

**ARAYÜZEY TABAKASI OLARAK Au/n-InP
DOĞRULTUCU EKLEMLERE YERLEŞTİRİLEN
KOVALENT TÜREVLENDİRİLMİŞ İNDİRGENMİŞ
GRAFEN OKSİT İNCE TABAKALARIN ENGEL
PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
NUMUNE SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK
İNCELENMESİ**

Bilge SALTUKLU AĞ

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Ana Bilim dalı
Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM
2024**

(Her hakkı saklıdır.)

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

**ARAYÜZEY TABAKASI OLARAK Au/n-InP DOĞRULTUCU EKLEMLERE
YERLEŞTİRİLEN KOVALENT TÜREVLENDİRİLMİŞ İNDİRGENMİŞ GRAFEN
OKSİT İNCE TABAKALARIN ENGEL PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN NUMUNE SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ**

(Sample Temperature-Dependent Investigation of The Effects on Barrier Parameters of
Covalently Derivatized Reduced Graphene Oxide Thin Layers Placed As An Interfacial Layer
in Au/n-InP Rectifying Junctions)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilge SALTUKLU AĞ

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Erzurum
Ocak, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Bilge SALTUKLU AĞ tarafından hazırlanan "Aryüzey Tabakası Olarak Au/n-InP Doğrultucu Eklemlere Yerleştirilen Kovalent Türevlendirilmiş İndirgenmiş Grafen Oksit İnce Tabakaların Engel Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi" başlıklı çalışması **05/02/2024** tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Fizik Ana Bilim Dalı, Katıhal Fiziği Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Songül DUMAN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Betül GÜZELDİR <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun tarih
ve sayılı kararı.

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

Aslı ıslak imzalıdır

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

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.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM danışmanlığında sunulan "Arayüzey Tabakası Olarak Au/n-InP Doğrultucu Eklemlere Yerleştirilen Kovalent Türevlendirilmiş İndirgenmiş Grafen Oksit İnce Tabkaların Engel Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Numune Sıcaklığına 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	7	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Yöntem	17	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	3	20
Sonuç ve Öneriler	2	20
Tezin Geneli	6	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.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Bilge SALTUKLU AĞ	Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM
8.2.2024	8.2.2024
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* 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

Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Fen Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken Proses ve Karakterizasyon Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Tez konumun belirlenmeside dâhil olmak üzere tüm çalışma süreci boyunca bilgi ve deneyimini benden esirgemeyerek her an destek olan çok kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım ve tezimi yazma sürecinde her an destekçim olan, fikir ve deneyimleri ile tezime yol gösteren kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Betül GÜZELDİR'e çok teşekkür ederim.

Deneysel verileri elde etme sürecinde numune hazırlanması ve ölçümlerin alınmasında çalışmama büyük katkısı olan Sayın Prof. Dr. Duygu EKİNCİ'ye, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet TAŞER'e, Sayın Dr. Züleyha KUDAŞ'a, Sayın Öğr. Gör. Oğuzhan ÖZAKIN'a ve Sayın Öğr. Gör. Cengiz AYKAÇ'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresinde bana her zaman motivasyon sağlayan maddi ve manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim başta eşim olmak üzere babam, annem ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilge SALTUKLU AĞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ARAYÜZEY TABAKASI OLARAK Au/n-InP DOĞRULTUCU EKLEMLERE YERLEŞTİRİLEN KOVALENT TÜREVLENDİRİLMİŞ İNDİRGENMİŞ GRAFEN OKSİT İNCE TABAKALARIN ENGEL PARAMETRELERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN NUMUNE SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK İNCELENMESİ

Bilge SALTUKLU AĞ

Danışman: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Amaç: Grafen oksidi (GO) kimyasal olarak indirgeme yöntemi, büyük ölçekte grafen üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Grafen oksit, oksijenin kimyasal oksidasyon yoluyla grafene verildiği grafenin oksit formudur. Buna ilave olarak, termal veya kimyasal işlemlerle grafen oksit, büyük ölçekte indirgenmiş grafen oksite (RGO) dönüştürülmektedir ve bu nanokompozit malzemeler sensörler, diyotlar ve transistörler gibi yarıiletken devre elemanlarında birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu çalışmada, daha önce yapılanlardan farklı olarak, anilin ve metil gibi gruplarla kovalent türevlendirilmiş RGO nanokompozit malzemeler Au/n-InP eklemlerde arayüzey tabakası olarak kullanılmış ve sonuçlar numune sıcaklığına bağlı olarak rapor edilmiştir.

Yöntem: RGO ve anilin ve metil ile kovalent türevlendirilmiş RGO nanokompozit malzemeler solvotermal redüksiyon metodu yöntemiyle sentezlendikten sonra dakikada 1000 devir (rpm) ve 1 dakikalık biriktirme koşulları altında döndürerek kaplama yoluyla ince film olarak n-InP yarıiletkeninin yüzeyi üzerine kaplanmıştır. RGO, RGO/Aryl ve RGO/Aryl-CH₃ ürünlerinin kovalent fonksiyonallasyonu X-ışını kırınım (XRD) spektroskopisi, Raman spektroskopisi ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) yöntemleri ile incelendikten sonra, üretilen Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge yapıların engel parametreleri sıcaklığa bağlı olarak alınan akım-voltaj (*I-V*) ölçümlerinden Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung metotlarıyla belirlenerek, bu arayüzey tabakalarının engel parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bulgular: Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge yapıların *I-V* karakteristikleri iyi derecede doğrultma karakteri göstermiştir. Üç numune için de idealite faktörü (*n*) değerlerinin birden büyük olması, eklemlerin ideal olmadığını göstermiştir. Numune sıcaklığına bağlı olarak farklı metotlarla belirlenen *n* ve engel yüksekliği (Φ_b) değerlerinin sıcaklığa kuvvetle bağlı olduğu, artan *n* değerlerine karşılık Φ_b değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Farklı metotlarla hesaplanan seri direnç (R_s) ve arayüzey hal yoğunluğu (N_{ss}) değerlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Sonuç: Solvotermal redüksiyon yöntemiyle sentezlenen RGO ve kovalent türevlendirilmiş RGO nanokompozit malzemelerin arayüzey tabakası olarak kullanıldığı Au/n-InP eklemlerin engel parametrelerinin numune sıcaklığına bağlı olarak göstermiş oldukları kararlı değişimler, bu malzemelerin alternatif devre elemanı üretiminde kullanılabilecekleri potansiyelini ortaya çıkarmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, RGO, Kovalent türevlendirilmiş RGO, Engel parametreleri, Elektriksel karakteristikler

Ocak 2024, 125 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

SAMPLE TEMPERATURE-DEPENDENT INVESTIGATION OF THE EFFECTS ON BARRIER PARAMETERS OF COVALENTLY DERIVATIZED REDUCED GRAPHENE OXIDE THIN LAYERS PLACED AS AN INTERFACIAL LAYER IN Au/n-InP RECTIFYING JUNCTIONS

Bilge SALTUKLU AĞ

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa SAĞLAM

Objective: Chemical reduction of graphene oxide (GO) is widely used to produce graphene on a large scale. Graphene oxide is the oxide form of graphene in which oxygen is introduced into graphene by chemical oxidation. In addition, graphene oxide is converted to reduced graphene oxide (RGO) on a large scale by thermal or chemical processes. These nanocomposite materials are used in many semiconductor devices such as sensors, diodes and transistors. In this study, unlike the previous ones, RGO nanocomposite materials covalently derivatized with groups such as aniline and methyl are used as interfacial layers in Au/n-InP junctions and the results are reported as a function of temperature.

Method: RGO and RGO nanocomposite materials covalently derivatized with aniline and methyl were synthesized by solvothermal reduction method. Subsequently, the obtained solution was grown as thin films by spin coating on n-InP substrate at 1000 rpm/min rotation speed for 1 min. The covalent functionalization of RGO, RGO/Aryl and RGO/Aryl-CH₃ samples was investigated by X-ray diffraction (XRD) spectroscopy, Raman spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The barrier parameters of the fabricated Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge and Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge devices were determined by Rhoderick, Cibils, Norde and Cheung approaches by considering the temperature dependent current-voltage (*I-V*) measurements. Thus, the effects of these interfacial layers on the barrier parameters were investigated as a function of temperature.

Findings: The *I-V* characteristics of Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge and Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge devices showed good rectification characteristics. The ideality factor (*n*) values for all three samples were greater than one, indicating that the devices were not ideal. It was observed that the *n* and barrier height (Φ_b) values determined by different methods depending on the sample temperature are strongly dependent on the temperature, and the Φ_b values decrease with increasing *n* values. Series resistance (R_s) and interfacial density of states (N_{ss}) values calculated by different methods were found to be compatible with each other.

Results: The stable temperature-dependent variation of the barrier parameters of Au/n-InP junctions in which RGO and covalently derivatized RGO nanocomposite materials synthesised by solvothermal reduction are used as the interfacial layer reveals the potential of these materials for the production of alternative devices.

Keywords: Schottky diode, RGO, Covalently derivatised RGO, Barrier parameters, Electrical characteristics

January 2024, 125 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
ŞEKİLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	15
Yarıiletken Materyallerin Elektriksel Özellikleri.....	15
Atomik bağlar.....	15
Akım taşıyıcılar	19
Yarıiletkenlerde akım taşıyıcıların iki tipi	19
n-tipi ve p-tipi katkılama	22
Katkılama teknikleri.....	24
Difüzyon.....	25
İyon Ekme (İmplantasyon).....	26
Metal-Yarıiletken Eklemler	28
Metal bağlantılar	28
Metal-Yarıiletken Eklem: Schottky Engel	29
Schottky engel yüksekliği	29
Bir Schottky engeli boyunca akım akışı: termoiyonik emisyon	34
Omik Metal Yarıiletken Eklemler.....	37
Doğrultucu MY Eklem Parametrelerinin Hesaplanmasında Kullanılan Bazı Metodlar.....	39
Rhoderick Metodu (<i>I-V</i> Metodu)	39
Cibils Metodu.....	40
Norde Metodu	41
Cheung Metodu	42
İki Boyutlu Kristaller: Grafen ve Karbon Nanotüpler	43

Grafen Oksit ve İndirgenmiş Grafen Oksit	46
Döndürerek Kaplama (Spin Coating) Tekniği	48
MATERYAL ve YÖNTEM	50
Kovalent Türevlendirilmiş İndirgenmiş Grafen Oksitlerin Sentezi	50
İndirgenmiş Grafen Oksit Sentezi	50
Grafen oksit sentezi.....	50
İndirgenmiş grafen oksit sentezi	50
Aril Diazonyum (Benzendiazonyum Tetrafloroborat ve 4 Metilbenzendiazonyum Tetrafloroborat) Tuzlarının Sentezi.....	51
Kovalent Fonksiyonallaştırılmış İndirgenmiş Grafen Oksitlerin Sentezi.....	51
<i>n</i> -InP Yarıiletkeninin Kimyasal Olarak Temizlenmesi	51
Au-Ge/ <i>n</i> -InP Omik Kontakların Yapılması	52
RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH ₃ Nanokompozitlerin <i>n</i> -InP Altlıklar Üzerine Büyütülmesi	54
Au/RGO/ <i>n</i> -InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/ <i>n</i> -InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH ₃ / <i>n</i> -InP/Au-Ge Yapıların Elde Edilmesi ve Elektriksel Karakterizasyonları	54
ARAŞTIRMA BULGULARI.....	55
Giriş.....	55
Grafen Oksit, İndirgenmiş Grafen Oksit ve Kovalent Fonksiyonallaştırılmış İndirgenmiş Grafen Oksit (RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH ₃) Karakterizasyonu	55
Au/RGO/ <i>n</i> -InP/Au-Ge Numunesinin Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi	60
Au/RGO-Aryl/ <i>n</i> -InP/Au-Ge Numunesinin Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi	73
Au/RGO-Aryl-CH ₃ / <i>n</i> -InP/Au-Ge Numunesinin Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi	83
TARTIŞMA ve SONUÇ	92
KAYNAKÇA	102
ÖZGEÇMİŞ.....	109

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Periyodik Tablodaki Yarıiletkenlerle İlgili Elementler (Atom Numaraları ve Atom Ağırlıkları da gösterilmiştir)	17
Tablo 2. Si, GaAs ve Ge Yarıiletkenlerinin $T = 300\text{ K}$ 'deki Asal Taşıyıcı Konsatrasyonları	22
Tablo 3. Katkılı Yarıiletkenlerdeki Yük Türleri	24
Tablo 4. Katıhal Elektronığında Kullanılan Bazı Metallerin Öz dirençleri, İş Fonksiyonları ve Bazı Yarıiletkenlerin Elektron Yakınlığı Değerleri	29
Tablo 5. n ve p Tipi Yarıiletkenler Üzerindeki Bazı Metaller İçin Schottky Engel Yüksekliklerinin Volt Cinsinden Değerleri.....	31
Tablo 6. Sentezlenen Numunelerin Raman Pozisyonları (cm^{-1}), D ve G Bantlarının Şiddet Oranları (I_D/I_G)	57
Tablo 7. C1s Spektrumundan Elde Edilen XPS Analiz Parametreleri	58
Tablo 8. Au/RGO/ n -InP/Au-Ge Numunesinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Alınan I - V Karakteristiklerinden Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung Metotları Kullanılarak Hesaplanan Engel Parametrelerinin Değerleri	72
Tablo 9. Au/RGO-Aryl/ n -InP/Au-Ge Numunesinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Alınan I - V Karakteristiklerinden Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung Metotları Kullanılarak Hesaplanan Engel Parametrelerinin Değerleri	82
Tablo 10. Au/RGO-Aryl-CH ₃ / n -InP/Au-Ge Numunesinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Alınan I - V Karakteristiklerinden Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung Metotları Kullanılarak Hesaplanan Engel Parametrelerinin Değerleri	91

ŞEKİLER DİZİNİ

Şekil 1. 2s ve 2p elektron orbitallerinin şekilleri ve simetrileri	15
Şekil 2. Bir karbon atomunun dört simetrik kovalent bağını mümkün kılan hibrit elektronik konfigürasyon: (a) sp^3 hibrit orbitallerinin tetrahedral simetrisi ve şekli, (b) Bir CH_4 molekülünün dört kovalent bağını oluşturmak için dört hidrojen atomunun 1s yörüngesi ile dört sp^3 yörüngesinin etkileşimi ve (c) CH_4 molekülünün üç boyutlu atomik bağ modeli.....	17
Şekil 3. Üçgen düzlemsel bağlarla sonuçlanan bir karbon atomunun hibrit elektronik konfigürasyonu: (a) sp^2 hibrit orbitallerinin şekli ve üçgen simetrisi, (b) Bir C_2H_4 molekülünde iki sp^2 orbitalinin oluşturduğu σ bağı ve iki karbon atomunun hibritleşmemiş p orbitallerinin oluşturduğu π bağı ve (c) C_2H_4 molekülünün atomik bağ modeli.....	18
Şekil 4. Silikon kristalinin iki boyutlu temsili: (a) tüm elektronlar 0 K'de bağlıdır ve (b) 0 K'den büyük sıcaklıklarda serbest elektron-boşluk çiftleri oluşturan kopmuş bağlar vardır	19
Şekil 5. Pozitif yükün hareketli yük taşıyıcısı olarak boşluk modeli	21
Şekil 6. (a) <i>n</i> -tipi katkılama ve (b) <i>p</i> -tipi katkılamanın etkileri.....	22
Şekil 7. Bir yarıiletkenin difüzyon yoluyla katkılanması.....	25
Şekil 8. Alıcıların <i>n</i> tipi alt tabakaya difüzyonu bir <i>p-n</i> eklemi oluşturur. Yüzey ile X_j arasında <i>p</i> -tipi yarıiletken ve X_j 'den alt tabakanın büyük kısmına doğru <i>n</i> tipi yarıiletken.....	26
Şekil 9. İyon ekme diyagramı.....	27
Şekil 10. (a) Katkılama elementinin hızlandırılmış iyonları yarıiletken içinde çarpışarak dağınık derinliklerde dururlar, (b) İyon implantasyonundan ve (c) tavlama dan hemen sonra doping profili	27
Şekil 11. (a) Bir MY eklemi n şeması, (b) Vakum seviyesine göre metal ve yarıiletkendeki çeşitli önemli enerji seviyeleri ve (c) Metal ve yarıiletken kontak haline getirildiğinde üretilen potansiyel. Eklemdaki yerleşik potansiyel nedeniyle W genişliğinde bir tükenme bölgesi oluşur.	32
Şekil 12. İdeal <i>p</i> -tipi Schottky engel oluşumunun şeması: (a) Metal ve yarıiletkendeki enerji seviyeleri konumları ve (b) Eklem potansiyeli ve tükenim tabaka genişliği	33
Şekil 13. Gerçek bir metal-yarıiletken arayüzeyindeki arayüz durumları.....	34

Şekil 14. Dengede Schottky engeli.....	34
Şekil 15. Omik kontağın I - V karakteristikleri ve metal n^+ - n kontağının bant diyagramları. Ağır katkılama, deplasyon tabaka genişliğini öyle bir ölçüde azaltır ki, elektronlar ince engelden her iki yönde de kolayca tünelleyerek geçebilirler	37
Şekil 16. Grafenin kristal yapısı: sp^2 hibritlenmiş karbon atomlarından oluşan iki boyutlu bir kristal	44
Şekil 17. Kiral bir karbon nanotüpün kesikli noktalı çizgi boyunca kesilmesiyle elde edilen iki boyutlu grafen tabakanın şematik görünümü.....	45
Şekil 18. (a) Zigzag, (b) Koltuk ve (c) Kiral karbon nanotüplerin yandan ve üstten görünümleri	45
Şekil 19. Grafenin çeşitli yapıları	47
Şekil 20. Grafit oksidin GO ve grafene dönüşümünün şeması	47
Şekil 21. Döndürerek kaplama işleminin şeması	49
Şekil 22. RGO'nun, benzendiazonyum tetrafloroborat ve 4-metilbenzendiazonyum tetrafloroborat tuzları ile kovalent fonksiyonizasyonunun şematik gösterimi	51
Şekil 23. Termal kaplama ünitesi	53
Şekil 24. Tek bölmeli tavlama fırını.....	53
Şekil 25. RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH ₃ 'ün sentez prosedürünün şematik gösterimi	55
Şekil 26. Sentezlenen (GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH ₃) numunelerin XRD spektrumları	56
Şekil 27. Sentezlenen (GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH ₃) numunelerin Raman spektrumları	57
Şekil 28. GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH ₃ karbon numunelerin C1s bölge XPS spektrumları	59
Şekil 29. RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH ₃ karbon numunelerin N1s bölge XPS spektrumları ..	60
Şekil 30. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı doğru beslem I - V karakteristikleri (Şeklin içerisinde (a) Doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V - T karakteristikleri ve (b) Açılma voltajı- I_0 - T değişimleri gösterilmiştir).....	62
Şekil 31. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden elde edilen n - Φ_b değişimleri (n - Φ_b - T değişimleri şeklin içerisinde gösterilmiştir) ..	63
Şekil 32. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K'de Cibilis fonksiyonu $F(V)$ 'nin I ile değişim eğrileri (I_0 - V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir).....	66
Şekil 33. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin Cibilis metodundan elde edilen n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri	67

- Şekil 34.** Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak Norde fonksiyonu $F(V)$ 'nin V 'ye göre değişimleri (Φ_b ve R_s 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde gösterilmiştir) 68
- Şekil 35.** Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ değişimleri (n ve Φ_b 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde (a)'da, $R_{s(ort)}$ 'un T 'ye göre değişimleri ise (b)'de gösterilmiştir)..... 69
- Şekil 36.** Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin $I-V$ ölçümlerinden numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan arayüzey hal yoğunluk değerlerinin E_c-E_{ss} 'ye göre değişimleri..... 71
- Şekil 37.** Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı doğru beslem $I-V$ karakteristikleri (Şeklin içerisinde (a) Doğru ve ters beslem $\ln(I)-V-T$ karakteristikleri ve (b) Açılma voltajı- I_0-T değişimleri gösterilmiştir)..... 74
- Şekil 38.** Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem $\ln(I)-V$ karakteristiklerinden elde edilen $n-\Phi_b$ değişimleri ($n-\Phi_b-T$ değişimleri şeklin içerisinde gösterilmiştir) 75
- Şekil 39.** Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K'de Cibils fonksiyonu $F(V)$ 'nin I ile değişim eğrileri (I_0-V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir) (devam)..... 76
- Şekil 39.** Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K'de Cibils fonksiyonu $F(V)$ 'nin I ile değişim eğrileri (I_0-V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir) 77
- Şekil 40.** Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin Cibils metodundan elde edilen n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri 78
- Şekil 41.** Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak Norde fonksiyonu $F(V)$ 'nin V 'ye göre değişimleri (Φ_b ve R_s 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde gösterilmiştir) 79
- Şekil 42.** Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ değişimleri (n ve Φ_b 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde (a)'da, $R_{s(ort)}$ 'un T 'ye göre değişimleri ise (b)'de gösterilmiştir)..... 80
- Şekil 43.** Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin $I-V$ ölçümlerinden numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan arayüzey hal yoğunluk değerlerinin E_c-E_{ss} 'ye göre değişimleri..... 81
- Şekil 44.** Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı doğru beslem $I-V$ karakteristikleri (Şeklin içerisinde (a) Doğru ve ters beslem $\ln(I)-V-T$ karakteristikleri ve (b) Açılma voltajı- I_0-T değişimleri gösterilmiştir)..... 83

Şekil 45. Au/RGO-Aryl-CH ₃ /n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden elde edilen n - Φ_b değişimleri (n - Φ_b - T değişimleri şeklin içerisinde gösterilmiştir)	84
Şekil 46. Au/RGO-Aryl-CH ₃ /n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K’de Cibils fonksiyonu $F(V)$ ’nin I ile değişim eğrileri (I_0 - V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir)	86
Şekil 47. Au/RGO-Aryl-CH ₃ /n-InP/Au-Ge numunesinin Cibils metodundan elde edilen n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri	87
Şekil 48. Au/RGO-Aryl-CH ₃ /n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak Norde fonksiyonu $F(V)$ ’nin V ’ye göre değişimleri (Φ_b ve R_s ’nin T ’ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde gösterilmiştir)	88
Şekil 49. Au/RGO-Aryl-CH ₃ /n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I değişimleri (n ve Φ_b ’nin T ’ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde (a)’da, $R_{s(ort)}$ ’un T ’ye göre değişimleri ise (b)’de gösterilmiştir)	89
Şekil 50. Au/RGO-Aryl-CH ₃ /n-InP/Au-Ge numunesinin I - V ölçümlerinden numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan arayüzey hal yoğunluk değerlerinin E_c - E_{ss} ’ye göre değişimleri	90

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Φ_b	Engel yüksekliği
A	Etkin diyot alanı
A^*	Richardson sabiti
Aryl	Anilin
Aryl-CH ₃	Metil
AC	Alternatif akım
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
DC	Doğru akım
e	Elektron yükü
E_c	İletkenlik bandının tabanı
E_{Fm}	Metalin Fermi enerji seviyesi
E_{Fs}	Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
ϕ_m	Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
E_v	Valans bandının tavanı
EDX	Enerji dağılım x-ışını spektrometresi
V_{bi}	Built-in potansiyeli
DLC	Elmas benzeri karbon
DMF	Dimetilformamid
FE-SEM	Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
FET	Alan etkili transistör
$F(V)_{min}$	Cibils fonksiyonunun minimum değeri
G/w-V	Konduktans-voltaj
GD	Gauss dağılımı
GO	Grafen oksit
GUA	Guanidinium
HR-TEM	Yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu
I_0	Doyma akımı
I_{min}	Minimum akım değeri
InP	İndiyum fosfat
I-V	Akım-voltaj

$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletken e akan akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletken den metale akan akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
MESFET	Metal-yarıiletken alan etkili transistör
MIS	Metal-yalıtkan-yarıiletken
MPS	Metal-polimer-yarıiletken
MY	Metal-yarıiletken
n	İdealite faktörü
n_0	Termal denge elektron konsantrasyonu
N_A	Akseptör atomlarının konsantrasyonu
N_D	Donör atomlarının konsantrasyonu
n_i	Asal taşıyıcı konsantrasyonu
p_0	Termal denge boşluk konsantrasyonu
r_c	Özel kontak direnci
RF	Rad yo frekans
RGO	İndirgenmiş grafen oksit
R_s	Seri direnç
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
TE	Termoionik emisyon
UV-Vis	Ultraviyole ve görünür ışık
V_a	İsteğe bağılı sabit bir voltaj katsayısı
V_{min}	Minimum voltaj değeri
W	Deplasyon tabaka genişliği
γ	n 'den büyük ilk tam sayı
$C-V$	Kapasite-voltaj
XPS	x-ışını fotoelektron spektroskopisi
XRD	x-ışını kırınımı

GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MY) kontaklar, basit şekilde ifade edilmek istenirse elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılan kontak yapılarıdır. Bu kontaklar, bir metal malzeme ile bir yarıiletken malzemenin bir araya getirilmesi ile elde edilirler. Temelde, metalin ve yarıiletkenin enerji seviyeleri arasındaki farka bağlı olarak çalışırlar. Kontak yapıda metal ve yarıiletkenin içerisinde bulunan yüklerin ayrışması ile meydana gelen bir potansiyel engel söz konusudur (Karataş ve Yumuk 2022). Elde edilen bu potansiyel engel sayesinde elektrik akımını iletme, yönetme veya kontrol etmek mümkündür. Bu sebeple MY kontak yapıları elektronik cihazların temel yapı taşlarını oluştururlar.

Hızlı anahtarlama yapabilen ve düşük gerilimlerde çalışabilen Schottky kontaklar, bu özellikleri sayesinde elektronik teknolojisinde kendine önemli bir yer edinmiştir. Yüksek frekanslarda çalışması ve iletkenlik ile yalıtkanlık halleri arasındaki geçişlere hızlıca cevap vermesi gibi avantajları sayesinde kullanımı yarıiletken endüstrisinde hızla yaygınlaşmıştır (Tan 2018). Metal yarıiletken alan etkili transistörler (MESFET), güneş pilleri, yarıiletken fotodedektörler ve mikrodalga devre elemanları gibi daha birçok elektronik devre elemanı Schottky kontak yapıları kullanılarak üretilmektedir.

Çalışmamızda kullanılan İndiyum fosfat (InP), III-V bileşik yarıiletkenlerin en önemlilerinden biridir. Önemli olmasının ana nedenleri doğrudan bant aralığı (~ 1.42 eV) (Cui *et al.* 2019), yüksek yük taşıyıcı hareketliliği (Sun *et al.* 2017), yük taşıyıcılarının büyük sürüklenme hızı, yüksek kırılma voltajı ve yüksek radyasyon toleransıdır (Quaya *et al.* 2000; Baltakesmez 2019). InP'nin bu önemli özellikleri, onu yüksek hızlı mikroelettronik cihazlar, lazer diyotlar, alan etkili transistörler ve güneş pilleri gibi optoelettronik aygıtların elde edilmesinde en önemli yarıiletkenlerden biri haline getirmiştir. Bu uygulamaların yanı sıra InP, uzay uygulamalarında potansiyele sahip en önemli yarıiletkenlerden biridir (Squartecchia *et al.* 2018; Pawar *et al.* 2018).

Optimize edilmiş MY kontaklar ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) eklemler bu aygıtların vazgeçilmez parçalarıdır. Bu nedenle Schottky diyotlar bu uygulamalardaki temel yapılardan biridir. Ancak, InP atomlarının metal filme difüzyonu ve metal-InP arayüzeyinde meydana gelen kimyasal reaksiyonların neden olduğu Fermi seviyesindeki değişiklikler, düşük engel yüksekliğinin iki ana nedenidir. Bu nedenle enerji bant diyagramı istenilen Schottky engel yüksekliği için uygun olsa da metal ile InP arasındaki deneysel engel

yüksekliğinin 0,5 eV'den düşük olduğu gözlenmiştir (Louis *et al.* 1995). Ayrıca, eklemdaki bu küçük engel yüksekliği, büyük bir kaçak akımına, düşük doğrultma oranına ve buna bağlı olarak düşük aygıt performansına neden olmaktadır. Metal-InP yapılı bir kontak geliştirmenin alternatif bir yolu arayüzey tabakası kullanılmasıdır. Uygun engel yüksekliğinin elde edilmesi için ince bir ara yüzey oksit tabakası kullanılabilir. MY kontakların arayüzey özellikleri devre elemanının performansı, güvenilirliği ve kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Schottky diyot, doğrultucu bir MY kontağıdır. Bu kontak yapılar metal ve yarıiletken arasındaki temasla oluştuğundan, MY arayüzey kalitesi, Schottky diyotların elektriksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu noktada arayüze yerleştirilen ince film, diyotların bazı elektriksel özelliklerini değiştirmektedir (Çakıcı and Sağlam 2011). Burada amaç yarıiletken yüzeyini daha kararlı bir hale getirmektir. Bu sebeple arayüzey tabakasını seçerken malzemenin temel özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Arayüzey tabakasının kullanımı yüzeyi pasivize edip ve sızıntı akımlarını en aza indirecektir (Yumuk 2022). Bazen yarıiletken malzemenin oksitleride arayüzey tabakası olarak kullanılmaktadır. Bu oksit tabakası tünel akımını ve Fermi seviyesinde değişikliğe yol açan arayüzey durumlarını azaltabilir. Bununla birlikte, bu oksit tabakasının uygun sıcaklık kararlılığının yanı sıra büyük engel yüksekliği de sunması gerekir (Baltakesmez 2019).

Son zamanlarda grafen, grafen oksit (GO) ve diğer iki boyutlu malzemeler, yüksek mobilité, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, yüksek optik şeffaflık ve esneklikle birlikte yüksek mekanik mukavemet gibi mükemmel ve kontrol edilebilir özelliklerinden dolayı çeşitli mikroelektronik ve optoelektronik aygıt imalatında kullanılmaktadır (Lee *et al.* 2019). Ayrıca aygıtların imalatında bu malzemeler aktif katman, ara katman ve kapatma katmanı olarak da kullanılabilir.

Oksijen içeren gruplardan oluşan GO, yalnızca iyi bir arayüzey katmanı olmakla kalmaz, aynı zamanda mikroelektronik ve optoelektronik uygulamalarda termal kararlılığa da izin verir. Örneğin, Schottky-güneş pilinin güç dönüşüm verimliliğini arttırmak için, grafen/n-Si Schottky engel güneş pilinde GO arayüzey katmanı olarak kullanılmıştır (Jiao *et al.* 2014). Ayrıca, oksijen içeren fonksiyonel gruplardan oluşan indirgenmiş GO(RGO)/GaN ve GO/Si eklemlerinin termal indirgeme sırasında yüzey Fermi düzeyinde sabitleme nedeniyle engel yüksekliğini iyileştirdiği bilinmektedir (Ryu *et al.* 2016; Pandit *et al.* 2018). GO veya indirgenmiş grafen oksit (RGO) kullanılarak başka (opto) elektronik aygıtlar da hazırlanmıştır. Öte yandan ek devre gerektirmeyen (transistörsüz), kalıcı bilgi tutabilen, sınırsız okuma-yazma voltaj döngüsüne sahip ve enerji tasarruflu GO tabanlı kalıcı bellek aygıtları da bulunmaktadır (Baltakesmez 2019). Esas olarak (Al, Ag veya Au)/GO/ITO gibi

iki metal elektrot arasına sıkıştırılan bu aygıt yapısında, dirençli anahtarlama etkisi, GO katmanındaki yüksek iletkenliğe sahip nano kanalların oluşumuna ve bozulmasına dayanmaktadır (Tan *et al.* 2015). Bununla birlikte, sırasıyla p veya n tipi Si altlıklı ve metal elektrot/GO/metal elektrot yapısı kullanılarak iyileştirilmiş doğrultucu aygıt performansı ve elektrik alanına bağlı direnç etkisi sıklıkla literatüre konu olmuştur. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen InP ve GO'nun kendilerine özgü özelliklerinin mevcudiyeti birçok uygulama için önemini yıllardır korumaktadır.

Yapılan analizler her ne kadar 2000'li yıllardan sonra MY kontaklar ile ilgili yapılan çalışmaların arttığını gösterse de, bu yapıların temeli yüz yılı aşkın süre önce atılmıştır. MY kontakların iletkenlikleri üzerine yapılmış ilk araştırma 1874'de Braun tarafından gerçekleştirilmiştir (Braun 1874). Aslında uzun bir süre bu kontak elemanları çalışma prensipleri tam olarak anlaşılmadan kullanılmışlardır (Özgül 1994). Şevik (2019) ilk yarıiletken devre elemanı olan diyotun ise 1900'lü yılların başlarında kullanılmaya başlandığını ifade etmiştir.

1906 yılında Pickard silisyum nokta kontak detektörü ile ilk çalışmayı yapmış ve patentini almıştır (Pickard 1906). Sonraki yıl 1907'de Pierce diyotların doğrultma karakteristiği ile ilgili bir çalışma yayınlamıştır (Pierce 1907). Takip eden 20 yıl içerisinde kuantum mekaniği geliştirilmiştir ve günümüzde elektronik devre elemanlarının çalışmasında büyük öneme sahip olan Schottky diyotlar ile ilgili kabul edilebilir ilk teori 1930'lu yıllarda Walter Schottky tarafından bildirilmiştir. Walter Schottky geliştirdiği bu diyota kendi adını vermiştir ve MY doğrultucu kontaklar Schottky kontaklar olarak anılmaya başlamıştır. 1932 yılında Wilson engelde bulunan elektronların tünelleme yapmasını kuantum mekaniği kurallarıyla açıklamaya çalışmış, ancak bu yaklaşımla akım yönünü doğru bir şekilde tespit edememiştir (Rhoderick and Williams 1988).

Schottky 1938 yılında MY kontakta kimyasal bir tabaka oluşmadan sadece yarıiletkenin içindeki kararlı uzay yüklerinin sebep olacağı bir potansiyel engelin oluşacağını ileri sürmüştür (Sze *at al.* 2007). Schottky tarafından geliştirilen bu model, yarıiletkende meydana gelen elektrik alanın tükenim bölgesine olan mesafe ile lineer olarak artarken, potansiyelin ise ikinci dereceden artmakta olduğunu ifade etmiş ve Poisson denklemi ile uyumlu olduğunu göstermiştir (Rhoderick and Williams 1988).

Bu sürece paralel olarak 1938 yılında Mott farklı bir model tasarlamıştır. Mott'un tasarladığı bu modelde potansiyel engele yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarının sebep olduğu ileri sürülmüştür. Mott elektrik alanının sabit, elektrostatik potansiyelin ise metale

yaklaştığında uzaklıkla lineer biçimde değiştiğini ve engel bölgesinin yüklü safsızlıklardan arındırılmış olduğunu ileri sürmüştür (Mott 1938).

Schottky ve Mott'un teorisine göre, meydana gelen potansiyel engel metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan meydana gelmektedir. Oluşan potansiyel engelin büyüklüğü, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron ilgisi arasındaki fark kadardır (Rhoderick and Williams 1988).

1935'den sonra silisyum nokta kontak ve selenyum doğrultucu diyotlar radyo dedektörleri olarak kullanılmışlardır. Radarın zamanla geliştirilmesiyle, bu dedektörler diyotlara duyulan gereksinimi de giderek artırmıştır. Bu süreçte yüksek saflıkta silisyum ve germanyum elde etme metotları geliştirilmiştir. Silisyum ve Germanyum ile yapılan nokta kontak doğrultucuların, frekans dönüştürücü ve mikrodalga radarlarda kullanılması da yine bu alanda çok önemli gelişmeler kat edilmesine yardımcı olmuştur (Güzeldir 2011).

İkinci dünya savaşı dönemlerinde kontak yapıların anlaşılması konusundaki en önemli gelişme 1942'de Bethe'nin ileri sürdüğü termoiyonik emisyon (TE) teorisidir. Bethe'nin bu teorisine göre, elektronlar difüzyon ve sürüklenme ile değil emisyon süresi sayesinde hareket etmektedir. Bethe bu çalışma ile elektronların engeli aşma süreci ve metalde bulunan bir elektronun vakum seviyesine geçme sürecinin aynı olduğunu öne sürmüştür. Daha sonra 1965 yılında Crowell ve Sze, Schottky tarafından geliştirilen difüzyon teorisi ile birlikte Bethe'nin TE üzerine çalışmalar yaparak bu iki teoriyi aynı çatı altında toplamış ve Emisyon Difüzyon Teorisini ortaya koymuştur (Gündoğdu 2013). Ancak bu model sadece ideal şartlar altında geçerli olduğundan ve bu kontaklar genellikle ideal şartlar altında olmadığından idealite faktörü adı verilen önemli bir diyot parametresi ortaya çıkmıştır.

1960'lı yıllarda Schottky kontaklar üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır (Çatır 2009). Bu yoğun çalışmalarda MY kontakların başka devre elemanları ile birlikte nasıl kullanılacağı, kontak yapımında oluşabilecek oksit tabakası, seri direnç etkisi, arayüzey tabakasının diyot üzerindeki etkisi ve çevresel etkilerin diyot parametrelerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Teknolojinin ve yarıiletken fiziğinin hızla ilerlemesi bu kontak yapıların daha kolay anlaşılmasını sağlamıştır.

Sze 1964 yılında, MY doğrultucu kontakların teorik izahını yaparak MY kontaklarda imaj kuvvetinden dolayı engel düşüşü olduğunu göstermiştir (Sze *at al.* 1964).

1970 yılında, $p-n$ eklem diyotların sıcaklık-gerilim karakteristiklerini inceleyen Schottky ve Spenke doğrultma teorisini geliştirmiştir (Rhoderick and William 1988).

Schottky diyotlarda seri direnç (R_s), idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği (Φ_b) gibi parametrelerin hesaplanmasında geleneksel metod olarak deneysel akım-voltaj (I - V) ve kapasite-voltaj (C - V) grafiklerinden faydalanılıyordu. Ancak seri direncin ideal olarak hesaplanan değerden büyük ve arayüzey durumlarının da beklenen değerlere göre farklı sonuçlar vermesinden dolayı çizilen I - V ve C - V grafiklerinde ideal durumlardan sapma gözlenmekte ve bu durum elde edilen parametrelerin güvenilirliğini azaltmaktaydı. Bu ideal olmayan durumlardaki Schottky diyotların temel parametrelerinin belirlenmesi için yeni yöntemler geliştirmek birçok araştırmacının çalışmalarının temel nedeni olmuştur (Gündoğdu 2013).

1971 yılında Card ve Rhoderick tarafından arayüzey hallerinin idealite faktörüne ve I - V karakteristiklerine olan etkisi incelenmiştir (Card and Rhoderick 1971).

Norde, $\ln(I)$ - V grafiğinden elde edilen parametrelerin güvenilirliğini azaltan R_s değerlerini de göz önüne alarak bir $F(V)$ fonksiyonu geliştirmiştir. $F(V)$ 'nin teorik olarak hesaplanması bazı yaygın Schottky engel diyotları kullanılarak deneysel olarak da yapılmıştır (Norde 1979). Bohlin, Norde fonksiyonunu modifiye ederek yeniden tanımlamıştır. Böylece bu modifiye edilmiş $F(V)$ fonksiyonu kullanılarak diyot parametrelerinin daha doğru bir şekilde belirlenmesi sağlanmıştır (Bohlin 1986).

Tung (1992), rastgele Schottky engel yüksekliği profilleri ile MY arayüzeylerinde potansiyele ve elektronik taşınmaya analitik çözümler sağlayan bir dipol tabakası yaklaşımı sunmuştur. Schottky engel yüksekliğindeki homojensizliklerin varlığı, deney sonuçlarındaki birçok anormalliğin tutarlı bir şekilde açıklanmasına yol açtığı gösterilmiştir (Tung 1992).

Özgül (1994), yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında p tipi silisyum altlık üzerine bakır, gümüş ve altın gibi farklı metaller kaplayarak elde ettiği Schottky diyotlarının I - V ve C - V ölçümlerini yapmıştır. Yaptığı bu ölçümler neticesinde Schottky yapıların engel yüksekliklerini, idealite faktörlerini, difüzyon yoğunluklarını, akseptör yoğunluklarını ve seri dirençleri gibi parametrelerin tayinini yaparak bu elde ettiği parametreler üzerinde metalin cinsi ve sıcaklığının etkisini incelemiştir.

Çetin and Ayyıldız (2005), Au/ n -InP eklemlili MY kontaklar üzerine yaptıkları çalışmada, Schottky engelinin I - V ve C - V karakteristiklerinin sıcaklığa bağımlılığını incelemek için 80-320 K sıcaklık aralığında ölçüm yapmışlardır. Doğru beslem I - V karakteristiklerini, standart TE teorisi ve engel yüksekliklerinin Gauss dağılımı (GD) varsayımı temelinde analiz ederek, artan sıcaklıklarla engel yüksekliğinin arttığını idealite faktörünün azaldığını göstermişlerdir. Ayrıca sıcaklığa bağlı deneysel etkin engel

yükseklikleri ile idealite faktörleri arasındaki doğrusal ilişkiden aygıt için yaklaşık 0,524 eV'lik homojen engel yüksekliği değeri elde etmişlerdir. Modifiye edilmiş Richardson grafiğinin, sıcaklık aralığı boyunca iyi bir doğrusallığa sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Richardson sabiti'nin (A^*) değerini $5,97 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ olarak bulmuşlar ve bu değer $n\text{-InP}$ için $9,4 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ teorik değerine yakınlığını belirtmişlerdir. Ayrıca Au/n-InP için engel yüksekliğinin sıcaklık katsayısını $-3,16 \times 10^{-4} \text{ eV K}^{-1}$ olarak bulmuşlardır.

Ejderha *et al.* (2009), püskürtmeli Co/p-InP Schottky diyot üzerine çalışmalar yaparak, I - V karakteristiklerini 80-400 K sıcaklık aralığında 20 K'lık adımlarla ölçmüşlerdir. Diyodun idealite faktörünü, 300 K'de 2,01 ve 400 K'de 1,73 olarak bulmuşlardır ve idealite faktörü, birden büyük olduğundan elde edilen kontakın I - V ilişkisinin TE teorisi ile açıklanamayacağını bildirmişlerdir. MY arayüzeyindeki doğal bir oksit tabakasının varlığını işaret ederek I - V karakteristiklerini, doğal oksit tabakasının etkisine göre $p = 1,76 \times 10^{-3}$ iletim katsayısıyla düzeltmişlerdir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin numune sıcaklığının değişmesiyle birlikte değiştiği sonucunu elde etmişler ve bu durumu engel yüksekliğinin yanal homojensizliklerinin varlığı ile açıklamışlardır. Doğal oksit tabakasının etkisinin düzeltilmesinden önce, engel yüksekliği homojensizliğinin, engel yüksekliklerinin çift Gauss dağılım modeline uyduğunu bildirmişlerdir. Düzeltildikten sonra, engel yüksekliği homojensizliği, bazı yazarlar tarafından önerilen ve 80-400 K sıcaklık aralığında doğrusal bir değişime uyan engel yüksekliklerinin tek Gauss dağılım modeline uyduğu sonucuna varmışlardır. Böylece, düzeltmeden sonra $76,45 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$ 'lik bir Richardson sabiti değerini elde etmişlerdir. Modifiye edilmiş Richardson grafiğinden elde edilen bu değer p tipi InP için bilinen $60 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$ değeriyle yakın uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir.

Cimilli *et al.* (2009), Au/n-InP Schottky kontakların I - V karakteristiklerini 70-300 K sıcaklık aralığında ölçmüşlerdir. Au/n-InP Schottky kontakına ait elde ettikleri verilerden MY arayüzeyindeki sıcaklığa bağlı elektron taşınmasının, MY kontakta ait engelin homojen olmamasından önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Yerel etkili engel yüksekliklerinin dağılımını, 170-300 K ve 70-170 K aralığında tam dağılımın yüksek ve alçak engelini temsil eden çift Gauss engel yüksekliklerinin varlığının toplamı ile modellemişlerdir.

Çakıcı *et al.* (2014), laboratuvar koşullarında Au/n-InP/In diyotunu üretmiş ve diyotun I - V ve C - V karakteristiklerini oda sıcaklığında incelemişlerdir. Isıl tavlamanın etkisini gözlemlemek için bu diyotu N_2 atmosferinde 100 ve 200 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 3 dakika süreyle tavlamışlardır. Ürettikleri diyotun kaçak akımı, engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi karakteristik parametrelerini tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak doğru beslem I - V ve

ters beslem C - V karaktersitiklerini kullanarak hesaplamışlar ve diyotun doğrultma oranını, tavlama öncesi ve sonrasına göre değerlendirmişlerdir.

Altındal (2015), eklemdeki olası akım iletim mekanizmaları ve MY arayüzeyindeki engel yüksekliğinin doğası hakkında daha fazla bilgi edinmek için, $Ag/SiO_2/p$ -Si tipi Schottky diyotunun doğru beslem I - V karakteristiklerini 200-360 K sıcaklık aralığında incelemiştir. Sıcaklık arttıkça sıfır beslem engel yüksekliğinde bir artış ve idealite faktöründe bir azalma olduğunu gözlemlemiştir. Klasik Richardson grafiğinden elde edilen etkin A^* değerinin n -Si'nin bilinen teorik değerinden çok daha düşük olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, bir kanıt elde etmek için $\Phi_{b0} - q/2kT$ grafiğini çizmiştir. Ortalama engel yüksekliği ve standart sapma ile diyot alanı üzerindeki engel yüksekliği değerlerini, bu grafiğin eğim ve kesim noktasından sırasıyla 0,786 eV ve 0,082 V olarak bulmuştur. Böylece modifiye Richardson grafiğinin eğim ve kesim noktasından ortalama engel yüksekliği ve etkin A^* değerlerini sırasıyla 0,784 eV ve 30,40 $A\ cm^{-2}K^{-2}$ olarak elde ettiğini ifade etmiştir. Bu sayede $Ag/SiO_2/p$ -Si eklemine doğru beslem I - V karakteristiklerini, engel yüksekliklerinin GD yardımı ile TE mekanizması temelinde başarılı bir şekilde açıklanabildiğini göstermiştir.

Bilgili (2015), yapmış olduğu tez çalışmada (100) yönelimli 500 μm kalınlığa ve $3,13 \times 10^{18}\ cm^{-3}$ taşıyıcı konsantrasyonuna sahip n tipi InP yarıiletken üzerinde püskürtme yöntemiyle TiO_2 tabakasını oluşturarak $Ag/TiO_2/n$ - InP yapılarını hazırlamıştır. İki farklı kalınlıktaki TiO_2 ince filme sahip bu $Ag/TiO_2/n$ - InP/Au yapılarının bazı temel elektriksel parametrelerini 120-420 K aralığında incelemiştir. Elde edilen yapıların n ve Φ_b değerlerini I - V yöntemi ile hesaplamıştır. Bulmuş olduğu değerler neticesinde, sıcaklığın artmasıyla idealite faktörünün azaldığı ve engel yüksekliğinin arttığı sonucuna varmıştır. TE teorisi, Cheung ve Norde metodlarını kullanarak diyot parametrelerini hesaplamış ve elde ettiği değerleri birbirleriyle karşılaştırmıştır. I - V ölçümlerinden elde edilen değerlere GD uygulayarak diyotların çift GD verdiğini ifade etmiş ve ortalama engel yüksekliklerini hesapladığını belirtmiştir.

