçın, N., Sağlam, M., 1992. Parameter extraction from non-ideal C-V characteristics of a Schottky diode with and without interfacial layer. *Solid State Electronics*, 35, 835-841.
- 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.
- Türüt, A., 2012. Determination of barrier height temperature coefficient by Norde's method in ideal Co/n-GaAs Schottky contacts. *Turk. J. Phys.*, 36 ,235-244.
- Tung, R.T., 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces. *General Theory Physical Review B*, 45, 13509.
- Turgut, G., Keskenler, E.F., Aydın, S., Doğan, S., Duman, S., Sönmez, E., Esen, B., Düzgün, B., 2013. A study on characterization of Al/ZnS/p-Si/Al heterojunction diode synthesized by sol-gel technique. *Materials Letters*, 102-103, 106-108.
- Velasco-Soto, M.A., Perez-Garcia, S.A., Alvarez-Quintana, J., Cao, Y., Nyborg, L., Licea-Jimenez, L., 2015. Selective band gap manipulation of graphene oxide by its reduction with mild reagents. *Carbon*, 93, 967-973.
- Waldron, R. D., 1955. Infrared Spectra of Ferrites. *Physical Review* ,99, 1727-1735.
- Wang, J.Z., Zhong, C., Wexler, D., İdris, N.H., Wang, Z.X., Chen, L.Q., Liu, H.K., 2011. Graphene-encapsulated Fe₃O₄ nanoparticles with 3D laminated structure as superior anode in lithium ion batteries. *Chem. Eur. J.*, 17 ,661-667.
- Werner, J.H., and Güttler, H.H, 1991. Barrier inhomogeneties at Schottky contacts. *Journal Applied Physich*, 69(3), 1522-1532.
- Wilson, M. H. 1931. The Threory of Elektronik Semiconductors, *Proc R. Soc. Lond. Ser: A*, 133, 458.
- Wu, X. and Yang, E.S., 1989. Interface capacitance in metaiasemiconductor junctions. *Journal of Applied Physics*, 65, 3560.
- Xi, G., Xi, P., Liu, H., Chen, F., Huang, L., Shi, Y., Hou, F., Zeng, Z., Shao, C., Wang, J., 2012. A facile chemical method to produce süperparamagnetic graphene oxide-Fe₃O₄ hybrid composite and its application in the removal of dyes from aqueous solution. *J. Mater. Chem*, 22, 1033-1039.
- Yahia, I.S., Abd El-sadek, M.S., Yakuphanoglu, F., 2012. Methyl orange (C.I. acid orange 52) as a new organic semiconductor: Conduction mechanism and dielectrical relaxation. *Dyes and Pigments*, 93, 1434-1440.
- Yang, X., Zhang, X., Ma, Y., Huang, Y., Wang, Y., Chen, Y., 2009. Superparamagnetic graphene oxide-Fe₃O₄ nanoparticles hybrid for controlled targeted drug carriers, *J. Mater. Chem.*, 19, 2710-2714.
- Yang, X., Chen, C., Li, J., Zhao, G., Ren, X., Wang, X., 2012. Graphene Oxide-iron oxide and reduced graphene oxide-iron oxide hybrid materials for the removal of organic and inorganic pollutants. *Royal Society of Chemistry*, 2, 8821-8826.
- Yao, Y., Gangireddy, R., Kim, J., 2017. Electrical behavior of b-Ga₂O₃ Schottky diodes with different Schottky metals. *Journal of Vacuum Science & Technology B*,

- Yazıcı, S., 2015. Au/p-TlInS₂/n-InP Pseudo Schottky Yapıların Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yıldız, D.E., Altındal, Ş., 2008. On the temperature dependence of series resistance and interface states in Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes. Microelectronic Engineering, 85, 289–294.
- Yıldırım, N., 2009. Bakır Oksit/Titanyum Dioksit Heteroeklem Yapıların Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yıldırım, N. ve Durumlu, E., 2017. Ag/ Azure A /n-Si Schottky Diyodun elektriksel ve fotovoltajik özelliklerinin araştırılması. Bingöl Üniversitesi Türk Doğa ve Fen Dergisi, 6(1), 1-6.
- Yu, A.Y.C. and Snow, E.H., 1968. Surface Effects on Metal-Silicon Contacts. Journal of Applied Physics, 39, 3008.
- Zahn, D.R.T, Kampen, T. U., Mendez, H., 2003. Transport gap of organic semiconductors in organic modified Schottky contacts. Applied Surface Science, 212–213, 423–427.
- Zeng, T., Zhang, X., Ma, Y., Niu, H., Cai, Y., 2012. A novel Fe₃O₄-graphene-Au multifunctional nanocomposite: green synthesis and catalytic application, J. Mater. Chem., 22, 18658–18663.
- Zhang, F., Li, W., Ma, Y., Dai, X., 2018. Schottky barrier tuning of the graphene/SnS₂ van der Waals heterostructures through electric field. Solid State Communications, 271, 56-61.
- Zhu, S., Meirhaeghe, R.L.V., Detavernier, C., Cardon, F., Ru, G.-P., Qu, X.-P., Li, B.-Z., 2000. Barrier height inhomogeneities of epitaxial CoSi₂ Schottky contacts on n-Si (100) and (111). Solid-State Electronics, 44, 663-671.
- Ziel, A. and Kittel, C., 1959. Physics Today, 12(9), 62.
- Ziel, A., 1968. Solid-state physical electronics. Prentice-Hall, Inc., 7, 136-144.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	: İlknur Gümüş
Doğum tarihi	
Doğum Yeri	
Uyruğu	
Adres	
Tel	
E-mail	
Eğitim	
Lise	: Atatürk Lisesi
Tezsiz Yük.Lisans	: Atatürk Üniversitesi, Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi (2010)
Doktora	: Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Katıhal Fiziği Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce	: Orta
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Gümüş, İ., Metin, Ö., Sevim, M., Aydoğan, Ş., 2020. Analysis on the temperature dependent electrical properties of Cr/Graphene oxide-Fe₃O₄ nanocomposites/ n-Si heterojunction device. Diamond & Related Materials, 108, 107933., Doi: 10. 1016/j. diamond.2020.107933. 2. Gümüş, İ. and Aydoğan, Ş., 2020. On the studies of capacitance–voltage and impedance spectroscopy of an Ni/ (GO-Fe₃O₄) / n-Si heterojunction device over a wide temperature range. Semiconductor Science and Technology, 35, 105012., Doi:10.1088/1361-6641/aba419. 3. Gümüş, İ. and Aydoğan, Ş., 2021. The electrical and dielectric properties of the magnetite nanoparticles supported graphene-oxide/n-Si MOS type device that operates across a wide temperature range. Sensors and Actuators A: Physical, 331, 112989., Doi:10.1016/j. sna.2021. 112989.	