Aslan *et al.* (2015), yaptıkları çalışmada termal buharlaştırma yöntemini kullanarak p - InP yarıiletkenin üzerine bakır fitalosiyanin kaplamışlardır. Sonra ince organik filmin üzerine vakum ortamında alüminyum buharlaştırarak $Al/CuPc/p$ - InP diyotunu elde etmişlerdir ve I - V ölçümlerini oda sıcaklığında, karanlıkta ve aydınlık bir ortamda gerçekleştirmişlerdir. I - V ölçümlerinden diyot numunesinin doğrultucu özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Aydınlıktaki ölçümler için $100\ mW/cm^2$ şiddetinde bir ışık kaynağı kullanmışlar ve diyotun fotodiyot özelliğine sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca $Al/CuPc/p$ - InP Schottky diyotun temel karakteristik parametrelerini (n , Φ_b ve R_s) farklı yöntemlerle hesaplamışlardır.

Kim (2016), C - V ve iletkenlik-gerilim (G/w - V) ölçümlerini kullanarak Cu/n-InP Schottky diyotlarının elektriksel karakteristiklerini incelemiştir. Artan frekansla C ve G/w değerlerinin azaldığı görülmüştür. Arayüzey durumlarının varlığının artık kapasiteye neden olduğu ve frekans dağılımına yol açtığı belirlenmiştir. Doğru beslem şartları altında gözlenen negatif kapasiteye arayüzey durumlarının veya azınlık taşıyıcı enjeksiyonunun neden olabileceği öngörülmüştür. Ayrıca C - V ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin frekansa bağlı olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 200 kHz’de belirlenen 0,65 eV’luk engel yüksekliğinin, 0,66 eV’luk düzbant engel yüksekliği değerine benzerliği vurgulanmıştır.

Baltakesmez (2019), çalışmasında mikro ve opto elektronik uygulamalar için Au/p-GO/n-InP/Au-Ge aygıt yapısını incelemiştir. GO arayüzeyinin, 2,4 eV bant aralığı enerjisine ve geniş kontak alanına sahip olduğunu belirttiği çalışmasında Raman spektrumunda I_D/I_G oranını 0,78 olarak belirlemiştir. Ürettiği kontakların n , Φ_b ve R_s gibi karakteristik parametrelerini TE, Norde ve Cheung yöntemlerini kullanarak incelemiştir. GO arayüzeyinin varlığı hem engel yüksekliğinin 0,44’ten 0,71 eV’ye artmasına hem de doğrultma oranının ± 1 V’de 10^2 ’den 10^5 ’e önemli bir artışa neden olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca n değerinin 300 K’de 1,32’den 1,23’e iyileştiğini belirtmiş ve Au/p-GO/n-InP/Au-Ge diyotunun yüksek sıcaklıklarda (400 K) çalışmasının kararlı olduğunu gözlemlemiştir.

Cimilli (2021), kimyasal indirgeme yöntemini kullanarak GO’dan, RGO’yu sentezlemiştir. RGO filmini n-InP altlık üzerine spreyliz tekniğiyle yerleştirmiştir. Önce filmin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini XRD, SEM ve UV-Vis spektroskopi teknikleriyle incelemiştir. Au/RGO/n-InP devre elemanı üretildikten sonra I - V karakteristikleri 60-300 K sıcaklık aralığında alınmıştır. Engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi eklem parametrelerinin, MY arayüzeyindeki engel homojensizliklerinden dolayı sıcaklığı bağlı oldukları bulunmuştur. Devre elemanının elektriksel karakteristiklerinin sıcaklığa güçlü bağlılığı, engel yüksekliği değerlerinin GD’na sahip termiyonik alan emisyonu teorisi ile açıklanmıştır. Mevcut akım mekanizmasının ağırlıklı olarak numune sıcaklığına göre büyük doğru beslemelerde uzay yüküyle sınırlı akımlar tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir.

Baltakesmez *et al.* (2021), monodispers NiPt alaşımı monoparçacıkları sentezleyerek ve RGO üzerine bu nanoparçacıkları dekore ederek hazırladığı NiPt/RGO nanokompozit malzemesini Al/n-InP ekleminde arayüzey uygulaması olarak kullanılmıştır. Al/n-InP inorganik MY ekleminde arayüzey tabakasının doğrultma oranında 10^3 kadar bir artışa sebep olduğunu gözlemlemiştir. Aynı zamanda 300 K’deki idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin 1,47 ve 0,49 eV’den 1,24 ve 0,67 eV’ye değiştiği, yani idealite faktörünün

azaldığı engel yüksekliğinin ise arttığı bildirilmiştir. Bu durum n-InP ‘deki metal difüzyonunun ortadan kaldırılmasına ve Fermi seviyesinin sabitlenmesine atfedilmiştir. Ek olarak NiPt/RGO nanokompozit tabakasını P3HT:PCBM güneş pilinin fabrikasyonunda da kullanılmışlar ve fill-faktör değerinde %30‘dan daha fazla bir artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Sağlam *et al.* (2021), Au nanoparçacıklı RGO nanokompozit malzemesini sentezleyerek p-Si yarıiletken altlığı üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle ince film halinde büyütmüşlerdir. Au-RGO ince filmi üzerine Au kontaklar yerleştirilerek laboratuvar koşullarında ürettikleri Au/Au-RGO/p-Si/Al yapının akım iletim mekanizmasını ve arayüzeyin doğasını araştırmak için doğru beslem *I-V* karakteristiklerini 80-300 K sıcaklık aralığında incelemişlerdir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin numune sıcaklığına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olmasının, eklem üzerinde engel yüksekliğinin homojen olmadığını gösterdiğini ve çift GD yaklaşımını uygulayarak ortalama engel yüksekliklerinin 0,890 ve 0,471 eV değerlerine sahip olduklarını belirtmişlerdir. Sonuç olarak ürettikleri diyot numunesinin iyi derecede doğrultma davranışı sergilediğini ve Au-RGO nanokompozit malzemenin Schottky diyotlarda arayüzey tabakası olarak güvenle kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Razaq *et al.* (2022), grafen tabanlı nanokompozitlerin sentezi ve uygulamalarındaki en son gelişmeler hakkında kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Üstün mekanik mukavemetleri, iletkenlikleri ve olağan üstü termal kararlılıkları sayesinde grafen, GO ve RGO tabanlı kompozit malzemelerin enerji depolama sistemlerinde, giyilebilir ve taşınabilir elektronikte potansiyel uygulamalara sahip olabileceklerini bildirmişlerdir. Ayrıca bu tür malzemelerin sentezi ve geliştirilmesi aşamalarındaki zorluklar da bu çalışmada özetlenerek yeni çalışmalara ışık tutacak kapsamlı ve kullanışlı bir veri tabanı sağlanmıştır.

Bashahu *et al.* (2022), bilinmeyen metal malzemeli ve yarıiletken tipine sahip ticari bir Si tabanlı Schottky engel diyotunun idealite faktörü, engel yüksekliği, doyma akımı, seri direnç ve şönt direnci gibi çeşitli parametrelerini 274,5 K-366,5 K sıcaklık aralığında, karanlıkta, doğru ve ters beslem *I-V* karakteristiklerini ele alarak incelemiştir. Bu parametrelerin bazılarını, her yöntemin temel özelliklerini açıkça belirterek üç farklı yöntemle hesaplamışlardır. Bir parametreden diğerine sonuçlar, yapı performansı, farklı yöntemlerden çıkarıldığında birbiriyle karşılaştırılması, diğer çalışmalardan elde edilen verilerle uyumluluk veya uyumsuzluk ve parametrenin sıcaklık veya gerilime bağımlılığı açısından tartışılmıştır. Bazı parametrelere ilişkin sonuçların, aynı parametreler için literatürde mevcut bazı verilerle

karşılaştırılması, özellikle analiz edilen Schottky engel diyotunun metal ve yarıiletken tipinin kimliği hakkında net önerilere yol açtığı bildirilmiştir.

Deniz (2023), Au/CoO/p-Si/Al MIS yapısına sahip Schottky diyotlarının üretimini ve elektriksel karakterizasyonunu araştırmıştır. Bu yapının idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi karakteristik eklem parametrelerini, TE, Cheung ve Norde metodlarını kullanarak doğru beslem I - V karakteristiklerinden numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplamıştır. Ayrıca diyotun C - V ölçümlerinden difüzyon potansiyelini, engel yüksekliğini, Fermi enerji seviyesini ve serbest taşıyıcı konsantrasyonunu hesaplamıştır ve bu parametrelerin ölçüm frekansına bağlılığını incelemiştir. I - V - T ölçümlerinden n ve seri direnç değerlerinin artan sıcaklıkla azaldığını, engel yüksekliği değerinin ise arttığını tespit etmiştir. Benzer olarak, diyotun farklı frekans değerleri için yapılan C - V ölçümlerinden frekans arttıkça serbest taşıyıcı konsantrasyonunun, difüzyon potansiyelinin ve engel yüksekliği değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, deneysel olarak hesaplanan Richardson sabiti değerinin teorik değerinden çok daha düşük olduğunu göstermiştir.

Baltakesmez ve Güzelidir (2023), MIS ve FET aygıtların fonksiyonel bir parçası olarak guanidinium (GUA) büyük katyon tabanlı $\text{GUAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ perovskit ince filmin elektriksel özelliklerini ve etkilerini anlamak için $\text{GUAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ ince film tabanlı Au/ $\text{GUAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ /p-Si/Al ve Al/p-Si/SiO₂- $\text{GUAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ /Al aygıtlarını üretmişlerdir. Karakterizasyon sonuçlarını, $\text{GUAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ ince filminin, mikrometre kalınlığa sahip üç boyutlu çapraz ağ morfolojisi ($\text{GUAPbI}_{3-x}\text{Cl}_x$) olarak oluşturulduğunu bildirmişlerdir. 25 nm kalınlığa sahip iki boyutlu GUA_2PbI_4 filmlerinin düzgün bölgeler halinde büyümüş olduklarını XRD verileri ve EDX spektrumları ile desteklemişlerdir. Arayüzey tabakasının varlığıyla, uzun tünelleme mesafesi ve dolayısıyla daha yüksek seri direnç oluşmuş olsa da, MIS devre elemanlarında ters beslem akımının azaldığı belirlenmiştir. Böylece seri direncin artmasıyla n 'ninde arttığı bildirilmiştir. Aynı zamanda doğrultma oranının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Bir diğer önemli sonuç ise arayüzey tabakasının, referans devre elemanından önemli ölçüde farklı olarak, enerjinin bir fonksiyonu olarak arayüzey elektronik durumlarının geniş dağılımına neden olmasıdır.

Yükseltürk ve Bengi (2023), Au/P3HT/n-Si (MPS) tipi Schottky engel diyotlarının elektriksel ve dielektrik özelliklerini geniş frekans ve gerilim aralığında, bir dizi C - V ve G / w - V ölçümlerini kullanarak oda sıcaklığında 10 kHz-1 MHz frekans aralığında ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Deneysel sonuçların, Schottky engel diyotun hem C hem de G / w değerlerinin artan frekansla azaldığını ve özellikle doğru beslem bölgesinde veya tükenim-yığılım bölgelerinde artan gerilimle artış gösterdiğini bildirmişlerdir. Düşük frekanslarda periyodun

yüzey durumları ve dipollerin gevşeme süresinden daha yüksek olması nedeniyle hem yüzey durumlarının ac sinyali kolayca takip edebileceği hemde dipollerin kendi eksenini etrafında dönebileceği sonucuna varmışlardır. Aynı zamanda arayüzey tabakasının, arayüzey hallerinin, sabitlemiş yüzey ve oksit yüklerinin ve seri direncin varlığının Schottky engel diyotların hem elektriksel hem de dielektrik özelliklerinde önemli değişikliklere neden olabileceğini gözlemlemişlerdir.

Efeoğlu *et al.* (2023), laboratuvar şartlarında üretmiş oldukları Pt/n-Si ve PtSi/n-Si Schottky diyotlarında Schottky engel yüksekliğinin TE akımının belirli bir numune sıcaklığında gerçekleştiği, özel Schottky kontak alanına bağlı olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Elde ettikleri sonuçların kontak alanının artmasıyla Schottky engel yüksekliğinin arttığını n değerinin ise azaldığını gösterdiğini rapor etmişlerdir. Literatürde yüksek engelli MY Schottky kontaktlarının doğru ve ters beslem doyma akımlarının Schottky kontak çaplarına olan yoğun bağımlılığının, Schottky kontak çevresinin etkisi altında oluşan ilave bir elektrik alan voltajı ile belirlendiğine işaret etmişlerdir.

Koçyiğit *et al.* (2023), Giemsa boya maddesini, çeşitli elektriksel davranışları belirlemek amacıyla, Co/n-Si eklemine, Co metali ve *n-tipi* silikon arasında bir arayüzey tabakası olarak kullanmışlardır. Geniş sıcaklık ve frekans aralığında Co/Giemsa/n-Si hetero numunesinin elektriksel özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla sıcaklığa bağlı *I-V* ve frekansa bağlı *C-V* ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Eklem seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi çeşitli parametrelerini TE, Cheung ve Norde metodları yardımıyla *I-V* karakteristiklerinden belirlemişlerdir. Sonuçlar, eklem parametrelerinin ölçüm sıcaklığının güçlü bir fonksiyonu olduğunu ortaya çıkarmıştır. Maksimum elektrik alanı, tükenim tabaka genişliği ve engel yüksekliği gibi çeşitli elektriksel parametrelerin belirlenmesinde frekansa bağlı *C-V* karakteristikleri de kullanılmıştır. *C-V* karakteristiklerinden elde edilen sonuçlar, tüm elektriksel parametrelerin frekans ve voltajın fonksiyonu olarak değiştiğini göstermiştir. Yazarlar, Co/Giemsa/n-Si hetero numunesinin termal algılama ve anahtarlama uygulamaları için geliştirilebileceğini vurgulamışlardır.

El-Mahalawy *et al.* (2023), PVA: PVP@Ni(OAc)₂ nanokompozit ince filmlerini, ışık algılama uygulamaları için metal-polimer-yarıiletken (MPS) konfigürasyonunda engel değiştirici ara katman olarak üretmişlerdir. İnce filmlerin elde edilmesinde döndürerek kaplama yöntemini kullanmışlardır. Üretilen ince filmlerin nanoyapısını ve yüzey pürüzlülük profilini, yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (HR-TEM) ve alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanarak incelemişlerdir. 7,08 nm ortalama pürüzlülüğe sahip pürüzsüz yüzeyler elde ettiklerini vurgulamışlardır. Optik soğurma,

yansıma ve transmisyon spektrumlarını kullanarak filmlerin yasak enerji aralıkları değerlerini çeşitli analitik yaklaşımlarla doğrulamışlardır. Ayrıca Ag/Si (*n-tipi* ve *p-tipi*) eklemlerin yanı sıra Ag/polimer nanokompozit/Si (*n-tipi* ve *p-tipi*) eklemlerin DC elektriksel karakteristiklerini karanlık koşullar altında araştırmışlardır. TE, Norde ve Cheung metodlarını kullanarak eklemlerin mikroelettronik özelliklerini belirlemişlerdir. Ayrıca eklemlerin yük aktarımının mekanik detaylarını doğru ve ters beslem koşulları altında incelemişlerdir. Tasarladıkları Ag/PVA: PVP@Ni(OAc)₂/p-Si ekleminin ışığa duyarlı özelliklerini farklı aydınlatma yoğunlukları altında değerlendirmişlerdir. Tasarladıkları devre elemanının, yüksek duyarlılık, tespit ve hızlı anahtarlama davranışı ile üstün ışık algılama kapasitesine sahip olduklarını rapor etmişlerdir.

Prasad *et al.* (2023), β -Ga₂O₃ Schottky engel diyotlarında yüksek kırılma voltajı ve düşük sızıntı akımı elde etmek için *p-tipi* bir bakır alüminyum oksiti (p-CuAlO₂) ara katman olarak kullanmışlardır. β -Ga₂O₃ üzerindeki RF püskürtmeli p-CuAlO₂ ince filmlerin yüzey element bileşimlerini, kimyasal durumlarını ve mikroyapısal özelliklerini x-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve TEM analizleri yardımıyla ortaya çıkarmışlardır. Pt/ β -Ga₂O₃ Schottky engel diyotunun ve Pt/p-CuAlO₂/ β -Ga₂O₃ heteroekleminin elektriksel ve taşıyıcı iletim özelliklerini *I-V* ve *C-V* ölçümlerini kullanarak incelemişlerdir. Schottky engel diyot ile heteroeklemi karşılaştırdıklarında, heteroeklemin üstün doğrultma davranışı, daha düşük ters kaçak akımı, daha düşük açılma direnci ve daha büyük bir açılma voltajı sergilediğini belirlemişlerdir. Heteroeklemin ters kırılma geriliminin Schottky engel diyota göre yaklaşık 300 V artarak maksimum 922 V 'a ulaştığını vurgulamışlardır. Engel yüksekliği değerlerinin *I-V*, Hernandez, Cheung, Mikhelashvili, Norde, Chot ve yüzey potansiyeli yöntemlerini kullanarak hesaplamışlardır ve değerlerin birbiriyle karşılaştırılabilir olduğunu, buda onların kararlılığını ve geçerliliğini gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ulaştıkları deneysel sonuçlardan, p-CuAlO₂ 'nin, β -Ga₂O₃ ile heteroeklem oluşturmak için yüksek potansiyele sahip bir aday malzeme olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Vivek *et al.* (2023), jet nebülizör sprey piroliz teknikleriyle büyüttükleri saf MoO₃ ve farklı ağırlık yüzdesine sahip Ga-MoO₃ (ağırlıkça %5, %10 ve %15) ince filmlerini MIS diyotunu imal etmek için kullanmışlardır. Ürettikleri filmlerin yapısal özelliklerini XRD tekniğiyle ortaya çıkarmışlardır. FE-SEM görüntülerinin plaka benzeri yapılar gösterdiğini ve UV soğurma ölçümlerinden, ağırlıkça %10 Ga katkılı filmin 3,15 eV 'lik bir yasak bant aralığına sahip olduğu saptanmıştır. *I-V* karakteristik eğrilerinden belirlenen diyot parametrelerinin diyotta akımın ağırlıklı olarak arayüzeyler boyunca aktığını gösterdiğini

rapor etmişlerdir. Ayrıca, görünür ışık aydınlatması altında Cu/Ga-MoO₃/p-Si diyotunda önemli ölçüde yüksek fotoakım performansı gözlemlendiğini bildirmişlerdir.

Efeoğlu *et al.* (2023), metal tabanlı Pt/n-Si ve silikad tabanlı PtSi/n-Si Schottky engel diyotlarının *I-V-T* karakteristiklerini 40-320 K sıcaklık aralığında karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçların, silikad tabanlı diyotun (40 K'da 6,00 Ω ile 320 K'da 6,50 Ω), metal tabanlı diyottan (40 K'da 7,10 Ω ile 320 K'da 8,50 Ω) daha düşük seri direnç değerlerine sahip olduğunu ortaya çıkardığını bildirmişlerdir. Yine hem metal tabanlı hem de silikad tabanlı Schottky engel diyotları için belirlenen engel yüksekliği değerlerinin literatürdeki değerlerle tutarlı olduğunu belirtmişlerdir. Silikad tabanlı PtSi/n-Si diyot için elde edilen daha düşük seri direnç ve daha yüksek Schottky engel yüksekliğinin, Si teknolojisinde devre elemanı performansı ve güvenilirliği için metal yerine metal silikadın kullanılabileceği önerisini desteklediğini rapor etmişlerdir.

Asar *et al.* (2023), elmas benzeri bir karbon filmi (DLC), bir p-Si altlığı üzerine elektrokimyasal yöntemle büyütürerek Al/DLC/p-Si/Au MIS Schottky diyotlarını üretmişlerdir. Elektrokimyasal yöntemle üretilen DLC arayüzey katmanının yapısal analizlerini SEM ve XPS yöntemlerini kullanarak yapmışlardır. SEM görüntülerinden, silikon yüzeyinin tamamen DLC filmiyle kaplandığını ve film yüzeyinde küresel parçacıklar ve adacıkların ortaya çıktığını, XPS spektrumundan filmin ağırlıklı olarak C ve O elementlerinden oluştuğunu belirtmişlerdir. Ürettikleri devre elemanının frekans/gerilim bağımlı kapasitans ve iletkenlik ölçümlerini sırasıyla 1 kHz - 1 MHz ve -1 V ile 4 V aralığında almışlardır. C⁻²-V grafiğinden yararlanarak diyotun difüzyon potansiyelini, akseptör atomlarının konsantrasyonunu, Fermi enerjisini, maksimum elektrik alanını, tüketim tabaka genişliğini ve engel yüksekliğini hesaplamışlardır. Aynı zamanda paralel iletim metodundan yararlanarak arayüzey hallerinde bulunan yüklerin yaşama zamanlarını ve arayüzey hallerinin yoğunluklarını belirlemişlerdir. Arayüzey hal yoğunluğunun düşük olmasını DLC ara katmanının yarıiletken yüzeyini pasifleştirme etkisine bağlamışlardır.

Yukarıda özetlenen literatür bilgileri göz önüne alındığında MY doğrultucu eklemlerin teknolojik açıdan günümüzde de önemini koruduğunu, bu konu üzerinde yapılan araştırmaların yoğun bir şekilde devam ettiğini ve eklemlerin karakteristik parametrelerinin MY arayüzeyine ve arayüzeye yerleştirilen tabaka özelliklerine bağlı olduğu görülmektedir. Literatürde arayüzey tabakası olarak GO ve RGO dâhil çok sayıda malzeme farklı yöntemlerle sentezlenerek ve yine çok farklı yöntemlerle ince film haline getirilerek MY arayüzeyine yerleştirilmiş metal-arayüzey tabakası-yarıiletken yapılar üretilmiş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Ancak bu çalışmada RGO ve kovalent türevlendirilmiş

RGO'lar (RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃) Au/n-InP eklemlere arayüzey tabakası olarak yerleştirilmiş, ara tabaka özellikleri farklı tekniklerle araştırıldıktan sonra, eklemlerin elektriksel karakteristikleri numune sıcaklığına bağlı olarak Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung metotları ile incelenmiş ve elde edilen sonuçların devre elemanlarının performansları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

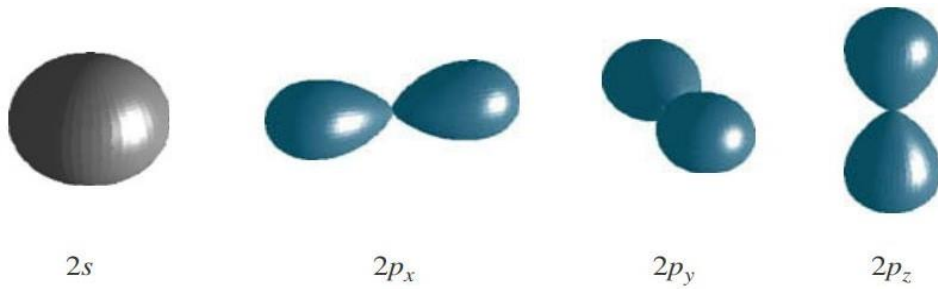
Sunmuş olduğumuz bu yüksek lisans tez çalışmasının birinci bölümünde; konunun tarihsel süreci ve önemi ile literatür taramasını içeren “giriş”, ikinci bölümünde; konu ile alakalı teorik bilgileri içeren “kuramsal temeller”, üçüncü bölümünde; Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge, Au/ RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge diyotların üretim kısmı ile ilgili bilgilerin verildiği “materyal ve yöntem”, dördüncü bölümünde “araştırma bulguları” ve beşinci bölümde ise “tartışma ve sonuç” kısmı yer almaktadır.

KURAMSAL TEMELLER

Yarıiletken Materyallerin Elektriksel Özellikleri

Atomik bağlar

Bazı atomlar, kristal kafes adı verilen düzenli bir modelde kendiliğinden toplanabilirler. Eğer böyle olmasaydı, bir milimetre küp malzeme üretebilmek için 10^{19} 'dan fazla atomun mükemmel bir düzende yerleştirilmesi gerektiğinden bir milimetre küp kristal malzemeyi bile üretmek neredeyse imkansız olurdu. Bir kristalin içerisinde atomlarını bir arada tutan doğal kuvvetler bulunmaktadır. Bu kuvvetler bireysel atomların elektronik konfigürasyonunun kararlılığı ile ilgilidir. Örneğin, soy gazlar olarak isimlendirilen atomlar oldukça kararlı elektronik konfigürasyonlara sahiptirler ve kimyasal olarak inerttirler. Diğer bir asal gaz elementi olan neon, 10 elektrona sahiptir. Neonda, iki elektron ilk kabukta bulunur ve genellikle $1s^2$ (1: birinci kabuğu ve s^2 'küresel yörüngedeki iki elektronu ifade eder) şeklinde gösterilir. Kalan sekiz elektron ikinci kabuğu doldurur. s orbitali bir çift küresel simetriye sahipken (s^2) üç çift olan p orbitali x, y ve z simetrilerine sahiptir ($P_x^2 P_y^2 P_z^2 = P^6$). 2s ve 2p elektron orbitallerinin şekilleri ve simetrileri Şekil 1'de gösterilmektedir. Buna göre, neonun tam elektronik konfigürasyonu $1s^2 2s^2 2p^6$ olarak ifade edilmektedir. Sodyum ise onbirinci elementtir ve onbirinci elektron $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ biçiminde s orbitalinin üçüncü kabuğuna yerleşmiştir. Neonda bulunan elektronik konfigürasyonun kararlılığına ulaşmak için sodyum on birinci elektronunu verme eğilimindedir. Öte yandan on yedinci element olan klor, kendinden sonraki asal gaz elementi olan argonun kararlılığına fazladan bir elektron alarak ulaşabilir. Bu nedenle, sodyum ve klor atomları nispeten kolayca elektron alışverişi yaparak pozitif sodyum iyonları ve negatif klor iyonları oluştururlar. Pozitif ve negatif iyonlar arasındaki çekim kuvveti (iyonik bağlar) NaCl kristallerinin atomlarını bir arada tutmaktadır.



Şekil 1. 2s ve 2p elektron orbitallerinin şekilleri ve simetrileri (Dimitrijević 2012)

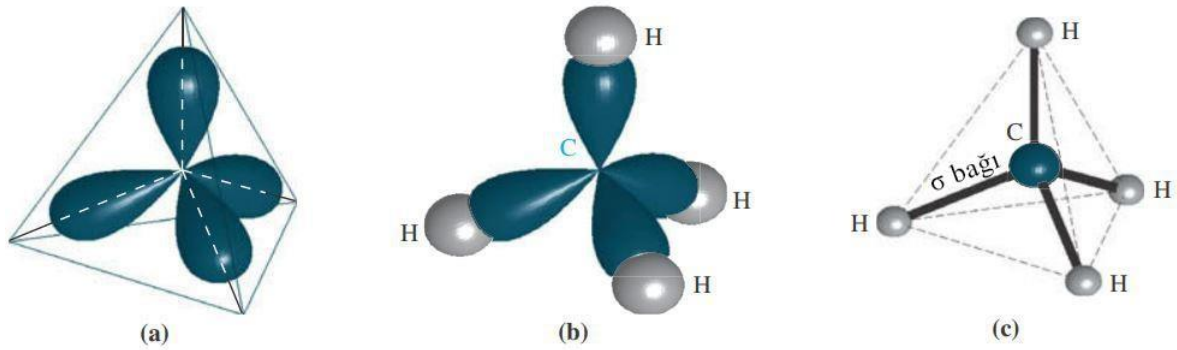
Metal kristallerindeki atomlar, başka bir bağ türü olan metalik bağ ile bir arada tutulurlar. Bu durumda atomlar, kararlı bir yapıya ulaşmak için fazla elektronlarını verirler. Bu fazla elektronlar, kristaldeki pozitif iyonlar tarafından paylaşırlar. Kristale bir elektrik alan uygulandığında pozitif iyonlar tarafından paylaşılan bu elektronlar hareket etmeye başlarlar. Sonuç olarak metaller, bu hareket sayesinde elektrik akımını mükemmel bir şekilde iletirler.

Yarı dolu kabuklara sahip atomlar iki durumda kararlı elektronik konfigürasyonlara ulaşabilirler; yarı dolu kabuktan elektron vererek veya yarı dolu kabuğu doldurmak için komşu atomlardan elektronları alarak. Buna ilk örnek element yarı dolu bir kabuğa sahip olan hidrojenidir. İlk kabuğunda sadece bir elektrona sahip olan hidrojen atomu bünyesinde en fazla iki elektron barındırabilir. İki hidrojen atomu bir araya geldiğinde bir hidrojen molekülü oluştururlar. Oluşan hidrojen molekülü için atomlardan biri bir elektronunu verirken diğer hidrojen atomu elektronu kabul eder (helyumun kararlı elektronik formuna ulaşmak için). Bağdaki simetri nedeniyle hangi atomun elektron verdiği hangi atomunsa elektronu kabul ettiği ayırt edilemez. İyonik ve metalik bağlar türünün her ikisinden de açıkça farklı olan bu bağ türünün ismi kovalent bağdır.

Kabuğu yarı dolu olan bir sonraki atom karbondur. Karbonun altı elektronu vardır: iki elektron ilk kabuğu tamamen doldurur, geri kalan dört elektron sekiz elektronu barındırabilen ikinci kabukta görünür: $1s^2 2s^2 2p^2$. İkinci kabuktaki kararsız ya da aktif dört değerlikli elektronlar Tablo 1’de gösterilmiştir. Bir karbon atomu, dört hidrojen atomu ile dört tane kovalent bağ oluşturabilir. Buda metan molekülü (CH_4) gibi kararlı bir yapı oluşturmuş olur. Metan molekülünde bulunan karbon atomu ya helyumun kararlı elektronik yapısına ulaşmak için dört değerlik elektronunu verir veya neonun kararlı yapısına ulaşmak için hidrojen atomundan dört elektronu kabul eder. Bir metan molekülündeki dört kovalent bağ, bu molekülün simetrisi nedeniyle ayırt edilemez; bu, bir karbon atomunun ikinci kabuğunun $2s^2 2p^2$ konfigürasyonundaki iki s elektronu ve iki p elektronu arasındaki farkla aynı değildir. Bir karbon atomunun Şekil 1 ’de gösterilen 2s, $2p_x$, $2p_y$ ve $2p_z$ hibrit yörüngeleri Şekil 2 (a) ’da gösterildiği gibi dört simetrik şekle dönüşebilirler. Bu dönüşüme hibritleşme denir ve dört simetrik hibrit orbital, sp^3 hibrit orbitalleri olarak adlandırılır. sp^3 etiketi bu orbitallerin bir s (2s) ve üç p'nin ($2p_x$, $2p_y$, ve $2p_z$) orbitallerini gösterir.

Tablo 1. Periyodik Tablodaki Yarıiletkenlerle İlgili Elementler (Atom Numaraları ve Atom Ağırlıkları da gösterilmiştir) (Dimitrijević 2012)

III ⊖ ⊖ (+3) ⊖			IV ⊖ ⊖ (+4) ⊖			V ⊖ ⊖ (+5) ⊖		
5	B		6	C		7	N	
	Boron			Karbon			Azot	
	10,82			12,01			14,008	
13	Al		14	Si		15	P	
	Alüminyum			Silisyum			Fosfor	
	26,97			28,09			31,02	
31	Ga		32	Ge		33	As	
	Galyum			Germanyum			Arsenik	
	69,72			72,60			74,91	
49	In		50	Sn		51	Sb	
	İndiyum			Kalay			Antimon	
	114,8			118,7			121,8	

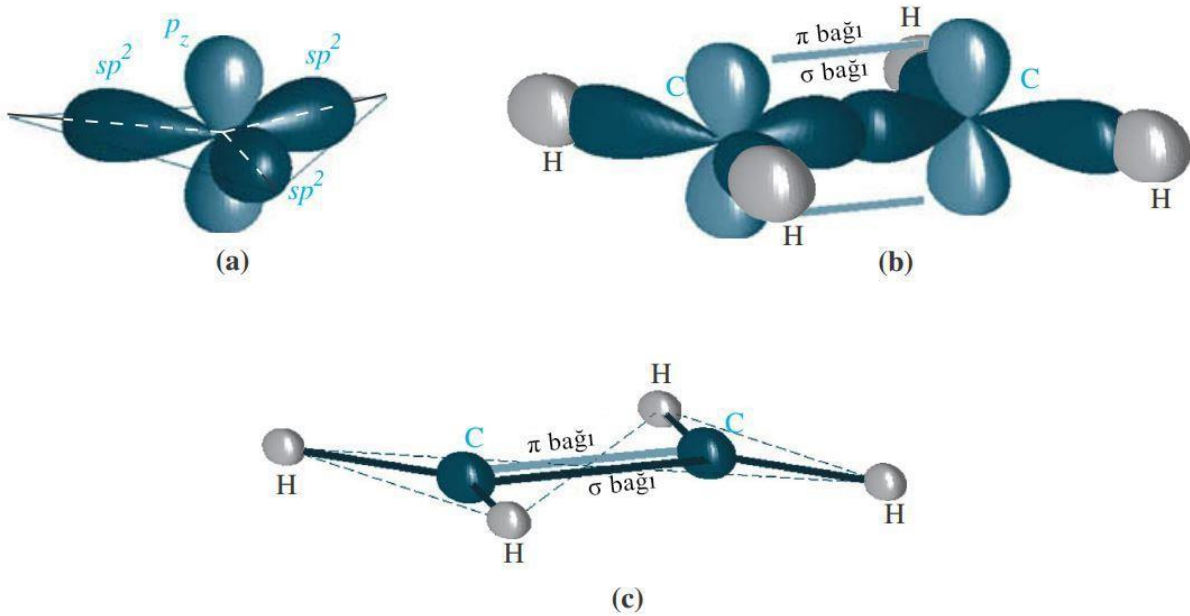


Şekil 2. Bir karbon atomunun dört simetrik kovalent bağını mümkün kılan hibrit elektronik konfigürasyon: (a) sp^3 hibrit orbitallerinin tetrahedral simetrisi ve şekli, (b) Bir CH_4 molekülünün dört kovalent bağını oluşturmak için dört hidrojen atomunun 1s yörüngesi ile dört sp^3 yörüngesinin etkileşimi ve (c) CH_4 molekülünün üç boyutlu atomik bağ modeli (Dimitrijević 2012)

Şekil 2 (b), bir metan molekülündeki dört hidrojen atomunun karbon atomu ve 1s orbitalleri ile dört sp^3 orbitali arasındaki etkileşimi göstermektedir. Şekil 2 (c) bu molekülün atomik bağ modelini üç boyutlu olarak göstermektedir. Şekil 2 (c)'de gösterildiği gibi, bu türdeki kovalent atomik bağlara σ bağları denir.

Karbondaki 2s, $2p_x$, $2p_y$ ve $2p_z$ yörüngelerinin bir diğer önemli hibridizasyonuna sp^2 hibridizasyonu denir. Bu durumda, s ve 2p orbitali, örneğin p_x ve p_y , Şekil 3 (a)'da gösterildiği gibi üçgen düzlemsel simetriye sahip üç sp^2 yörüngesine dönüştürülür; p_z yörüngesi ise melezleşmeden kalır. sp^2 hibrit orbitallerine sahip karbon atomları düzlemsel

(iki boyutlu) yapılarla σ kovalent bağlar oluşturur. Bu sınıftaki en basit yapı etilen molekülü, C_2H_4 'dir. Şekil 3 (b), sp^2 orbitallerinin σ bağları (dört hidrojen atomunun s orbitalleri ile dört bağ ve iki karbon atomunun iki sp^2 'nin orbitalleri arasında bir bağ) oluşturduğunu, oysa iki karbon atomunun hibritleşmemiş p orbitallerinin çok daha zayıf bir π bağı oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Üçgen düzlemsel bağlarla sonuçlanan bir karbon atomunun hibrit elektronik konfigürasyonu: (a) sp^2 hibrit orbitallerinin şekli ve üçgen simetrisi, (b) Bir C_2H_4 molekülünde iki sp^2 orbitalinin oluşturduğu σ bağı ve iki karbon atomunun hibritleşmemiş p orbitallerinin oluşturduğu π bağı ve (c) C_2H_4 molekülünün atomik bağ modeli (Dimitrijeviç 2012)

Karbon ve hidrojen atomları arasındaki kovalent bağlar, farklı tipte hidrokarbon gazları oluşturan moleküllerin oluşmasına neden olur. Ancak kovalent bağlanma karbon atomlarıyla sınırlı olduğunda durum çok farklıdır. Şekil 2 (a)'da olduğu gibi sp^3 -melezleştirilmiş karbon atomlarını düşünelim ve dört hidrojen atomunu aynı sp^3 hibritlenmiş karbon atomlarıyla değiştirelim. Tetrahedronun merkezindeki karbon atomu, dört komşu karbon atomuyla olan dört σ kovalent bağ sayesinde kararlı olacaktır. Tetrahedronun köşelerindeki hidrojen atomlarından farklı olarak, köşelerdeki karbon atomlarının her birinin kararlı olabilmesi için ekstra üç kovalent bağ oluşturması gerekir. Bu köşelerdeki karbon atomlarının her birinin benzer tetrahedral yapılardan dört karbon komşusuna ihtiyaç duyduğu ve bu atomlardan her birinin kendi tetrahedronunun merkezinde görüldüğü anlamına gelir. Bu düzenleme temel veya ilkel hücre olan tetrahedral desenin uzayda her üç boyutta da sürekli olarak tekrarlanmasını gerektirir.

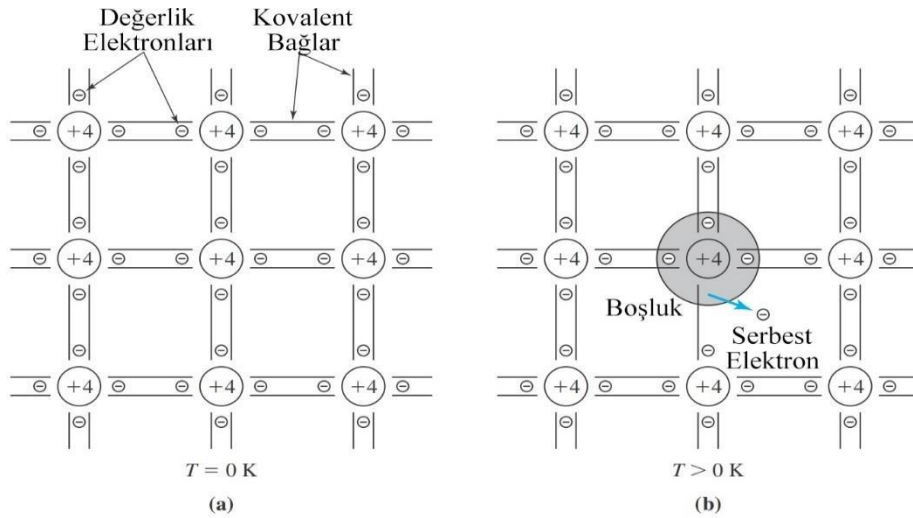
Buna göre, sp^3 -hibritlenmemiş karbon atomları, katı karbonun elmas versiyonu (politi) olan tetrahedral ilkel hücre ile üç boyutlu kristaller oluşturur. Periyodik tablonun 4. sütununda sırasıyla ikinci ve üçüncü elementler olan silikon ve germanyum da aynı elmas tipi kafese sahip üç boyutlu kristaller oluştururlar.

Şimdi Şekil 3 (a)'daki gibi sp^2 -melezleştirilmiş karbon atomlarını düşünelim ve dört hidrojen atomunu aynı sp^2 -melezlenmiş karbon atomlarıyla değiştirelim. Bir hidrojen atomunun bir sp^2 karbon atomu ile değiştirilmesi, bu atomun, etilen molekülündeki karbon atomlarına simetrik olarak kararlı olabilmesi için iki ek sp^2 karbon atomuna bağlanması gerektiği anlamına gelir. Bu durumda üçgen düzlemsel yapı, grafen olarak bilinen iki boyutlu bir kristal oluşturacak şekilde tekrarlanır (Dimitrijević 2012).

Akım taşıyıcılar

Yarıiletkenlerde akım taşıyıcıların iki tipi

Şekil 4'de dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, tüm elektronların yalnızca 0 K sıcaklıkta kovalent bağlarla bağlı olmasıdır. 0 K'den yüksek sıcaklıklarda belirli sayıda kovalent bağlar kopmuş olabilirler. Kovalent bağın kırılması ile oluşan serbest elektronun taşınması esnasında oluşan bu ısı enerjisi silikon atomu tarafından absorbe edilir. Silikon kristalinde bulunan kovalent bağı kırmak için gereken enerji oda sıcaklığında yaklaşık 1,1 eV'dir ve bu enerji farklı sıcaklıklarda biraz daha farklıdır. Daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla kırılmış kovalent bağ oluşacaktır çünkü silikon atomları, içinde bulunan kovalent bağları koparabilen daha fazla termal enerjiye sahip olacaktır. Şekil 4 (b)'de gösterildiği gibi, bir silisyum atomundan bir elektron koparıldığında oluşan boşluk ile silisyum atomu pozitif yüklü hale gelir.



Şekil 4. Silikon kristalinin iki boyutlu temsili: (a) tüm elektronlar 0 K'de bağlıdır ve (b) 0 K'den büyük sıcaklıklarda serbest elektron-boşluk çiftleri oluşturan kopmuş bağlar vardır (Dimitrijević 2012)

Şekil 4’de gösterilen termal enerjiyle kırılan kovalent bağlardan salınan serbest yüklü parçacıklar olarak adlandırılan elektronlar, elektrik akımı oluşturmak için kristalin içinden akabilirler. Bu duruma bakılarak serbest elektronlar akım taşıyıcıları olarak tanımlanmaktadırlar.

Elektronlarını serbest bırakan silikon atomlarının bağ yapılarındaki serbest elektronların yanı sıra arkalarında bıraktıkları boşlukları da düşünmek gerekmektedir (Şekil 4). Bağ yapısında boşluk bulunan bir silikon atomu artık kararsız bir yapıdadır ve içinde bulunan dört kovalent bağını yeniden tamamlayabilmek için komşu atomlardan bir elektron alabileceği her fırsatı değerlendirecektir. Şekil 5’de gösterildiği gibi kristale uygulanan bir elektrik alanı varsa, bu alan bu atomun komşu atomdan bir elektron almasına yardımcı olacak ve komşu atomun bağ yapısında bir boşluk bırakacaktır. Bu yaklaşımla bağ kuracak olan atomdaki boşluğun Şekil 5’de gösterildiği gibi komşu atoma taşındığını söyleyebiliriz. Açıkçası, bu yeni silikon atomunun boşlukta ilk atomdan çok daha uzun süre kalmasının hiçbir nedeni yok; komşusundan bir elektron almak için alanın yardımını da aynı derecede iyi kullanabilir. Sonuç olarak oluşan boşluk, alan yönünde bir adım daha ileri gitmiştir ve bu işlem yine Şekil 5’de gösterilmiştir. Bu süreç devam ettikçe boşluğun, kristal içinde elektrik alan çizgileri doğrultusunda hareket eden pozitif bir yük olduğu izlenimini ediniriz.

Yarıiletkenlerdeki mevcut mekanizmaların sunumunu basitleştirmek için, yukarıda anlatıldığı gibi boşluk hareketi sürecinin ayrıntılarını sürekli olarak akılda tutmak gerekli değildir; boşluğu basitçe pozitif yüklü bir akım taşıyıcısı olarak ele alabiliriz. Bu nedenle, yarıiletkenlerdeki iki tip akım taşıyıcı modelini: (1) negatif yüklü serbest elektronlar ve (2) bağlı elektronların hareketini temsil eden pozitif yüklü boşluklar olarak tanımlayabiliriz.

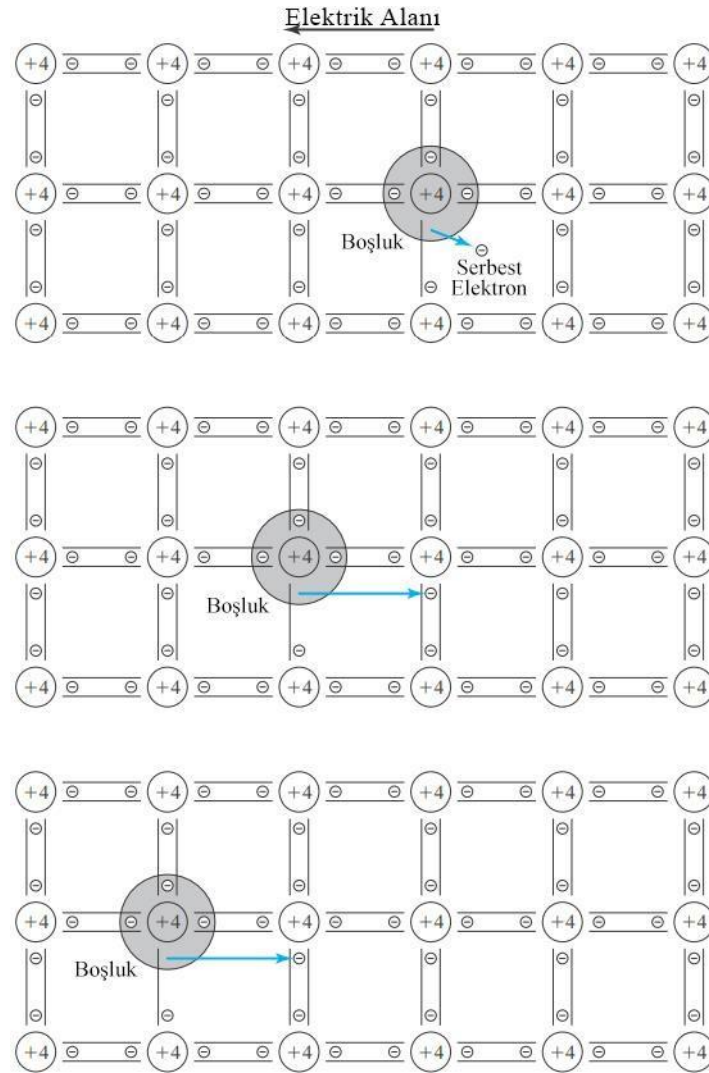
Oldukça açık bir şekilde, bir yarıiletken malzemenin elektriksel özellikleri doğrudan birim hacim başına akım taşıyıcıların sayısına ve taşıyıcıların konsantrasyonuna bağlıdır. Kovalent bağ kırılması sürecinin çiftler halinde serbest elektronlar ve boşluklar yarattığı göz önüne alındığında, serbest elektronların konsantrasyonunun (n_0) her zaman boşluk konsantrasyonuna (p_0) eşit olması gerektiği görünebilir (Şekil 4). Bu, yalnızca doğal atomları içeren bir yarıiletken kristal olan asal bir yarıiletken durumu için kesinlikle doğrudur. İdeal olarak saf bir yarıiletken elde etmek gerçekte mümkün olmasa da, asal yarıiletken modeli, yarıiletken özelliklerini açıklamada çok faydalıdır. Bir asal yarıiletkendeki serbest elektronların ve boşlukların konsantrasyonu n_i ile gösterilir ve asal taşıyıcı konsantrasyonu olarak adlandırılır. Bu nedenle, asal bir yarıiletken için

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (1)$$

yazabiliriz.

Belirli bir sıcaklıkta belirli bir yarıiletken için asal taşıyıcı konsantrasyonu n_i sabittir. Si, GaAs ve Ge için oda sıcaklığı değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Sıcaklık artarsa atomlar daha fazla termal enerjiye sahip olur ve daha fazla kovalent bağ kırılır ve bunun sonucu olarak serbest elektronların ve boşlukların konsantrasyonu artar.

Bu aşamada basitçe sıcaklığın kovalent bağları yok etmediğini (sadece serbest elektronlar ve boşluklar oluşturduğunu) aynı zamanda diğer enerji türlerinin de bu işi yapabileceğini belirtmek gerekir. Buna önemli bir örnek ışıktır. Bir yarıiletkenin yüzeyi aydınlatılırsa, ışığın emilen fotonları, enerjilerini kristaldeki elektronlara aktarabilir; bu, kovalent bağların yok edilebildiği ve serbest elektron ve boşluk çiftlerinin üretilebildiği bir süreçtir. Yarıiletken tabanlı cihazların ışık detektörleri ve güneş pilleri olarak kullanılmasını sağlayan etki de budur (Dimitrijev 2012).



Şekil 5. Pozitif yükün hareketli yük taşıyıcısı olarak boşluk modeli (Dimitrijev 2012)

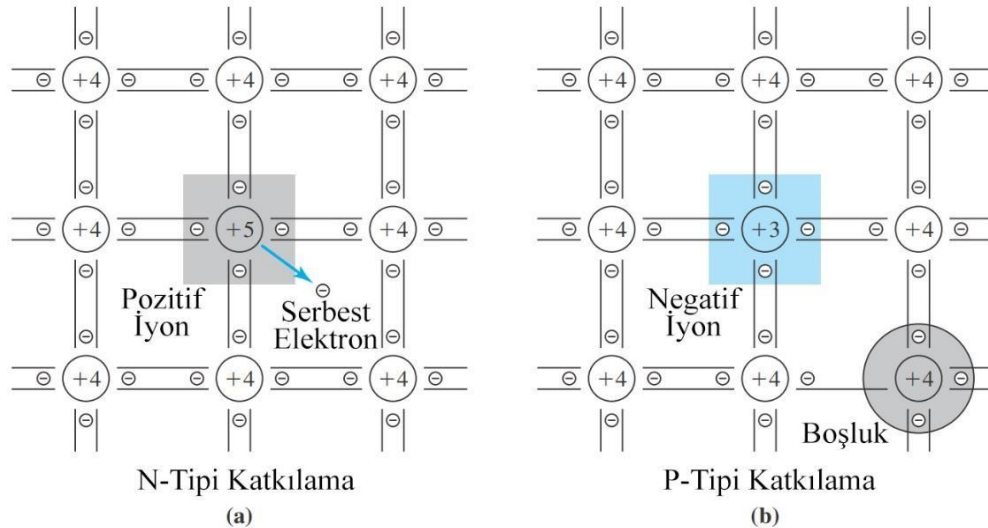
Tablo 2. Si, GaAs ve Ge Yarıiletkenlerinin $T = 300\text{ K}$ 'deki Asal Taşıyıcı Konsatrasyonları (Dimitrijević 2012)

Si	$1.02 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
GaAs	$2.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
Ge	$2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

n-tipi ve p-tipi katkılama

Yararlı mikro elektronik devre elemanları oluşturmak için yarıiletkenlerdeki taşıyıcı konsantrasyonları teknolojik yollarla değiştirilebilir. Teknolojik olarak değişen serbest elektron ve boşluk konsantrasyonlarına sahip yarıiletkenlere katkı yarıiletkenler adı verilir. Yarıiletken katkılama işleminde, bazı silikon atomlarının yerini, katkı atomları veya safsızlık atomları adı verilen farklı türdeki atomlar alır. Gerçek bir silikon kristalinde çok sayıda safsızlık atomları tarafından işgal edilen birçok silikon atomu yeri bulunur. Bazı silikon atomlarının yerleri periyodik tablonun üçüncü veya beşinci sütunundaki atomlar tarafından alındığında faydalı özellikler elde edilebilir.

İlk olarak, Şekil 6 (a)'da gösterildiği gibi, periyodik tablonun beşinci sütunundaki bir atomun, örneğin fosforun, bir silikon atomunun yerini aldığını düşünelim. Fosfor atomunun dış yörüngesinde beş elektronu vardır. Silikon örgüye yerleşen bu atom, Şekil 6 (a)'da gösterildiği gibi, dört komşu silikon atomuyla kovalent bağ oluşturmak için dört elektron kullanacaktır.



Şekil 6. (a) *n*-tipi katkılama ve (b) *p*-tipi katkılamanın etkileri (Dimitrijević 2012)

Bağ yapımında kullanılmayan beşinci elektron, ana atomun etrafında rahat bir yer bulamayacak ve termal enerjinin yardımıyla fosfor atomundan ayrılacaktır. Başka bir deyişle, beşinci fosfor elektronu termal enerji yardımıyla fosfor atomundan ayrılarak serbest bir

elektron haline gelecektir. Bu elektron, kovalent bağ kırılmasıyla üretilen serbest elektronlara ilave olacaktır. Bu nedenle, bir silikon atomunun bir fosfor atomu ile yer değiştirilmesi serbest bir elektron üreterek serbest elektronların konsantrasyonu olan n_0 'ı arttıracaktır. Bu sürece *n-tipi* katkılama denir. Periyodik tablonun beşinci grubunda yer alan ve silikon kristal örgüsüne yerleştirildiğinde serbest elektron üretebilen elementler fosfor, arsenik ve antimondur. Bu katkılanan atomlara donör denir (yani elektron verici). Silikonda hemen hemen her donör atomu oda sıcaklığında serbest bir elektron üretir, ancak düşük sıcaklıklarda ve bazı yarıiletkenlerin oda sıcaklığında olması durumunda katkı atomlarının önemli bir kısmı inaktif kalabilir. Serbest elektron üreten donör atomlarının konsantrasyonu N_D ile gösterilecektir.

n-tipi yarıiletkenlerdeki serbest elektronlar birbirinden ayırt edilemez olmasına rağmen bunların iki bağımsız kaynaktan gelebileceğini biliyoruz: termal üretim ve katkı atomları. Tablo 2'de gösterildiği gibi, termal yolla, asal bir silikonda yaklaşık 10^{10} elektron/cm³ elektron üretilmekte iken katkılama yoluyla 10^{21} elektron/cm³'e kadar çıkılabilmektedir. Aslında, kontrol edilebilir bir şekilde katkılamayla sağlanabilecek en düşük elektron konsantrasyonu 10 elektron/cm³'ten çok da küçük değildir. Bu sayılar, *n-tipi* bir yarıiletkende doping kaynaklı elektronların konsantrasyonu ile karşılaştırıldığında termal olarak üretilen elektronların konsantrasyonunun ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir.

n-tipi katkılama yalnızca serbest elektronlar üretmez; her serbest elektronun üretimi de pozitif bir iyon oluşturur. Bir kristalde genel yük nötrallığını korumak için genellikle aynı sayıda pozitif ve negatif yük bulunur. Bir fosfor atomu beşinci elektronunu serbest bıraktığında, Şekil 6 (a)'da gösterildiği gibi pozitif yüklü kalır. Bu pozitif yük ile kopmuş kovalent bağın oluşturduğu pozitif yük arasında önemli bir fark vardır (Şekil 4 (b)). Şekil 4 (b)'deki pozitif yük, eksik bir elektrondan veya silikon atomunun bağ yapısındaki bir boşluktan kaynaklanmaktadır. Fosforun (veya başka bir beşinci grup elementinin) komşu silikon atomlarıyla oluşturduğu bağ yapısında herhangi bir boşluk yoktur bu yüzden dört bağın tümü karşılandığı için yapı kararlı durumdadır. Beşinci (ekstra) fosfor elektronunun yokluğu nedeniyle oluşan pozitif yük ne nötrleştirilecek ne de komşu atoma taşınacaktır. Bu yük sabit bir pozitif iyon olarak görünecektir. Hareketsiz pozitif iyonlar akım akışına katkıda bulunamayacakları için akım taşıyıcıları değildir. Ancak bu durum onların yok sayılması anlamına gelmez çünkü yarıiletken devre elemanlarında yükleri ve ilgili elektrik alanı nedeniyle önemli etkiler yaratırlar. Hollerden ve elektronlardan ayırt etmek için şekillerde gösterilen kareler, hareketsiz iyon yükünün sembolü olarak kullanılır. Bir yarıiletkende görülen yük türlerinin özeti Tablo 3'te verilmiştir.

p tipi katkılama, bir dizi silikon atomunun, periyodik tablonun üçüncü sütunundaki temel olarak bor atomu gibi atomlar ile değiştirilmesiyle elde edilir. Bor atomlarının dış kabuğunda, komşu silikon atomlarıyla üç kovalent bağ oluşturmak için alınabilecek üç elektron bulunur. Dördüncü kovalent bağı karşılamak için bor atomu ek bir elektrona ihtiyaç duyduğundan, bor atomları termal olarak üretilen serbest elektronları (silisyum atomlarının kovalent bağlarının kırılmasıyla üretilir) yakalayacak ve pozitif mobil yük olarak fazla boşluklar yaratacaktır (Şekil 6 (b)).

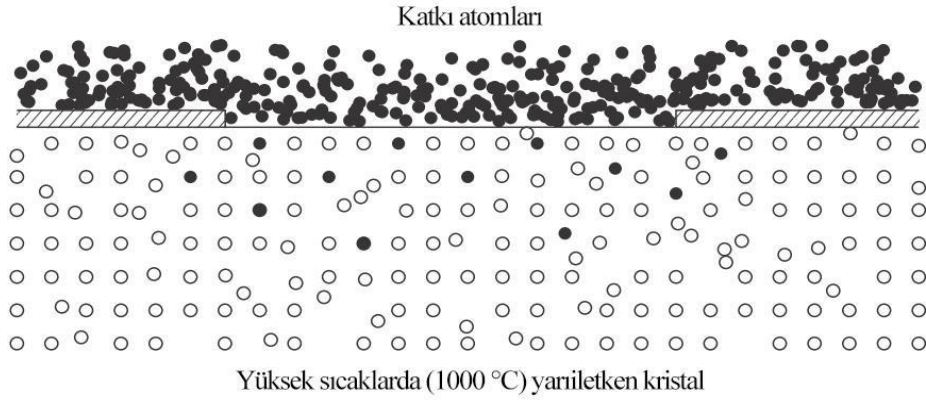
Tablo 3. Katkılı Yarıiletkenlerdeki Yük Türleri (Dimitrijević 2012)

Akım Taşıyıcılar (Mobil Yük)	
Serbest elektronlar (n_0)	
Boşluklar (p_0)	
Sabit Yük	
Pozitif donör iyonları (N_D)	
Negatif akseptör iyonları (N_A)	
N Tipi	P Tipi
Çoğunluk taşıyıcılar: elektronlar	Çoğunluk taşıyıcılar: boşluklar
Azınlık taşıyıcılar: boşluklar	Azınlık taşıyıcılar: elektronlar
($N_D > N_A$)	($N_A > N_D$)

Komşu silikon atomlarıyla kovalent bağ yapılarını tamamlamak için elektronları kabul eden bor atomları, negatif yüklü iyonlar haline gelir; yani, n tipi katkılama durumunda pozitif yüklü donör atomlarına benzer hareketsiz yükler olurlar. Bor atomlarına veya genel olarak p tipi katkılı atomlara alıcı (akseptör) denir. n -tipi katkılama olayına benzer şekilde bor (alıcı) atomlarının neredeyse tamamı oda sıcaklığında iyonize olur, bu da onların elektron olarak hareketli boşluklar oluşturduğu anlamına gelir. Alıcı iyonların konsantrasyonu (boşluklar oluşturan alıcı atomlar) N_A ile gösterilecektir (Dimitrijević 2012).

Katkılama teknikleri

Katkılama doğal kristallerin bazı atomlarının safsızlık atomlarıyla değiştirilmesiyle elde edilir. Bu, kristal büyümesi sırasında safsızlık atomlarının eriyik veya kristal büyümesi için kullanılan gaza eklenmesiyle elde edilebilir. Aşağıda büyütüldükten sonra bir yarıiletken kristali katkılamak için kullanılabilecek teknikler iki başlık altında kısaca açıklanacaktır.



Şekil 7. Bir yarıiletkenin difüzyon yoluyla katkılanması (Dimitrijev 2012)

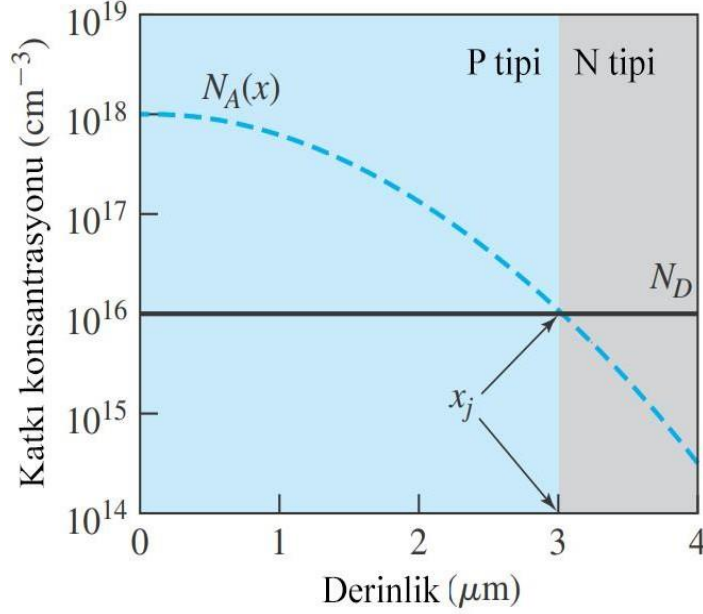
Difüzyon

Termal rastgele hareketlerinden dolayı parçacıklar daha yüksek konsantrasyonlu noktalardan daha düşük parçacık konsantrasyonlu noktalara doğru etkili bir şekilde akarlar.

Difüzyonun eğilimi, parçacıkların tedüze konsantrasyonuna ulaşmaktır. Difüzyon sadece gazlarla sınırlı değildir; bu durum sıvılarda ve katılarda da meydana gelir, ancak atomların difüzyonunun katılarda açıkça gözlemlenmesi için tipik olarak çok yüksek bir sıcaklık gerekir. Şekil 7'de gösterildiği gibi, yeterli sayıda yarıiletken atomun kristal örgü konumlarından salınabilmesi için yarıiletken kristalin yaklaşık 1000 °C'ye ısıtılması gerekir. Kristal kafes konumlarını terk eden yarıiletken atomlara ara yerler (interstitials), geride kalan boş konumlara ise boşluklar (vacancies) adı verilir. Yarıiletkenin yüzeyinde bulunan katkı atomları bu yüksek sıcaklıkta yarıiletken içerisine difüze olup, oluşturulan boşluklara yerleşerek kristal-örgü pozisyonlarını alabilirler. Yarıiletken oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda yarıiletken ve katkı atomlarının termal hareketi önemsiz hale gelir; bu nedenle katkı atomları konumlarında "sabit" kalırlar. Bu şekilde oluşturulan katkılı yarıiletken katman yalnızca belirli bir derinliğe kadar genişler. Yüksek sıcaklıkta difüzyon kullanılarak istenilen derinliğe, uzunluğa ve genişliğe sahip katkılı bir yarıiletken katman oluşturulabilir.

Akseptörlerin *n-tipi* altlığa veya donörlerin *p-tipi* altlığa difüzyonu, difüzyon tarafından oluşturulan katkılı bölgeleri çevreleyen *p-n* eklemlerini oluşturacaktır. *n-tipi* bir altlıktaki donör atomlarının konsantrasyonunun, Şekil 8'de düz çizgi ile gösterildiği gibi $N_D = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ olduğunu varsayalım. Katkılama işlemi kristal altlık büyütülürken gerçekleştirildiği için, donör atomlarının konsantrasyonu altlık boyunca aynıdır. *p* tipi bir bölge oluşturmak için bor difüzyonu gerçekleştirilir. Bor difüzyonu, silikondaki difüzyonla birleştirilen bor atomlarının çoğu yüzeyde kalacağından, düzgün olmayan bir katkı profili yaratacaktır; Altlığın derinliklerine inildiğinde, Şekil 8'deki kesikli çizgi ile gösterildiği gibi, daha düşük bir bor atomu konsantrasyonu bulunacaktır. Yüzeyde daha yüksek bir bor atomu

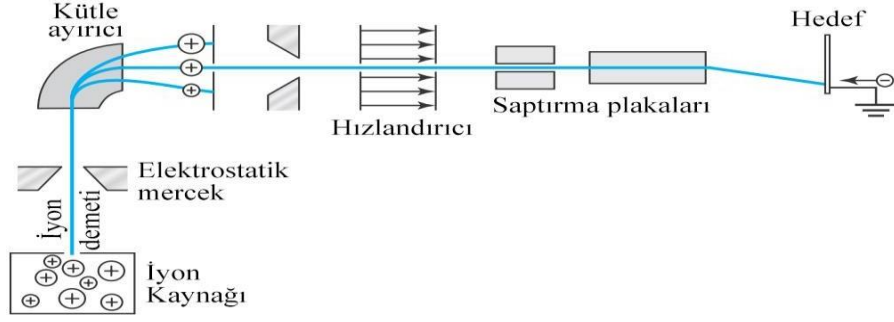
konsantrasyonu elde edilirse (örneğin $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$), alıcı tipi katkı atomları hakim olacak ve silikonun yüzeyi p tipi olarak görünecektir. Şekil 8’de $N_A = N_D$ olan bir noktanın olduğunu göstermektedir. Bu noktaya p - n eklemi adı verilir; eklemin bir tarafındaki yarıiletken p tipidir, diğer tarafındaki yarıiletken ise n tipidir (Dimitrijević 2012).



Şekil 8. Alıcıların n tipi alt tabakaya difüzyonu bir p - n eklemi oluşturur. Yüzey ile X_j arasında p -tipi yarıiletken ve X_j 'den alt tabakanın büyük kısmına doğru n tipi yarıiletken (Dimitrijević 2012)

İyon Ekme (İmplantasyon)

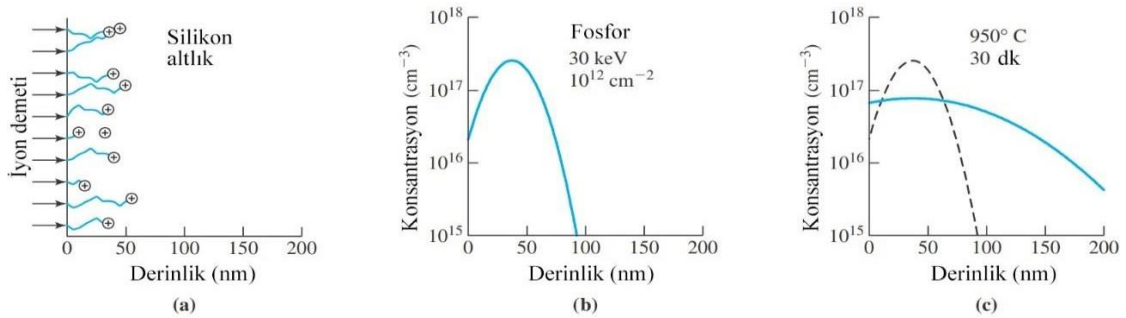
Şekil 9' daki iyon ekme diyagramı iyon ekme sürecini göstermektedir. İşlem, katkı elementinin iyonlarını içeren bir iyon karışımı oluşturan gaz iyonizasyonu ile başlar. İstenilen iyonlar bir kütle ayırıcıda atomik kütlelerine göre ayrılır, iyon ışını daha sonra odaklanır ve iyonlar istenen enerjiye (tipik olarak 10 keV ile 200 keV arasında) kadar hızlandırılır. İyon ışını, düzgün katkılama elde etmek için yarıiletken yonga (wafer) boyunca taranır. Katkılanan elementin iyonları yarıiletken yongaya çarptığında, yarıiletken atomlarla birçok çarpışmaya maruz kalır ve sonunda yüzeyin altında belirli bir derinlikte durur. Hedef topraklandığında, elektrik devresini tamamlamak için ekilen iyonlar, alt tabakaya akan elektronlar tarafından nötrleştirilirler.



Şekil 9. İyon ekme diyagramı (Dimitrijević 2012)

Tüm ışın iyonları aynı enerjiye sahip olmasına rağmen, durma süreci bir dizi rastgele olay içerdiğinden aynı mesafede durmazlar. Bu durum Şekil 10 (a)'da gösterilmektedir. Bu nedenle iyon yerleştirme işlemi, Şekil 10 (b)'de gösterildiği gibi katkı atomlarının çan şeklinde bir karakteristiğine yol açar.

Daha önce açıklandığı gibi, katkı atomları yalnızca kristal örgü içindeki konumlarından yarıiletken atomları ile yer değiştirdikleri zaman elektriksel olarak aktiftirler. İmplant edilen atomlar genel olarak ara konumlarda sonlanırlar. Ayrıca, bir dizi yarıiletken atom konumlarından yer değiştirecek ve bu da yarıiletken kristalin zarar görmesine neden olacaktır. Bu nedenle implant sonrası tavlama yapılması gerekmektedir. Bu tavlama silikon ve katkı atomlarının kristal yapıya geri dönmelerini sağlamak için yeterli enerjiyi sağlamalıdır. Bu tavlama sırasında iyon-ekme profilinin değişimi Şekil 10 (c)'de gösterilmektedir.



Şekil 10. (a) Katkılama elementinin hızlandırılmış iyonları yarıiletken içinde çarpışarak dağınık derinliklerde dururlar, (b) İyon implantasyonundan ve (c) tavlamadan hemen sonra doping profili (Dimitrijević 2012)

İyon implantasyon sürecinin iki önemli parametresi implant enerjisi ve implante edilen iyonların yoğunluğudur (doz). İmplant enerjisi implante edilen iyonların derinliğini belirler. Birim alan başına implante edilen iyon sayısı olarak ifade edilen doz, implantasyon süresi ve iyon ışınının akımı ile belirlenir. İyon ışınının akımı, implante edilen iyonları nötralize etmek için toprak ucundan alt tabakaya akan elektronların akımı ölçülerek bulunabilir. Ölçülen akımın zamana entegrasyonu, alt tabakaya implante edilen yükü verir; bu, birim yük q 'ya ve alt tabaka alanına bölünerek doz elde edilir. Bu şekilde iyon implantasyonuyla elde edilen

katkılama seviyesi çok hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Bu, difüzyon tekniğiyle karşılaştırıldığında iyon implantasyonunun en önemli avantajlardan biri olduğunun ispatıdır. Katkılama profili mühendisliği için ilave esneklik, iyon implantasyonunun ek bir avantajı olarak görünmektedir. İyon implantasyonunun bir dezavantajı, katkılama işleminin maliyetine yansıyan karmaşık bir ekipmandır (Dimitrijević 2012).

Metal-Yarıiletken Eklemler

İki farklı malzemenin bir eklem oluşturması (örneğin *n-tipi* ve *p-tipi* yarıiletken) etkileşime giren elektriksel etkilerin ortaya çıkmasına sebep olur. Metaller ile yarıiletkenler ve aynı veya farklı bant aralıklı yarıiletkenler arasında eklemler oluşturabilir. Bu eklemlerin aynı zamanda devre elemanları için faydalı özel karakteristikleri de vardır. Yarıiletkenleri gerilim kaynaklarına ve devrelere bağlamak için metaller gereklidir. Ayrıca metaller doğrultucu eklemler de üretebilirler. Aynı zamanda yalıtkanlarda elektroniğin ayrılmaz bir parçasıdır. Bu malzemeler bir devre elemanının iki bölgesi arasında izolasyonu sağlayabilirler, bant numunesinin uyarlanabilmesi ve kapasitör vb. olarak kullanılabilirler.

Metal bağlantılar

Metaller, yarıiletken teknolojisinin önemli bir parçasını oluştururlar. Metaller ara bağlantı (düşük dirençli iletkenler) olarak, Schottky engel ve omik kontak oluşturmak ve alan etkili transistörlerde kapı oluşturmak için kullanılırlar. Hareketli elektronların yüksek yoğunluğu nedeniyle metallerin direnci oldukça düşüktür. Tablo 4'de elektronikte kullanılan bazı önemli metallerin öz dirençleri gösterilmiştir. Yarıiletken devrelerde ara bağlantılar, yükün bir noktadan diğerine geçmesini sağlayan yollar oluştururlar. Bu ara bağlantılar devrenin pasif elemanları olsa da son derece önemlidirler ve devre performansında önemli rol oynarlar. Ara bağlantıyı oluşturan metal şeritler yeterli akımı taşıyabilmeli ve devre elemanlarıyla iyi temas kurabilmelidir. Ara bağlantılar yalıtkanlarla da kaplanır ve aktif devre elemanlarına yalnızca seçilen noktalarda açılan pencereler aracılığıyla temas ederler. Alüminyum yaygın olarak kullanılan bir ara bağlantı malzemesidir. Alüminyum tel halinde $2,7 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ öz direnciyle iyi bir iletkenidir. İnce film formunda, direnç 20 kat daha düşük olabilir, bu da ince ara bağlantı filminin ($\sim 10^6 \text{ A cm}^{-2}$) düzeyinde çok yüksek akım yoğunlukları taşımasına olanak tanır (Mishra and Singh 2008).

Tablo 4. Katıhal Elektronikinde Kullanılan Bazı Metallerin Özdirençleri, İş Fonksiyonları ve Bazı Yarıiletkenlerin Elektron Yakınlığı Değerleri

MALZEME	ÖZDİRENÇ ($\mu\Omega\text{-cm}$)	BAZİ METALLERİN İŞ FONKSİYONLARI
Bulk	2,7	Elementİş fonksiyonu, ϕ_m (volt)
İnce tabaka	0,2-0,3	Ag, gümüş4,26
Alaşımlar, $\Delta\rho$		Al, alüminyum4,28
%Si başına	+0,7%Si	Au, altın5,1
%Cu başına	+0,3%Cu	Cr, krom4,5
		Mo, molibden4,6
Titanyum (Ti)	40,0	Ni, nikel5,15
Tungsten (W)	5,6	Pd, paladyum5,12
Ti-W	15-50	Pt, platin5,65
Altun (Au)	2,44	Ti, titanyum4,33
Gümüş (Ag)	1,59	W, tungsten4,55
Bakır (Cu)	1,77	
Platin (Pt)	10,0	BAZİ YARIİLETKENLERİN ELEKTRON YAKINLIĞI
Silisitler		ElementElektron ilgisi, χ (volt)
PtSi	28-35	Ge, germanyum4,13
NiS ₂	50	Si, silikon4,01
		GaAs, galyum arsenit4,07
		AlAs, alüminyum arsenit3,5

Metal-Yarıiletken Eklem: Schottky Engel

Schottky engel yüksekliği

Schottky diyotunun çalışması, MY ekleminin harici ön beslem karşısında nasıl davranacağına bağlıdır. MY eklemin nasıl çalıştığını anlamak için önce bir metal ile bir yarıiletkenin bant profilini inceleyelim. Şekil 11 (a)'da bir MY yapı gösterilmektedir. Şekil 11 (b) ve Şekil 11 (c)'de bir metal ve bir yarıiletkenin bant profilleri gösterilmektedir. Şekil 11 (b), metal yarıiletkenden uzakta olduğunda (kontakt haline getirilmeden önce) bant profilinin ve Fermi seviyesinin konumlarını göstermektedir. Şekil 11 (c)'de metal ve yarıiletken kontak halindedir. Metaldeki Fermi seviyesi E_{Fm} ve iş fonksiyonu ϕ_m şeklindeki bant yapısında gösterilmiştir. Aynı şekilde yarıiletkendeki Fermi seviyesi E_{Fs} 'nin konumu, χ_s elektron ilgisi ve ϕ_s iş fonksiyonu da vakum seviyesi ile birlikte gösterilmiştir (Mishra and Singh 2008).

Başlangıçta yarıiletken yüzeyinin ideal durumda olduğunu varsayalım. Daha sonra yüzey kusurlarının etkisini de göz önüne alalım. Metaldeki Fermi seviyesinin yarıiletkendeki Fermi seviyesinden daha düşük bir konumda olduğu $\phi_m > \phi_s$ durumunu dikkate alalım. Bu durum *n-tipi* Schottky engeline yol açar. İki sistem arasında eklem oluştuğunda, Şekil 11 (c)'de gösterildiği gibi Fermi seviyeleri eklem noktasında aynı hizada olmalı ve herhangi bir akım olmadığında düz kalmalıdır. Vakum seviyesinin sürekliliğini sağlamak ve Fermi seviyelerini hizalamak için eklemde metal ve yarıiletken tarafın vakum enerji seviyeleri aynı olmalıdır. Elektronlar yarıiletken taraftan metal tarafa doğru hareket ederler. Metal tarafı çok büyük bir elektron yoğunluğuna sahip olduğundan, metal Fermi seviyesinin veya bant profilinin, küçük bir miktar elektron eklendiğinde veya çıkarıldığında değişmediğine dikkat edilmelidir. Elektronlar metal tarafa doğru hareket ettikçe arkalarında pozitif yüklü sabit katkı atomları bırakırlar ve *p-n* diyotta olduğu gibi bir dipol bölgesi üretirler.

Bant aralığında kusur seviyelerinin olmadığı ideal bir Schottky engelinde, yarıiletken-metal eklemindeki engelin yüksekliği, eklemdeki yarıiletken iletim bandı ile metal Fermi seviyesi arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu engel

$$e\Phi_b = e\phi_m - e\chi_s \quad (2)$$

şeklinde verilebilir.

Yarıiletkenden metale geçen elektronlar, Şekil 11(c)'de gösterildiği gibi eV_{bi} ile gösterilen bir engelle karşı karşıyadır. V_{bi} , potansiyeli eklemde yerleşik potansiyeli (built-in potansiyeli) olarak adlandırılır ve:

$$eV_{bi} = (e\phi_m - e\phi_s) \quad (3)$$

şeklinde verilir.

Tablo 5. *n* ve *p* Tipi Yarıiletkenler Üzerindeki Bazı Metaller İçin Schottky Engel Yüksekliklerinin Volt Cinsinden Değerleri

SCHOTTKY METALLER	<i>n</i> Si	<i>p</i> Si	<i>n</i> GaAs
Alüminyum, Al	0,7	0,8	
Titanyum, Ti	0,5	0,61	
Tungsten, W	0,67		
Altın, Au	0,79	0,25	0,9
Gümüş, Ag			0,88
Platin, Pt			0,86
PtSi	0,85	0,2	
NiSi ₂	0,7	0,45	

Eğer $\phi_m < \phi_s$ ise boşluk iletimi için bir engele sahip olmak mümkündür. Şekil 12'de, $\phi_m < \phi_s$ olacak şekilde seçilen bir metal-*p*-tipi yarıiletken eklem durumu gösterilmiştir. Bu durumda, denge halinde elektronlar metalden yarıiletkene transfer edilirler ve yarıiletken tarafta negatif bir yüke neden olurlar. Bantlar tekrar bükülerek boşluğun taşınması için engel oluşturulur. Yarıiletkendeki boşlukların gördüğü engelin yüksekliği

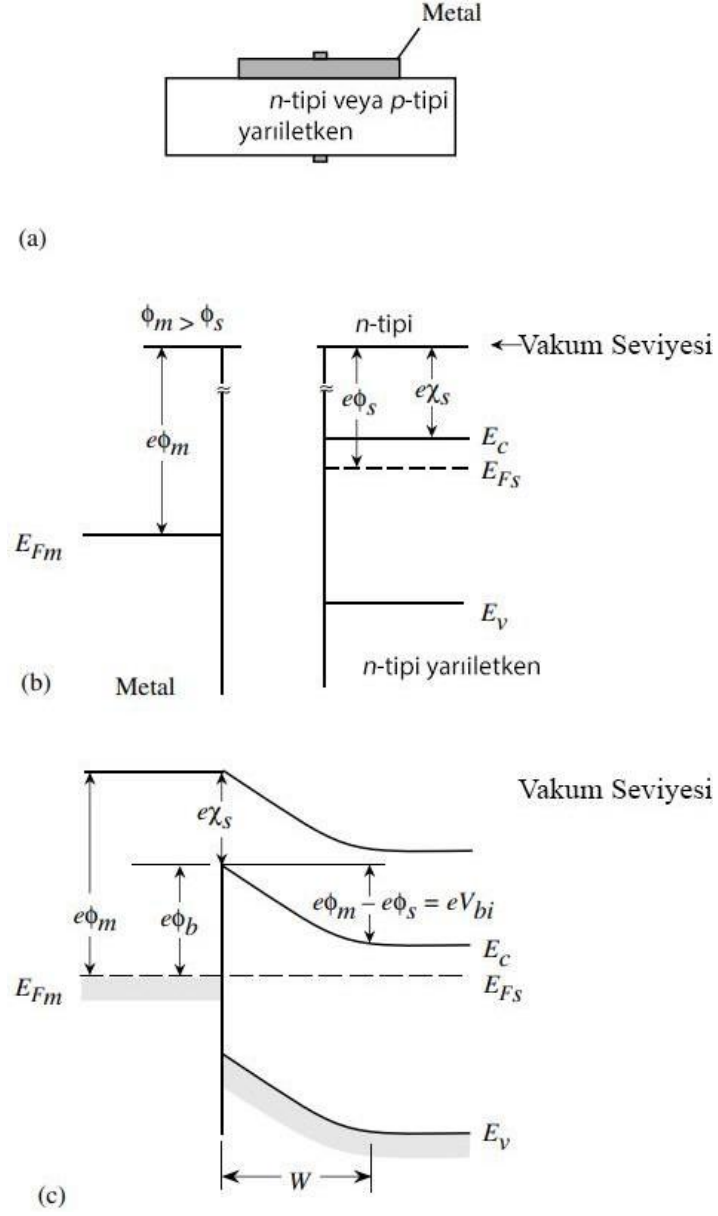
$$eV_{bi} = e\phi_s - e\phi_m \quad (4)$$

şeklinde verilir.

n-tipi veya *p*-tipi yarıiletkenler için Schottky engel yüksekliği metale ve yarıiletken özelliklerine bağlıdır. Bu ideal bir durum için geçerlidir. Schottky engel yüksekliğinin genellikle kullanılan metalden bağımsız olduğu deneysel olarak bulunmuştur. Bu, ideal olmayan yüzeylere dayalı bir model açısından niteliksel olarak anlaşılabilir. Bu modelde MY arayüzü, havaya maruz kalma veya doymamış bağlardan vb. kaynaklanan kimyasal kusurların varlığından kaynaklanabilecek arayüzey durumlarının bir dağılımına sahiptir. Yüzey kusurları, Şekil 13'de gösterildiği gibi arayüzeydeki bant aralığında elektronik seviyelerin dağılımına yol açar. Bu dağılım ϕ_0 nötral seviyesi ile karakterize edilebilir. Eğer ϕ_0 yakınındaki bant aralığı durumlarının yoğunluğu çok büyükse, o zaman yarıiletkene elektron eklenmesi veya çıkarılması, yüzey yüklerinde büyük değişiklikler olmadan yüzeydeki Fermi seviyesi konumunu değiştiremez. Böylece Fermi seviyesinin sabitlendiği söylenir. Bu durumda Şekil 13'de gösterildiği gibi Schottky engel yüksekliği

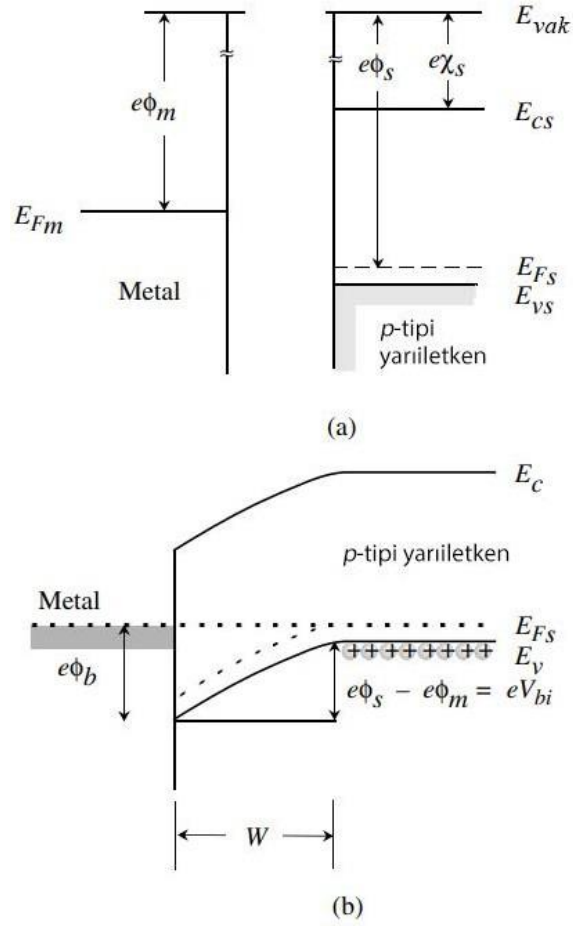
$$e\Phi_b = E_g - e\phi_0 \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir ve hemen hemen kullanılan metalden bağımsızdır (Mishra and Singh 2008).



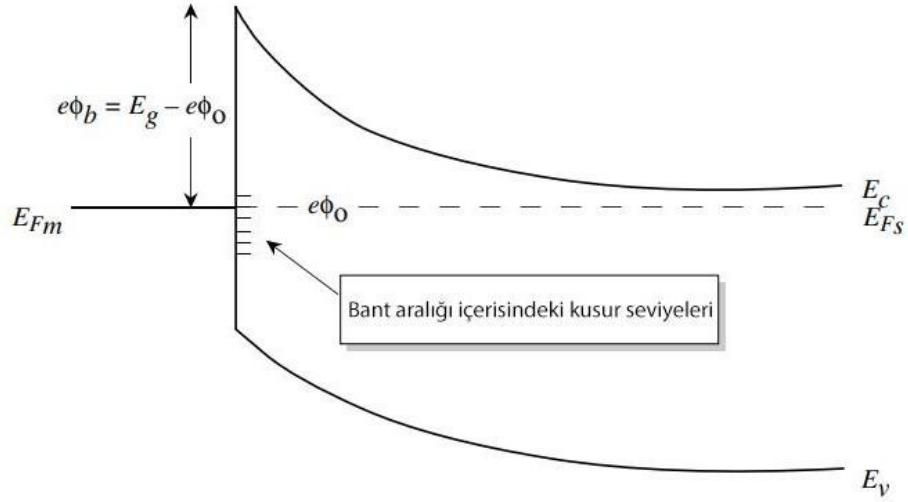
Dengede MY Eklem

Şekil 11. (a) Bir MY eklem şeması, (b) Vakum seviyesine göre metal ve yarıiletkendeki çeşitli önemli enerji seviyeleri ve (c) Metal ve yarıiletken kontak haline getirildiğinde üretilen potansiyel. Eklemdeki yerleşik potansiyel nedeniyle W genişliğinde bir tükenme bölgesi oluşur.



Şekil 12. İdeal *p-tipi* Schottky engel oluşumunun şeması: (a) Metal ve yarıiletkendeki enerji seviyeleri konumları ve (b) Eklem potansiyeli ve tükenim tabaka genişliği

Yukarıda tartışılan model, Schottky engel yüksekliklerinin niteliksel olarak anlaşılmasını sağlar. Bununla birlikte, arayüzey oluşumunun ve Fermi seviyesinde sabitlenmenin ayrıntılı mekanizması oldukça karmaşıktır. Tablo 5’de bazı yaygın MY kombinasyonları için Schottky engel yükseklikleri gösterilmiştir. GaN ve AlGaN gibi bazı malzemelerde yüzey ideal davranışını korur ve Schottky engeli aslında metal iş fonksiyonu tarafından kontrol edilir.

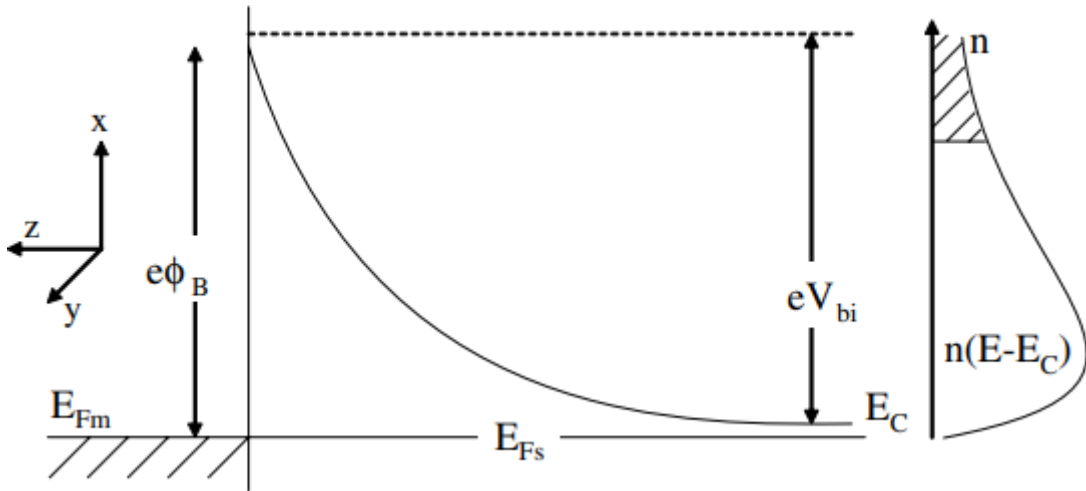


Şekil 13. Gerçek bir metal-yarıiletken arayüzündeki arayüz durumları

Şekilde ϕ_0 nötral seviye olarak tanımlanmıştır. ϕ_0 'ın altındaki bütün hallerin donör halleri, üstündeki hallerinde akseptör halleri olduğu kabul edilir. Donör hali bir elektron bulundursa nötr olarak, eğer elektron bulundurmaz ise pozitif olarak yüklenmiş olduğu kabul edilir. Benzer şekilde bir akseptör hali elektron bulundurmazsa nötr olarak, bir elektron bulundursa negatif olarak yüklendiği kabul edilir.

Bir Schottky engeli boyunca akım akışı: termiyonik emisyon

Şekil 14'te sıfır önbeslemde gösterilen Schottky engel bant diyagramını düşünelim. Bir metal ve yarıiletken arasındaki Schottky engeli, sağda gösterilen elektron dağılımı ile dengede (sıfır önbeslemde) gösterilmiştir (Mishra and Singh 2008).



Şekil 14. Dengede Schottky engeli

Ayrıca elektron dağılımı da p - n eklemine benzer olarak elektron spini göz önüne alındığında 2 faktörüyle aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$n(E - E_c) = 2f(E - E_c)N(E - E_c) \quad (6)$$

TE, +z yönünde eV_{bi} 'den ($E_z > eV_{bi}$) ve $k_z > 0$ 'dan daha büyük kinetik enerjiye sahip yarıiletkendeki tüm elektronların engeli aşabildiğini ve yarıiletkenden metale akım akışına ($J_{s \rightarrow m}$) katkıda bulunabildiğini varsayar. Toplam kinetik enerjinin $E - E_c = E_x + E_y + E_z$ olduğuna dikkat edilmelidir. Termal dengede, metalden yarıiletkene giden akım $J_{m \rightarrow s}$, büyüklük olarak eşit ve işaret olarak $J_{s \rightarrow m}$ 'ye zıt olacak ve net akımı sıfır yapacaktır. $J_{s \rightarrow m}$ 'yi hesaplamak için müsaadeli her elektron tarafından taşınan akımın $E_z > eV_{bi}$ ve $v_z > 0$ şartları için toplanması gerekir:

$$J_{s \rightarrow m} = e \sum n(E - E_c) v_z \quad (7)$$

Kullanılan metodoloji, k-uzay $(dk)^3$ hacmindeki E enerjisindeki elektronların sayısını hesaplamak, sayıyı engel yönündeki elektron hızıyla çarpmak ve enerji üzerinden toplamak veya entegre etmektir. L uzunluğunda bir kristal varsayarsak, periyodik sınır koşulları:

$$k = 2\pi N \quad (8)$$

bağlantısıyla verilen müsaadeli k değerlerini verir.

Burada N bir tam sayıdır ve müsaadeli k 'lar arasındaki fark $\Delta k = 2\pi/L$ 'dir. dk_x, dk_y, dk_z hacim elemanındaki elektronların sayısı dolayısıyla

$$dN = 2f(E - E_c) \frac{dk_x dk_y dk_z}{\Delta k^3} \quad (9)$$

bağlantısıyla verilir.

$(E - E_c) > E_F$ olduğu varsayılarak ve $E - E_F = E - E_c + E_c - E_F$ şeklinde yazarak

$$dN = 2 \exp\left(\frac{-((E - E_c) + (E_c - E_F))}{kT}\right) \frac{dk_x dk_y dk_z}{\Delta k^3} \quad (10)$$

bağlantısını elde edebiliriz. Bu elektronların sağladığı akım yoğunluğu $k_z > 0$ ve $E_z > eV_{bi}$ şartlarında

$$J_z = -e \sum_z \frac{dN}{L^3} \quad (11)$$

bağlantısıyla verilir.

E_x ve E_y 'nin tüm değerlerine, +z yönündeki engel tarafından sınırlandırılmayan x-y düzlemindeki hareketi temsil ettiklerinden izin verildiği unutulmamalıdır. $(E_y - E_c)$ ve $(E_z - E_c)$ için benzer ilişkilere sahip

$$(E_x - E_c) = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} \quad (12)$$

bağlantısına dikkat edilmelidir.

Ayrıca $(E_z - E_c) > eV_{bi}$ koşulu kullanıldığında minimum değer elde edilir:

$$k_{min} = \sqrt{eV_{bi} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)} \quad (13)$$

ayrıca

$$v_z = \frac{\hbar k_z}{m^*} \quad (14)$$

olarak dikkate alındığında

$$J_z = \frac{e}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x \int_{-\infty}^{+\infty} dk_y \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hbar k_z}{m^*} dk_z \quad (15)$$

$$2 \exp \left[- \left(E_x + E_y + E_z \right) / kT \right] \exp \left[- \left(E_C - E_F \right) / kT \right] \exp \left(\frac{eV_{bi}}{kT} \right)$$

$$= - \frac{2}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left(- \frac{(E_C - E_F)}{kT} \right) \quad (16)$$

bağıntısı elde edilir.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dk_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left(- \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^* kT} \right) dk_x = \frac{\sqrt{2\pi m^* kT}}{\hbar}$$

$$\int_{k_{min}}^{\infty} \exp \left(- \frac{\hbar^2 k_z^2}{kT} \right) \frac{\hbar k_z}{m^*} dk_z$$

$$= \frac{kT}{\hbar} \exp \left(- \frac{\hbar^2 k_{min}^2}{kT} \right) = \frac{kT}{\hbar} \exp \left(\frac{-eV_{bi}}{kT} \right) \quad (17)$$

şeklindedir. Bu düzenleme sonucunda

$$J_z = \frac{4\pi}{(2\pi\hbar)^3} e m^* k^2 T^2 \exp \left(- \frac{(eV_{bi} + (E_C - E_F))}{kT} \right)$$

$$J_z = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_b}{kT} \right) = J_{s \rightarrow m} (V = 0) \quad (18)$$

denklemini elde edilir. Burada

$$A^* = \frac{4\pi e m^* k^2}{2\pi\hbar^3} = 120 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2} * \frac{m^*}{m_0} \quad (19)$$

Richardson sabitidir ve $e\Phi_b = eV_{bi} + (E_C - E_F)$, metaldeki elektronlar tarafından görülen Schottky engel yüksekliğidir. $V = 0$ 'da $J_{s \rightarrow m}$ 'yi hesapladık. Analiz, V doğru beslemine kolayca genişletilebilir; tek değişiklik V_{bi} engelini yeni $V_{bi} - V$ engeliyle değiştirilmesidir. Bu durumda I_z veya $J_{s \rightarrow m}$

$$I_z = \frac{kT}{\hbar} \exp \left(- \frac{eV_{bi}}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (20)$$

$$J_{s \rightarrow m} = J_{s \rightarrow m} (V = 0) \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (21)$$

şeklinde elde edilir.

Metalden yarıiletkenine olan akım akışı değişmediğinden

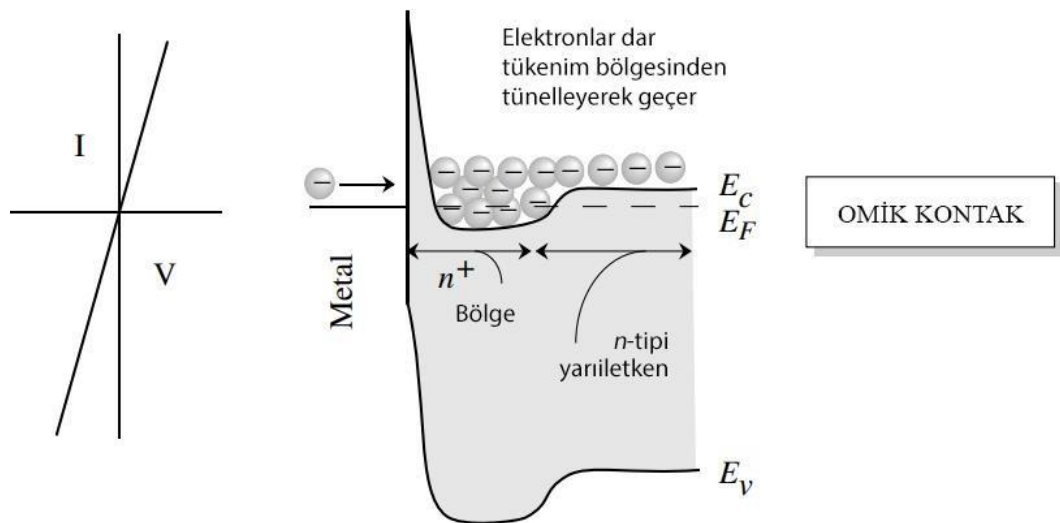
$$J = A^{-2} \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right] \quad (22)$$

ifadesi elde edilmiş olur (Mishra and Singh 2008).

Omik Metal Yarıiletken Eklemler

Şu ana kadar akım akışını sağlamak için devre elemanına nasıl bir önerilim uygulanması gerektiğini tartıştık. Bir güç kaynağından yarıiletkenine bağlantının nasıl yapıldığını bilmek önemlidir. Elektronlar veya boşluklar yarıiletkenin içine ve dışına nasıl akarlar? Elektron akışını kısıtlayan büyük bir engel (iş fonksiyonu) vardır. Yukarıda yapılan tartışmalarda en azından bazı durumlarda MY eklemının aynı zamanda elektronların akışına engel teşkil ettiğini gördük. Bununla birlikte Şekil 15’de gösterildiği gibi lineer doğrultulmamış I - V karakteristiğine sahip MY eklemleri oluşturmakta mümkündür. Bu tür eklemlere veya kontaklara omik kontaklar denir (Mishra and Singh 2008).

Omik kontaklar oluşturmak için iki olasılık vardır. Önceki kısımlarda ifade edildiği gibi, n -tipi bir yarıiletken üzerinde Schottky engeli üretmek için (ideal yüzey için) iş fonksiyonu yarıiletkeninkinden daha büyük olan bir metale ihtiyaç vardır. Bu nedenle, prensip olarak, iş fonksiyonu yarıiletkeninkinden daha küçük olan bir metal kullanırsak, herhangi bir yerleşik engele sahip olmamamız gerekir. Ancak gerçek yarıiletkenlerin yüzeyindeki Fermi seviyesi, bant aralığındaki yüksek arayüzey yük yoğunluğu nedeniyle sabitlendiğinden bu yaklaşım pratikte çoğu zaman kullanışlı değildir.



Şekil 15. Omik kontakın I - V karakteristikleri ve metal n^+ - n kontakının bant diyagramları. Ağır katkılama, deplasyon tabaka genişliğini öyle bir ölçüde azaltır ki, elektronlar ince engelden her iki yönde de kolayca tünelleyerek geçebilirler.

Daha önce tartışılan Schottky engeli, omik bir kontak oluşturacak şekilde değiştirilebilir. Bu, arayüzey boyunca büyük akım elde etmek için ağır katkılama ve tünelleme yardımıyla yapılabilir. V_{bi} built-in potansiyelinin varlığını göz önüne alalım. Yarıiletken tarafındaki tükenim tabakasının genişliği

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{eN_D} \right]^{1/2} \quad (23)$$

bağıntısı ile verilmektedir.

Şimdi, eğer yarıiletken arayüzey bölgesinin yakınında yoğun bir şekilde katkılanmışsa, tükenim tabakasının genişliği son derece dar hale getirilebilir. Aslında o kadar dar yapılabilir ki, bir potansiyel engel olsa bile, Şekil 15'de gösterildiği gibi, elektronlar engeli kolaylıkla geçebilirler. Omik kontağın kalitesi genellikle kontağın belirli bir A alanı üzerindeki R direnci ile tanımlanır. Normalize edilmiş direnç, özel kontak direnci r_c olarak adlandırılır ve

$$r_c = RA \quad (24)$$

bağıntısıyla verilir.

Ağır doping koşulları altında, tünelleme yoluyla iletim belirli kontak direnci için

$$\ln(r_c) \propto \frac{1}{\ln(T)} \propto \frac{(V_{bi})^{3/2}}{F} \quad (25)$$

bağıntısıyla verilir. Burada T üçgen bir engel boyunca tünelleme ihtimaliyeti F ise elektrik alandır. Dolayısıyla

$$F = \frac{V_{bi}}{W} \propto (V_{bi})^{1/2} (N_D)^{1/2}$$

$$\ln(r_c) \propto V_{bi}$$

$$\propto \frac{1}{N_D} \quad (26)$$

olur.

Direnç, düşük Schottky engel yüksekliği kullanılarak ve mümkün olduğunca yoğun katkılama yapılarak azaltılabilir. Kontak direncinin katkı yoğunluğuna bağımlılığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. Deneylerden, düşük dirençli p -tipi yarıiletkenlerle kontak elde etmenin genellikle daha zor olduğu görülmektedir. Bunun nedeni p -dopinginin zorluğudur ve aynı zamanda birçok malzemede nispeten yüksek etkili boşluk kütlelerinin tünelleme akımlarının azalmasına yol açmasıdır. Ayrıca, GaN gibi geniş bant aralıklı yarıiletkenler

durumunda, mevcut metallere ile değerklik bandı arasındaki engel yükseklikleri, iletim bandınıninkinden çok daha yüksektir (Mishra and Singh 2008).

Doğrultucu MY Eklem Parametrelerinin Hesaplanmasında Kullanılan Bazı Metodlar

Schottky diyotların elektriksel performansı etkin engel yüksekliği, idealite faktörü, seri direnç ve doyma akımı gibi fiziksel parametrelerle açıklanabilir. Bu fiziksel parametreler MY engel üzerindeki akım iletim mekanizmalarını daha iyi anlamamızı sağlamanın yanı sıra teknolojik gelişmelere ulaşmamıza da yardımcı oldukları için büyük önem taşımaktadır. Üstelik Schottky diyotları içeren herhangi bir elektronik devre için bu parametrelerin kesin bilgisi gereklidir. Bu parametrelerin doğru beslem I - V karakteristiklerinden hesaplandığı yaygın olarak kullanılan bazı yöntemler vardır. Bu bölümde Schottky diyotların fiziksel parametrelerinin doğru beslem I - V ölçümlerinden belirlenmesinde kullanılan Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung yöntemleri sunulmaktadır. Bu yöntemlerin çoğu, engel üzerinden akım iletiminin aşağıdaki denkleme uygun olduğunu varsayan TE modeline dayanmaktadır.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (27)$$

Bunlardan ilki, sıfır seri dirençli ve idealite faktörü $1,0 < n < 1,2$ olan ideal bir diyot durumunu dikkate alan Rhoderick tarafından açıklanan standart I - V yöntemi olarak bilinir. Cibils, Norde ve Cheung yöntemleri olarak bilinen diğer üç teknik ise diyot seri direnci sorununu ele almıştır. Bu yöntemlerde, diyot seri direnci TE modelinde aşağıdaki gibi kullanmıştır;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (28)$$

Bu denklemde, idealite faktörü diğer akım mekanizmalarının termoiyonik emisyon teoriye katkısını gösterirken, seri direnç ise kontak tarafından görülen akım kaybını ortaya koymaktadır.

Rhoderick Metodu (I - V Metodu)

Rhoderick yöntemi Schottky diyot parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan en yaygın ve en kolay yöntemdir. Rhoderick yaklaşımı, deneysel verilerden diyotun engel yüksekliğini ve idealite faktörünü belirlemek için TE teorisine dayanmaktadır. Yüksek katkılı yarıiletkenler için $V > 3kT/e$ durumunda yukarıda verilen denklem (27)'de (-1) ihmal edilebilir ve

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (29)$$

denklemini yazılabilir. Burada I_0 ,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (30)$$

şeklinde ifade edilen doyma akımı yoğunluğudur.

Richardson sabiti (A^*), çoğu durumda bilinmesi gereken bir sabittir. Ancak bu sabit aktivasyon enerjisi yöntemi kullanılarak deneysel olarak da bulunabilir. Engel yüksekliği ve idealite faktörü, $\ln(I)$ – V grafiğinden deneysel olarak belirlenebilir. $\ln(I)$ – V grafiği y eksenini 0 voltajda $\ln(I_0)$ değerinde kesen bir doğru verir. I_0 değeri grafikten belirlendikten sonra sıfır beslem etkin engel yüksekliği (Φ_{b0}) yukarıdaki denklemden bulunabilir. $\ln(I)$ – V grafiğinin eğimi ise diyot idealite faktörünü hesaplamak için aşağıda verilen bağıntıda kullanılabilir:

$$n = \frac{e}{kT} \frac{1}{\text{eğim}} \quad (31)$$

Rhoderick pratik diyotlarda gözlenen seri direnç etkisini ihmal ederek ideal bir diyot için idealite faktörünün $1,1 > n > 1$ aralığında olacağını önermiştir. Yüksek akımlarda daha etkili olan diyot seri direnci $\ln(I) - V$ grafiğinin eğimini etkiler. Bu nedenle doğrusal kısım, seri direncin etkisinin ihmal edilebileceği $3kT/e < V \ll IR_s$ voltaj aralığıyla sınırlanmış olacaktır. Diyot seri direnci arttığında $\ln(I)$ – V grafiğinin doğrusal kısım azalır, bu da eğimin ve y eksenini kestiği noktanın doğru olarak belirlenmesinde zorluklara neden olur. Bu aralık dar bant aralıklı yarıiletkenlerle üretilen diyotlar için daha da küçük olacaktır. Bu nedenle, bu tür diyotları değerlendirmek için Rhoderick yöntemini kullanmak, $\ln(I)$ – V grafiğinin doğrusal bölgesini belirlemedeki zorluk nedeniyle hesaplanan parametrelere yüksek düzeyde belirsizlik getirebilir.

Cibils Metodu

Bir Schottky engel diyotta yarıiletkenin veya arayüzeyin bazı özelliklerini belirlemek için kullanılan en basit yöntem, doğru beslem $\ln(I)$ – V grafiğidir. Ancak bazen üretim tekniklerine ve kullanılan malzemelere bağlı olarak bu yapılarda yüksek seri direnç gözlenebilir. Bu yüksek seri direnç, özellikle Schottky engel diyotu ideal olmayan davranış sergilediği zaman, $\ln(I)$ – V karakteristik eğrilerinden elde edilecek bilgilerin çoğunu maskeler. Farklı üretim koşulları için Schottky engel özelliklerinin belirlenmesi gerektiğinden, bu tür koşullar altında diyotun n , R_s , I_0 gibi karakteristik parametrelerini elde etmek hala gereklidir. Cibils geliştirdiği metotla doğrusal bir I_0 – V_a grafiğinin ölçülmesiyle bu tür parametrelerin belirlenmesinin mümkün olduğunu göstermiştir.

Yüksek seri dirençli ideal Schottky engel diyotlarda karakteristik parametrelerin belirlenmesine yönelik Norde tarafından geliştirilen yöntem, yüksek seri dirençli ideal

olmayan diyotlara uygulanabilmesi için modifiye edilebilir. Bu, aşağıdaki gibi bir $F(V)$ fonksiyonunun tanımlanmasıyla yapılabilir;

$$F(V) = V - V_a \ln(I) \quad (32)$$

Burada V ve I sırasıyla numune üzerinde doğru beslem altında ölçülen voltaj ve akım değerleridir ve V_a , V veya I 'ya bağlı olmayan isteğe bağlı bir voltajdır. Bu fonksiyon $\infty > V_a > nkT/e$ aralığında farklı V_a değerleri için farklı bir bağlı minimum $F[V_0(I_0)]$ sunar. Fonksiyonun minimum değerine karşılık gelen I_0 akımları farklı V_a değerlerine göre belirlenebilir. $V_0 - I_0$ ilişkisi

$$I_0 = \frac{V_a}{R_s} - \frac{nkT}{eR_s} \quad (33)$$

şeklindedir. Bu denkleme göre $I_0 - V_a$ arasındaki ilişki doğrusaldır. Dolayısıyla doğrunun eğiminden diyot seri direnci R_s ve düşey eksenini kestiği noktadan da idealite faktörü belirlenebilir (Cibils and Buitrago 1985).

Norde Metodu

Norde (1979), doğru beslem $\ln(I) - V$ grafiğinin doğrusal bölgesinin yokluğunda bile, yüksek seri dirence sahip bir diyotun engel yüksekliğini ve seri direncini tahmin etmek için yeni bir ampirik $F(V)$ fonksiyonu önermiştir. Yukarıda verilen kesimlerde de ifade edildiği gibi $eV \gg 3kT$ durumunda modifiye edilmiş TE teorisinde toplam I akımı

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1\right] \quad (34)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Eksponansiyel ifadedeki $(V-IR_s)$ diyot üzerinde düşen gerilimi göstermektedir. Norde'nin yüksek seri dirençli diyotlarda engel yüksekliği ve seri direnç hesaplamaları için kullandığı ampirik fonksiyon;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (35)$$

şeklindedir. (34) denklemini (35) denkleminde kullanılarak $eV \gg 3kT$ durumu için Norde fonksiyonu

$$F(V) = \Phi_b + IR_s - \frac{V}{2} \quad (36)$$

şeklinde ifade edilebilir. $F(V)-V$ grafiği minimuma sahip bir eğri ile sonuçlanır. Seri direnç ve engel yüksekliği değerleri, minimum noktaya karşılık gelen $F(V)_{min}$, V_{min} ve I_{min} değerleri belirlenerek ve aşağıda verilen denklemler kullanılarak hesaplanabilir.

$$\Phi_b = F(V)_{min} + \frac{V_{min}}{2} - \frac{kT}{e} \quad (37)$$

$$R_s = \frac{kT}{eI_{min}} \quad (38)$$

Norde geliştirdiği yöntemde $n=1$ ideal diyot durumunu göz önüne almış ve engel yüksekliğinin besleme bağımlılığının $F(V)$ fonksiyonu üzerindeki etkisini ihmal etmiştir. Ancak daha sonra idealite faktörünün birden büyük olması durumunda Norde fonksiyonu Bohlin tarafından $F(V)$ fonksiyonunun ilk terimi olan $V/2$ yerine V/γ alınarak modifiye edilmiştir. Burada γ , idealite faktöründen kk olmamak üzere ($1 < n < \gamma$) ilk büyük tam sayı olarak alınmıştır. Böylece büyük idealite faktörüne sahip diyotlar için seri direnç ve engel yüksekliğinin daha doğru olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Dolayısıyla modifiye edilmiş yeni Norde fonksiyonu

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) \quad (39)$$

şeklini almıştır. Bu denklemde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra sırasıyla engel yüksekliği ve seri direnç hesaplamaları için

$$\Phi_b = F(V)_{min} + \left(\frac{\gamma-n}{n} \right) \left(\frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{e} \right) \quad (40)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{eI_{min}} \quad (41)$$

bağıntıları elde edilmiştir.

Cheung Metodu

Cheung, tek bir $I-V$ lmnden idealite faktörü ve engel yüksekliğine ek olarak Schottky diyot seri direncini değerlendirmek için bir yaklaşım sunmuştur. Cheung metodu, Cheung fonksiyonları olarak bilinen aşağıdaki matematiksel ifadeleri çalıştırmak için modifiye edilmiş termoiyonik emisyon modeline dayanmaktadır.

İdeal bir Schottky diyotun $I-V$ karakteristiklerinin TE teorisinden sapması idealite faktörü (n) denen boyutsuz bir sabit ile tanımlanır. Diyot seri direnci dahil edildiğinde akım

$$I = AA^* T^2 \exp \left(- \frac{e\Phi_b}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (42)$$

şeklinde yazılabilir. Logaritması alındıktan sonra denklem V 'ye göre düzenlendiğinde

$$V = \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) + n\Phi_b + IR_s \quad (43)$$

elde edilir. $\ln(I)$ 'ya göre denklemin türevi alındığında,

$$\frac{dV}{d\ln(I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (44)$$

elde edilir. Ayrıca yukarıdaki denklemde son iki terimi $H(I)$ olarak tanımlarsak

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s = V - \frac{(nkT)}{AA} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (45)$$

bağıntısını yazabiliriz.

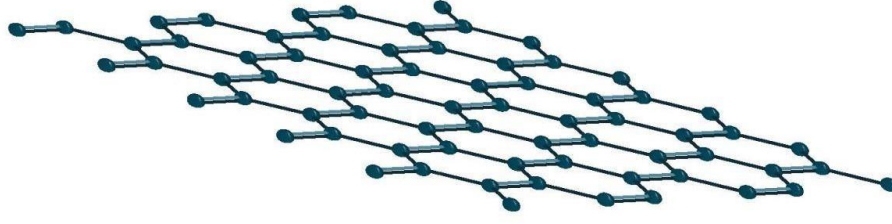
(44) ve (45) ile verilen denklemler Cheung fonksiyonları olarak adlandırılmaktadır (Cheung and Cheung 1986).

Denklem (44)'e göre, $dV/d\ln(I)$ değişimi, $\ln(I)$ - V karakteristiğinin aşağı doğru bükülen bölgesinde, doğrusal bir değişime sahiptir ve bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü değeri ve eğimden de diyotun seri direnç değeri belirlenebilir. Bu grafikten belirlenen idealite faktörü değeri denklem (43)'de yerine yazılarak aynı voltaj aralığından $H(I)$ fonksiyonu elde edilir. Denklem (45)'e göre $H(I)$ - I değişimi yine lineerdir ve doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği değeri, eğiminden ise seri direnç için ikinci bir değer elde edilebilir. Böylece, diyot seri direncinin iki değeri, bu yöntemlerin doğruluğunun bir ölçüsü olarak kullanılabilir.

İki Boyutlu Kristaller: Grafen ve Karbon Nanotüpler

Üç boyutlu elmas kristalleri oluşturan sp^3 ile hibritlenmiş karbon atomlarından farklı olarak, sp^2 ile hibritlenmiş karbon atomları iki boyutlu yapılar oluşturur. sp^2 karbon atomları, hidrojenle birleştirildiğinde iki boyutlu C_2H_4 molekülünü oluşturur. Bir C_2H_4 molekülündeki (Şekil 3 (c)) dört hidrojen atomu aynı sp^2 karbon atomlarıyla değiştirildiğinde ne olacağını düşünelim. Bir hidrojen atomunun bir sp^2 karbon atomu ile değiştirilmesi, bu atomun kararlı olabilmesi için C_2H_4 molekülündeki karbon atomlarına simetrik olarak iki ek sp^2 karbon atomuna bağlanması gerektiği anlamına gelir. Şekil 16'da gösterildiği gibi, bu gereksinim karbon atomlarının düzlemsel bağ numunesinin kopyalanmasına yol açarak bal peteği yapılı iki boyutlu bir kristal oluşturur. Bu iki boyutlu kristal, grafen olarak bilinir.

Grafen kavramı, özellikle gevşek bağlı paralel grafen tabakalarından oluşan grafitin özelliklerini açıklamak için uzun süredir kullanılmaktadır. Grafendeki komşu karbon atomları arasındaki mesafe 0,1421 nm'dir. Her katmandaki karbon atomları arasındaki σ bağları elmastakilerden daha güçlüdür ve karbon atomları arasındaki π bağları dağıtılmıştır (metalik bağa benzer şekilde) ve bu özellik grafitin iyi elektriksel iletkenliğinin sebebidir.



Şekil 16. Grafenin kristal yapısı: sp^2 hibritlenmiş karbon atomlarından oluşan iki boyutlu bir kristal (Dimitrijević 2012)

Her ne kadar tek katmanlı grafenin kararlı olamayacağına inanılsa da, son zamanlarda tek ve az sayıda grafen katmanından oluşan filmlerin başarılı bir şekilde pul pul dökülmesiyle bunun yanlış olduğu kanıtlanmıştır (Novoselov *et al.* 2004). Atomlardan yapılabilecek en ince malzeme olan bu grafen filmlerin, çok yüksek elektrik iletkenliği ve mekanik mukavemeti ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, filmin elektrik iletkenliğinin bir elektrik alanı uygulanarak modüle edilebileceği de gösterilmiştir. En önemli yarıiletken devre elemanlarının çalışmasını destekleyen bu alan etkisi, metallerdeki serbest elektronların bolluğu, elektrik alanını atom mesafelerine kadar perdelediğinden dolayı, üç boyutlu metallerde mümkün değildir. Grafen tabanlı ticari devre elemanları henüz mevcut olmasa da, malzemenin olağanüstü elektriksel ve mekanik özellikleri, çok yüksek elektriksel iletkenlik nedeniyle transistörler de dâhil olmak üzere birçok olası uygulamaya ilişkin kapsamlı araştırma faaliyetlerini ortaya çıkarmıştır.

Grafen tabakaları, karbon nanotüpleri olarak bilinen mikroskobik tüpleri oluşturmak üzere kendiliğinden yuvarlanabilirler. Şekil 17’de, bir karbon nanotüpünün kesilip açılması durumunda elde edilebilecek bir grafen tabakasını göstermektedir. a_1 ve a_2 vektörleri grafen örgü vektörleridir: kafesin her düğümü bir $na_1 + ma_2 \equiv (n, m)$ vektörü ile temsil edilebilir; burada n ve m tam sayılardır. Şekil 17’de gösterilen c_h vektörü, bir karbon nanotüpün çapını ve sarmallığını benzersiz bir şekilde belirler. Bu vektör, karbon nanotüpteki kristalografik olarak özdeş düğümleri birbirine bağlar; bu, bu örnekteki (0,0) ve (5,2) düğümlerinin, tüp sarıldığında aynı olduğu anlamına gelir.

Bir karbon nanotüpün sarmallığı, kafes vektörü a_1 ile yuvarlanma vektörü c_h arasındaki açıya bağlıdır. Kesikli çizgiler bu açı için iki uç değeri göstermektedir: $c_h = (n, 0)$ için 0° ve $c_h = (n, n)$ için 30° ’dir. Şekil 18’de gösterildiği gibi, $c_h = (n, 0)$ olduğunda karbon nanotüplere *zigzag*, $c_h = (n, n)$ olduğunda *koltuk* ve c_h ile a_1 arasındaki açı 0° ile 30° arasında olduğunda *kiral* denir.

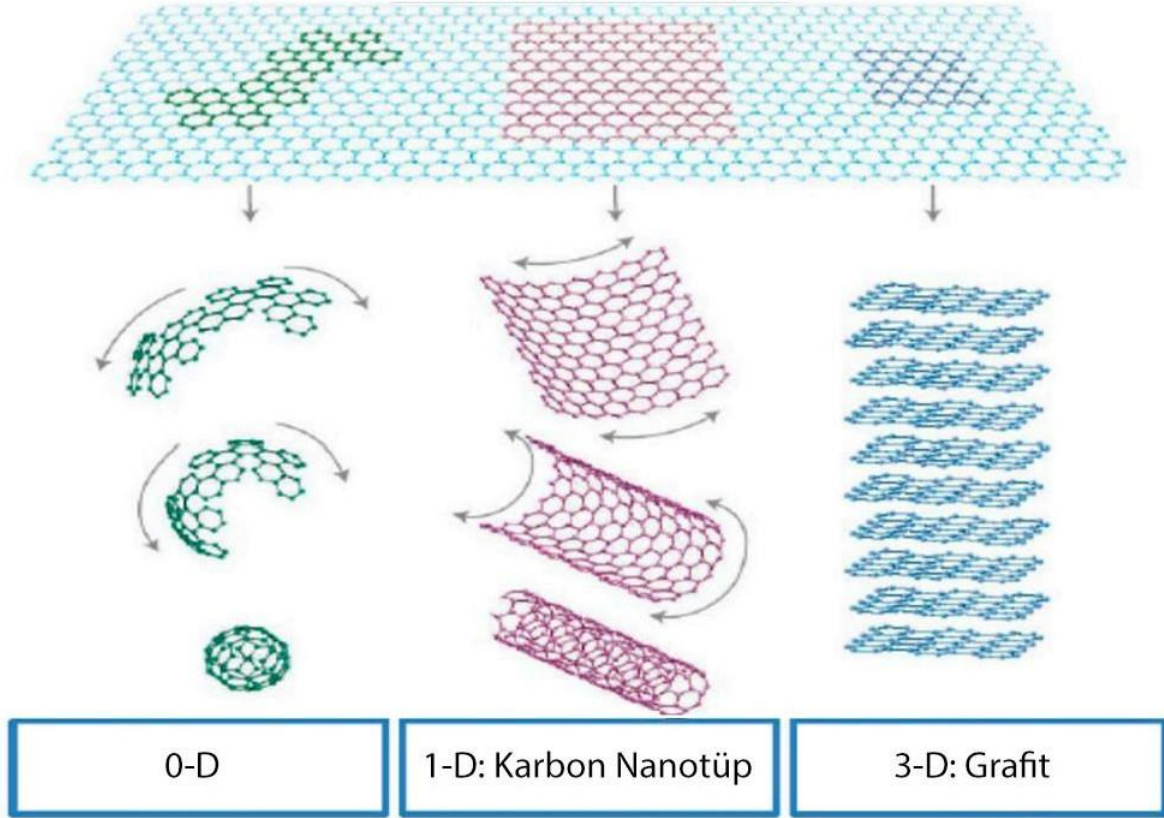
bağlı olarak metalik veya yarıiletken olarak görünebilirler. Bu durum olası uygulamalar açısından olumlu olsa da, henüz nanotüplerin büyümeleri sırasında helisitesini kontrol edecek bir yöntem olmadığından karbon nanotüplerin pratik kullanımı açısından da en büyük sorunu oluşturmaktadır (Dimitrijević 2012).

Grafen Oksit ve İndirgenmiş Grafen Oksit

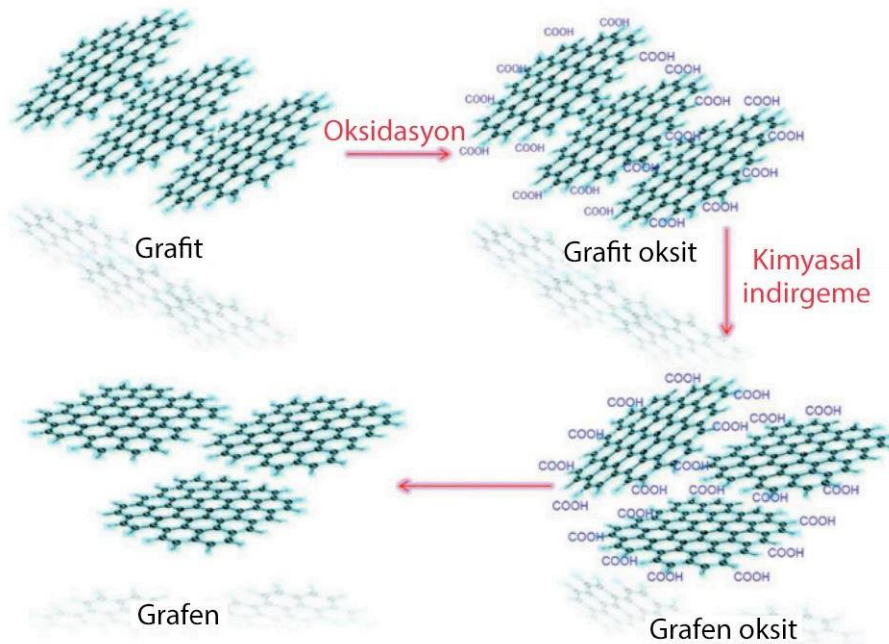
Yeni bir teknolojinin gerçekleştirilmesi çoğu zaman yeni malzemelerin desteklenmesini gerektirdiğinden malzemelerin bilim ve teknolojinin gelişmesinde önemli bir rol oynadığı iyi bilinmektedir. Bu nedenle mükemmel özelliklere sahip malzemeleri keşfetmek her zaman bilimsel araştırmaların önemli bir konusu olmuştur. Dikkate değer bir malzeme olan grafen, 2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Novoselov tarafından ilk kez grafitten arındırıldığından beri büyük ilgi görmüştür. Öne çıkan performansları sonucunda grafen, enerji depolama, biyosensör, optoelektronik, esnek elektronik, elektrokimyasal algılama, robotik, tekstil endüstrisi vb. gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir (Jalili *et al.* 2013, Huang *et al.* 2021). Grafenin keşfi, malzeme bilimi araştırmalarında yeni bir dönemin başlangıcı olmuştur (Chabot *et al.* 2014).

Tek bir karbon atomu kalınlığındaki grafen, bal peteği şeklinde bir örgüye sahiptir. Bu yapı çok sağlamdır ve Şekil 19'da gösterilen 0D, 1D, 3D gibi formlara dönüştürülebilir (Khan *et al.* 2016). Ayrıca olağanüstü şeffaftır ve yüksek kristalografik yapının yanı sıra olağanüstü elektronik özelliklere de sahiptir. Grafen pek çok mükemmel özelliğe sahip olmasına rağmen, grafende bant aralığı yoktur ve suda çözünürlüğü zayıftır, bu da grafenin bazı alanlarındaki uygulamasını büyük ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu sınırlamaların üstünden gelmenin ve grafenin uygulama alanını genişletmenin etkili bir yolu, grafen türevleri hazırlamaktır. Örneğin, grafitin güçlü oksidanlarla işlenmesi, grafit katmanlarının bazal planına epoksi grupları, hidroksil grupları ve karboksil grubu ekleyecek ve böylece GO üretilenektir. Bu polar oksijen içeren fonksiyonel gruplar GO'yu oldukça hidrofilik yapar. Bu, GO'nun birçok solventte, özellikle de suda mükemmel dağılılabirliğe sahip olmasını sağlar. Ek olarak, oksijen içeren fonksiyonel gruplar GO'nun kimyasal modifikasyonu veya işlevselleştirilmesi için reaktif alanlar sağlayabilir ve bu da GO tabanlı malzemeler geliştirmek için kullanılabilir (Razaq *et al.* 2022). Oksijen içeren gruplar grafenin bazı dezavantajlarını ortadan kaldırabilse de bazı sorunlara da neden olmaktadır. Örneğin bu gruplar GO'yu elektriksel olarak yalıtkan hale getirebiliyorlar. Bununla birlikte GO'nun kimyasal indirgenmesi iletkenliğini bir dereceye kadar eski haline getirebilir. Elde edilen RGO hala bazı fonksiyonel gruplar taşır, bu da RGO'nun birçok solventte iyi bir şekilde dağılmasına neden olur. En önemlisi, geri kalan fonksiyonel grupların sayısını kontrol ederek RGO'nun elektriksel performansını ve

çözünürlüğünü kontrol etmek nispeten kolaydır. Kimyasal olarak indirgenmiş bu grafenin özellikleri, yaklaşık olarak saf grafenin özelliklerine benzemektedir (Khan *et al.* 2016, Eda and Chhowalla 2010). Grafitin, grafit oksit, grafen oksit ve grafene dönüşümü Şekil 20'de gösterilmektedir.



Şekil 19. Grafenin çeşitli yapıları (Razaq *et al.* 2022)

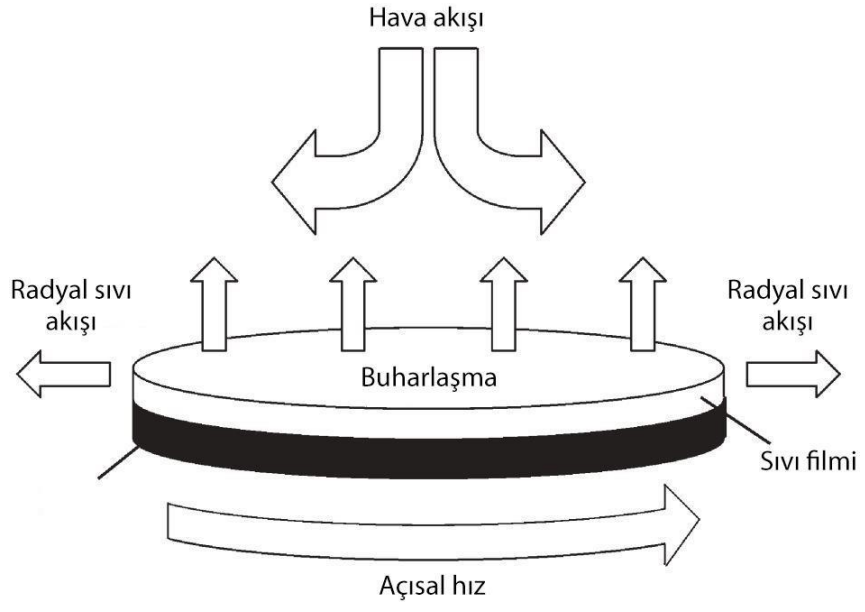


Şekil 20. Grafit oksidin GO ve grafene dönüşümünün şeması (Khan *et al.* 2016)

Grafen ve türevlerinin kendine özgü avantajları vardır ve bu malzemeler termal kimyasal buhar biriktirme (CVD), döndürerek kaplama, vakumlu filtreleme, termal ayrışma, çözelti dağılım tekniği ve kimyasal ayrışma gibi farklı teknikler uygulanarak birçok alanda kullanılabilirler (Eda and Chhowalla 2010, Choi *et al.* 2010, Liu *et al.* 2018).

Döndürerek Kaplama (Spin Coating) Tekniği

Çeşitli malzemeleri ince film halinde üretmek ve incelemek için çok sayıda kimyasal teknik geliştirilmiştir. Bu tekniklerin içerisinde yaygın olarak kullanılanlardan biri de döndürerek kaplama tekniğidir. Hem ekonomik hem de karmaşık olmayan döndürerek kaplama tekniği, birçok endüstriyel proseste, özellikle mikroelektronik endüstrisinde, yarıiletken levhalar (wafer) üzerine homojen bir ince film uygulamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Laboratuvar ölçekli döndürerek kapama işleminin şeması aşağıda Şekil 21’de gösterilmiştir. Bu sistemde öncelikle elde edilecek ince film malzemesi çözelti olarak hazırlanır ve çözeltilerden alınan damla döndürerek kaplama sistemi diski üzerine yerleştirilen bir altlığın merkezine damlatılır. Sonra diskle birlikte altlığın yüksek dönme hızlarında döndürülmesi sağlanır. Döndürme işlemiyle, çözelti/altlık arayüzündeki yapışma kuvvetleri ve dönen sıvıya etki eden merkezkaç kuvvetleri, çözeltinin güçlü bir şekilde parçalanmasına neden olur ve bu da çözeltinin çoğunun diskten hızla dışarı atıldığı radyal bir akışa neden olur. Çözelti içerisindeki çözücü bileşen uçucu olduğundan, çözücünün buharlaşmasıyla film viskozitesinde dramatik bir artışa bağlı olarak altlık yüzeyinde ultra ince bir film tabakası üretilir. Bu adımları bazen kalan çözücüğü uzaklaştırmak için tavlama takip eder. Bu yöntemle üretilen ince filmlerin kalınlığı ve morfolojisini etkileyen döndürme hızı, döndürme süresi, altlık sıcaklığı, nem, malzeme çözünürlüğü, moleküler ağırlık, çözücü uçuculuğu ve çözelti viskozitesi gibi birçok faktör vardır. Mesela filmin kalınlığı dönüş hızının azalmasıyla artar veya çözeltinin viskozitesinin azalmasıyla azalır. Diğer taraftan dönme süresindeki artış, yüzeyde daha görünür gözeneklere sahip daha ince bir film üretme potansiyeline sahiptir. Fazlalık çözelti merkezkaç kuvvetleri tarafından yüzeyden uzaklaştırıldığı için, altlığa uygulanan çözelti miktarı genellikle film kalınlığını ekilemez.



Şekil 21. Döndürerek kaplama işleminin şeması (Norrman *et al.* 2005)

MATERYAL ve YÖNTEM

Kovalent Türevlendirilmiş İndirgenmiş Grafen Oksitlerin Sentezi

İndirgenmiş grafen oksitin kovalent fonksiyonallizasyonu için öncelikle RGO ve aril diazonyum (benzendiazonyum tetrafloroborat ve 4-metilbenzendiazonyum tetrafloroborat) tuzlarının sentezi gerçekleştirildi.

İndirgenmiş Grafen Oksit Sentezi

RGO, iki basamaklı bir sentez yöntemi kullanılarak hazırlandı.

Grafen oksit sentezi

GO modifiye Hummers metodu kullanılarak doğal grafitten sentezlendi (Hummers ve Offeman, 1958). Öncelikle grafit (3 g), P_2O_5 (2.5 g) ve $K_2S_2O_8$ (2.5 g) içeren konsantre H_2SO_4 (12,5 mL) çözeltisine ilave edildi ve karışım 80 °C’de 6 saat karıştırıldı. Karışım oda sıcaklığına soğutulduktan sonra 0,5 L distile su ile seyreltilti. Gece boyu oda sıcaklığında bekletildikten sonra, dispersiyon süzüldü ve distile su ile yıkandı. Daha sonra ürün oda sıcaklığında kurumaya bırakıldı. Böylece grafitin ön oksidasyon işlemi gerçekleştirildi. Başlangıç oksidasyon adımından sonra, buz banyosunda ön okside edilmiş grafit (3 g) üzerine konsantre H_2SO_4 (115 mL) ilave edildi ve homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırıldı. Daha sonra karışıma, $KMnO_4$ (15 g) yavaş yavaş ilave edildi ve karışım 35 °C’de 2 saat karıştırıldı. Reaksiyon 2 saat karıştırıldıktan sonra, H_2O_2 (12,5 mL, %30) ve su (750 mL) ilavesi ile sonlandırıldı. GO, distile su ve HCl (40,5 mL, %37) ile yıkayıp, oda sıcaklığında kurutma işleminden sonra elde edildi.

İndirgenmiş grafen oksit sentezi

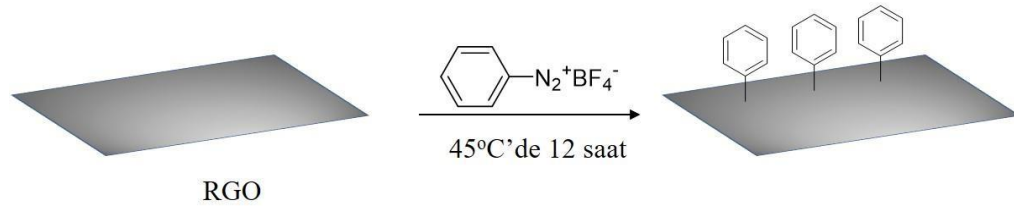
RGO solvotermal redüksiyon metodu ile sentezlenmiştir (Ai *et al.* 2011). Öncelikle, GO, 1 mg/ml konsantrasyon elde edilecek şekilde dimetilformamid (DMF) içerisinde ultrasonik banyoda homojen bir süspansiyon sağlanıncaya kadar sonike edildi. Daha sonra homojen karışım 150 °C’de 6 saat reflüks edildi. RGO, ürünün süzme, distile su ile birkaç kez yıkama ve 60 °C’de kurutma işleminden sonra elde edildi.

Aril Diazonyum (Benzendiazonyum Tetrafloroborat ve 4 Metilbenzendiazonyum Tetrafloroborat) Tuzlarının Sentezi

Benzendiazonyum tetrafloroborat ve 4-metilbenzendiazonyum tetrafloroborat tuzlarının sentezi, sırasıyla anilin ve 4-metilanilin, çıkış molekülleri (0.01 mol) buz banyosunda 10 mL HBF_4 (%48) içerisinde çözüldü. Daha sonra, her bir çözelti ortamına buz banyosunda soğutulmuş NaNO_2 'in su (4 mL) içerisindeki çözeltisi yavaş yavaş ilave edildi ve karışımlar 30 dakika buz banyosunda azot atmosferi altında karıştırıldı. Reaksiyon ürünleri süzildükten sonra, her bir katı sırasıyla buzlu su, etanol ve eter ile yıkandı. Katı ürünler oda sıcaklığında kurutuldu ve 4 °C'de desikatör içerisinde muhafaza edildi.

Kovalent Fonksiyonalize İndirgenmiş Grafen Oksitlerin Sentezi

25 mg RGO (1mg/1mL sulu çözeltisi), ultrasonik banyoda homojen bir çözelti elde edilinceye kadar karıştırıldı. Daha sonra bu homojen karışıma, 5 mg benzendiazonyum tetrafloroborat ve 4-metilbenzendiazonyum tetrafloroborat diazonyum tuzları ilave edildi. Reaksiyon karışımı 45 °C'de 12 saat karıştırıldı (Strano *et al.* 2011) (Şekil 22). Reaksiyon oda sıcaklığına soğutulduktan sonra her bir ürün ultra saf su ve etanol ile yıkandı. Siyah katı ürünler oda sıcaklığında 12 saat kurumaya bırakıldı.



Şekil 22. RGO'nun, benzendiazonyum tetrafloroborat ve 4-metilbenzendiazonyum tetrafloroborat tuzları ile kovalent fonksiyonizasyonunun şematik gösterimi

n-InP Yarıiletkeninin Kimyasal Olarak Temizlenmesi

Yapılan bu çalışmada *n-tipi*, kalınlığı 400 nm ve (100) yönelimli InP yarıiletkeni kullanılmıştır. Yarıiletken yüzeyindeki organik ve inorganik kirleri uzaklaştırmak için aşağıda listelenen kimyasal temizleme işlemi uygulanmıştır (Çakıcı 2014);

- ✓ 3 dakika trikloretilende ultrasonik olarak yıkandı.
- ✓ 3 dakika asetonda ultrasonik olarak yıkandı.
- ✓ 3 dakika metanolde ultrasonik olarak yıkandı.
- ✓ Deiyonize su kullanılarak iyice yıkandı.
- ✓ 1 dakika ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$; 5:1:1) çözelti içerisinde yıkandı.
- ✓ 1 dakika seyreltik HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$; 10:1) içerisinde yıkandı.
- ✓ Deiyonize su kullanılarak iyice yıkandı.

- ✓ 15-20 dakika deiyonize su kullanılarak yıkandı ve son olarak azot gazı kullanılarak iyice kurutuldu.

Au-Ge/n-InP Omik Kontakların Yapılması

n-InP yarıiletkenine omik kontak Au-Ge (%88-%12) alaşımı kullanılarak yapıldı. Au-Ge alaşımı laboratuvar şartlarında ağırlıkça %88 Au ve %12 Ge metali kullanılarak vakum ortamında hazırlandı. Buharlaştırma işleminde kullanılacak molibden ısıtıcı cihaza yerleştirilmeden önce kimyasal olarak temizlendi ve azot gazıyla iyice kurutulduktan sonra hemen kaplama ünitesi içerisine yerleştirildi. Kimyasal olarak temizlenen ve azot gazıyla kurutulan Au-Ge alaşımının uygun bir miktarı molibden ısıtıcı üzerine yerleştirildi. Kimyasal olarak temizlenen n-InP yarıiletkeni uygun yükseklikte kaplama ünitesi içerisine yerleştirildikten sonra ortam vakuma alındı. Vakum odasındaki basınç 10^{-7} Torr olduğunda ısıtıcıya yavaşça akım verilerek önce Au-Ge alaşımı eritildi ve sonra buharlaştırılması sağlanarak n-InP yarıiletkenin yüzeyinde Au-Ge ince film oluşturuldu. Omik kontak elde etme işleminin ikinci aşaması için tavlama fırını 425°C 'ye set edildi. Tavlama işlemleri esnasında yarıiletkenin içerisine konulacağı kuvars pota kimyasal olarak temizlendikten sonra azot gazıyla kurutuldu ve tavlama fırınının girişine yerleştirildi. Vakum odasından alınan Au-Ge/n-InP numunesi kuars pota içerisine yerleştirildi, fırının orta bölmesine itildi ve 3 dakika bekletildi. Bu işlem esnasında fırından azot gazı geçirildi. Fırından kademeli olarak çıkarılan kuvars pota içerisindeki numunenin soğuması beklendi ve böylece omik kontak elde etme işlemleri tamamlanmış oldu. Omik kontak elde etme işlemlerinde kullanılan termal buharlaştırma sistemi Şekil 23'de, tavlama işleminde kullanılan fırın Şekil 24'de gösterilmiştir.



Şekil 23. Termal kaplama ünitesi



Şekil 24. Tek bölmeli tavlama fırını

RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ Nanokompozitlerin n-InP Altlıklar Üzerine Büyütülmesi

Au-Ge alaşımı ile omik kontağı yapılan n-InP yarıiletkeni yaklaşık 0,5x0,5 cm boyutlarında kesilerek üç parçaya bölündü. Daha önce hazırlanan RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ çözeltisi sırayla döndürerek kaplama cihazının diski üzerine yerleştirilen n-InP altlıklar üzerine damlatıldı ve disk 1000 rpm'de 3 dakika döndürülerek numune yüzeyleri, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ nanokompozit malzemelerin ince filmleriyle kaplandı. Bu işlem her bir numune için ayrı ayrı uygulandı. Film malzemeleri içerisindeki çözücü maddelerin tamamen uzaklaşması ve filmlerin kalitesinin yükseltilmesi için, film kaplı üç numune etüv içerisine yerleştirilerek 100 °C'de 10 dakika tavlandı. Böylece n-InP yarıiletken altlıklar üzerinde RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ nanokompozit ince filmlerin üretilme işlemi tamamlandı.

Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge Yapıların Elde Edilmesi ve Elektriksel Karakterizasyonları

RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ nanokompozit malzemelerin karakterizasyonları yapıldıktan ve n-InP yarıiletken altlıklar üzerinde döndürerek kaplama tekniği ile ince film haline getirildikten sonra, eklem alanını belirlemek ve elektriksel ölçümleri gerçekleştirmek için, filmlerin üzerine 1 mm çaplı dairesel delikli maskeler kullanılarak termal buharlaştırma sisteminde 10^{-7} Torr vakumda altın metali buharlaştırıldı. Böylece kontak alanı $7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ olarak belirlenen Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge yapılarının üretimi tamamlandı. RGO'nun iş fonksiyonuyla karşılaştırıldığında altın metalinin iş fonksiyonu daha düşük olduğundan, Au/RGO, Au/RGO-Aryl ve Au/RGO-Aryl-CH₃ eklemler düşük dirençli omik karaktere sahipken, RGO/n-InP, RGO-Aryl/n-InP ve RGO-Aryl-CH₃ /n-InP eklemler doğrultucu karaktere sahiptir. Üretilen yapıların *I-V* ölçümleri Keithley 487 pikoampermetre-voltaj kaynağı cihazı ile Leybold Heraeus He kriyostat içerisinde ve karanlıkta 20 K adımlarla 100-320 K sıcaklık aralığında ölçüldü ve karakteristik eklem parametreleri farklı metodlar yardımıyla numune sıcaklığına bağlı olarak belirlendi.

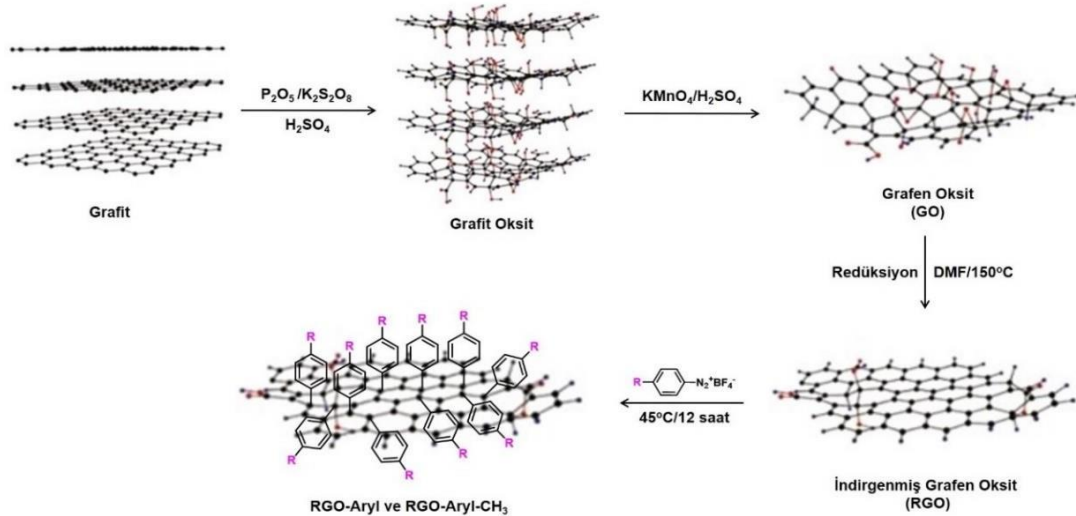
ARAŞTIRMA BULGULARI

Giriş

Bu bölümde sentezlenen GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ numunelerinin XRD, Raman ve XPS analizleri ile Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge yapılarının elektriksel karakteristiklerinin numune sıcaklığına bağlı olarak değerlendirilmesi yer almaktadır.

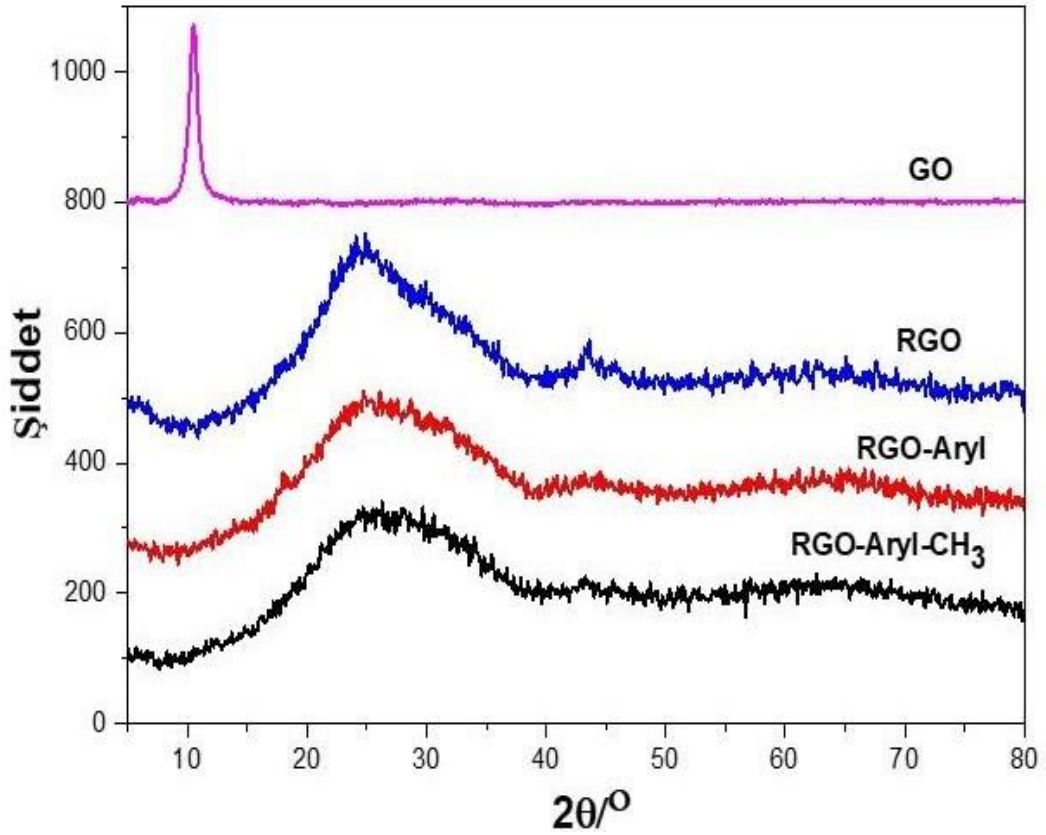
Grafen Oksit, İndirgenmiş Grafen Oksit ve Kovalent Fonksiyonalize İndirgenmiş Grafen Oksit (RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃) Karakterizasyonu

Aril diazonyum tuzlarının (benzendiazonyum tetrafloroborat ve 4-metilbenzendiazonyum tetrafloroborat) RGO yüzeyine kovalent bağlanmasına yönelik prosedür Şekil 25'de sunulmuştur. Buna göre üç aşamalı süreç; *i*- modifiye Hummers yöntemiyle GO'nun hazırlanması, *ii*- GO'nun DMF ortamında reflux edilmesi sonucunda indirgenmesi ve *iii*- benzendiazonyum tetrafloroborat ve 4-metilbenzendiazonyum tetrafloroborat diazonyum tuzlarının RGO yüzeyine kovalent bağlanmasını içerir (Zhao *et al.* 2014). Bu durumda, RGO tabakaları oldukça hidrofobiktir ve grafen tabakaları arasındaki Van der Waals etkileşimi önemli bir aglomerasyona yol açmaktadır. Ayrıca, aril diazonyum tuzu ile reaksiyon için sp² karbon alanlarının boyutunu artırarak fonksiyonizasyonu mümkün kılmak için oksijen işlevselliğinin çoğunluğunun çıkarılması esastır. Sentezlenen RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ ürünlerinin kovalent fonksiyonizasyonu XRD, Raman spektroskopisi ve XPS yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 25. RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃'ün sentez prosedürünün şematik gösterimi

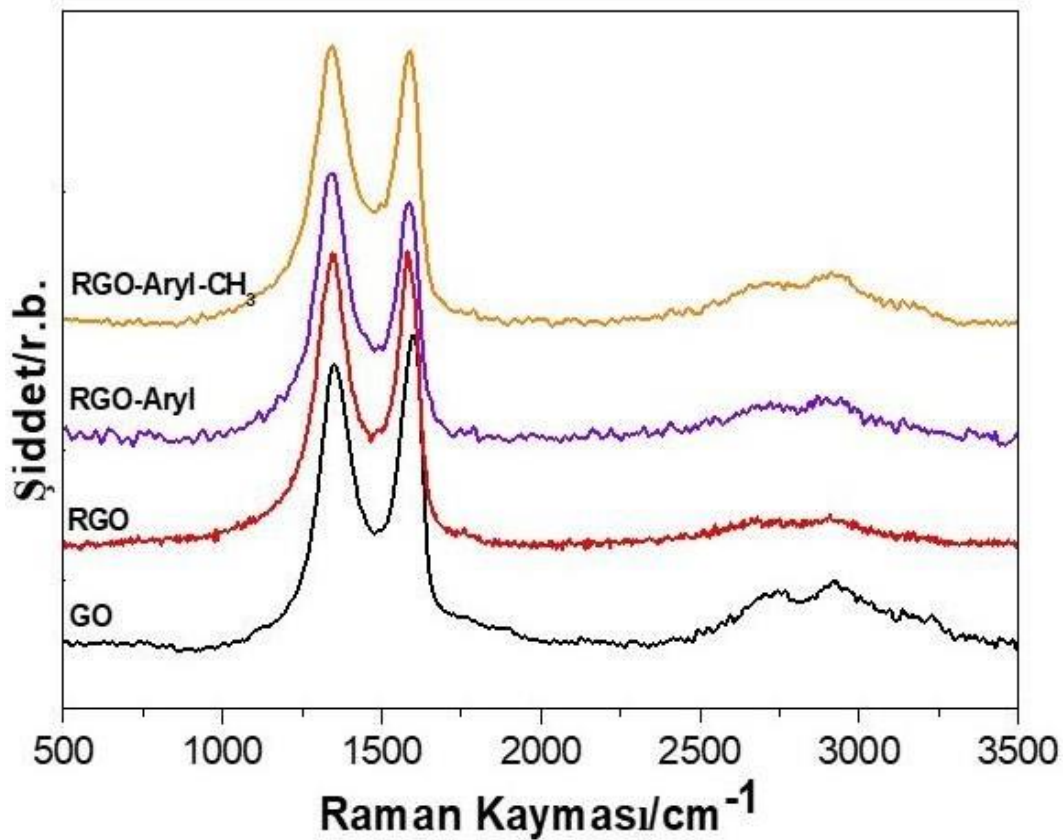
Hazırlanan grafen türevlerinin katmanlar arası aralıkları ve organizasyonu hakkında bilgi elde etmek amacıyla XRD ölçümleri yapılmıştır. Şekil 26'da görüldüğü gibi, GO, 0,84 nm'lik (d_{002}) tabakalar arası mesafe ile (002) kafes düzlemine atfedilen $2\theta=10,5^\circ$ 'deki karakteristik kırınım pikini sergilemektedir. GO'nun indirgenmesinden sonra elde edilen RGO'nun (002) kırınım piki, ara katman oksijen fonksiyonel gruplarının çıkarılmasıyla iyi istiflenmiş grafen tabakalarının oluşması nedeniyle daha yüksek açığa ($2\theta =24,7^\circ$ ve $d_{002}=0,360$ nm) doğru kaymıştır. Benzen türevlerinin RGO yüzeyine kovalent bağlanmasından sonra, (002) kırınım pikleri RGO/Aryl ($2\theta =25,4^\circ$) ve RGO/Aryl-CH₃ ($2\theta =25,6^\circ$) yaklaşık aynı açı konumunda gözlenmiştir.



Şekil 26. Sentezlenen (GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃) numunelerin XRD spektrumları

Şekil 27, GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃'ün Raman spektrumlarını göstermektedir. Tüm numunelerin Raman spektrumları, D ve G bantlarına karşılık gelen 1200-1600 cm⁻¹ arasında iki belirgin pik ve 2D bantlarına karşılık gelen 2500-3500 cm⁻¹ aralığında geniş bir bant sergilemektedir. D bandı sp³-hibritleşmiş karbonların titreşimleriyle ilgilidir. Buna karşılık G bandı, grafen tabakalarındaki E_{2g} titreşim modunun birinci dereceden saçılımına atfedilebilir (Ferrari *et al.* 2000). Grafit yapının kalitesini değerlendirmek için Raman yoğunluk oranı (I_D/I_G) kullanılır. GO'nun Raman spektrumu 1353 ve 1592 cm⁻¹'de D ve G bantlarını göstermektedir ve ayrıca GO için I_D/I_G oranı 0,90'dır. RGO'nun I_D/I_G oranı

(0,99) GO'dan daha yüksektir. Bu durum indirgeme işleminden sonra RGO yapısındaki kusurların arttığını ortaya koymaktadır (Kudas *et al.* 2018). Ayrıca, RGO için G bandı 14 cm^{-1} aşağı alana kaymıştır (1597 'den 1583 cm^{-1} 'e). Bu durum, termal indirgeme sırasında oksijen içeren fonksiyonel grupların eliminasyonu ile grafen parçacıklarının sayısının arttığını göstermektedir (Stankovich *et al.* 2007). Tablo 6'dan da görüldüğü gibi, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ örnekleri için diazonyum fonksiyonelleştirmesi sonrasında I_D/I_G oranlarında büyük bir değişiklik gözlenmemiştir.



Şekil 27. Sentezlenen (GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃) numunelerin Raman spektrumları

Tablo 6. Sentezlenen Numunelerin Raman Pozisyonları (cm^{-1}), D ve G Bantlarının Şiddet Oranları (I_D/I_G)

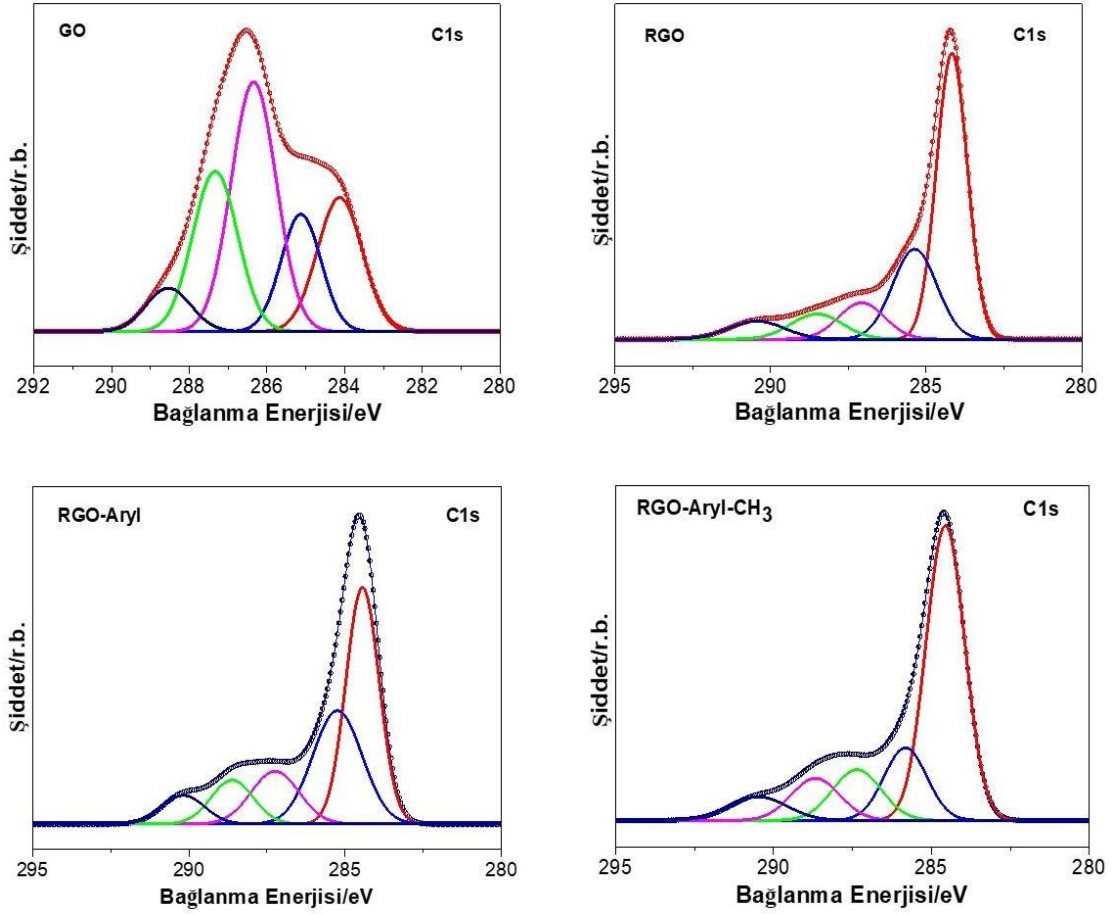
Numune	D bandı (cm^{-1})	G bandı (cm^{-1})	I_D/I_G
GO	1354	1597	0,90
RGO	1347	1583	0,99
RGO/Aryl	1340	1583	1,07
RGO-Aryl-CH ₃	1343	1586	1,01

GO'nun indirgenmesi ve RGO'nun diazonyum tuzları kullanılarak benzen halkaları ile kovalent fonksiyonizasyonu, XPS ölçümleriyle de araştırılmıştır. Şekil 28, GO, RGO, RGO-

Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ numuneleri için fit edilmiş dar alan C1s XPS spektrumlarını göstermektedir. GO'nun ayrıştırılmış C1s XPS spektrumu 284,1, 285,1, 286,3, 287,3 ve 288,5 eV'da beş farklı bileşenin varlığını göstermektedir. 284,1 eV'daki pik, sp²-hibritleşmiş karbonun C1s sinyaline atfedilirken, 285,1 eV'daki ikinci pik kusurların varlığına işaret eden sp³-hibritleşmiş karbon atomlarını göstermektedir (Fan *et al.* 2011). Buna karşılık, 286,3, 287,3 ve 288,5 eV'daki pikler hidroksil (-C-OH), keton (-C=O) ve karboksil (-COOH) karbonlarına karşılık gelmektedir. RGO'nun C1s spektrumu, 286,3, 287,3 ve 288,5 eV'deki piklerin yoğunluklarında önemli bir azalma göstermektedir; bu durum, oksijen içeren -C-OH ve -C=O fonksiyonel grupların DMF reflüks ile giderildiğini göstermektedir (Blyth *et al.* 2000). Öte yandan, 284,1 eV'deki sp² karbon bileşeni, grafendeki sp² konjuge ağ yapısının büyük oran restorasyonu nedeniyle RGO'nun C1s spektrumunda belirgin bir şekilde artmaktadır. Tablo 7'den de görüldüğü gibi fonksiyonelleştirilmiş RGO numuneleri (RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃), RGO'nun spektrumuna benzer şekilde pikler sergilemiştir.

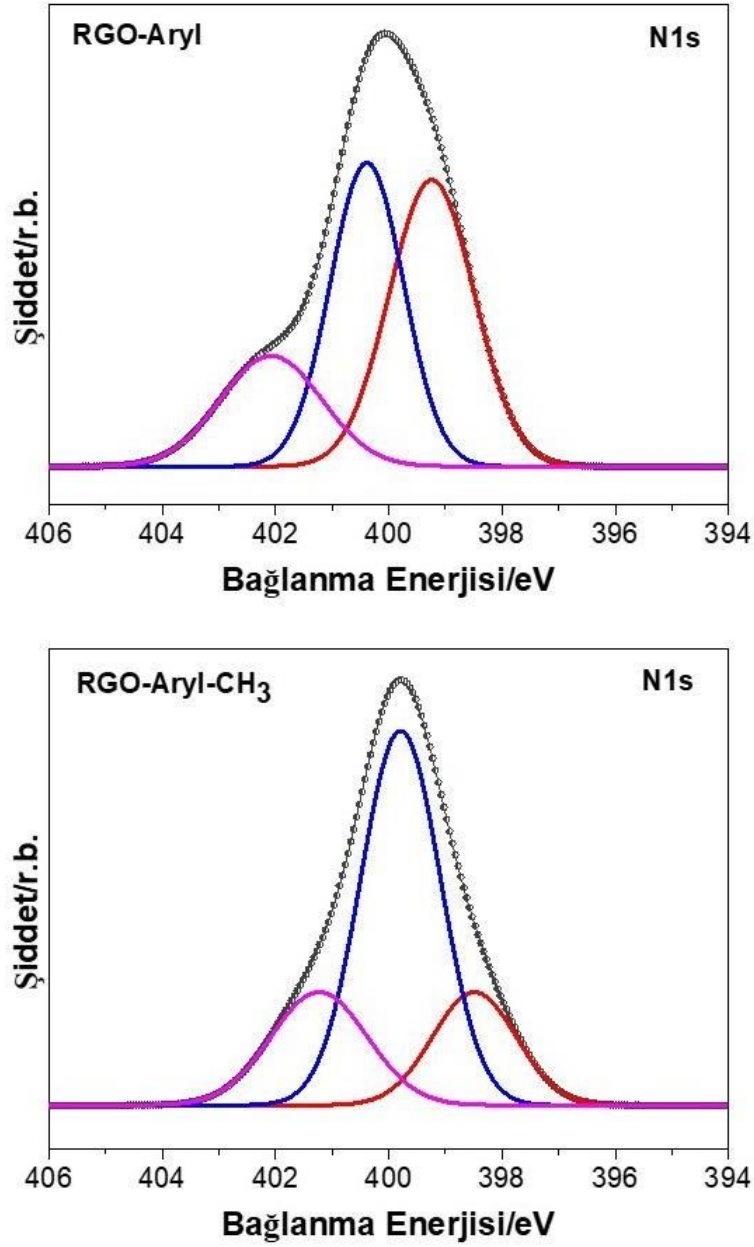
Tablo 7. C1s Spektrumundan Elde Edilen XPS Analiz Parametreleri

C1s						
Numune		sp ² C	sp ³ C	-C-O-	-C=O	-COO-
RGO-Aryl	Pik merkezi (eV)	284,40	285,20	287,20	288,60	290,10
	FWHM	1,25	1,85	1,80	1,59	1,59
	Atomik %	41,30	29,30	13,30	9,70	6,40
RGO-Aryl-CH ₃	Pik merkezi (eV)	284,50	285,80	287,30	288,60	290,40
	FWHM	1,44	1,58	1,81	1,81	2,13
	Atomik %	56,00	15,20	12,10	10,10	6,60



Şekil 28. GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ karbon numunelerin C1s bölge XPS spektrumları

RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ karbon numunelerin N1s bölge XPS spektrumları Şekil 29’da sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, N1s bölgesi için, 394 ile 408 eV arasında ortaya çıkan geniş pik noktaları, diazonyum fonksiyonalize RGO numunelerinin doğasıyla ilişkili olarak üç pik noktasına iyi bir şekilde ayrıştırılabilir. Her durumda, 398 ve 400 eV’lik ortalama bağlanma enerjilerindeki pikler, indirgenmiş nitrojen türlerinden ve azo köprülerinden kaynaklanmaktadır (Yu *et al.* 2007).



Şekil 29. RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ karbon numunelerin N1s bölge XPS spektrumları

Au/RGO/n-InP/Au-Ge Numunesinin Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi

Diyot temel parametreleri olan engel yüksekliği, idealite faktörü ve doyma akımı değerleri, TE metodu kullanılarak numune sıcaklığına bağlı çizilen I - V karakteristikleri kullanılarak elde edilebilmektedir. TE metodu diyot üzerine düşen gerilim ve akım arasındaki ilişkiyi

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (46)$$

denklemini ifade etmektedir (Rhoderick and Williams 1988). Burada n ile idealite faktörü ve I_0 ile doyma akımı ifade edilmektedir. Doğru beslem durumunda $eV \gg 3kT$ olduğu durumda denkleminde bulunan 1 değeri ihmal edilebilir. Bu durum göz önüne alınarak denklem (46)

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) \right] \quad (47)$$

şeklinde yeniden ifade edilebilir. Burada (47)'de verilen denklemin her iki tarafının tabii logaritması alınarak V 'ye göre türevi alındığında, idealite faktörü

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (48)$$

bağıntısından bulunabilir. TE metoduna göre I_0 doyma akımı,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_b}{kT} \right) \quad (49)$$

ifadesi ile verilmektedir. Verilen ifadede A^* , Richardson sabiti (n-InP için $A^* = 9,4 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$) A , diyetun etkin alanı ($A = 7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) k , Boltzmann sabiti ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) ve T , Kelvin cinsinden ortamın sıcaklığıdır. Denklem (49)'un her iki tarafının da tabii logaritması alınarak Φ_b 'ye göre düzenlenirse,

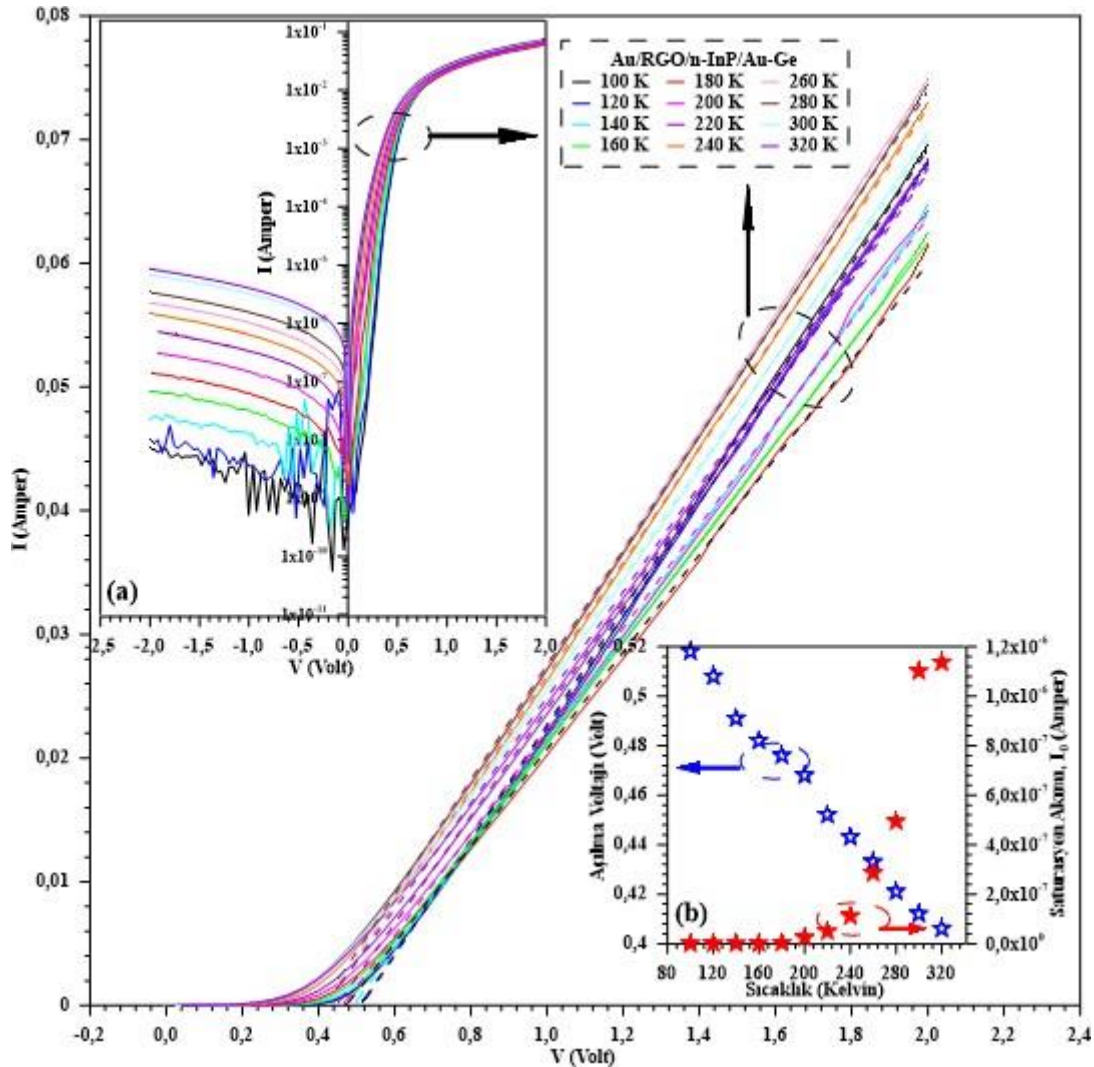
$$e\Phi_b = kT \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (50)$$

şeklinde engel yüksekliğini ifade eden denklem elde edilir.

Solvothermal redüksiyon metodu ile sentezlenerek Au-Ge omik kontaklı n-InP yarıiletkeni üzerine spin kaplama metodu kullanılarak büyütülen RGO arayüzey tabakalı Au/RGO/n-InP/Au-Ge diyetunun I - V ölçümleri, Keithley 487 pikoampermetre-voltaj kaynağı cihazı ile Leybold Heraeus He kriyostat içerisinde ve karanlıkta 20 K adımlarla 100-320 K sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Sıcaklığa bağlı çizilen doğru beslem I - V karakteristikleri Şekil 30' da doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V grafikleri bu şeklin içerisinde (a)'da ve açılma voltajı- I_0 - T değişimleri de yine şeklin içerisinde (b)'de verilmiştir. I - V grafiğinin doğrusal bölgesine yapılan lineer fitin yatay ekseni kestiği noktadan açılma (Turn-on) voltajının değeri her bir sıcaklık için belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Açılma voltajının 0,518-0,406 V aralığında değerler aldığı görülmüştür. Denklem (48)'den ve Şekil 30 (a)'daki $\ln(I)$ - V grafiklerinin doğrusal bölgelerinin eğimlerinden yararlanarak n değerleri numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanmıştır. Tablo 8'den de görüldüğü gibi, hesaplanan n değerlerinin 100-320 K sıcaklık aralığında 3,176'dan 1,552'ye değiştiği gözlenmiştir.

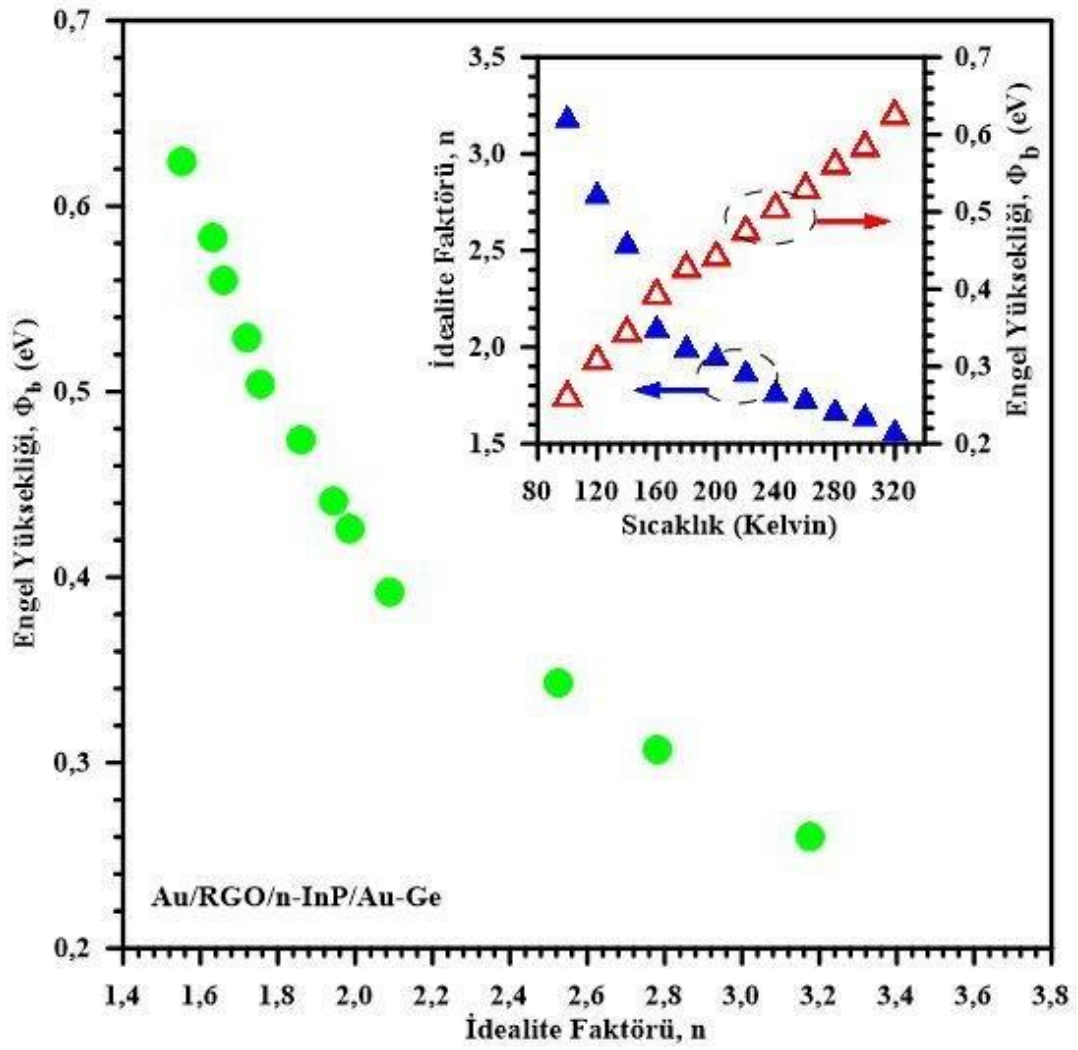
Yine Şekil 30 (a)'daki doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiklerinin doğrusal bölgelerine yapılan fitlerin düşey ekseni kestiği noktalardan sıcaklığa bağlı I_0 değerleri belirlenmiştir ve bu değerler denklem (50)'de kullanılarak Φ_b değerleri 100 K için 0,260 eV ve 320 K için 0,624 eV olarak hesaplanmıştır. Numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan I_0 ve Φ_b değerleride Tablo 8'de sunulmuştur. Aynı zamanda Şekil 30 (a)'da verilen grafikler üretilen diyetun iyi

derecede doğrultma karakteristiğine sahip olduğunu göstermiştir. Deneysel olarak belirlenen açılma voltajı değerleri ile saturasyon akımı değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri Şekil 30 (b)'de görülmektedir. Bu grafik artan numune sıcaklığı ile açılma voltajının hemen hemen lineer azaldığını saturasyon akımının ise hızla arttığını göstermektedir.



Şekil 30. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı doğru beslem I - V karakteristikleri (Şeklin içerisinde (a) Doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V - T karakteristikleri ve (b) Açılma voltajı- I_0 - T değişimleri gösterilmiştir)

Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden hesaplanan n ve Φ_b değerleri arasındaki ilişki Şekil 31'de, n ve Φ_b 'nin numune sıcaklığına bağlı değişimi de bu şeklin içerisinde gösterilmiştir. Bu grafikten artan idealite faktörü değerlerine karşılık gelen engel yüksekliği değerlerinin azaldığı (hemen hemen lineer), artan numune sıcaklığıyla idealite faktörünün azaldığı ve engel yüksekliğinin ise arttığı (hemen hemen lineer) tespit edilmiştir. n , Φ_b ve T arasındaki bu ilişki Schottky engel yüksekliğinin, arayüzey tabakasının ve arayüzey yüksekliklerinin homojen olmamasına atfedilmiştir (Cimilli *et al.* 2009; Orhan *et al.* 2021; Çatır and Sağlam 2021; Çaldıran *et al.* 2014).



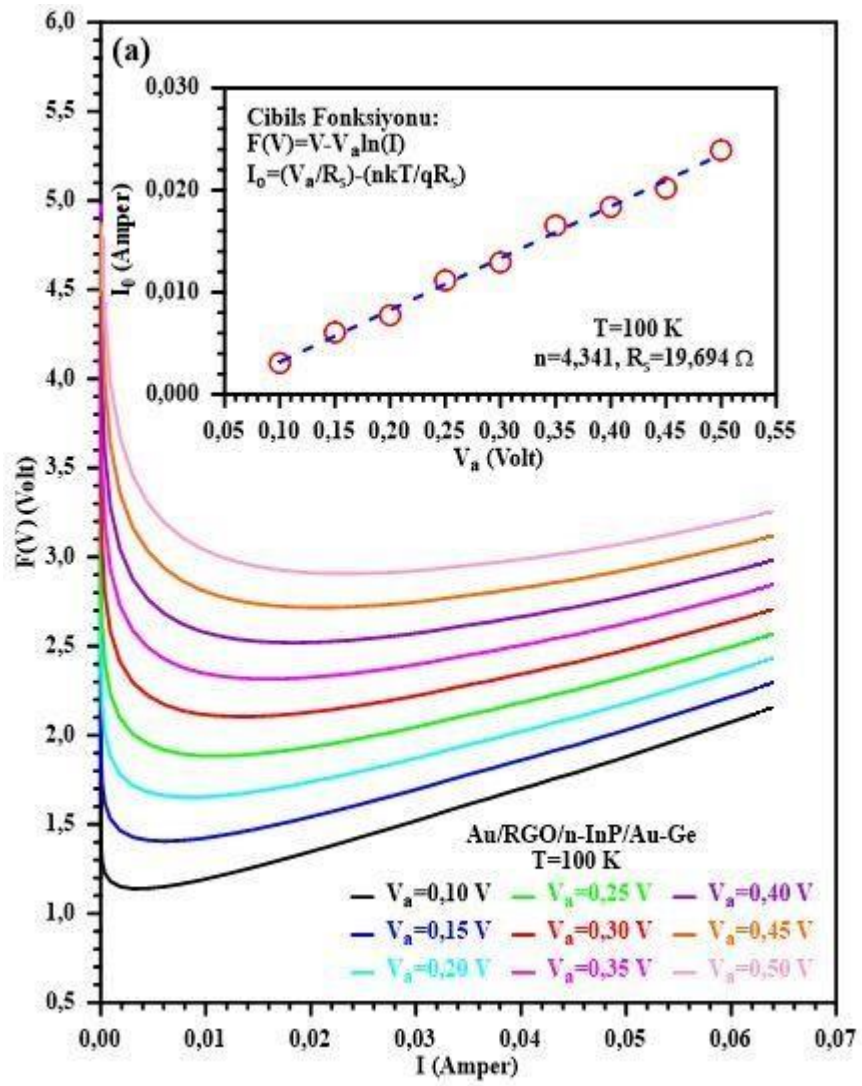
Şekil 31. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden elde edilen n - Φ_b değişimleri (n - Φ_b - T değişimleri şeklin içerisinde gösterilmiştir)

MY Schottky kontaklarda, engel parametrelerinin belirlenmesinde dikkate alınması gereken parametrelerden birisi de seri dirençtir. Yarıiletkenin bir yüzeyine yapılan omik kontak ile deplasyon bölgesi arasında kalan nötral bölgenin diyotun akımına karşı göstermiş olduğu direnç, seri direnç olarak adlandırılır ve R_s ile gösterilir. Bu parametre diyot karakteristiklerini etkileyen önemli bir parametredir. Doğru beslem durumunda akımı sınırlayıcı etkiye sahip olan seri direnç, yüksek gerilim değerlerinde $\ln(I)$ - V karakteristiklerinin aşağı doğru bükülmesine yani doğrusal bölgenin azalmasına sebep olan faktörlerden birisidir (Odabaş 2020).

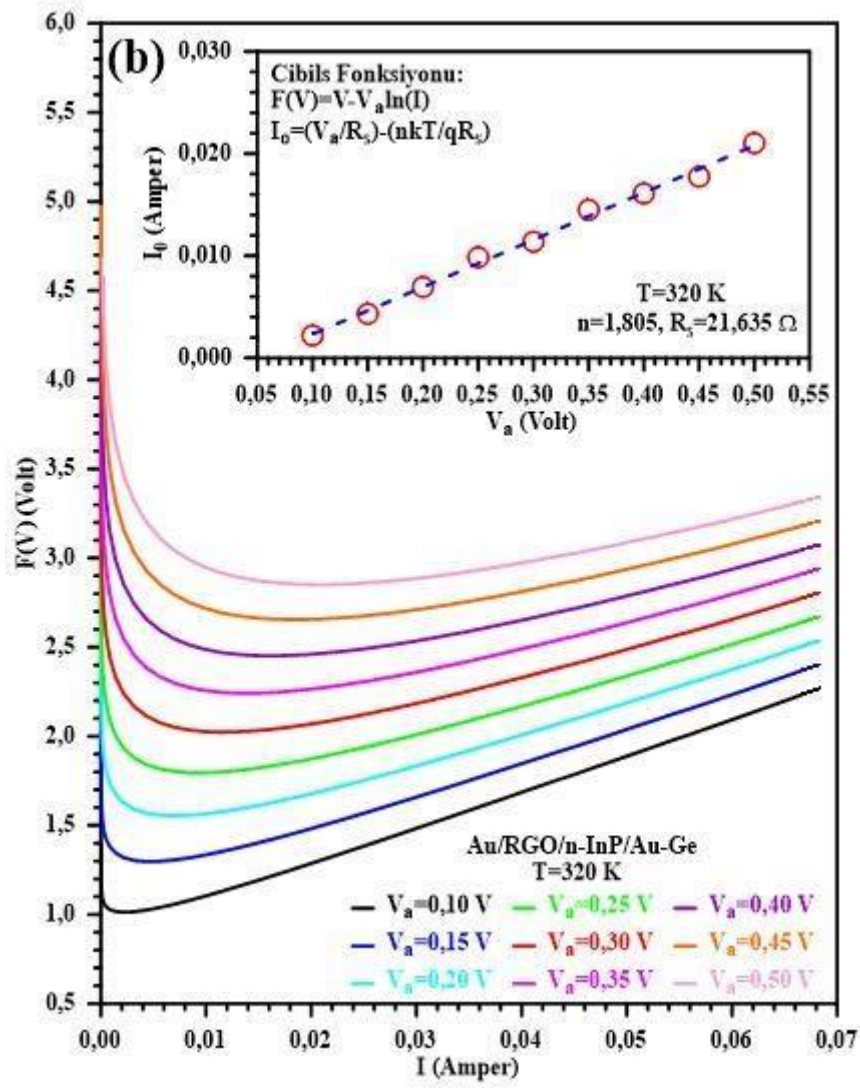
Diyotlarda I - V karakteristiklerinden yararlanarak seri direncin belirlenmesiyle ilgili birçok metot geliştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılan bu metotlardan biriside Cibils ve Buitrago (1985) tarafından önerilen metottur. Bu metodun detayları kuramsal temeller bölümünde verilmiştir. Bu metotta tanımlanan $F(V)$ fonksiyonunun V_a 'nın fonksiyonu olarak akıma karşı grafiği çizilir ve elde edilen eğrinin minimum değerine karşılık gelen I_0 akım

değerleri belirlenir ve I_0 - V_a arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanılarak diyotun n ve R_s değerleri hesaplanır. I_0 - V_a grafiğinin eğiminden R_s , düşey eksenini kestiği noktadan yararlanılarak da n değeri bulunur.

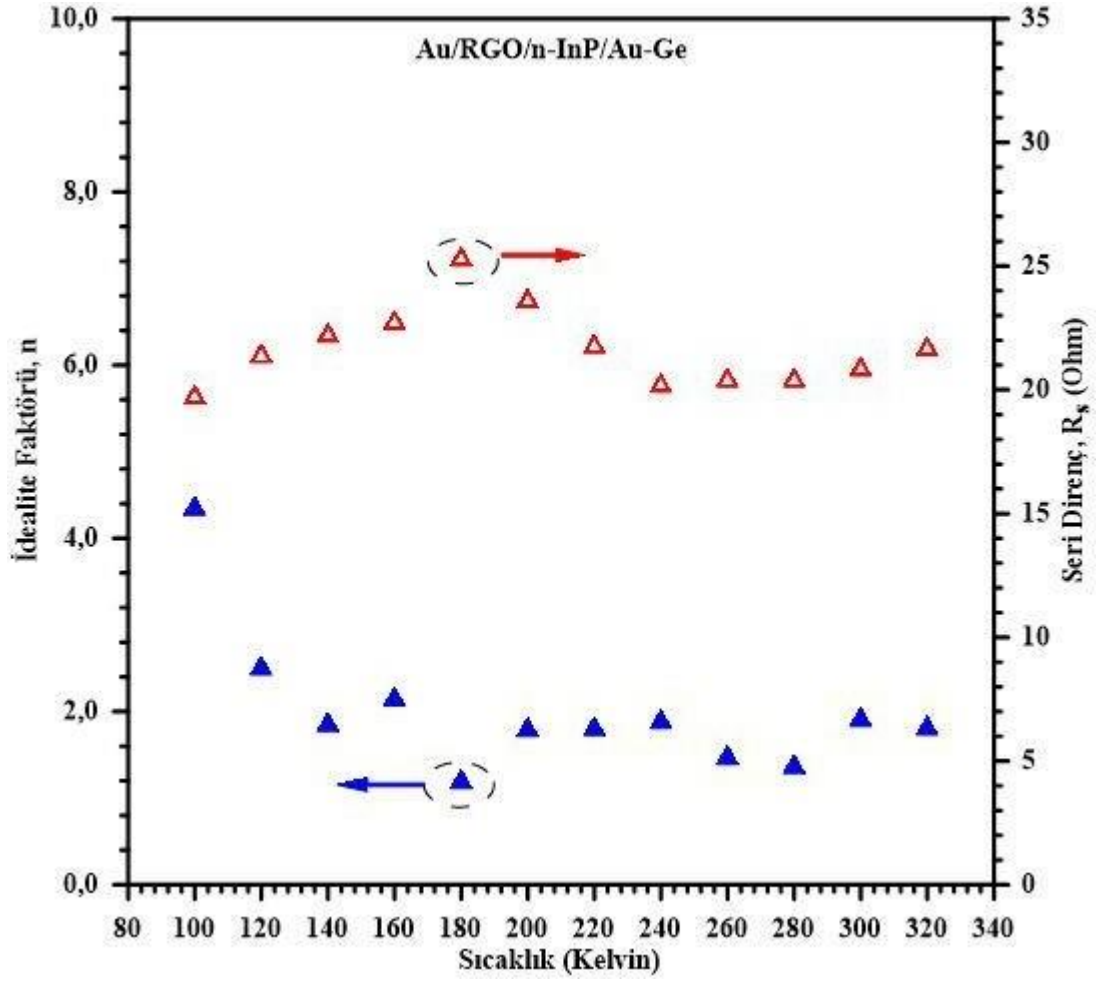
Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesi için $F(V)$ Cibilis fonksiyonu oluşturulurken V_a değerleri 0,1-0,5 V aralığında 0,05 V'luk adımlarla arttırılmıştır. Sonra her bir V_a değeri için $F(V)$ - I grafiği çizilmiş ve I_0 değerleri belirlenmiştir. Her bir sıcaklık için I_0 - V_a grafikleri çizilerek R_s ve n değerleri hesaplanmıştır. 100 K'de $F(V)$ - I grafikleri Şekil 32 (a)'da, 320 K'de de Şekil 32 (b)'de görülmektedir. Aynı zamanda I_0 - V_a grafikleride bu şekillerin içerisinde sunulmuştur. Grafik sayıları çok fazla olduğu için diğer sıcaklıklara ait $F(V)$ - I grafikleri tezde gösterilmemiştir. Bu yöntemle hesaplanan n ve R_s değerleri 100 K ve 320 K'de sırasıyla 4,341, 19,694 Ω ve 1,805, 21,635 Ω olarak hesaplanmıştır. 100-320 K aralığında n ve R_s için hesaplanan tüm değerler Tablo 8'de verilmiştir. Aynı zamanda n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri Şekil 33' da sunulmuştur. 160 K'e kadar n değerlerinin azaldığı, 160 K'den sonra ise hemen hemen sabit kaldığı belirlenmiştir. Benzer olarak R_s değerleri de 180 K'e kadar hafifçe artmış, 180-240 K aralığında hafifçe azalmış ve 240 K'den sonra ise hemen hemen sabit kalmıştır.



Şekil 32. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K’de Cibils fonksiyonu $F(V)$ ’nin I ile değişim eğrileri (I_0 - V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir) (devam)

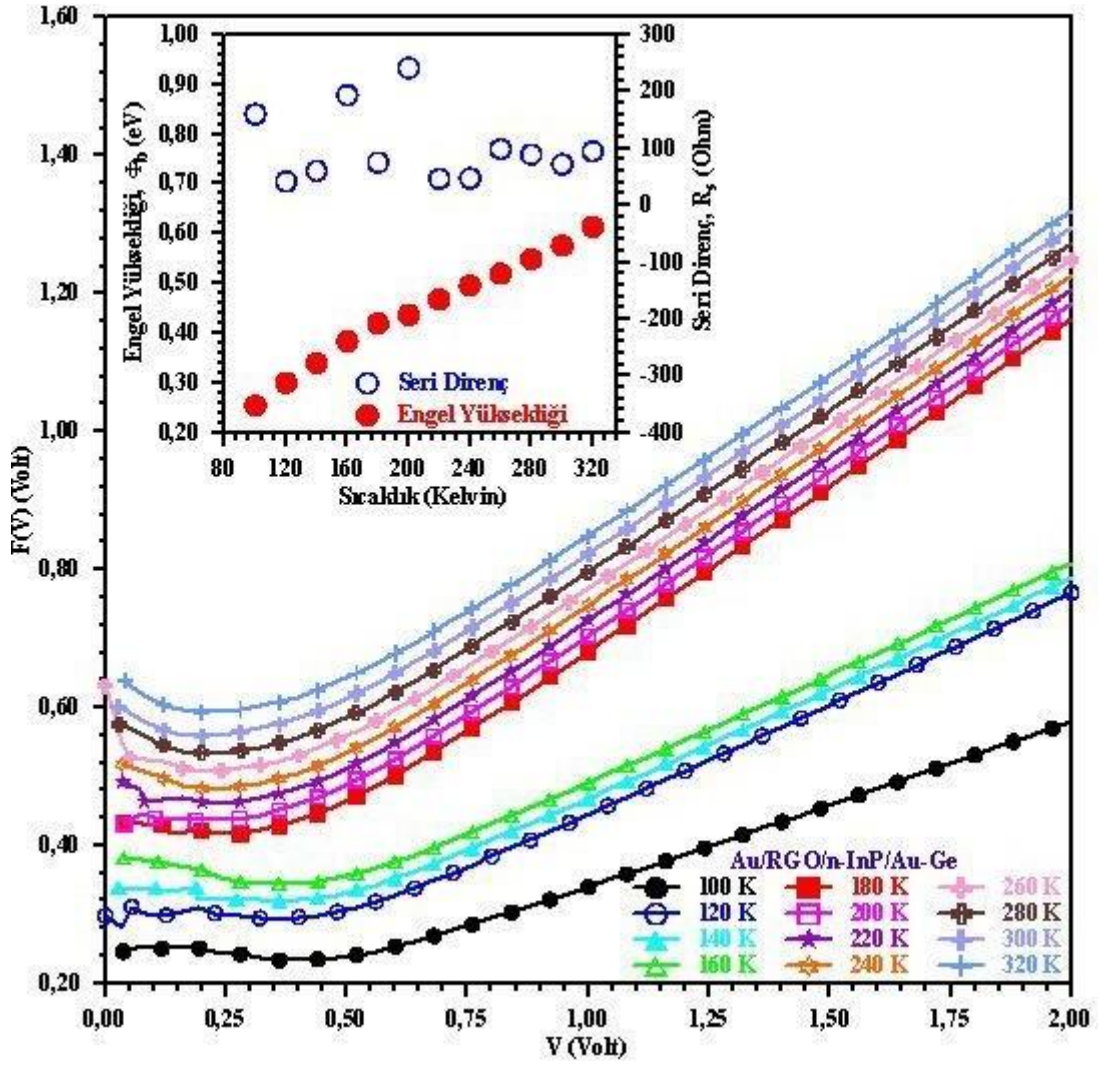


Şekil 32. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K’de Cibils fonksiyonu $F(V)$ ’nin I ile değişim eğrileri (I_0 - V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir)



Şekil 33. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin Cibils metodundan elde edilen n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri

Aynı zamanda Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin Φ_b ve R_s değerleri Norde metodu kullanılarak da hesaplanmıştır. Norde metodunun detayları kuramsal temeller bölümünde verilmiştir. Bu metotta Norde fonksiyonu γ tam sayısına ($\gamma > n$) bağlı olarak oluşturulmuş, her bir sıcaklık için $F(V)$ - V grafikleri çizilmiş ve grafiklerin minimum noktalarına karşılık gelen akım ve gerilim değerleri belirlenmiştir. Bu değerler kuramsal temeller kesiminde verilen (40) ve (41) denklemlerinde yerine konularak her bir sıcaklık için Φ_b ve R_s değerleri yeniden hesaplanmıştır. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesi için $F(V)$ - V grafikleri numune sıcaklığına bağlı olarak Şekil 34’de verilmiştir. Φ_b ve R_s ’nin 100 K ve 320 K için hesaplanan değerleri sırasıyla 0,255 eV, 160,420 Ω ve 0,614 eV, 95,114 Ω ’dur. 100-320 K aralığında hesaplanan tüm değerler Tablo 8’de sunulmuştur. Şekil 34 içerisinde verilen Φ_b - R_s - T grafiklerinden de görüldüğü gibi Φ_b değerleri artan numune sıcaklığına bağlı olarak doğrusal bir artışa sahipken, R_s değerleri düzensiz bir davranış sergilemiştir. Bu metotla elde edilen Φ_b değerlerinin Rhoderick metoduyla elde edilen değerlerle uyumlu olduğu, ancak R_s değerlerinin ise Cibils metodundan elde edilen değerlerden biraz farklı olduğu gözlenmiştir.

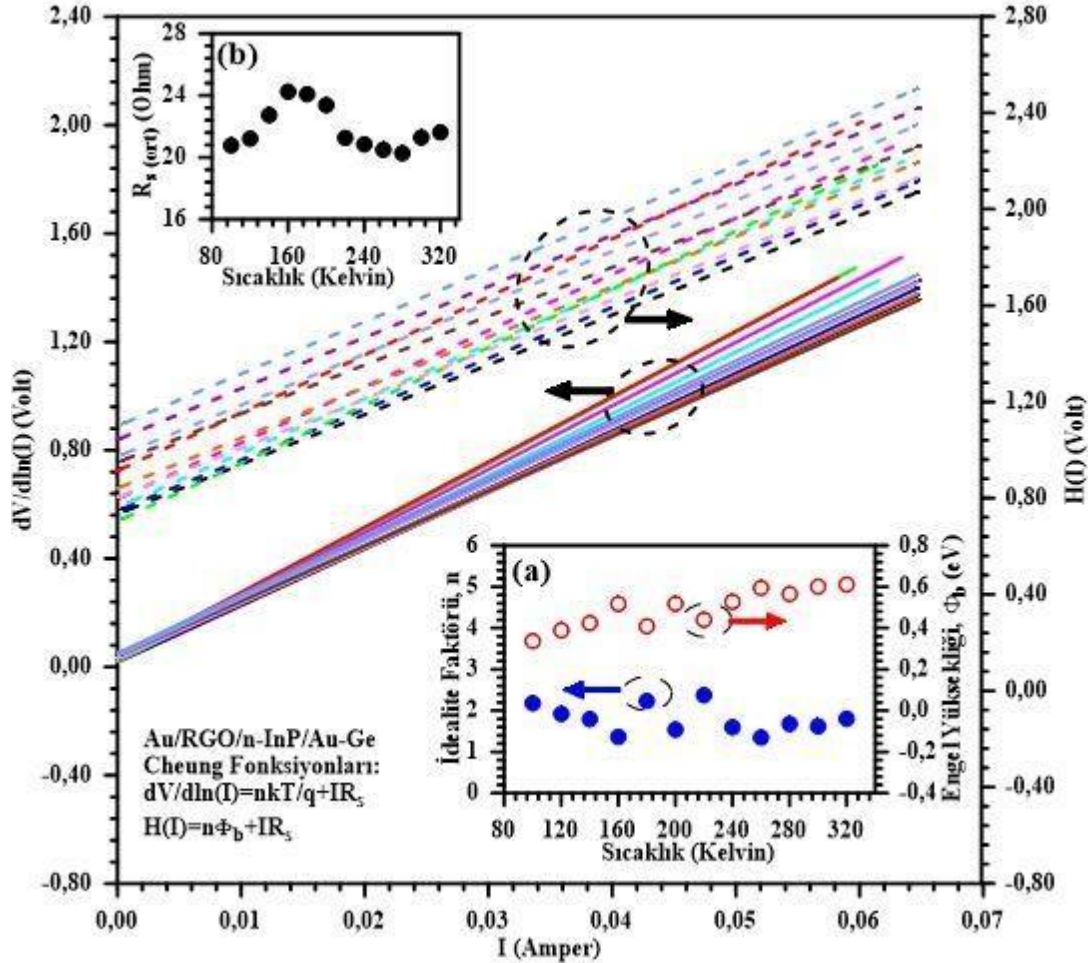


Şekil 34. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak Norde fonksiyonu $F(V)$ 'nin V 'ye göre değişimleri (Φ_b ve R_s 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde gösterilmiştir)

Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin n , Φ_b , R_s değerlerini çapraz kontrol etmek için kullandığımız son metot Cheung metodudur. Bu metodun detayları kuramsal temeller bölümünde verilmiştir. Bu kesimden de görülebileceği gibi, Cheung metodunda $dV/d\ln(I)$ ve $H(I)$ fonksiyonları I 'ya bağlı olarak tanımlanmıştır. Doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiklerinin aşağı doğru bükülen kısmına uygunlanan bu fonksiyonlar doğrusal değişimlere sahiptir. Dolayısıyla $dV/d\ln(I)$ - I grafiklerine yapılan doğrusal fitlerin eğimlerinden R_s ve y eksenini kestiği noktalardan ise idealite faktörü değerleri, $H(I)$ - I grafiklerine yapılan doğrusal fitlerin eğimlerinden R_s ve y eksenini kestiği noktalardan ise Φ_b değerleri hesaplanabilir.

Cheung metodu kullanılarak elde edilen Au/RGO/n-InP/Au-Ge diyotunun $dV/d\ln(I)$ - I $H(I)$ grafikleri Şekil 35'de verilmiştir. Yapılan doğrusal fitlerin yardımıyla diyotun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri yeniden hesaplanmış, elde edilen değerler Tablo 8'de, engel yüksekliği ve idealite faktörü parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimleri

ise Şekil 35 (a)'da verilmiştir. İki grafikten elde edilen seri direnç değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. 100 K ve 320 K sıcaklıkları için idealite faktörü 2,177 –1,802, engel yüksekliği 0,337–0,611 eV ve ortalama seri direnç değerleri 20,771–21,618 Ω olarak belirlenmiştir.



Şekil 35. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I değişimleri (n ve Φ_b 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde (a)'da, $R_{s(ort)}$ 'un T 'ye göre değişimleri ise (b)'de gösterilmiştir)

Şekil 35'in içerisinde verilen n - Φ_b - T grafiğinden görüldüğü gibi, n değerleri 240 K'e kadar düzensiz davranış sergilerken, 240 K'den sonra hemen hemen sabit kalmıştır. Benzer olarak Φ_b değerleri de yaklaşık olarak 180 K'e kadar kararsız davranış sergilemiş ve 180 K'den sonra artan numune sıcaklığı ile hemen hemen lineer olarak artmıştır. Yine Şekil 35'in içerisinde verilen $R_{s(ort)}$ - T grafiğinden, $R_{s(ort)}$ 'un 160 K'e kadar hafifçe arttığı, 160-220 K aralığında azaldığı ve 220 K'den sonra hemen hemen sabit kaldığı tespit edilmiştir. Cheung metodunda 180 K'den sonra elde edilen Φ_b değerlerinin, diğer iki metotla elde edilen değerlerle uyumlu olduğu, $R_{s(ort)}$ değerlerinin Cibils metoduyla elde edilen değerlerle uyumlu olduğu, ancak her üç metotla elde edilen n değerlerinin farklılıklar sergilediği belirlenmiştir.

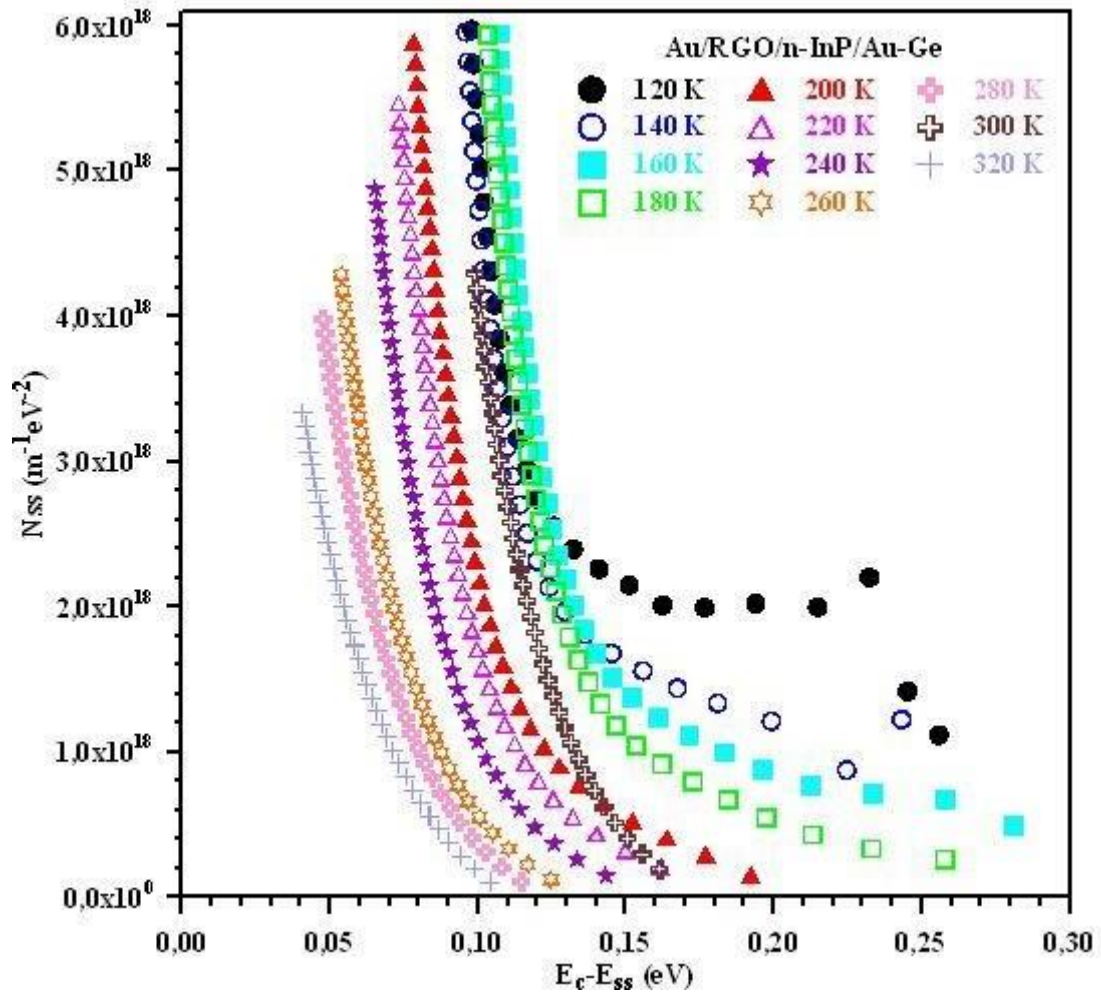
MY, MIS ve metal-oksid-yarıiletken (MOS) yapıların en önemli özelliği, metaldeki Fermi seviyesi ile bu arayüzeydeki yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcılarının bant kenarı arasındaki potansiyel engelin doğasıdır. Yüksek akımlarda idealite faktöründe her zaman arayüzey tabaka kalınlığı, arayüzey hal yoğunluğu ve seri direnç gibi parametrelere bağlı bir sapma vardır. Bu nedenle, engel yüksekliği ve diğer karakteristik parametrelerin hesaplanmasında, MY doğrultucu kontaklarda arayüzey durumları, önemli bir rol oynar. Yarıiletkenle dengede olan arayüzey durumlarına sahip gerçek bir Schottky diyot için idealite faktörü birden büyüktür ve Card ve Rhoderick tarafından (1971) aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{s_i} \left[\frac{s_s}{W} + eN_{ss} \right] \quad (51)$$

Bu bağıntıda W uzay yükü tabakasının genişliği, N_{ss} arayüzey hallerinin yoğunluğu, ϵ_s ve ϵ_i sırasıyla yarıiletken ve arayüzey tabakasının geçirgenliğidir. Arayüzey hallerinin enerji dağılımının ve rölatif arayüzey tabaka kalınlığının değerlendirilmesi, Card and Rhoderick (1989) ve Kolnik and Ozvold (1990) tarafından türetilen formül kullanılarak gerçekleştirilebilir. Diyot doğru beslem altında bulunduğu, tüm arayüzey hallerinin yarıiletkenle dengede olduğu durumda, ters yönde arayüzey hal yükündeki değişim ihmal edilebilir. n -tipi bir yarıiletkende, arayüzey hallerinin enerjisi E_{ss} , yarıiletkenin yüzeyinde iletim bandının tabanına göre

$$E_c - E_{ss} = e(\Phi_b - V) \quad (52)$$

bağıntısıyla verilir (Lakshami *et al.* 2012). (51) ve (52) denklemleri I - V karakteristikleri ile birlikte, iletkenlik bandının tabanına göre ifade edilen arayüzey hal enerjisi E_{ss} 'nin bir fonksiyonu olarak arayüzey hal yoğunluğunun tayininde kullanılabilir. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesi için elde edilen N_{ss} değerleri E_c - E_{ss} değerlerinin ve numune sıcaklığının fonksiyonu olarak Şekil 36'da verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, artan E_c - E_{ss} değeri ile N_{ss} değerleri azalmaktadır. $T=320$ K'de arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımı yaklaşık olarak $0,1 \times 10^{18} \text{ m}^{-1} \text{ eV}^{-2} - 5 \times 10^{18} \text{ m}^{-1} \text{ eV}^{-2}$ aralığında değişmektedir. Ayrıca azalan numune sıcaklığı ile arayüzey hal yoğunluk eğrileri bant ortasına doğru kaymıştır.



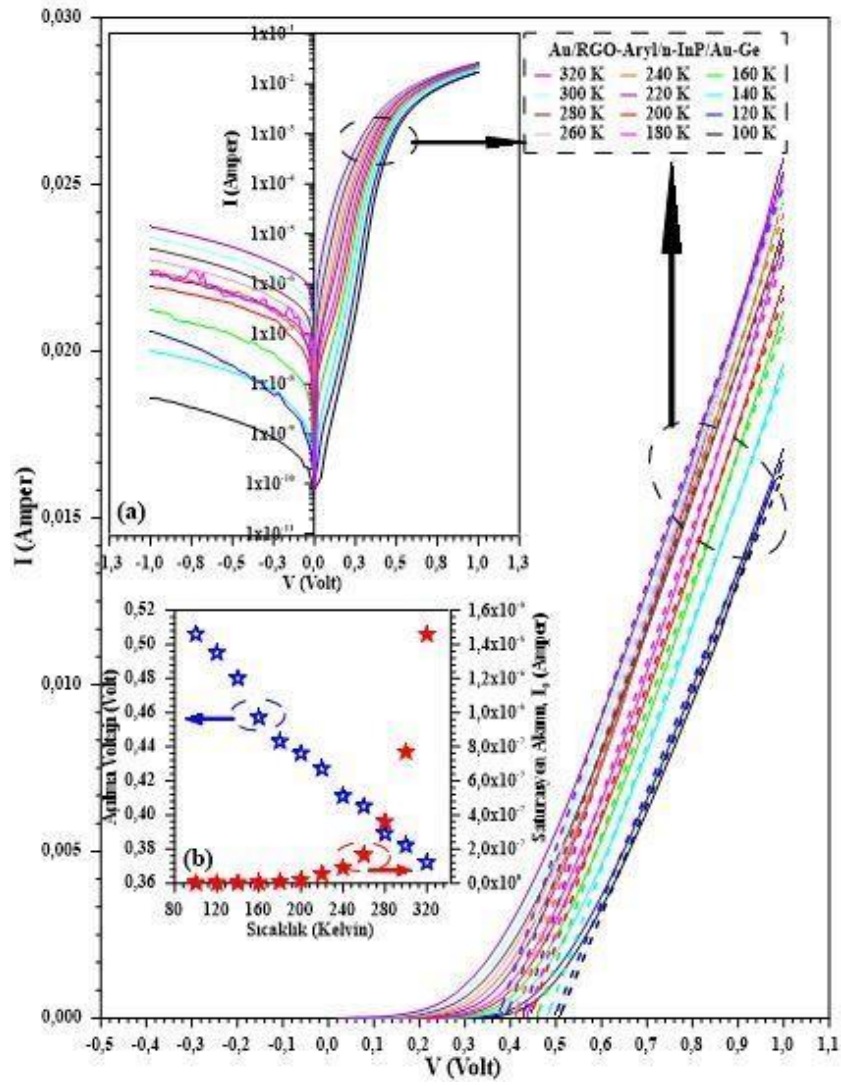
Şekil 36. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin I - V ölçümlerinden numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan arayüzey hal yoğunluk değerlerinin E_c-E_{ss} 'ye göre değişimleri

Tablo 8. Au/RGO/n-InP/Au-Ge Numunesinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Alınan *I*-*V* Karakteristiklerinden Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung Metotları Kullanılarak Hesaplanan Engel Parametrelerinin Değerleri

Au/RGO/n-InP/Au-Ge											
Termoiyonik Emisyon Metodu (Rhoderick Metodu)					Cibils Metodu		Norde Metodu		Cheung Metodu		
Sıcaklık (K)	Açılma Voltajı (V)	I_0 (A)	Φ_b (eV)	n	R_s (Ω)	n	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	$R_{s(ort)}$ (Ω)	n
100	0,518	$5,814 \times 10^{-11}$	0,260	3,176	19,694	4,341	0,255	160,42	0,337	20,771	2,177
120	0,508	$1,454 \times 10^{-10}$	0,307	2,781	21,368	2,495	0,301	42,131	0,389	21,209	1,920
140	0,491	$6,963 \times 10^{-10}$	0,343	2,525	22,186	1,843	0,34	60,502	0,424	22,724	1,795
160	0,482	$8,77 \times 10^{-10}$	0,392	2,089	22,706	2,139	0,384	193,71	0,517	24,236	1,362
180	0,476	$2,83 \times 10^{-9}$	0,426	1,986	25,270	1,186	0,420	75,586	0,409	24,078	2,231
200	0,468	$2,359 \times 10^{-8}$	0,441	1,944	23,579	1,785	0,437	241,50	0,518	23,377	1,538
220	0,452	$4,932 \times 10^{-8}$	0,474	1,860	21,744	1,795	0,468	46,769	0,440	21,257	2,373
240	0,443	$1,107 \times 10^{-7}$	0,504	1,755	20,160	1,877	0,496	47,844	0,527	20,842	1,595
260	0,433	$2,854 \times 10^{-7}$	0,529	1,720	20,374	1,464	0,520	98,882	0,595	20,489	1,348
280	0,421	$4,94 \times 10^{-7}$	0,560	1,659	20,374	1,359	0,549	89,610	0,565	20,264	1,678
300	0,412	$1,101 \times 10^{-6}$	0,583	1,632	20,816	1,902	0,576	72,136	0,601	21,281	1,619
320	0,406	$1,136 \times 10^{-6}$	0,624	1,552	21,635	1,805	0,614	95,114	0,611	21,618	1,802

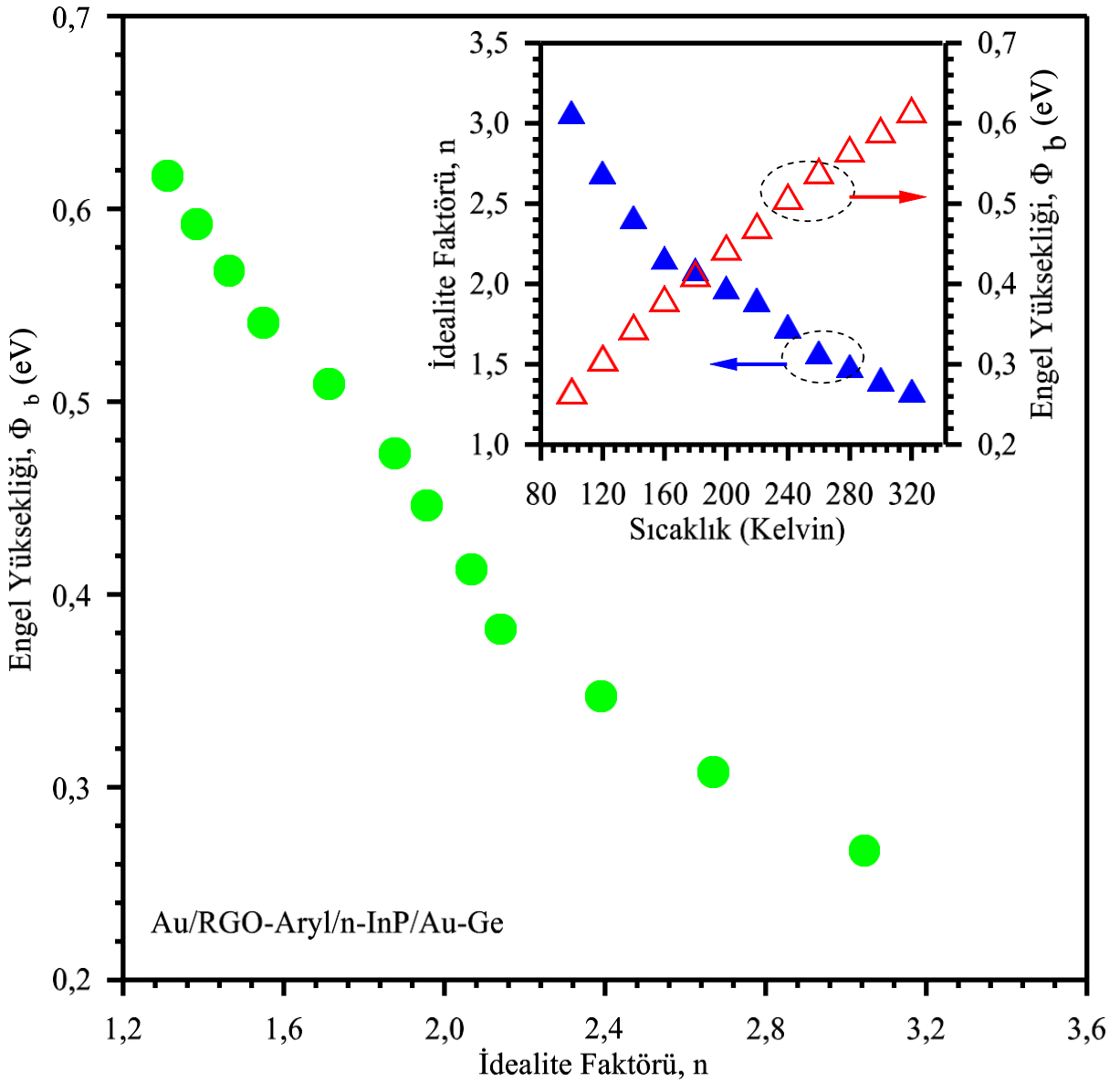
Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge Numunesinin Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi

Bu numunede arayüzey tabakası olarak anilin ile kovalent türevlendirilmiş RGO-Aryl tabakası kullanılmıştır. RGO-Aryl malzemesi solvotermal redüksiyon metoduyla sentezlendikten sonra döndürerek kaplama metodu kullanılarak omik kontağı önceden yapılmış olan n-InP yarıiletkeni üzerine ince film halinde büyütülmüştür. Film üzerinde $7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ alanlı Au kontaklar vakum ortamında oluşturulduktan sonra Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge yapısı elde edilmiştir ve I - V ölçümleri 100-320 K aralığında 20 K adımlarla alınmıştır. Numunenin sıcaklığa bağlı doğru beslem I - V karakteristikleri Şekil 37’de, doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V karakteristikleride bu şeklin içerisinde Şekil (a)’da görülmektedir. Detayları önceki başlık altında verilen yöntem ve denklemler yardımıyla doğru beslem I - V karakteristiklerinden açılma voltaj değerleri 100 K’de 0,506 V, 320 K’de ise 0,372 V olarak elde edilmiştir. 100-320 K aralığında hesaplanan açılma voltajı değerleri Tablo 9’da sunulmuştur. Doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden numune sıcaklığına bağlı olarak belirlenen saturasyon akımları ile açılma voltajı değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 37’nin içerisindeki Şekil (b)’de görülmektedir. Bir önceki numunede olduğu gibi, bu numune içinde açılma voltajı, artan numune sıcaklığı ile doğrusal azalırken, saturasyon akımı 200 K’den sonra hızlı bir şekilde artmıştır. Aynı zamanda Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesine ait $\ln(I)$ - V karakteristikleri de diyotun iyi derecede doğrultma davranışı sergilediğini göstermiştir.



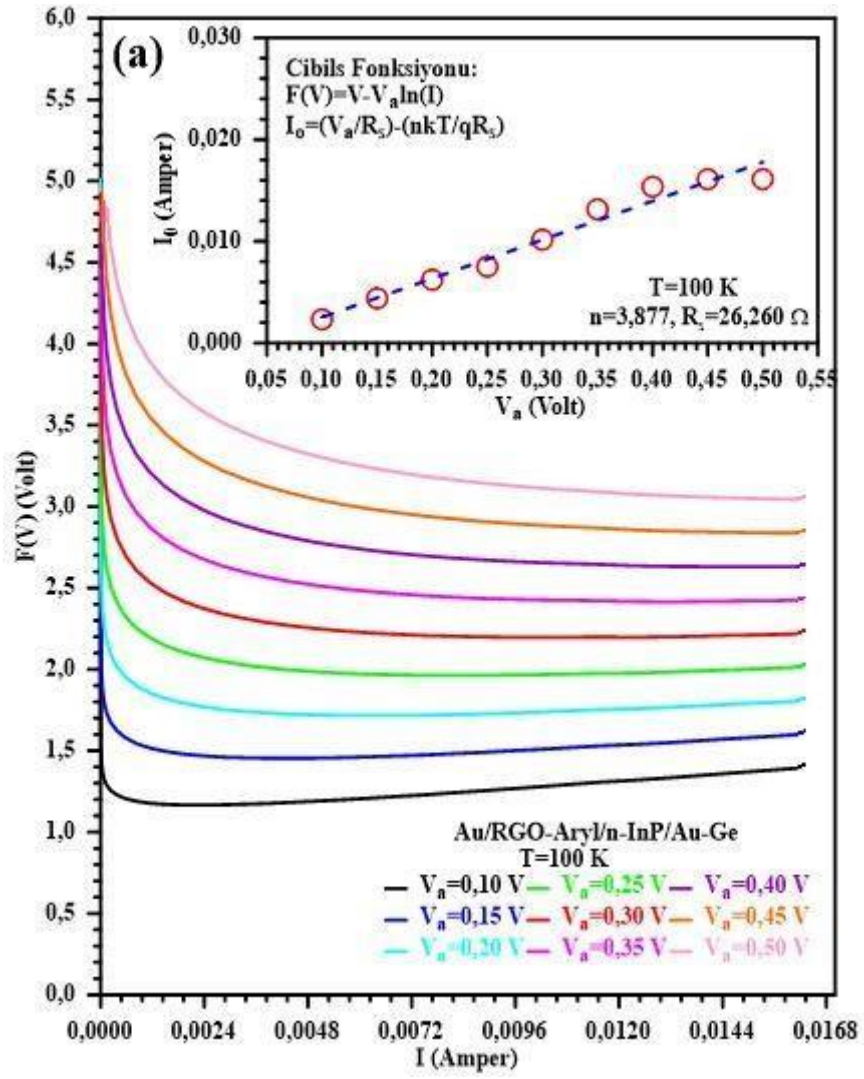
Şekil 37. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı doğru beslem I - V karakteristikleri (Şeklin içerisinde (a) Doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V - T karakteristikleri ve (b) Açılma voltajı- I_0 - T değişimleri gösterilmiştir)

Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden hesaplanan n ve Φ_b değerleri Tablo 9’da görülmektedir. Aynı zamanda n - Φ_b değişimleri Şekil 38’de, n - Φ_b - T değişimleri ise bu şeklin içerisinde gösterilmiştir. Tablo 9 ve Şekil 38’den de görülebileceği gibi, artan numune sıcaklığı ile n değerleri azalırken Φ_b değerleri artmıştır. Numune sıcaklığına bağlı olarak n değerlerinin artması ve Φ_b değerlerinin azalması, akım iletim mekanizmasında sadece TE’nin etkili olmadığını göstermektedir.

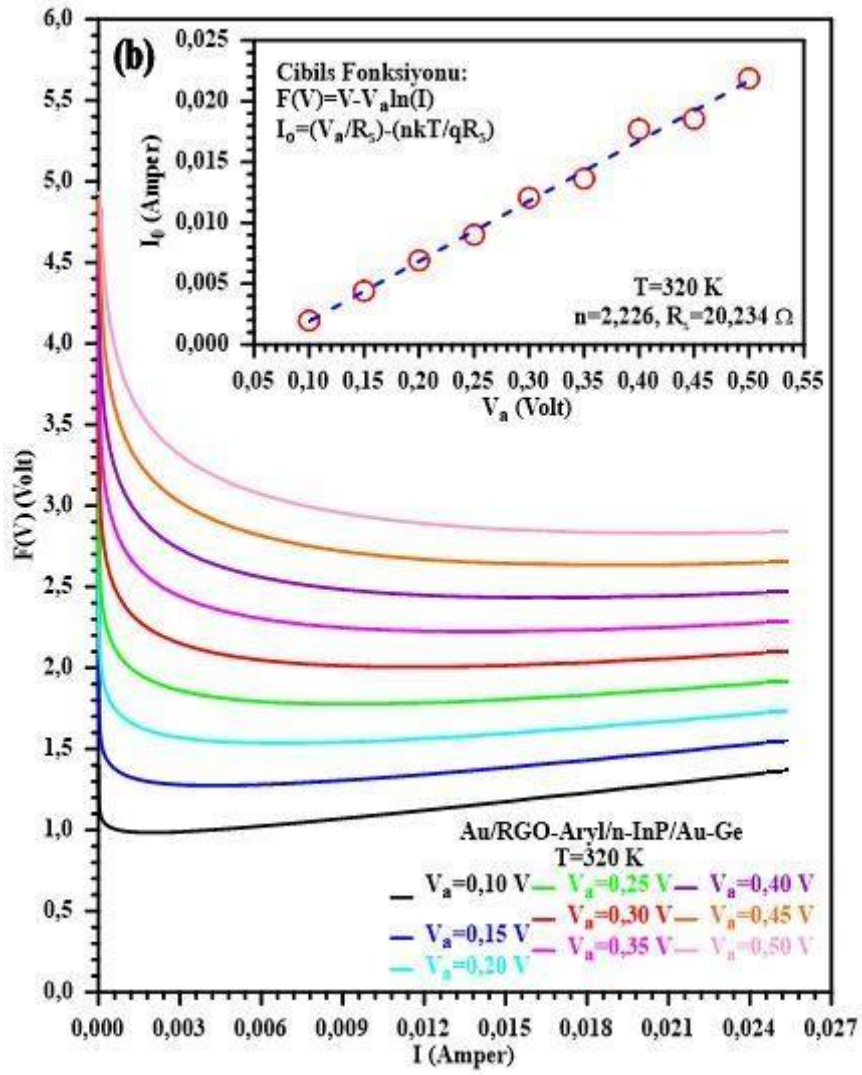


Şekil 38. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden elde edilen n - Φ_b değişimleri (n - Φ_b - T değişimleri şeklin içerisinde gösterilmiştir).

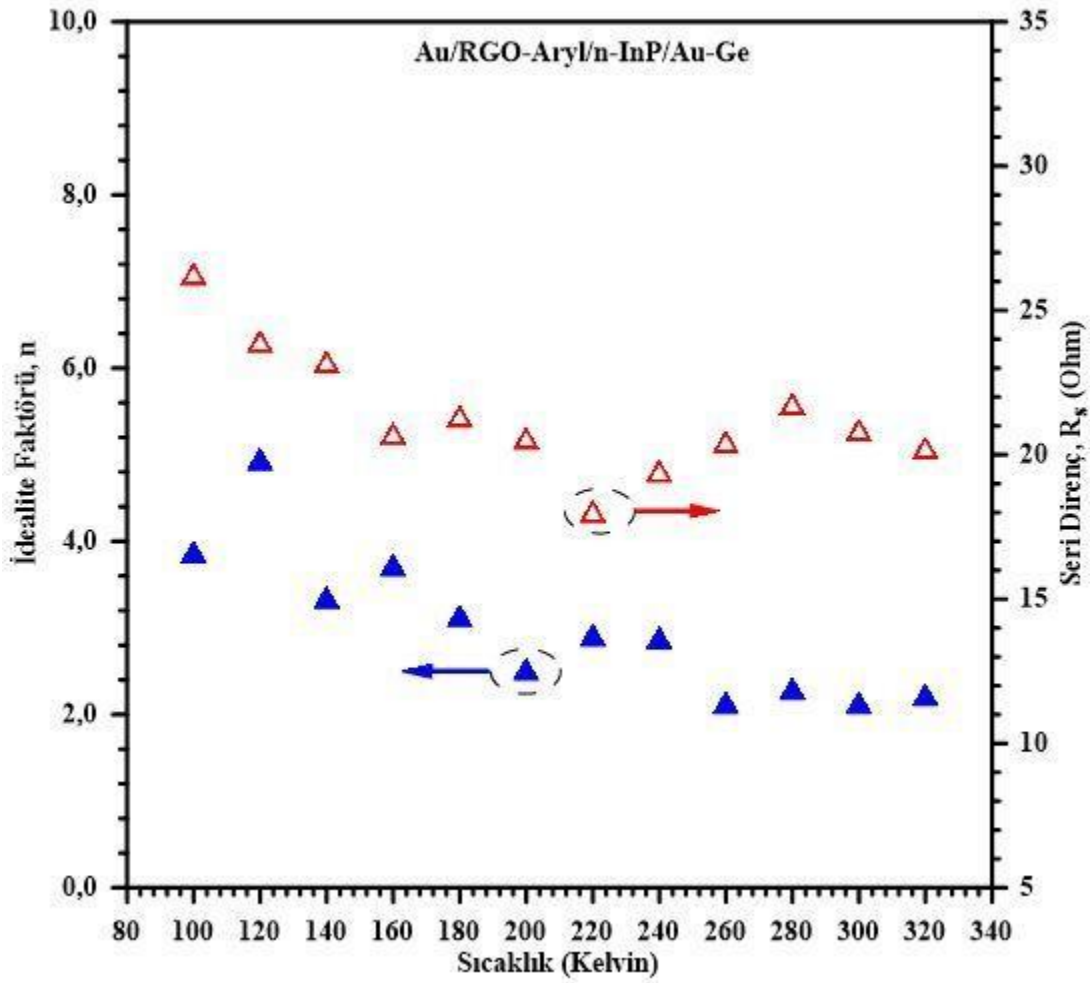
Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin V_a 'nın 0,1-0,5 V değer aralığında çizilen $F(V)$ - I Cibilis grafikleri $T=100$ K için Şekil 39 (a)'da, $T=320$ K için de Şekil 39 (b)'de görülmektedir. Aynı zamanda bu grafiklerden elde edilen I_0 değerlerinin V_a ile değişimleri de bu grafiklerin içerisinde verilmiştir. Bu metotta I_0 - V_a ilişkisinden 100-320 K aralığında hesaplanan tüm n ve R_s değerler Tablo 9'da verilmiştir. Yine n - R_s - T değişimleri Şekil 40'da gösterilmiştir. Bu grafik yardımıyla n değerlerinin yaklaşık olarak 240 K'e kadar azaldığı, 240 K'den sonra sabit kaldığı, R_s değerlerinin 220 K'e kadar azaldığı, 220-280 K aralığında hafifçe arttığı ve 280-320 K aralığında ise hemen hemen sabit kaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 39. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K'de Cibils fonksiyonu $F(V)$ 'nin I ile değişim eğrileri (I_0 - V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir) (devam)

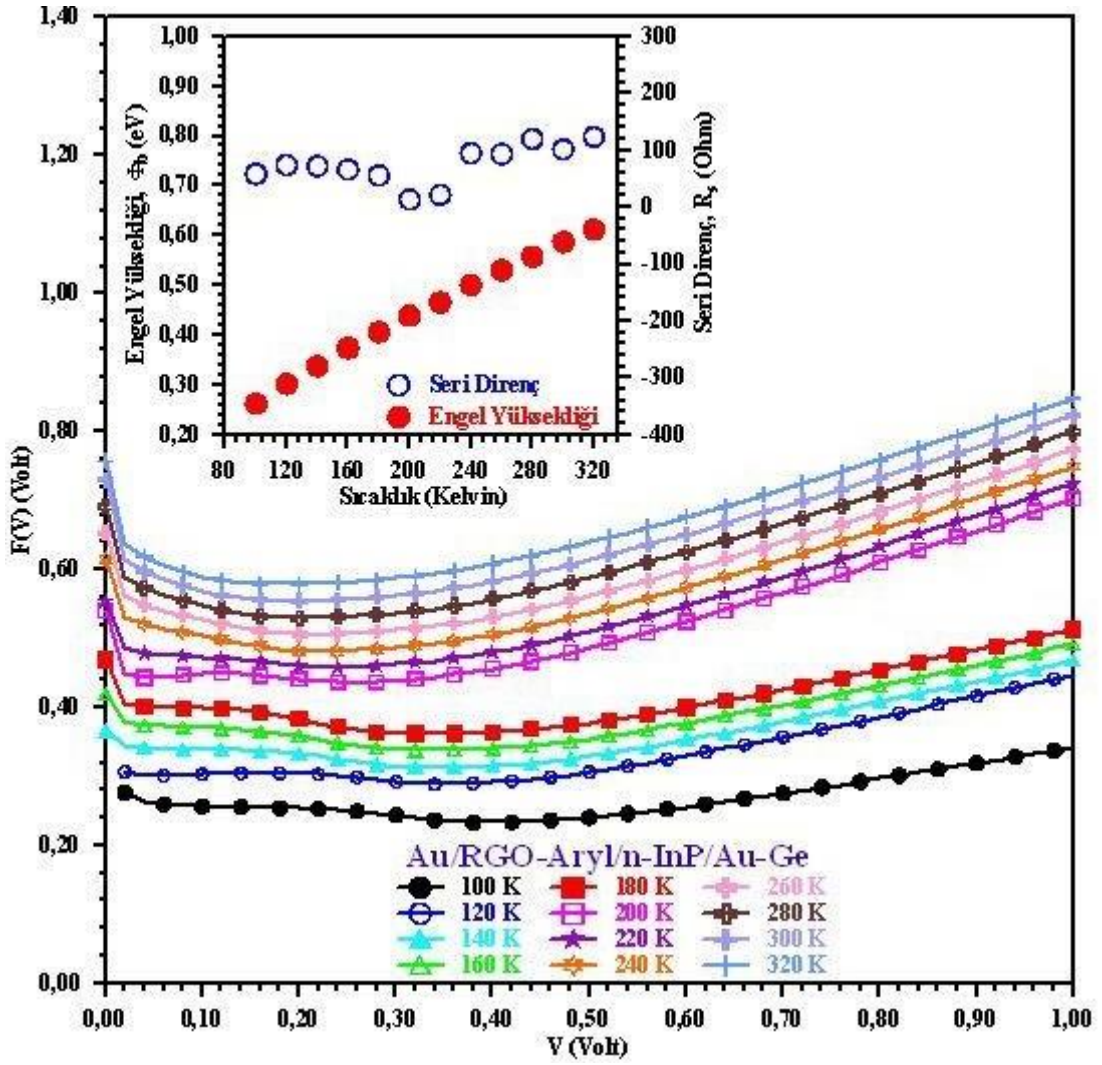


Şekil 39. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K’de Cibils fonksiyonu $F(V)$ ’nin I ile değişim eğrileri (I_0 - V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir)



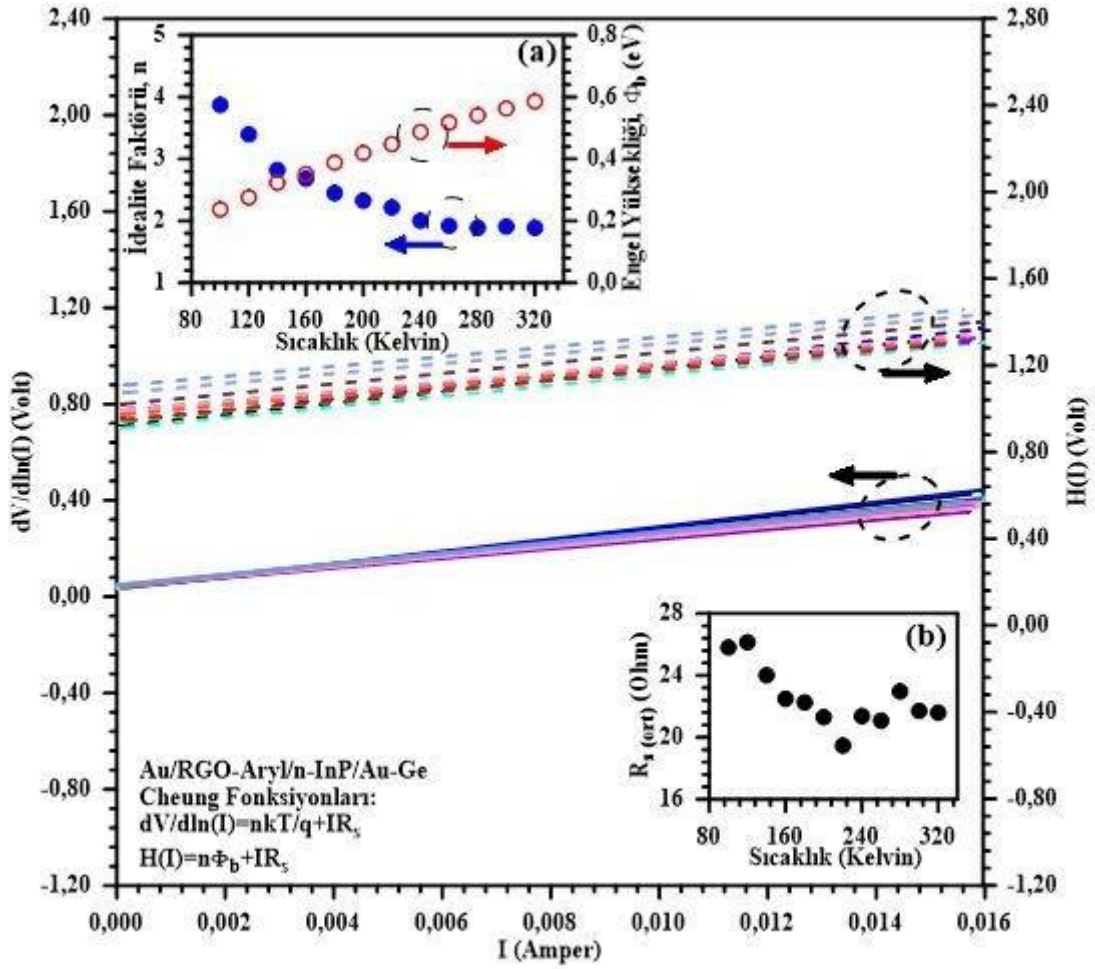
Şekil 40. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin Cibils metodundan elde edilen n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri

Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin Norde fonksiyonundan yararlanılarak çizilen $F(V)$ - V değişimleri Şekil 41’de verilmiştir. Bu grafiklerde $F(V)$ ’nin minimum değerlerine karşılık gelen akım ve gerilim değerleri kullanılarak elde edilen Φ_b ve R_s değerlerinin T ’ye bağlı değişimleri de bu şeklin içerisinde gösterilmiştir. Aynı zamanda Φ_b ve R_s değerleri Tablo 9’da sunulmuştur. Şekil 41’nin içerisinde verilen Φ_b - R_s - T grafiğinden, artan numune sıcaklığı ile Φ_b değerlerinin hemen hemen lineer olarak arttığı, R_s değerlerinin ise önemli sayılabilecek bir değişim göstermediği tespit edilmiştir.



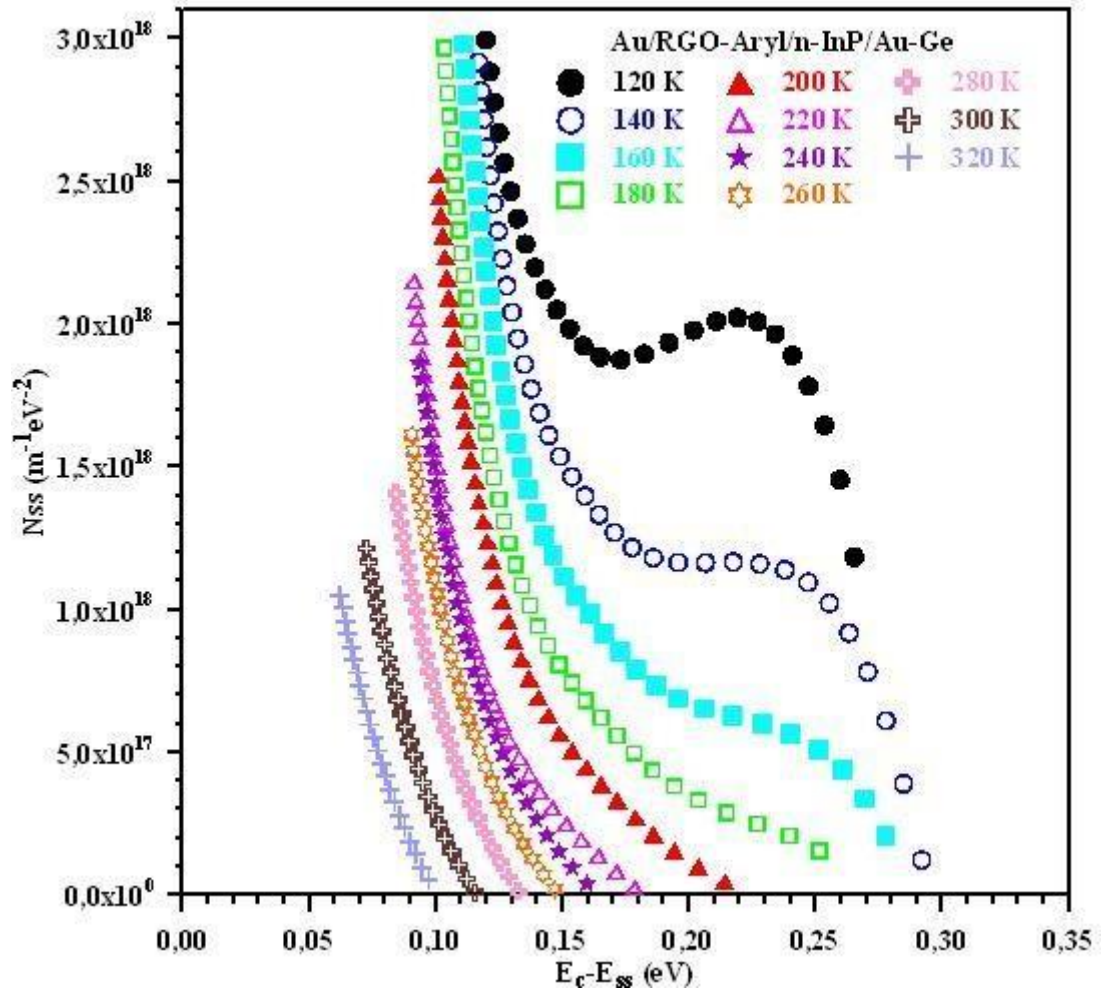
Şekil 41. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak Norde fonksiyonu $F(V)$ 'nin V 'ye göre değişimleri (Φ_b ve R_s 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde gösterilmiştir)

Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesi için Cheung metodunda ifade edilen $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri Şekil 42'de, bu grafiklerden elde edilen $n-\Phi_b-T$ ilişkisi bu şeklin içerisinde Şekil (a)'da, $R_{s(ort)}-T$ ilişkisi de yine bu şeklin içerisinde Şekil (b)'de gösterilmiştir. Aynı zamanda 100-320 K aralığında hesaplanan n , Φ_b , $R_{s(ort)}$ değerleri Tablo 9'da verilmiştir. Şeklin içerisinde sunulan $n-\Phi_b-T$ ilişkisinden, n değerlerinin artan sıcaklık ile azaldığı, Φ_b değerlerinin ise arttığı gözlenmiştir. Yine şeklin içerisinde verilen $R_{s(ort)}-T$ ilişkisi, $R_{s(ort)}$ değerlerinin 240 K'e kadar azaldığını, 240 K'den sonra ise hemen hemen sabit kaldığını göstermiştir.



Şekil 42. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I değişimleri (n ve Φ_b 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde (a)'da, $R_{s(ort)}$ 'un T 'ye göre değişimleri ise (b)'de gösterilmiştir)

Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin (51) ve (52) denklemleri kullanılarak doğru beslem I - V karakteristiklerinden elde edilen N_{ss} değerleri E_c - E_{ss} değerlerinin ve numune sıcaklığının fonksiyonu olarak Şekil 43'de gösterilmiştir. Bu numunede de artan E_c - E_{ss} değerleri ile N_{ss} değerlerinin azaldığı görülmüştür. $T=320$ K'de N_{ss} yaklaşık olarak 4×10^{17} - $1,1 \times 10^{18} \text{ m}^{-1} \text{ eV}^{-2}$ aralığında değişmiştir. Yine azalan numune sıcaklığı ile arayüzey hal yoğunluk eğrileri bant ortasına doğru kaymıştır.



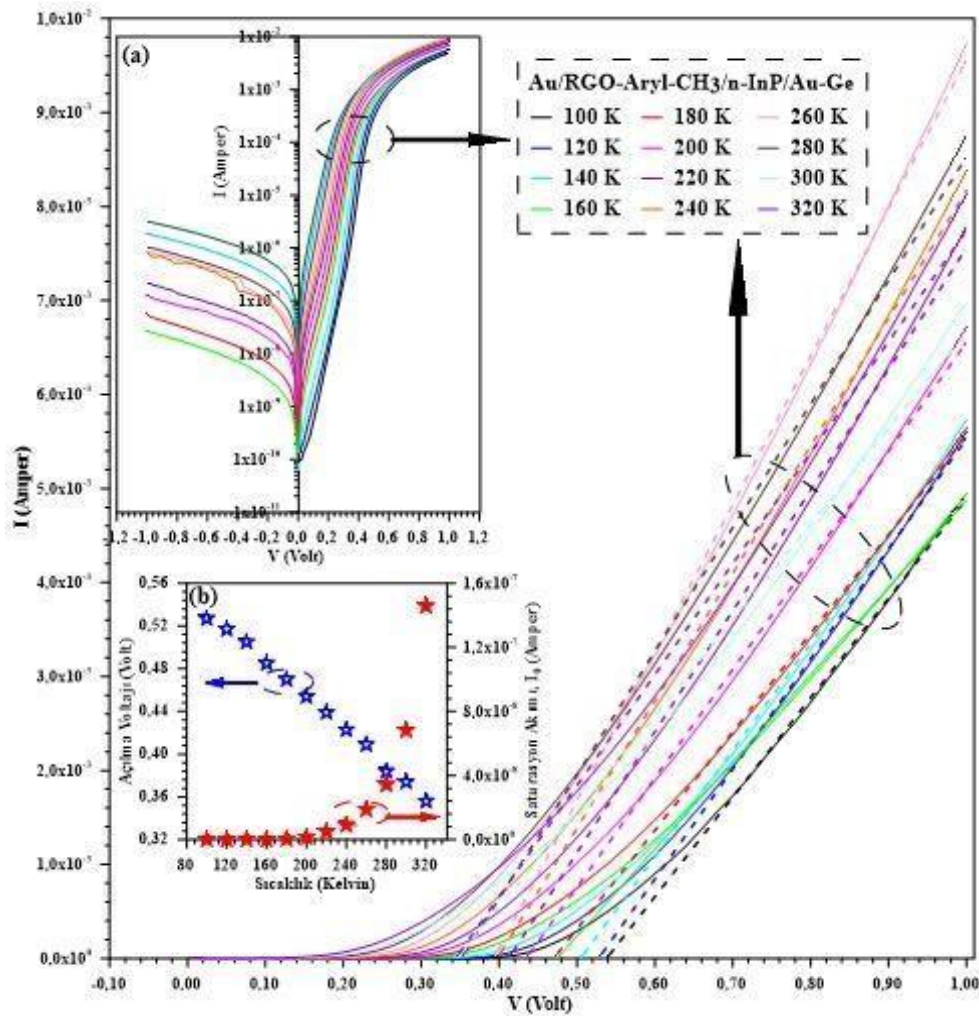
Şekil 43. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinin I - V ölçümlerinden numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan arayüzey hal yoğunluk değerlerinin E_c-E_{ss} 'ye göre değişimleri

Tablo 9. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge Numunesinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Alınan *I-V* Karakteristiklerinden Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung Metotları Kullanılarak Hesaplanan Engel Parametrelerinin Değerleri

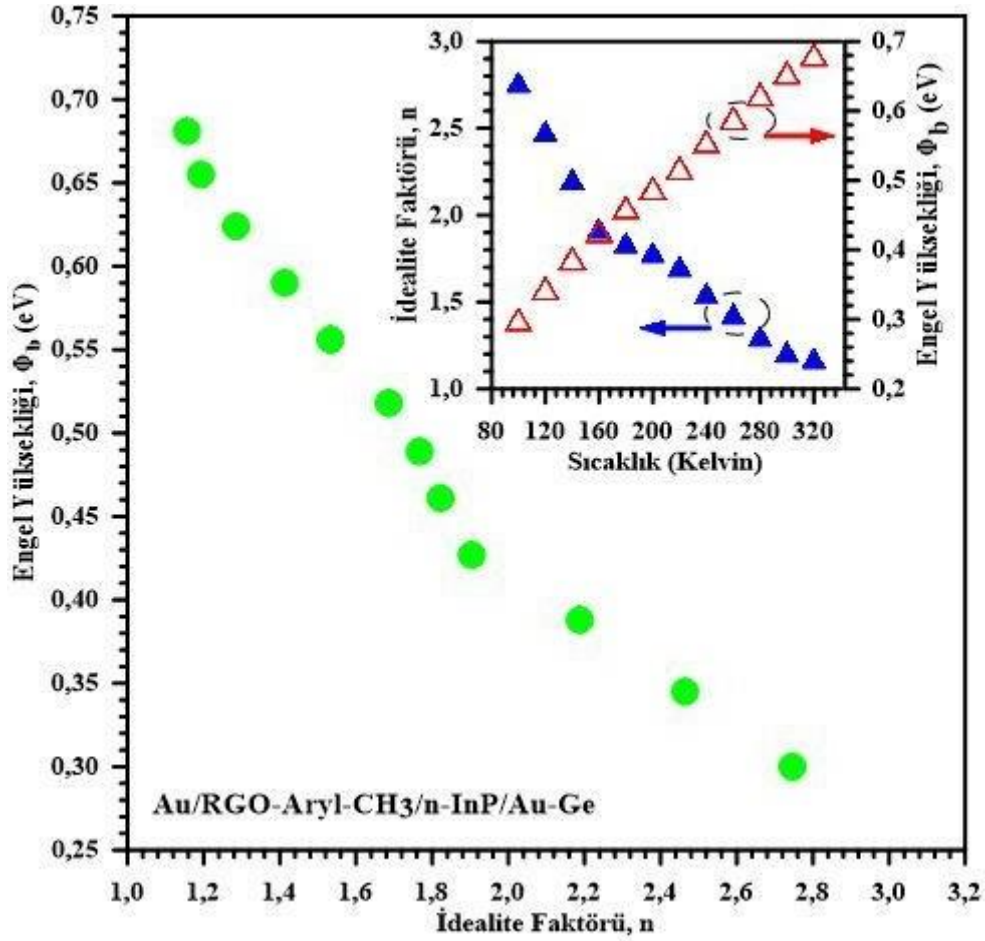
Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge											
Termoiyonik Emisyon Metodu (Rhoderick Metodu)					Cibils Metodu		Norde Metodu		Cheung Metodu		
Sıcaklık (K)	Açılma Voltajı (V)	I_0 (A)	Φ_b (eV)	n	R_s (Ω)	n	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)	$R_{s(ort)}$ (Ω)	n
100	0,506	$2,768 \times 10^{-11}$	0,267	3,046	26,260	3,877	0,262	58,356	0,237	25,809	3,871
120	0,495	$1,226 \times 10^{-10}$	0,308	2,669	23,927	4,948	0,302	74,153	0,276	26,141	3,395
140	0,480	$4,798 \times 10^{-10}$	0,347	2,391	23,212	3,352	0,338	72,095	0,323	24,007	2,821
160	0,457	$1,743 \times 10^{-9}$	0,382	2,140	20,728	3,729	0,374	66,302	0,351	22,485	2,682
180	0,443	$6,785 \times 10^{-9}$	0,413	2,068	21,328	3,141	0,406	55,640	0,388	22,258	2,449
200	0,436	$1,725 \times 10^{-9}$	0,446	1,956	20,567	2,521	0,439	13,131	0,419	21,302	2,325
220	0,427	$5,275 \times 10^{-8}$	0,473	1,876	18,038	2,917	0,466	21,786	0,448	19,462	2,216
240	0,411	$9,04 \times 10^{-8}$	0,509	1,713	19,433	2,884	0,501	94,946	0,487	21,367	2,001
260	0,405	$1,646 \times 10^{-7}$	0,541	1,550	20,448	2,136	0,531	93,438	0,517	21,081	1,919
280	0,389	$3,593 \times 10^{-7}$	0,568	1,464	21,755	2,299	0,558	119,85	0,541	22,961	1,887
300	0,382	$7,691 \times 10^{-7}$	0,592	1,384	20,853	2,137	0,587	101,52	0,563	21,705	1,908
320	0,372	$1,458 \times 10^{-6}$	0,617	1,310	20,234	2,226	0,612	123,66	0,586	21,596	1,888

Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge Numunesinin Akım-Voltaj Karakteristiklerinin Numune Sıcaklığına Bağlı Olarak İncelenmesi

Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem I - V garfikleri Şekil 44'de doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V grafikleri bu şeklin içerisinde (a)'da ve açılma voltajıyla saturasyon akımının sıcaklıkla değişimleri ise (b)'de verilmiştir. Şeklin içerisinde (a)'da verilen $\ln(I)$ - V garfikleri diyotun iyi bir doğrultma karakterine sahip olduğunu gösterirken, şeklin içerisinde verilen (b) grafiği artan numune sıcaklığı ile açılma voltajının lineer olarak azaldığını, saturasyon akımının 200 K'e kadar sabit kaldığını ve 200 K'den sonra ise hızlı bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiklerinden hesaplanan n ve Φ_b arasındaki ilişki Şekil 45'de, n ve Φ_b 'nin T 'ye bağlı değişimleri de Şekil 45'in içerisinde gösterilmiştir. Artan n değerlerine karşılık Φ_b değerlerinin hemen hemen lineer olarak azaldığı, n değerlerinin sıcaklık ile lineer olarak azaldığı ve Φ_b değerlerinin ise sıcaklık ile lineer olarak arttığı tespit edilmiştir. Rhoderick metodu kullanılarak 100-320 K aralığında hesaplanan I_0 , n ve Φ_b değerleri Tablo 10'da sunulmuştur.

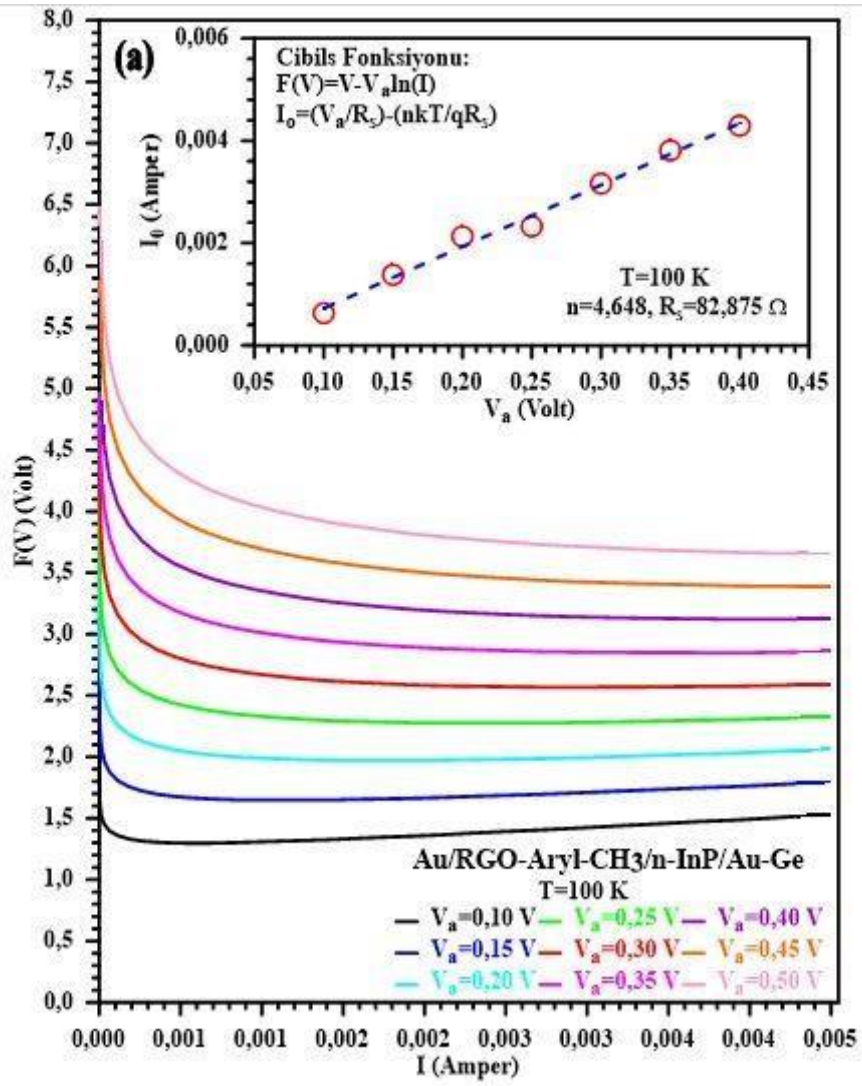


Şekil 44. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı doğru beslem I - V karakteristikleri (Şeklin içerisinde (a) Doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V - T karakteristikleri ve (b) Açılma voltajı- I_0 - T değişimleri gösterilmiştir)

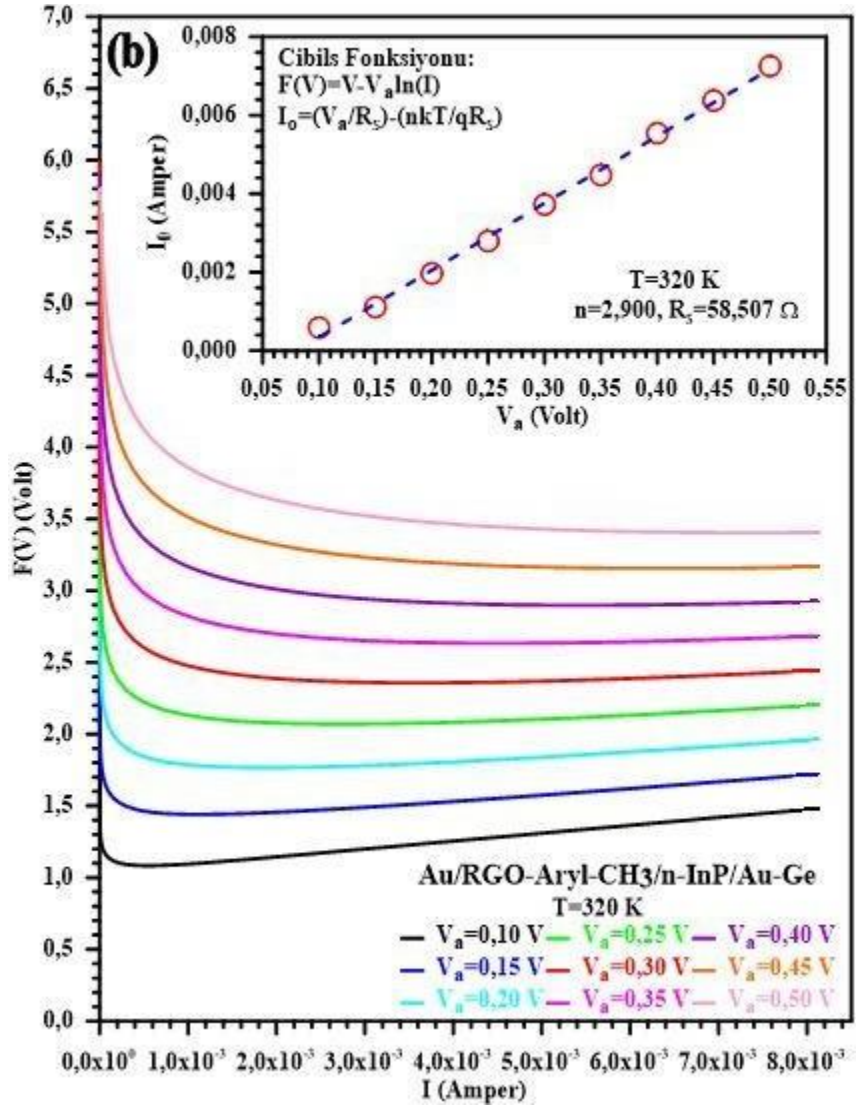


Şekil 45. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden elde edilen n - Φ_b değişimleri (n - Φ_b - T değişimleri şeklin içerisinde gösterilmiştir)

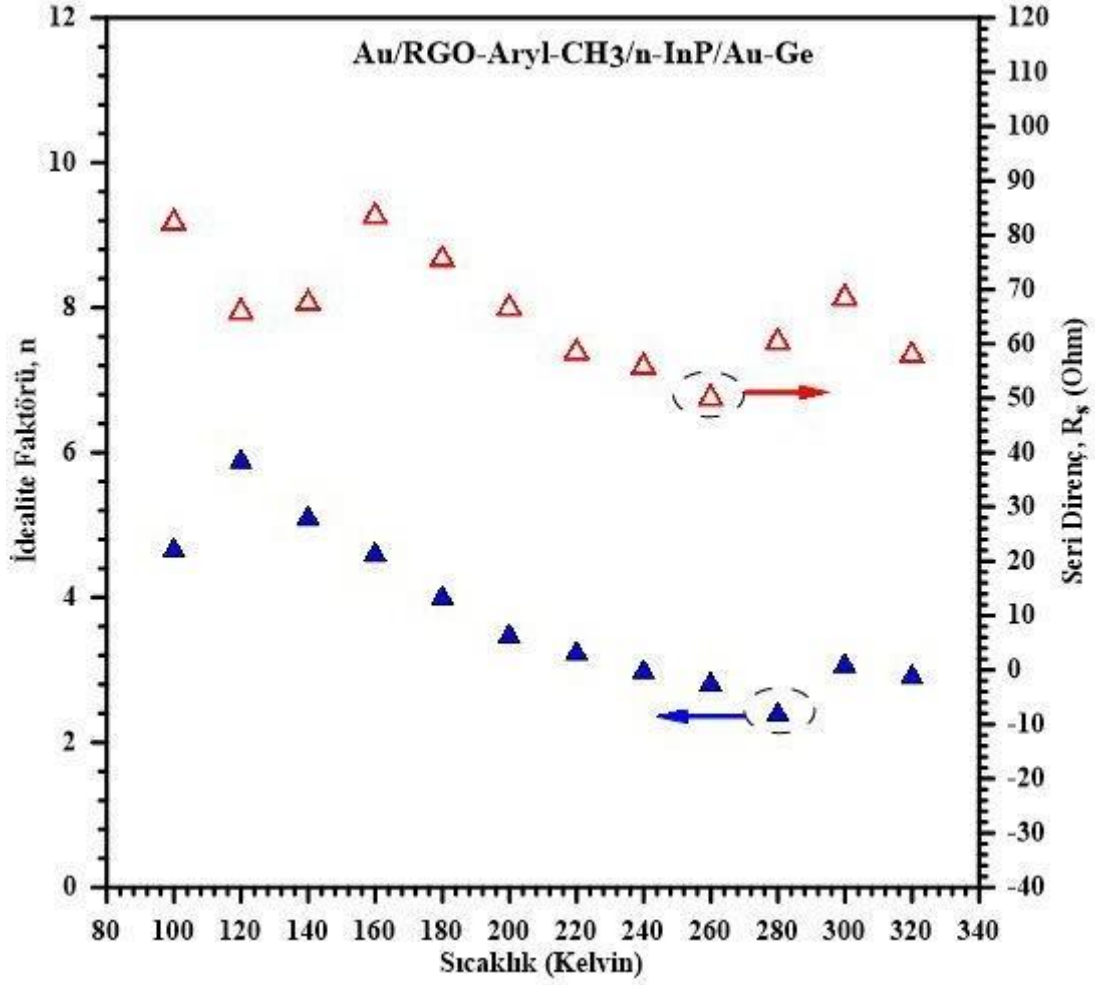
Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin Cibils fonksiyonu kullanılarak hazırlanan $F(V)$ - I garfikleri 100 K için Şekil 46 (a)'da, 320 K için de Şekil 46 (b)'de sunulmuştur. Bu grafiklerden türetilen I_0 - V_a ilişkisinden hesaplanan n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri ise Şekil 47'de gösterilmiştir. Bu grafikten n değerlerinin 120-260 K aralığında azaldığı, 260-320 K aralığında hemen hemen sabit kaldığı, R_s değerlerinin ise 100-160 K aralığında düzensiz, 160-260 K aralığında azaldığı ve 260-300 K aralığında ise hafifçe arttığı tespit edilmiştir. Cibils Metodu kullanılarak 100-320 K aralığında hesaplanan tüm n ve R_s değerleri Tablo 10'da sunulmuştur.



Şekil 46. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K’de Cibils fonksiyonu $F(V)$ ’nin I ile değişim eğrileri (I_0 - V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir) (devam)

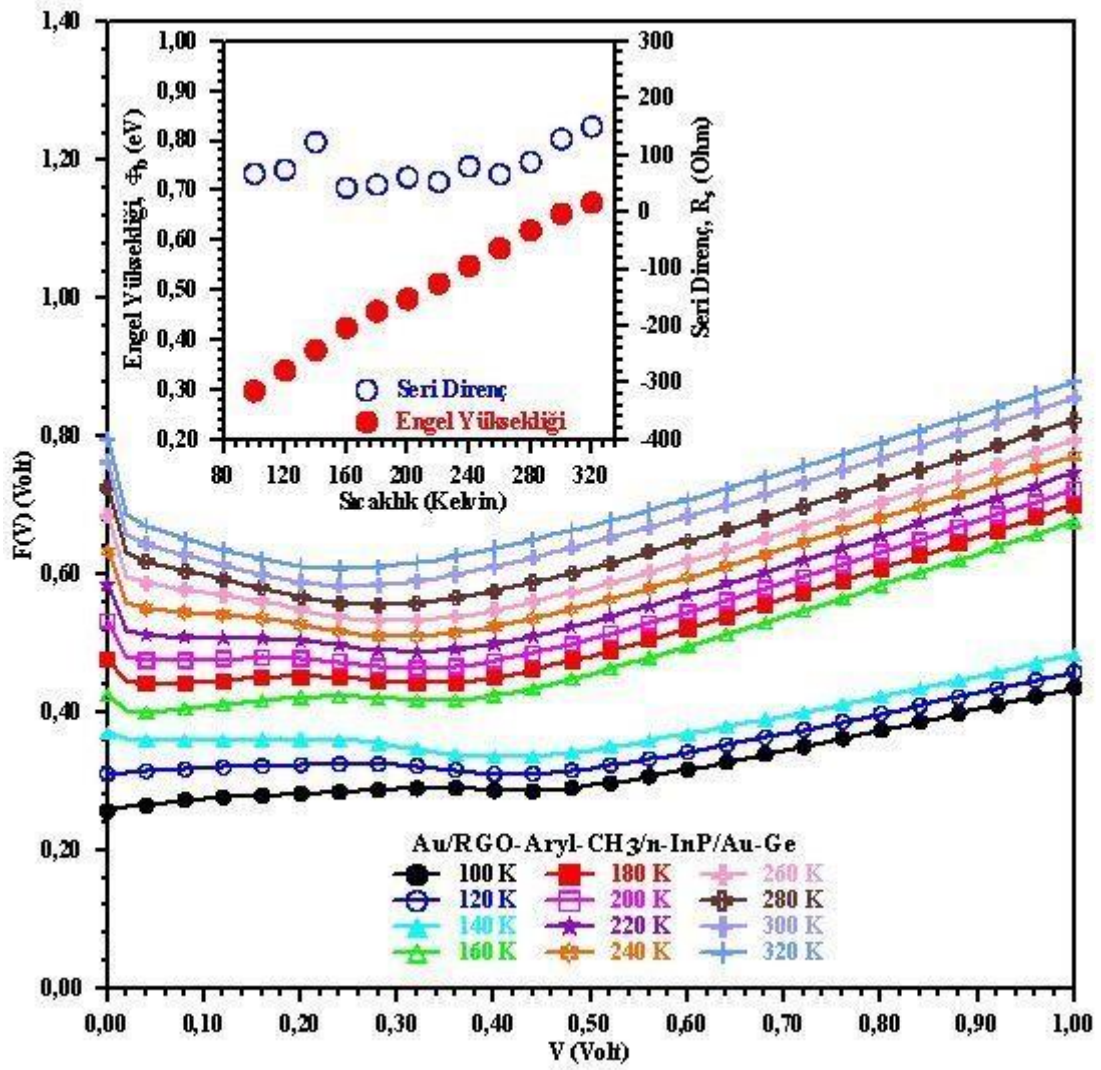


Şekil 46. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin (a) 100 K ve (b) 320 K’de Cibils fonksiyonu $F(V)$ ’nin I ile değişim eğrileri (I_0 - V_a değişimleri şekillerin içerisinde verilmiştir)



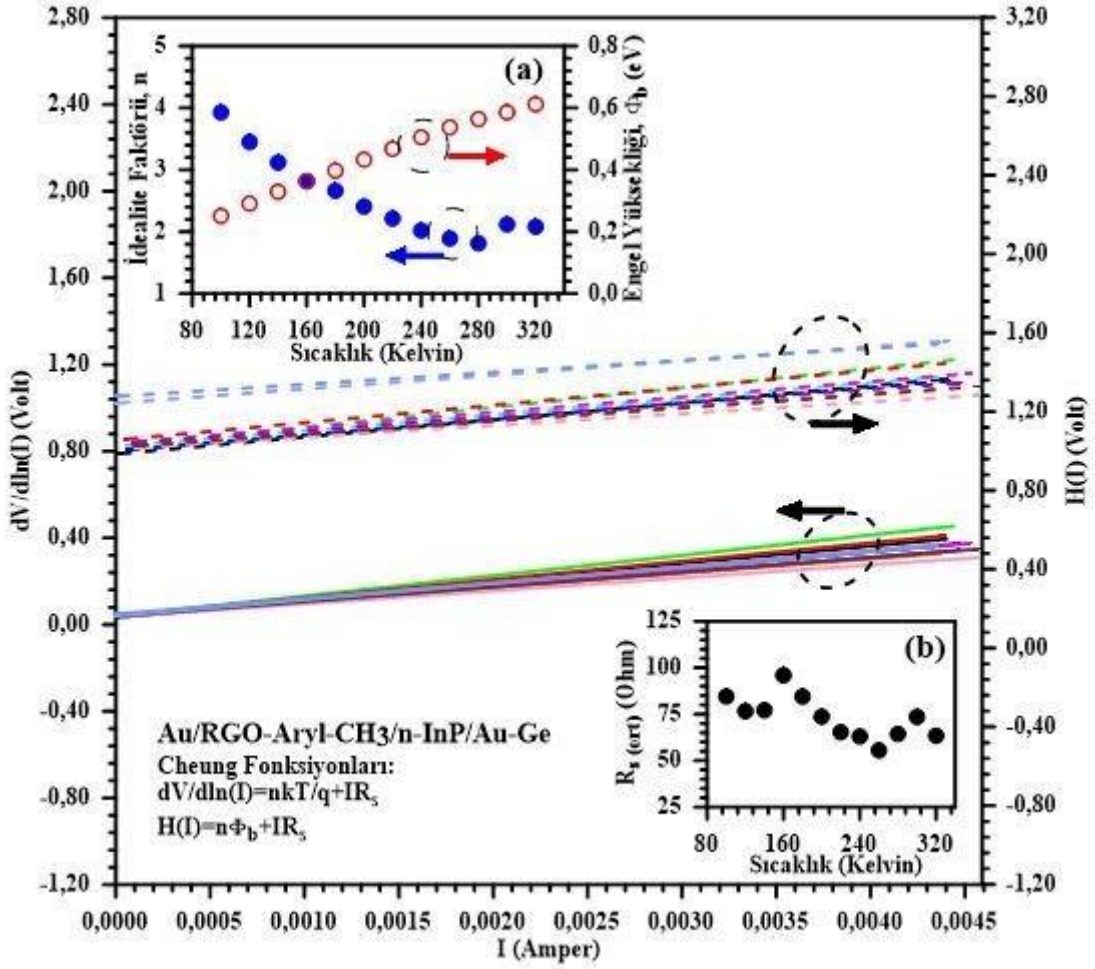
Şekil 47. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin Cibils metodundan elde edilen n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri

Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin Norde fonksiyonu kullanılarak hazırlanan $F(V)$ - V grafikleri Şekil 48’de, Φ_b - R_s - T grafikleri de bu şeklin içerisinde verilmiştir. Φ_b - R_s - T grafiklerinden, artan numune sıcaklığı ile Φ_b değerlerinin lineer olarak arttığı, R_s değerlerinin ise 260 K’e kadar hemen hemen sabit kaldığı, 260 K’den sonra ise hafifçe arttığı tespit edilmiştir. Norde metodu kullanılarak 100-320 K aralığında hesaplanan Φ_b ve R_s değerleri Tablo 10’da sunulmuştur.



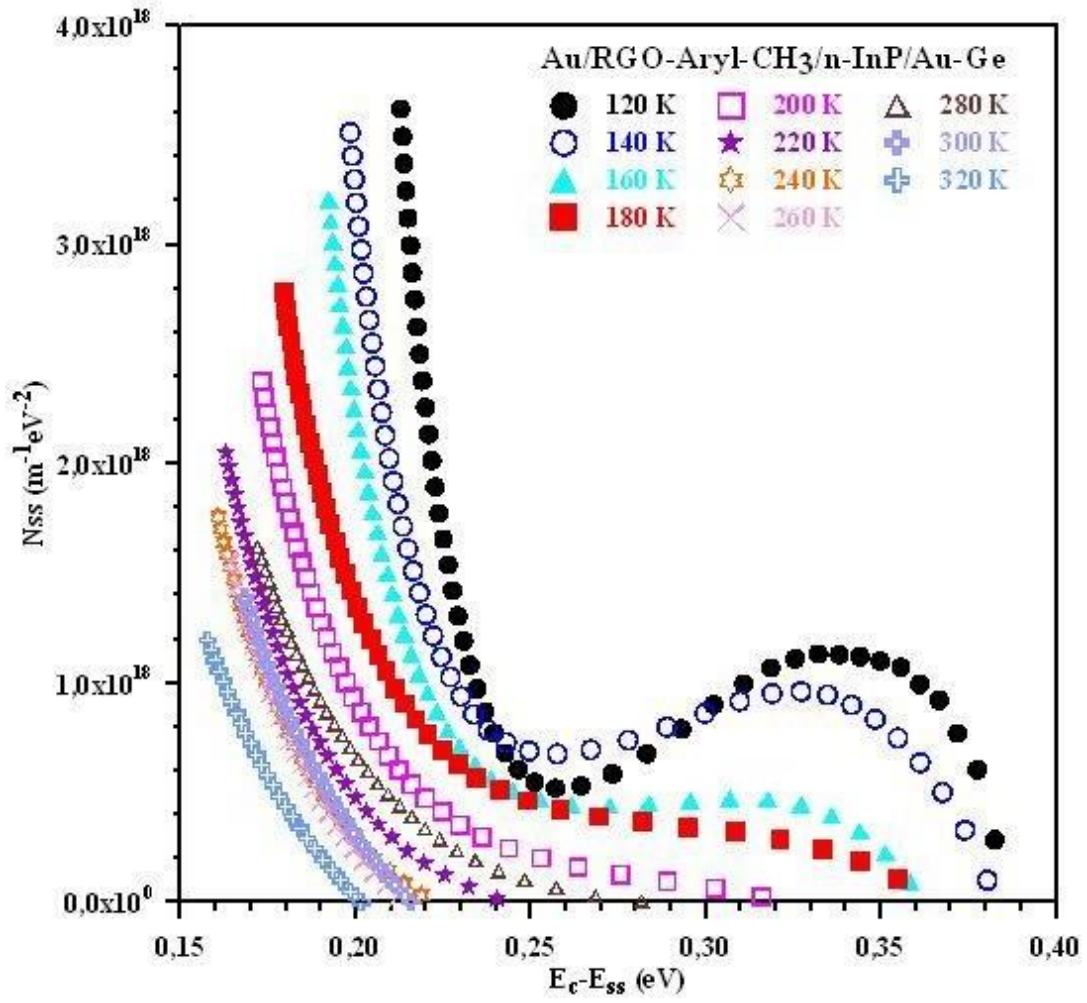
Şekil 48. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak Norde fonksiyonu $F(V)$ 'nin V 'ye göre değişimleri (Φ_b ve R_s 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde gösterilmiştir)

Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin Cheung fonksiyonları kullanılarak hazırlanan $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri, Şekil 49'da, bu grafiklerden hesaplanan $n-\Phi_b-T$ grafikleri bu şeklin içerisinde Şekil(a)'da ve $R_{s(ort)}-T$ grafikleri de yine bu şeklin içerisinde Şekil (b)'de sunulmuştur. $n-\Phi_b-T$ grafiklerinden, artan T ile n değerlerinin 280 K'e kadar lineer azaldığı ve 280 K'den sonra sabit kaldığı, Φ_b değerlerinin 100-320 K aralığında lineer olarak arttığı, $R_{s(ort)}-T$ grafiğinden ise $R_{s(ort)}$ değerlerinin 100-160 K aralığında düzensiz, 160-260 K aralığında lineer azaldığı ve 260 K'den sonra ise hafifçe arttığı gözlenmiştir. Cheung metodu kullanılarak 100-320 K aralığında hesaplanan n , Φ_b ve $R_{s(ort)}$ değerleri Tablo 10'da sunulmuştur.



Şekil 49. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin sıcaklığa bağlı olarak $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I değişimleri (n ve Φ_b 'nin T 'ye göre değişimleri bu şeklin içerisinde (a)'da, $R_{s(ort)}$ 'un T 'ye göre değişimleri ise (b)'de gösterilmiştir)

Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesi için hazırlanan $N_{ss} - (E_c - E_{ss})$ grafikleri Şekil 50'de sunulmuştur. Artan $E_c - E_{ss}$ değerleri ile N_{ss} değerlerinin azaldığı görülmüştür. $T=320$ K'de N_{ss} yaklaşık olarak $0,1 \times 10^{18}$ - $1,2 \times 10^{18} \text{ m}^{-1} \text{ eV}^{-2}$ aralığında ve $T=120$ K'de de $0,2 \times 10^{18}$ - $3,7 \times 10^{18} \text{ m}^{-1} \text{ eV}^{-2}$ aralığında değişmiştir. Aynı zamanda azalan numune sıcaklığı ile arayüzey hal yoğunluk eğrileri bant ortasına doğru kaymıştır.



Şekil 50. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinin *I-V* ölçümlerinden numune sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan arayüzey hal yoğunluk değerlerinin $E_c - E_{ss}$ 'ye göre değişimleri

Tablo 10. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge Numunesinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Alınan *I-V* Karakteristiklerinden Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung Metotları Kullanılarak Hesaplanan Engel Parametrelerinin Değerleri

Au/RGO-Ary-CH ₃ /n-InP/Au-Ge												
Termoiyonik Emisyon Metodu (Rhoderick Metodu)					Cibils Metodu		Norde Metodu		Cheung Metodu			
Sıcaklık (K)	Açılma Voltajı (V)	I ₀ (A)	Φ _b (eV)	n	R _s (Ω)	n	Φ _b (eV)	R _s (Ω)	Φ _b (eV)	R _{s(ort)} (Ω)	n	
100	0,527	5,762 x10 ⁻¹³	0,300	2,746	82,875	4,648	0,298	67,201	0,251	84,563	3,928	
120	0,517	3,415 x10 ⁻¹²	0,345	2,464	66,474	5,874	0,339	74,665	0,291	76,606	3,450	
140	0,505	1,585 x10 ⁻¹¹	0,388	2,188	68,067	5,086	0,380	123,17	0,329	77,145	3,117	
160	0,485	6,473 x10 ⁻¹¹	0,427	1,904	84,119	4,590	0,425	43,013	0,363	95,947	2,817	
180	0,470	3,016 x10 ⁻¹⁰	0,461	1,822	76,156	3,989	0,458	48,134	0,397	84,493	2,664	
200	0,454	1,442 x10 ⁻⁹	0,489	1,767	67,206	3,463	0,483	61,363	0,433	73,684	2,408	
220	0,439	4,905 x10 ⁻⁹	0,518	1,686	59,035	3,224	0,514	53,198	0,468	65,327	2,214	
240	0,423	9,180 x10 ⁻⁹	0,556	1,533	56,337	2,970	0,549	80,556	0,505	62,975	2,019	
260	0,409	1,883 x10 ⁻⁸	0,590	1,413	50,619	2,800	0,585	66,820	0,537	55,543	1,891	
280	0,384	3,428 x10 ⁻⁸	0,624	1,285	60,958	2,383	0,620	88,098	0,564	64,337	1,813	
300	0,374	6,824 x10 ⁻⁸	0,655	1,193	69,075	3,054	0,654	128,896	0,586	73,551	2,118	
320	0,356	1,458 x10 ⁻⁷	0,681	1,156	58,507	2,900	0,676	150,286	0,612	63,401	2,082	

TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada taban malzeme olarak bir yüzü parlak diğer yüzü mat olan n-InP yarıiletkeni kullanılmıştır. Standart kimyasal temizleme işleminden sonra, uygun boyutta kesilen n-InP yarıiletkeninin mat yüzeyi üzerine, laboratuvarında hazırlanan Au-Ge alışı (ağırlıkça %88 Au, %12 Ge) kaplama ünitesi içerisinde 10^{-7} Torr basınçta buharlaştırılarak ve hemen takibinde tavlama fırınında 425°C 'de azot gazı ortamında tavlanoarak omik kontak yapılmıştır. Arayüzey tabakalı üç ayrı numune üretmek için, Au-Ge alışı ile omik kontak yapılan n-InP yarıiletkeni elmas kalem yardımıyla üç parçaya bölünmüştür. Parçaların her birinin parlak ve temiz yüzeyleri üzerine solvotermal yöntemle sentezlenen sırasıyla RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ çözeltileri döndürerek kaplama yöntemiyle ince film halinde büyütülmüştür. RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ numunelerinin karakterizasyonları XRD, XPS ve Raman spektroskopisi yardımıyla yapılmıştır. Elektriksel ölçümler yapabilmek ve doğrultucu kontak alanlarını belirlemek için, filmlerin üzerine kaplama ünitesinde ve 10^{-7} Torr basınçta Au metali buharlaştırılmıştır. Dairesel geometrili kontaktların alanı $7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Böylece Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge yapıları laboratuvar şartlarında üretildikten sonra, yapıların akım iletim mekanizmalarını anlamak için, *I-V* karakteristikleri 20 K adımlarla 100-320 K aralığında ölçülmüş ve engel parametreleri TE modeline dayanan Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung metodları kullanılarak hesaplanmıştır. Sonuçlar analiz modellerinin farkları da göz önüne alınarak literatür eşliğinde karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

RGO ve kovalent fonksiyonize RGO'ların (RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃) karakterizasyonları XRD, Raman spektroskopisi ve XPS yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ numunelerinin XRD spektrumlarından tabakalar arası aralıkları ve organizasyonları hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Buna göre GO, 0,84 nm'lik (*d*₀₀₂) tabakalar arası mesafe ile (002) kafes düzlemine atfedilen karakteristik kırınım pikini $2\theta=10,5^{\circ}$ 'de sergilerken, RGO'nun (002) kırınım piki, $2\theta=24,7^{\circ}$ ye doğru kaymıştır ve *d*₀₀₂ için tabakalar arası mesafe 0,36 nm olarak belirlenmiştir. RGO'da karakteristik kırınım pikinin daha yüksek açılara doğru kayması, ara tabaka oksijen fonksiyonel gruplarının çıkarılmasıyla iyi istiflenmiş grafen tabakalarının oluşmasına atfedilmiştir. Benzen türevlerinin RGO yüzeyine kovalent bağlanmasından sonra, (002)

kırınım pikleri RGO-Aryl ($2\theta = 25,4^\circ$) ve RGO-Aryl-CH₃'de ($2\theta = 25,6^\circ$) yaklaşık aynı açı konumunda gözlenmiştir.

GO, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ numunelerinin Raman spektrumları dikkate alındığında, GO'ya ait D ve G bantlarının sırasıyla 1353 ve 1592 cm⁻¹'de yerleştiği belirlenirken, RGO'da bu bantların 1347 ve 1583 cm⁻¹'de yerleştiği tespit edilmiştir. D bandı sp³-hibritleşmiş karbonların titreşimleriyle ilgiliyken, G bandı, grafen tabakalarındaki E_{2g} titreşim modunun birinci dereceden saçılmasıyla ilgilidir. RGO'da G bandının 1592'den 1583 cm⁻¹'e kayması termal indirgeme sırasında oksijen içeren fonksiyonel grupların eliminasyonu ile grafen parçacıklarının sayısının arttığını göstermektedir. Raman yoğunluk oranı (I_D/I_G) grafit yapının kalitesini değerlendirmek için kullanılmaktadır. GO için bu oran 0,90 olarak elde edilirken, RGO'da 0,99 olarak belirlenmiştir ve bu durum indirgeme işleminden sonra RGO yapısında kusurların arttığını ortaya koymaktadır. RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ için I_D/I_G oranları sırasıyla 1,07 ve 1,01 olarak elde edilmiştir.

XPS yöntemiyle GO'nun indirgenmesi ve RGO'nun diazonyum tuzları kullanılarak benzen halkaları ile kovalent fonksiyonizasyonu araştırıldığında, GO'nun ayrıştırılmış C1s XPS spektrumu 284,1, 285,1, 286,3, 287,3 ve 288,5 eV'da beş farklı bileşenin varlığını gösterirken, RGO'nun C1s spektrumu, 286,3, 287,3 ve 288,5 eV'daki piklerin yoğunluklarında önemli bir azalma olduğunu göstermektedir. GO'da 284,1 eV'daki pik, sp²-hibritleşmiş karbonun C1s sinyali, 285,1 eV'daki ikinci pik kusurların varlığına işaret eden sp³-hibritleşmiş karbon atomlarına, 286,3, 287,3 ve 288,5 eV'daki pikler ise sırasıyla hidroksil (-C-OH), keton (-C=O) ve karboksil (-COOH) karbonlarına karşılık gelmektedir. RGO'nun C1s spektrumunda 286,3, 287,3 ve 288,5 eV'daki piklerin yoğunluklarında önemli bir azalma söz konusudur ve bu durum, oksijen içeren -C-OH ve -C=O fonksiyonel grupların DMF reflüks ile giderildiğini göstermektedir. Aynı zamanda RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ numunelerinin de RGO'nun spektrumuna benzer pikler sergilediği tespit edilmiştir. N1s bölgesi için 398 ve 400 eV'luk ortalama bağlanma enerjilerinde elde edilen pikler, indirgenmiş nitrojen türlerinden ve azo köprülerinden kaynaklanmaktadır.

Üretilen devre elemanlarının oda sıcaklığında alınan *I-V* ölçümlerinden doğrultucu davranış sergiledikleri belirlendikten sonra, 20 K adımlarla 100-320 K aralığında *I-V* ölçümleri numune sıcaklığına bağlı olarak yapılmış ve engel parametreleri hesaplanmıştır. Üretilen Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge devre elemanlarının akım-voltaj-sıcaklık (*I-V-T*) ölçümleri aşağıda karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

İdealite faktörü, potansiyel engel yüksekliği ve seri direnç, MY doğrultucu eklemleri karakterize eden en önemli parametreler arasındadır ve bu parametreler TE teorisine dayalı farklı tekniklerle hesaplanabilirler. İdealite faktörü ideal diyot davranışından sapmanın bir ölçüsünü temsil ederken, potansiyel engel yüksekliği yeterli enerjiye sahip yük taşıyıcılarının ekleminden geçmesine izin verir. Seri direnç ise yarıiletken gövde (bulk), omik kontaklar ve bağlantı tellerinden oluşan dirençlerin toplamını ifade eden bir parametredir. Aynı zamanda bu parametrelerin değerleri MY eklemının arayüzey özelliklerine hassas bir şekilde bağlı olduğundan, eklem özelliklerinin analizinde bu parametrelerin deneysel olarak belirlenmesi çok önemlidir. Bu nedenle bu parametreleri deneysel olarak hesaplamak için birçok model geliştirilmiştir Rhoderick (1988), Cibils and Buitrago (1985), Norde (1979), Bohlin (1986) ve Cheung and Cheung (1986) tarafından geliştirilen modeller bunlardan bazılarıdır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında yukarıda belirtilen parametreler öncelikle Rhoderick (I - V yöntemi) yöntemi yardımıyla, daha sonra Cibils, Norde ve Cheung metodları kullanılarak hesaplanmıştır.

100-320 K aralığında Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunelerinin doğru beslem I - V karakteristikleri sırasıyla Şekil 30, 37 ve 44'de, doğru ve ters beslem $\ln(I)$ - V karakteristikleri ise bu şekillerin içerisinde Şekil (a) olarak gösterilmiştir. Her üç numune için de I - V ve $\ln(I)$ - V karakteristiklerinin numune sıklığına güçlü bir şekilde bağlılığı eklem boyunca termal olarak uyarılmış iletimi akla getirmektedir. Taşıyıcı aktivasyon enerjisinin artmasıyla doğru beslemde akım artan sıcaklıkla artmaktadır. Engel parametrelerini elde etmek için TE modelinin uygulandığı düşük doğru beslemlerde (yaklaşık olarak 0,1'den 0,5 V'a kadar) doğrusal bir bölge gözlenmiştir. Ancak 0,5-2,0 V yüksek gerilim bölgesindeki doğrusallıktan sapma, seri direnç gibi diğer süreçlerin katkısına bağlanmıştır. $\ln(I)$ - V karakteristiklerinin ters beslem kısmında, her sıcaklıkta ters beslem voltajı arttığında ters beslem akımında doyum gözlenmiştir.

Açılma voltajı, sinyal doğrultma ve anahtarlama için kullanılan diyotların önemli bir parametresidir. Eğer diyot üzerindeki voltaj, açılma voltajı değerinden düşükse diyot akımı çok küçüktür. Eğer diyot üzerindeki voltaj, açılma voltajından daha yüksekse diyot tam olarak iletir. Dolayısıyla açılma voltajı, doğru beslenmiş bir diyotun tam olarak ilettime başladığı voltajdır (Rashid 2011). Pratik bir diyotta açılma voltajı, diyotun üstel olarak ilettime başladığı nokta kullanılarak tanımlanabilir. Doğru beslem I - V grafiklerinin doğrusal bölgelerine yapılan doğrusal fitler yardımıyla devre elemanlarının açılma voltajları numune sıcaklığının fonksiyonu olarak hesaplanmıştır ve açılma voltajı-sıcaklık değişimleri Şekil 30, 37 ve 44'ün içerisinde Şekil (b) olarak sunulmuştur. Açılma voltajı-sıcaklık grafikleri üç numunede de

açılma voltajının artan numune sıcaklığı ile hemen hemen doğrusal bir şekilde azaldığını göstermiştir. Yani açılma voltajının değeri eklem sıcaklığına bağlıdır. Belirli bir akımı üretmek için gerekli diyot voltajı, sıcaklığın artmasıyla azalmıştır. Bu durum taşıyıcı konsantrasyonunun, yarıiletken enerji bant aralığının ve hallerin etkin yoğunluğunun sıcaklığa bağlılığına atfedilmiştir (Jang and Jang 2013). Numune sıcaklığının azalmasıyla açılma voltajının artması, yarıiletkendeki serbest taşıyıcı konsantrasyonunun doğrudan sıcaklıkla azalmasıyla ilişkili olmasına bağlanabilir. Aynı zamanda açılma voltajı, yarıiletkende bant bükülmesinin olmadığı, yani bantların düz bant durumunda olduğu doğru beslem voltajı olarak da tanımlanabilir. Bu durumda eklem üzerindeki elektrik alanı sıfır olduğundan, diyot tamamen iletken hale gelir. Bununla birlikte, yarıiletkendeki serbest taşıyıcıların konsantrasyonu sıcaklığa bağlı olduğundan, numune sıcaklığının artmasıyla birlikte birçok serbest taşıyıcı, düz bant durumuna ulaşmadan önce eklemde geçebilir, bu da açılma voltajının azalmasına ve dolayısıyla büyük bir akımın üretilmesine neden olur (Özakın *et al.* 2022).

Numunelerin $\ln(I)$ - V grafiklerinin düşük doğru beslemlerde ortaya çıkan doğrusal bölgelerinin her birine yapılan doğrusal fitler yardımıyla numune sıcaklığına bağlı olarak I_0 , n ve Φ_b değerleri belirlenmiştir. Yine Şekil 30, 37 ve 44'ün içerisinde Şekil (b) olarak gösterilen I_0 - T grafikleri, üç numune içinde yaklaşık 200 K'den sonra saturasyon akımının artan sıcaklıkla hızla arttığını göstermiştir. Numune sıcaklığının artmasıyla birlikte I_0 değerlerinin artması, açılma voltajının sıcaklığa bağımlılığı ile ilgili olabilir (Sağlam *et al.* 2021). Daha öncede zikredildiği gibi, idealite faktörü, standart TE teorisinden herhangi bir sapmayı açıklayan boyutsuz bir parametredir (ideal bir eklem için $n = 1$) ve doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiğinin doğrusal bölgesinin eğiminden hesaplanabilir. Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunelerinin n - Φ_b grafikleri sırasıyla Şekil 31, 38 ve 45'de, n ve Φ_b 'nin T 'ye bağlı değişimleri ise her bir numune için bu şekillerin içerisinde gösterilmiştir. Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numuneleri için n değerlerinin sırasıyla 3,176-1,552, 3,046-1,310 ve 2,746-1,156 aralıklarında, Φ_b değerlerinin ise 0,260-0,624, 0,267-0,617 ve 0,300-0,681 eV aralıklarında değiştikleri Tablo 8, 9, ve 10'da gösterilmiştir. Aynı zamanda üç numunede de artan numune sıcaklığına bağlı olarak n değerlerinin azaldığı, Φ_b değerlerinin ise arttığı Şekil 31, 38 ve 45'in içerisinde verilen n - Φ_b - T grafiklerinde gözlenmiştir. n ve Φ_b değerleri arasında hemen hemen doğrusal bir ilişki olduğu Şekil 31, 38 ve 45'de açık bir şekilde görülmektedir. Bu grafiklerden n değerleri arttığında Φ_b değerlerinin azaldığı, yani daha büyük idealite faktörlerine, daha küçük engel yüksekliklerinin eşlik ettiği belirlenmiştir. n ve Φ_b değerlerinin'nin numune sıcaklığına bu şekilde bağımlılığı, potansiyel

engelin homojen olmamasıyla ilgili olabilir. Yani eklemden farklı yükseklikte potansiyel engeller vardır ve elektronlar düşük sıcaklıklarda alçak engellerden, yüksek sıcaklıklarda ise yüksek engellerden geçerler (Yıldırım *et al.* 2011). Sonuç olarak numune sıcaklığının artmasıyla potansiyel engelinin arttığı söylenebilir. Genel olarak devre elemanlarında engel yüksekliği değerleri, kontak malzemelerinin iş fonksiyonları, oluşturulan arayüzeyin özellikleri gibi birçok parametreye bağlı olarak değişebilmektedir. Düşük sıcaklıklarda idealite faktöründe önemli bir artış ve potansiyel engel yüksekliğinde bir azalma, arayüzey tabakasının kalınlığının homojen olmaması ve arayüzey yüklerinin homojen olmaması gibi diğer faktörlerden de kaynaklanabilir (Khurelbaatar *et al.* 2015). Her üç numunede de n değerlerinin birden büyük olması, eklemlerin ideal olmadığını göstermektedir ve bu durum arayüzey halleri, arayüzey tabakası ve jenerasyon-rekombinasyon akımları gibi faktörlerin varlığına atfedilebilir (Sze 1981; Rhoderick 1978). n ve Φ_b değerlerinin numune sıcaklığına bağlılığı ideal TE teorisinden açıkça sapmayı ve engel homojensizliklerini akla getirmektedir. Gerçekte yüzey durumları yarıiletkenin doğal bir özelliğidir ve doğru bir şekilde dikkate alınması gerekir. Ayrıca, termiyonik alan emisyonu ve engel boyunca tünelleme gibi diğer faktörler de gerçek Schottky engel yüksekliğini, yüzey halleri, kusurlar ve imaj kuvvet düşmesi gibi katkıları göz ardı eden Schottky-Mott modeli kullanılarak elde edilen değerden değiştirebilir. Aslında, yüksek yüzey hal yoğunluğuna sahip bir yarıiletken için, Schottky-Mott modelinin aksine engel yüksekliği metal iş fonksiyonuna bağlı değildir. Bu nedenle gerçek Schottky eklemlerinin daha iyi anlaşılması için yukarıda belirtilen faktörlerin katkısının dâhil edilmesi gerekmektedir (Sze 1981; Bardeen 1947).

Geleneksel olarak, termiyonik emisyon veya difüzyon modellerini kullanarak I_0 'ın belirlenmesi yoluyla hemen hemen ideal ($n \approx 1$) Schottky diyotun engel yüksekliğini hesaplamak mümkündür (Sze 1981). Seri direncin etkili olmadığı bir diyotun doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiği doğrusaldır ve bu bölgeden I_0 , n ve Φ_b değerleri hesaplanabilmektedir. Ancak idealite faktörü 1,1'den büyük olan Schottky diyotların I - V karakteristikleri Φ_b hakkında yeterince doğru bilgi veremeyebilir (Rhoderick 198; Sharma 2013). Gerçek diyotlar, geleneksel yöntemin başarısız olmasına neden olan yüksek bir seri dirence sahip olabilirler. Bu nedenle diyotların I - V karakteristiklerinin değerlendirilmesinde seri direnç dikkate alınmalıdır (Cibils and Buitrago 1985). Seri dirence sahip ideal olmayan Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan metodlardan birisi ayrıntıları kuramsal temeller kesiminde verilen Cibils metodudur. Bu metot uygulanarak Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numuneleri için hazırlanan $F(V)$ - I grafikleri 100 K için sırasıyla, Şekil 32 (a), Şekil 39 (a) ve Şekil 46 (a)'da, 320 K için de Şekil 32 (b), Şekil 39 (b) ve Şekil 46 (b)'de gösterilmiştir. Aynı zamanda bu

grafiklerden belirlenen I_0-V_a grafikleri de yine bu grafiklerin içerisinde sunulmuştur. Üç numune için de I_0-V_a ilişkilerinden belirlenen n ve R_s değerleri sırasıyla Tablo 8, 9 ve 10'da, n ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri de Şekil 33, 40 ve 47'de verilmiştir. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinde n değerleri 180 K'e kadar T ile azalmış, 180 K'den sonra hemen hemen sabit kalmıştır. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinde n değerleri 200 K'e kadar T ile azalmış, 200 K'den sonra hemen hemen sabit kalmıştır. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinde ise n değerleri 280 K'e kadar T ile azalmış, 280 K'den sonra hemen hemen sabit kalmıştır. Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinin R_s değerleri 180 K'e kadar artmış, 180-240 K arasında azalmış ve 240 K'den sonra hemen hemen sabit kalmıştır. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinde R_s değerleri 220 K'e kadar azalmış, 220-280 K aralığında artmış ve 280 K'den sonra hemen hemen sabit kalmıştır. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinde ise R_s değerleri 160 K'e kadar kararsız, 160-260 K arasında azalmış ve 260 K'den sonra hafifçe artmıştır.

Diyot seri direncini dikkate alan bir diğer metod ayrıntıları kuramsal temeller kesiminde verilen Norde metodudur. Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunelerinin $F(V)$ - V grafikleri sırasıyla Şekil 34, 41 ve 48'de ve bu grafiklerde $F(V)$ 'nin minimum noktalarına karşılık gelen akım ve voltaj değerlerinden yararlanılarak hesaplanan Φ_b ve R_s değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri ise bu şekillerin içerisinde sunulmuştur. Aynı zamanda üç numune için $F(V)$ - V ilişkilerinden belirlenen Φ_b ve R_s değerleri sırasıyla Tablo 8, 9 ve 10'da da verilmiştir. Şekil 34, 41 ve 48'den ve Tablo 8, 9 ve 10'dan da görüldüğü gibi, üç numunede de Φ_b değerleri artan numune sıcaklığı ile lineer olarak artarken, R_s değerleri Au/RGO/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunelerinde hemen hemen sabit, Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinde ise 240 K'e kadar kararsız, 240 K'den sonra ise hemen hemen sabit bir davranış sergilemiştir.

n , Φ_b ve R_s değerlerinin belirlenmesinde kullanılan bir diğer metod ise Cheung metodudur. Ayrıntıları kuramsal temeller kesiminde verilen bu metotta parametreler, seri direnç ve arayüzey halleri gibi etkilerden dolayı doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiklerinin aşağı doğru bükülen bölgesinden hesaplanmaktadır. Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunelerinin $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri sırasıyla Şekil 35, 42 ve 49'da, bu grafiklerden hesaplanan n ve Φ_b değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri bu şekillerin içerisinde Şekil (a) olarak ve ortalama seri direnç değerlerinin numune sıcaklığına bağlı değişimleri de bu şekillerin içerisinde Şekil (b) olarak sunulmuştur. Aynı zamanda üç numune için $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I ilişkilerinden belirlenen n ,

Φ_b ve $R_{s(ort)}$ değerleri sırasıyla Tablo 8, 9 ve 10'da da verilmiştir. Şekil 34, 41 ve 48'den de görüldüğü gibi, üç numunede de Φ_b değerleri artan numune sıcaklığı ile hemen hemen lineer olarak artarken, n değerleri Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinde hemen hemen sabit, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunelerinde ise 280 K'e kadar azalmış, 280 K'den sonra sabit kalmıştır. Aynı zamanda $R_{s(ort)}$ değerleri, Au/RGO/n-InP/Au-Ge numunesinde 100-160 K aralığında artmış, 160-240 K aralığında azalmış, 240-320 K aralığında hemen hemen sabit kalmıştır. Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge numunesinde $R_{s(ort)}$ değerleri 100-220 K aralığında azalmış, 220-280 K aralığında hafifçe artmış ve 280-320 K aralığında hemen hemen sabit kalmıştır. Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunesinde ise 100-160 K aralığında hemen hemen sabit, 160-260 K aralığında azalmış ve 260-300 K aralığında ise hafifçe artmıştır.

Üretilen devre elemanlarının seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişmesi, düşük sıcaklıklarda yarıiletkendeki serbest taşıyıcı konsantrasyonlarındaki azalmalarla ilişkilendirilebilir (Rhoderick and Williams 1988; Sze 1981). Uygulanan ön beslemin bir kısmı seri direnç üzerinde düştüğünden ve bu parametre daha yüksek gerilimlerde daha etkili olduğundan, seri direnç, doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinin yeterince yüksek gerilimlerde aşağı doğru bükülmesinin nedenlerinden biridir. R_s değerlerinin sıcaklığa bağlılığı, potansiyel engel yüksekliğinin homojen olmamasından ve düşük sıcaklıklarda serbest taşıyıcı konsantrasyonunun azalmasından kaynaklanabilir (Özakın *et al.* 2022).

MY doğrultucu eklemlerde, çeşitli nedenlerle yarıiletken yüzeyinde ve yarıiletkenin yasak bant aralığında yer alan arayüzey halleri, yarıiletken tabanlı devre elemanlarının potansiyel engel parametreleri üzerinde baskın bir etkiye sahiptir. Bu arayüzey halleri, devre elemanlarının $\ln(I)$ - V karakteristiklerinin yeterince büyük doğru beslem gerilimlerinde aşağı doğru bükülmesinin nedenlerinden biri olarak görülebilir. Yüksek yoğunluklu arayüzey halleri, yarıiletken bant aralığının ortasına yakın Fermi düzeyinin çakılmasına neden olarak engel yüksekliğinin ideal durumdan önemli ölçüde sapmasına ve idealite faktörünün büyük değerler almasına sebep olabilirler. Arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımları, doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinin aşağı doğru büküldüğü bölgede enerjiye bağlı olarak hesaplanabilir (Choi *et al.* 2015). Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunelerinin doğru beslem $\ln(I)$ - V grafiklerinden E_c - E_{ss} enerjilerine göre hesaplanan arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımları numune sıcaklığının fonksiyonu olarak sırasıyla Şekil 36, 43 ve 50'de sunulmuştur. Her üç numunede de arayüzey hal yoğunluk eğrilerinin uygulanan gerilimle birlikte bant ortasından iletkenlik bandının tabanına doğru yaklaşık olarak eksponansiyel bir artış gösterdikleri ve artan numune sıcaklığı

ile de bant ortasından iletkenlik bandının tabanına doğru kaydıkları gözlenmiştir. Yine, her üç numunede de arayüzey hallerinin yoğunluk dağılımları hemen hemen aynı büyüklük mertebesinde (yaklaşık $10^{18} \text{ cm}^{-1}\text{eV}^{-1}$) olup, aynı tarzda değişim göstermişlerdir. Arayüzey hal yoğunluk dağılımlarının numune sıcaklığına bağlı olarak değişimleri, eklem arayüzeyinin termal yeniden yapılanması, yeniden düzenlenmesi ve arayüzeydeki kusur seviyelerinin varlığı ile yorumlanabilir. Bu arayüzey halleri tarafından yakalanan bazı elektronların oluşturduğu akım bileşeni, TE teorisinin öngördüğü akım bileşenine eklendiğinde diyotun I - V karakteristikleri etkilenebilir (Hudait and Krupanidhi 2001).

Farklı sıcaklıklarda elde edilen I - V karakteristikleri, Schottky engel diyotlarının kalitesi, akım iletim süreci ve olası ideal olmayan etkiler hakkında önemli bilgiler sağlayabilir (Al-Ahmadi 2020). Bu nedenle numunelerin I - V ölçümleri numune sıcaklığına bağlı olarak alınmıştır. Üç numunenin de I - V karakteristikleri asimetric yapıya sahiptir. Asimetri, uygulanan belirli bir voltajda doğru ve ters beslem akımları arasındaki oran olarak açıklanabilir. Bu oran aynı zamanda doğrultma oranı olarakta bilinmektedir ve üretilen diyotların doğrultma oranları oldukça yüksektir. Doğru beslem $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörü değerleri üç numunede de birden büyüktür. Dolayısıyla bu duruma yarıiletkenle dengedeki arayüzey halleri, metal ile yarıiletken arasına yerleştirilen arayüzey tabakaları, seri direnç ve potansiyel engelin homojen olmaması gibi faktörler sebep olabilir. Bu faktörler, daha yüksek doğru beslemelere sahip diyotların $\ln(I)$ - V grafiklerinde aşağı doğru bir bükülmeye neden olabilirler.

Engel yüksekliğinin homojen olmaması, Schottky engelinde anormal elektriksel davranışlara neden olabilir (Hardikar et al. 1999; Huang et al. 2011; Karataş et al. 2005; Tung 1992). Engel yüksekliği alçak ve yüksek bölgeler arasında dalgalandığında, homojen olmayan bir engel yüksekliği olarak kabul edilir ve Gauss dağılımı ile modellenenebilir (Al-Ahmadi and Al-Jawhari 2016). İdealite faktörü ve potansiyel engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlılığı, Gauss modeli aracılığıyla Schottky engel yüksekliğindeki ortalama engel yüksekliği etrafındaki yerel değişikliklerle açıklanabilir (Mtangi et al. 2009; Zhang 1999). Taşıyıcılar, sıcaklık arttığında TE yoluyla daha yüksek engelleri aşmak için yeterli enerjiyi elde ederler ve bu nedenle yamalar aracılığıyla mevcut taşınmaya hakim olurlar. Böylece idealite faktörü ve engel yüksekliği sıcaklığa bağlı hale gelir. Schottky diyotlarındaki engel yüksekliğinin homojen olmaması, idealite faktörüne karşı engel yüksekliğindeki değişimleri açıklamaktadır. MY ekleme yerleştirilen bir arayüzey tabakasının varlığı, arayüzde potansiyel engel yüksekliklerinin dağılımını etkileyebilir. Dolayısıyla Schottky diyotlardan bazıları TE mekanizmasını takip ederken diğerleri, Schottky diyotların arayüzeyine gömülü engel

yüksekliklerinin azalmasıyla ilgili yamalar nedeniyle bu mekanizmayı takip edemezler. Aynı zamanda Farklı metal fazlarından dolayı arayüzey metalurjisindeki farklılıklar da etkin engel yüksekliklerinin yerel varyasyonlarına yol açabilirler (Werner and Güttler 1991).

MY doğrultucu eklemlerinde yüzey halleri, yüzeydeki kontak metalinin atomlarıyla farklı şekillerde etkileşime girerek engel yüksekliklerinde yerel değişikliklere neden olabilirler. Bu nedenle, performansı yüzeye duyarlı olan Schottky diyot ve metal oksit yarıiletken alan etkili transistör gibi devre elemanlarında, yüzey kusurları elektrik alanının artmasına ve dolayısıyla sızıntı akımının artmasına neden olurlar. Üretim sırasında yüzeyde farklı boyut ve şekillerde yüzey nanoçukurları da oluşmuş olabilir. Ayrıca, kenar dislokasyonlarıyla ilişkili yüzey nanoçukurları da MY doğrultucu eklemlerinde sızıntı akımının artmasına yol açabilir. MY eklemden yarıiletken yüzeyindeki pozitif yüklü tuzaklar, metal ve yarıiletken Fermi seviyeleri arasındaki uyumsuzluğun neden olduğu arayüzeydeki elektrik alanını kısmen perdeleyebilir. Bu durumda yarıiletkendeki denge uzay yükü genişliği, ideal uzay yükü genişliğine göre daha dardır. Yarıiletken tarafındaki yerleşik (built-in) potansiyeli ifade eden bant bükülmesi azalır. Sıfır beslemde bant bükülmesine karşılık gelen ve I - V karakteristiklerinden belirlenen engel yüksekliği değeri, arayüzey tuzaklarından dolayı bant bükülmesi azaldığı için bundan önemli ölçüde etkilenebilir. Engel yüksekliği, doğru ve ters yönde beslem durumlarında bu tuzakların doldurulup boşaltılmasından etkilenir (Omar 2014; Güzeldir et al. 2022). Bu etkiler, metal ile yarıiletken arasına bir ara tabaka yerleştirilerek azaltılabilir ve devre elemanı uygulamalarında bazı avantajlar sağlayabilir. Örneğin, GO ve RGO gibi arayüzey tabakalarının yardımıyla, kararlı arayüzlere sahip yüksek performanslı MY doğrultucu eklemleri üretilebilir. Bu çalışmada, RGO, RGO-Aryl ve RGO-Aryl-CH₃ arayüzey tabakaları, MY arayüzeyindeki yarıiletken bant aralığında çeşitli nedenlerle oluşan arayüzey hallerini ve kusurları azaltmak ve üretilen devre elemanlarının performansını arttırmak için Au/n-InP eklemlerinde kullanılmıştır. Bu eklemlere ilişkin elde edilen sonuçların bu amacı doğrulayacak kapasitede olduğu tespit edilmiştir. Bu eklemlerin I - V ölçümleri 100-320 K aralığında numune sıcaklığına bağlı olarak ölçülmüş ve açılma voltajı, sızıntı akımı, idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi önemli engel parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Rhoderick, Cibils, Norde ve Cheung yöntemleri kullanılmış, sonuçlarda çapraz kontrol sağlanmış ve tüm sonuçlar karşılaştırma kolaylığı açısından Tablo 8, 9 ve 10'da sunulmuştur. Genel olarak farklı yöntemlerle hesaplanan parametrelerin değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Parametre değerlerinde gözlenen küçük çaplı sapmalar yöntemlerin türetilmesinde göz önüne alınan nüanslara atfedilmiştir. Özetle, Au/RGO/n-InP/Au-Ge, Au/RGO-Aryl/n-InP/Au-Ge ve Au/RGO-Aryl-CH₃/n-InP/Au-Ge numunelerinin doğrultma davranışları ve engel

parametreleri dikkate alındığında, solvotermal yöntemiyle sentezlenen RGO ve kovalent türevlendirilmiş RGO nanokompozit malzemelerin, MY doğrultucu eklemlerde arayüzey tabakası olarak güvenle kullanılabilecekleri söylenebilir.

KAYNAKÇA

- Ai, K., Liu, Y., Lu, L., Cheng, X. and Huo, L., 2011. A novel strategy for making soluble reduced graphene oxide sheets cheaply by adopting an endogenous reducing agent. *Journal of Materials Chemistry*, 21, 3365-3370.
- Al-Ahmadi, N. A. and Al-Jawhari, H. A., 2016. Effect of epitaxial layer thickness on the electrical properties of Ti/n-AlGaAs grown by MBE. *Results in Physics*, 6, 67-69.
- Al-Ahmadi, N. A., 2020. Schottky barrier inhomogeneities at the interface of different epitaxial layer thicknesses of n-GaAs/Ti/Au/Si: Al_{0.33}Ga_{0.67}As. *Heliyon*, 6, e04852.
- Altındal, S., 2015. On the origin of increase in the barrier height and decrease in ideality factor with increase temperature in Ag/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky barrier diodes (SBDs). *Journal of Materials and Electronic Devices*, 1 (1), 38-43.
- Aslan, F., Güllü, Ö., Ocak, Y. S., Rüzgar, Ş., Tombak, A., Özaydın, C. and Arsel, İ., 2015. Organik arayüzey tabakalı Al/CuPc/p-Inp kontakların fabrikasyonu ve elektriksel parametrelerinin incelenmesi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 5 (2), 263-275.
- Baltakesmez, A. and Güzeldir, B., 2023. Mixed halide perovskite compound thin film with large cation Guanidinium and applications: MIS (Au/GUAPbI₃-xClx/p-Si/Al) and p-FET (Al/p-Si/SiO₂/GUAPbI₃-xClx/Al). *Surfaces and Interfaces*, 40, 103066.
- Baltakesmez, A., 2019. Improved barrier parameters and working stability of Au/p-GO/n-InP/Au-Ge Schottky barrier diode with GO interlayer showing resistive switching effect. *Vacuum*, 168, 108825.
- Baltakesmez, A., Sevim, M., Güzeldir, B., Aykaç, C. and Biber, M., 2021. Interface application of NiPt alloy nanoparticles decorated RGO nanocomposite to eliminate of contact problem between metal and inorganic/organic semiconductor. *Journal of Alloys and Compounds*, 867, 158802.
- Bardeen, J., 1947. Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact. *Physical Review*, 71 (10), 717.
- Bashahu, M., Ngendabanyikwa, D. and Nyandwi, P., 2022. Non ideal Schottky barrier diode's parameters extraction and materials identification from dark IVT characteristics. *Journal of Modern Physics*, 13 (3), 285-300.
- Bilgili, A. K., 2015. n-InP yarıiletkeni ile hazırlanan TiO₂ arayüzey tabakalı MY kontakların elektriksel özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü , Fizik Ana Bilim Dalı.
- Blyth, R. I. R., Bupa, H., Netzer, F. P., Ramsey, M. G., Besenhard, J. O. and Golob, P., 2000. XPS studies of graphite electrode materials for lithium ion batteries, *Applied Surface Science*, 167, 99-106.
- Bohlin, K. F., 1986. Generalized Norde plot including determination of the ideality factor, *Journal of Applied Physics*, 60, 1223-1225.
- Braun, F., 1874. On the current conduction through metal sulphides (in German), *Annalen der Physik and Chemie*, 153 (4), 556-563.

- Card, H. C. and Rhoderick, E. H., 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4 (10), 1589-1601.
- Chabot, V., Higgins, D., Yu, A., Xiao, X., Chen, Z. and Zhang, J., 2014. A review of graphene and graphene oxide sponge: material synthesis and applications to energy and the environment. *Energy and Environmental Science*, 7 (5), 1564-1596.
- Cheung, S. K. and Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49 (2), 85-87.
- Choi, M. J., Kim, M. H. and Choi, D. K., 2015. A transparent diode with high rectifying ratio using amorphous indium-gallium-zinc oxide/SiNx coupled junction. *Applied Physics Letters*, 107, 053501.
- Choi, W., Lahiri, I., Seelaboyina, R. and Kang, Y. S., 2010. Synthesis of graphene and its applications: A review. *Critical Reviews In Solid State And Materials Sciences*, 35 (1), 52-71.
- Cibils, R. M., and Buitrago, R. H., 1985. Forward I-V plot for nonideal Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 58 (2), 1075-1077.
- Cui, H., Zhang, Y., Kang, Q., Chang, H. M., Zhang, X. B., Zhai, R. H. and Wang, G. Q., 2019. Bandgaps properties of III-phosphides (BP, AlP, GaP, InP) materials excited by ultrasonic. *Optik*, 177, 58-63.
- Çakıcı, T. and Sağlam, M., 2011. The effects of growth parameters on electrical characteristics of In₂S₃/n-InP junctions with In₂S₃ interfacial layer obtained by chemical spray pyrolysis method. *Materials Today: Proceedings*, 3 (5), 1262-1270.
- Çakıcı, T., 2014. In₂S₃ ince filminin n-InP altlık üzerine kimyasal püskürtme metoduyla büyütülmesi ve üretilen Au/n-InP/In ve Au/In₂S₃/n-InP/In yapıların numune sıcaklığına bağlı olarak elektriksel karakteristiklerinin karşılaştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Çakıcı, T., Sağlam, M. and Güzeldir, B., 2014. The effects of thermal annealing on the electrical characteristics of Au/n-InP/In diode. *Materials science in semiconductor processing*, 28, 121-126.
- Çaldıran, Z., Deniz, A. R., Coşkun, F. M., Aydoğan, Ş., Yeşildağ, A. and Ekinici, D., 2014. I-V-T (current-voltage-temperature) characteristics of the Au/Anthraquinone/p-Si/Al junction device. *Journal of Alloys and Compounds*, 584, 652-657.
- Çatır, F. E. C. and Sağlam, M., 2021. Annealing effect on I-V and C-V characteristics of Al/n-InP Schottky diodes at low temperatures. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6979-6985.
- Çatır, F. E. C., 2009. Ag/n-InP/In, Au/n-InP/In ve Cd/n-InP/In Schottky diyotların akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçümlerinden elde edilen karakteristik parametreler üzerine numune sıcaklığının ve termal tavlamanın etkileri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Çatır, F. E. C., 2021. Properties of a facile growth of spray pyrolysis-based RGO films and device performance for Au/RGO/n-InP Schottky diodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 611-622.
- Çetin, H. and Ayyildiz, E., 2005. Temperature dependence of electrical parameters of the Au/n-InP Schottky barrier diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 20 (6), 625.

- Deniz, A. R., 2023. Analysis of temperature dependent current-voltage and frequency dependent capacitance-voltage characteristics of Au/CoO/p-Si/Al MIS diode. *Microelectronics Reliability*, 147, 115114.
- Dimitrijević, S., 2012. Principles of semiconductor devices, Chapter 1, 2nd Ed., Oxford University Press Inc., Newyork Oxford, 2-31.
- Eda, G. and Chhowalla, M., 2010. Chemically derived graphene oxide: towards large-area thin-film electronics and optoelectronics. *Advanced Materials*, 22(22), 2392-2415.
- Efeoğlu, H., Türüt, A. and Gül, M., 2023. An experimental study: dependence of Schottky diode parameters on Schottky contact area size. *Optical Materials*, 142, 114038.
- Efeoğlu, H., Türüt, A. and Gül, M., 2023. Current-voltage characteristics of Pt metal-based and PtSi s-based n-Si Schottky diodes over a wide measuring temperature range. *Journal of Electronic Materials*, 52(2), 1410-1418.
- Ejderha, K., Yıldırım, N., Abay, B. and Türüt, A., 2009. Examination by interfacial layer and inhomogeneous barrier height model of temperature-dependent I-V characteristics in Co/p-InP contacts. *Journal of Alloys and Compounds*, 484(1-2), 870-876.
- El-Mahalawy, A.M., Abdrabou, M.M. and Mansour, S.A., 2023. Mechanistic exploration of charge transport and photosensitivity of metal/polymer/semiconductor (MPS) junction for sensitive light detection applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34, 2313.
- Fan, Z. J., Kai, W., Yan, J., Wei, T., Zhi, L. J. and Feng, J., 2011. Facile synthesis of graphene nanosheets via Fe reduction of exfoliated graphite oxide. *ACS Nano*, 5 (1), 191-198.
- Ferrari, A.C. and Robertson, J., 2000. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*, 61 (20), 14095-14107.
- Gündoğdu, Ö. F., 2013. İletken polimer (PNpCIPhPy) arayüzey tabakasının Au/n-tipi-InP Schottky diyot parametreleri üzerine etkileri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güzeldir, B., 2011. SILAR tekniği ile büyütülen CdS ince filmlerin sandviç tipi devre elemanları yapımında kullanılması ve bu yapıların karakteristiklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Güzeldir, B., Baltakesmez, A. and Sağlam, M., 2022. Microstructural properties of SiC thin film deposited by RF sputtering technique and its role on the barrier parameters of n-InP/Pd and n-GaP/Pd junctions as an interlayer. *Physica B: Condensed Matter*, 647, 414364.
- 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*, 68, 49-55.
- Huang, W. C., Horng, C. T., Cheng, J. C. and Chen, C. C., 2011. The current-voltage-temperature characteristics of Al/NPB/p-Si contact. *Microelectronic Engineering*, 88 (5), 597-600.
- Huang, W., Xia, X., Zhu, C., Steichen, P., Quan, W., Mao, W. and Li, X. A., 2021. Memristive artificial synapses for neuromorphic computing. *Nano-Micro Letters*, 13, 1-28.
- Hudait, M. K. and Krupanidhi, S. B., 2001. Interface states density distribution in Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge and n-GaAs substrates. *Materials Science and Engineering: B*, 87 (2), 141-147.

- Hummers, W. S. and Offeman, R. E. 1958. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80, 1339-1339.
- Jalili, R., Aboutalebi, S. H., Esrafilzadeh, D., Shepherd, R. L., Chen, J., Aminorroaya-Yamini, S. and Wallace, G. G. 2013. Scalable one-step wet-spinning of graphene fibers and yarns from liquid crystalline dispersions of graphene oxide: towards multifunctional textiles. *Advanced Functional Materials*, 23 (43), 5345-5354.
- Jang, S. H. and Jang J. S., 2013. Electrical characteristics and carrier transport mechanism for Ti/p-GaN Schottky diodes. *Electronic Materials Letters*, 9, 245-249.
- Jiao, K., Wang, X., Wang, Y. and Chen, Y., 2014. Graphene oxide as an effective interfacial layer for enhanced graphene/silicon solar cell performance. *Journal of Materials Chemistry C*, 2 (37), 7715-7721.
- Karataş, Ş., Altındal, Ş. and Çakar, M., 2005. Current transport in Zn/p-Si (100) Schottky barrier diodes at high temperatures. *Physica B: Condensed Matter*, 357 (3-4), 386-397.
- Karataş, Ş., and Yumuk, M., 2022. Electrical characteristics of Al/(GO:PTCDA)/p-type Si structure under dark and light illumination: photovoltaic properties at 40 mWcm⁻². *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33 (14), 10800-10813.
- Khan, Z. U., Kausar, A., Ullah, H., Badshah, A. and Khan, W. U., 2016. A review of graphene oxide, graphene buckypaper, and polymer/graphene composites: properties and fabrication techniques. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 32 (4), 336-379.
- Khurelbaatar, Z., Shim, K. H., Cho, J., Hong, H., Reddy, V. R. and Choi, C. J., 2015. Temperature dependent current-voltage and capacitance-voltage characteristics of an Au/n-type Si Schottky barrier diode modified using a PEDOT: PSS interlayer. *Materials Transactions*, 56 (1), 10-16.
- Kim, H., 2016. Capacitance-voltage (C-V) characteristics of Cu/n-type InP Schottky diodes. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 17 (5), 293-296.
- Kocyigit, A., Aydoğan, S., İncekara, Ü. and Yılmaz, M., 2023. The electrical characteristics of the Co/giemesa/n-Si heterostructure depending on measurement temperatures and frequencies. *IEEE Sensors Journal*, 23 (8,15), 8184-8191.
- Kolnik, J. and Ozvold, M., 1990. The Influence of inversion surface layers on the evaluation of the interface state energy distribution from Schottky diode I-U characteristics. *Physica Status Solidi (a)*, 122 (2), 583-588.
- Kudas, Z., Gür, E. and Ekinci, D., 2018. Synthesis of graphene-like films by electrochemical reduction of polyhalogenated aromatic compounds and their electrochemical capacitor applications. *Langmuir*, 34, 7958-7970.
- Lakshmi Devi, V., Jyothi, I. and Rajagopal Reddy, V., 2012. Electrical transport properties of Ru/Cu/n-InP Schottky barrier diode based on temperature-dependent I-V and C-V measurements. *Indian Journal of Physics*, 86, 687-695.
- Lee, X. J., Hiew, B. Y. Z., Lai, K. C., Lee, L. Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S. and Rigby, S., 2019. Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 98, 163-180.
- Liu, J., Papadakis, R. and Li, H., 2018. Experimental observation of size-dependent behavior in surface energy of gold nanoparticles through atomic force microscope. *Applied Physics Letters*, 113 (8), 083108.

- Liu, M., Duan, Y., Wang, Y. and Zhao, Y., 2014. Diazonium functionalization of graphene nanosheets and impact response of aniline modified graphene/bismaleimide nanocomposites. *Materials and Design*, 53, 466-474.
- Louis, P., Besland, M. P., Robach, Y. and Joseph, J., 1995. Correlations between the electrical characteristics of metal-oxide-InP tunnel diodes and the nature of thin interfacial oxides. *Journal of the Electrochemical Society*, 142 (4), 1343.
- Mishra, U. K. and Singh, J., 2008. *Semiconductor device physics and design*, Chapter 5, 1st Ed., Springer Dordrecht, The Netherlands, 216-230.
- Mott, N. F., 1938. Note on the contact between metal and semiconductor. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34 (4), 568.
- Mtangi, W., Auret, F. D., Nyamhere, C., Van Rensburg, P. J., Diale, M. and 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: Condensed Matter*, 404 (8-11), 1092-1096.
- Norde, H., 1979. A modified forward *I-V* plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50, 5052-5053.
- Norrman, K., Ghanbari-Siahkali, A. and Larsen, N. B., 2005. Studies of spin-coated polymer films. *Annual Reports Section C (Physical Chemistry)*, 101, 174-201.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D. E., Zhang, Y., Dubonos, S. V. and Firsov, A. A., 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306 (5696), 666-669.
- Odabaş, M., 2020. Au/p-Si/Al, Au/GO/p-Si/Al ve Au/Au-RGO/p-Si/Al yapılarının elektriksel karakteristiklerinin numune sıcaklığına bağlı olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Omar, S. U., 2014. The role of interface effects and minority carriers in the metal-semiconductor Schottky junction. Doctoral dissertation, University of South Carolina.
- Orhan, Z., Taşer, A., Güzeldir, B. and Sağlam, M., 2021. The temperature dependence of current-voltage characteristics of CuAuAg/n-Si/Ti Schottky diode. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6924-6928.
- Özakın, O., Sağlam, M. and Güzeldir, B., 2022. Transfer of graphene thin film obtained by PECVD method to Au/p-Si rectifier junction as interfacial layer and analysis of its barrier characteristics depending on sample temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33 (18), 14627-14643.
- Özgül, G., 1994. Metal türünün Schottky diyod parametrelerine etkisi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi.
- Pandit, B. and Cho, J., 2018. Metal-semiconductor-metal ultraviolet photodiodes based on reduced graphene oxide/GaN Schottky contacts. *Thin Solid Films*, 660, 824-827.
- Pawar, S. A., Kim, D., Kim, A., Park, J. H., Shin, J. C., Kim, T. and Kim, H. J., 2018. Heterojunction solar cell based on n-MoS₂/p-InP. *Optical Materials*, 86, 576-581.
- Pickard, G.W., 1906, US patent no.836531.
- Pierce, G. W., 1907. Understanding metal and semiconductor structures. *Physical Review*, 25, 31.
- Prasad, C. V., Park, J. H., Min, J. Y., Song, W., Labeled, M., Jung, Y. and Rim, Y. S. (2023). Interface engineering of p-type quaternary metal oxide semiconductor interlayer-embedded β -Ga₂O₃ Schottky barrier diode. *Materials Today Physics*, 30, 100932.

- Quay, R., Mogilestue, C., Palankovski, V. and Selberherr, S., 2000. A temperature dependent model for the saturation velocity in semiconductor materials. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 3(1-2), 149-155.
- Rashid, M. H., 2011. *Microelectronic circuits: analysis and design*, 2nd Ed., Stamford: Cengage Learning.
- Razaq, A., Bibi, F., Zheng, X., Papadakis, R., Jafri, S. H. M. and Li, H., 2022. Review on graphene-, graphene oxide-, reduced graphene oxide-based flexible composites: from fabrication to applications. *Materials*, 15(3), 1012.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., 1988. *Metal-semiconductor contacts*, Oxford: Clarendon press.
- Ryu, B. D., Hyung, J. H., Han, M., Ko, K. B., Park, Y. J., Cuong, T. V. and Hong, C. H., 2016. Effect of characteristic properties of graphene oxide on reduced graphene oxide/Si Schottky diodes performance. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 44, 1-7.
- Sağlam, M., Güzeldir, B., Türüt, A. and Ekinçi, D., 2021. Role of reduced graphene oxide-gold nanoparticle composites on Au/Au-RGO/p-Si/Al structure depending on sample temperature. *Journal of Electronic Materials*, 50, 4752-4761.
- Sharma, B. L., 2013. *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. Springer Science & Business Media.
- Squartecchia, M., Johansen, T. K., Dupuy, J. Y., Midili, V., Nodjiadjim, V., Riet, M. and Konczykowska, A., 2018. Optimization of InP DHBT stacked-transistors for millimeter-wave power amplifiers. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 10 (9), 999-1010.
- Stankovich, S., Dikin, D. A., Piner, R. D., Kohlhaas, K. A., Kleinhammes, A. and Jia, Y.Y., 2007. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon*, 45, 1558-1565.
- Sun, S. X., Ma, L. H., Cheng, C., Zhang, C., Zhong, Y. H., Li, Y. X. and Jin, Z., 2017. Numerical simulation of the impact of surface traps on the performance of InP-based high electron mobility transistors. *Physica Status Solidi (a)*, 214 (10), 1700322.
- Sze, S. M., 1981. *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & Sons 2nd Edition
- Sze, S. M. and Kwok K. Ng., 2007. *Physics of Semiconductor Devices* , 3rd Edition. Willey and Sons, New Jersey.
- Sze, S. M., Crowel, C. R. and Khang, D., 1964. Electron-optical-phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal-semiconductor structures. *Journal of Applied Physics*, 8 (12), 979-990.
- Şevik, A., 2019. İki bileşenli ZnCdO fotodiyotların üretilmesi ve elektriksel karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Tan, C., Liu, Z., Huang, W. and Zhang, H., 2015. Non-volatile resistive memory devices based on solution-processed ultrathin two-dimensional nanomaterials. *Chemical Society Reviews*, 44 (9), 2615-2628.
- Tan, S. O., 2018. Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması. *Politeknik Dergisi*, 21 (4), 977-989.
- Tung, R. T., 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509.

- Vivek, P., Chandrasekaran, J., Balasubramani, V. and Manimekalai, A., 2023. Insertion of Ga-MoO₃ thin film at Cu/p-Si interface for the fabrication of MIS structure Schottky barrier diodes. *Surfaces and Interfaces*, 37, 102689.
- Werner, J. H. and Güttler, H. H., 1991. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69 (3), 1522-1533.
- Yıldırım, M. A., Güzeldir, B., Ateş, A. and Sağlam, M., 2011. Temperature dependent current–voltage characteristics of the Zn/ZnO/n-Si/Au–Sb structure with ZnO interface layer grown on n-Si substrate by SILAR method. *Microelectronic Engineering*, 88 (10), 3075-3079.
- Yu, S. S. C., Tan, E. S. Q., Jane, R. T. and Downard, A. J., 2007. An electrochemical and XPS study of reduction of nitrophenyl films covalently grafted to planar carbon surfaces. *Langmuir*, 23, 11074-11082.
- Yumuk, M., 2022. Metal/Go:Ptcda/P-Si yapıların ışık şiddeti altında akım-voltaj (*I-V*) ile kapasitans-voltaj (*C-V*) karakteristiklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Yükseltürk, E. and Bengi, S., 2023. The frequency dependent complex dielectric and electric modulus properties of Au/P₃HT/n-Si (MPS) Schottky barrier diode (SBD). *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34 (21), 1580.
- Zhang, D. H., 1999. Metal contacts to n-type AlGaAs grown by molecular beam epitaxy. *Materials Science and Engineering: B*, 60 (3), 189-193.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı :	Bilge SALTUKLU AĞ
Doğum tarihi :	
Doğum Yeri :	
Uyruğu :	T.C.
Adres :	
Tel :	
E-mail	
Eğitim	
Lise :	Erzurum Merkez Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Yüksek lisans	: Atatürk Üniversitesi Fizik Bölümü
Doktora	:
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce	Orta