



**SAF VE BAKIR KATKILI DLC ARA KATMANLI
SCHOTTKY YAPILARININ FARKLI SICAKLIK
KOŞULLARI ALTINDAKİ ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİ**

**2025
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Mustafa ŞAHİN

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Ahmet KAYMAZ**

**SAF VE BAKIR KATKILI DLC ARA KATMANLI SCHOTTKY
YAPILARININ FARKLI SICAKLIK KOŞULLARI ALTINDAKİ
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ**

Mustafa ŞAHİN

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Ahmet KAYMAZ**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Temmuz 2025**

Mustafa ŞAHİN tarafından hazırlanan “SAF VE BAKIR KATKILI DLC ARA KATMANLI SCHOTTKY YAPILARININ FARKLI SICAKLIK KOŞULLARI ALTINDAKİ ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ahmet KAYMAZ

.....

Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 11/07/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mustafa Burak TÜRKÖZ (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Ahmet KAYMAZ (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Esra EVCİN BAYDİLLİ (HU)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mustafa ŞAHİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SAF VE BAKIR KATKILI DLC ARA KATMANLI SCHOTTKY YAPILARININ FARKLI SICAKLIK KOŞULLARI ALTINDAKİ ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Mustafa ŞAHİN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Ahmet KAYMAZ

Temmuz 2025, 82 sayfa

Bu çalışmada, saf ve bakır katkılı elmas benzeri karbon (DLC) ara tabakalı Schottky diyotlarının elektriksel özellikleri farklı sıcaklık koşulları altında karşılaştırılmıştır. İki farklı cihaz türü (D1: saf DLC, D2: bakır katkılı DLC) elektrokimyasal çöktürme yöntemiyle üretilmiş olup, bu cihazlar 80-410 K sıcaklık ve ± 4 V gerilim aralığında test edilmiştir. Ölçümler sonucunda, bakır katkılı D2 cihazının seri direnç (R_s), arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) ve doğrultma oranı (RR) gibi elektriksel parametrelerde daha düzenli ve kararlı bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle, D2 cihazı daha düşük N_{ss} (10^{12} – 10^{13} eV⁻¹cm⁻²) ve daha sabit R_s değerleri ile dikkat çekmektedir. Elde edilen veriler, bakır katkılı DLC tabakasının taşıyım iletimini kolaylaştırdığını ve idealite faktörü ile potansiyel bariyer yüksekliğini sıcaklığa bağlı olarak daha tutarlı bir biçimde değiştirdiğini ortaya koymaktadır. D1 cihazı, kalın ve yalıtkan DLC tabakası nedeniyle özellikle orta ve yüksek sıcaklıklarda karmaşık davranışlar sergilerken, D2 cihazı tüm sıcaklık aralıklarında daha öngörülebilir ve

kaliteli bir performans sunmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, bakır katkısının DLC ara tabakalı Schottky diyotlarının elektriksel performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir.

Anahtar Sözcükler : Schottky cihazları, MIS tipi yapılar, Elmas benzeri karbon (DLC), Sıcaklık etkileri, Yüzey durumları, Seri direnç.

Bilim Kodu : 93439



ABSTRACT

Master Thesis

ELECTRICAL PROPERTIES OF PURE AND COPPER DOPED DLC INTERLAYERED SCHOTTKY STRUCTURES UNDER DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS

Mustafa ŞAHİN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Ahmet KAYMAZ

July 2025, 82 pages

In this study, the electrical properties of pure and copper-doped diamond-like carbon (DLC) interlayered Schottky diodes were compared under different temperature conditions. Two different types of devices (D1: pure DLC, D2: copper-doped DLC) were fabricated by the electrochemical deposition method and tested at temperatures of 80-410 K and ± 4 V voltage ranges. As a result of the measurements, it was observed that the copper-doped D2 device exhibited a more regular and stable performance in electrical parameters such as series resistance (R_s), density of surface states (N_{ss}), and rectification ratio (RR). In particular, the D2 device is characterized by lower N_{ss} (10^{12} - 10^{13} eV⁻¹cm⁻²) and more stable R_s values. The obtained data reveal that the copper-doped DLC layer facilitates convection conduction and more consistently changes the ideality factor and potential barrier height in a temperature-dependent manner. The D1 device exhibits complex behavior, especially at moderate to high

temperatures, due to the thick and insulating DLC layer, while the D2 device offers a more predictable and qualitative performance in all temperature ranges. In summary, the present study has demonstrated that copper doping has a substantial impact on the electrical performance of Schottky devices with a DLC interlayer.

Key Word : Schottky devices, MIS type structures, Diamond-like carbon (DLC), Temperature effects, Surface states, Series resistance.

Science Code : 93439



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince bana maddi ve manevi yardımlarını asla esirgemeyen, bilgi birikimi ve akademik yönlendirmeleriyle bana ilham veren, değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet KAYMAZ’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Her aşamada gösterdiği sabır, rehberlik ve önemli katkıları sayesinde bu çalışmayı başarıyla tamamlayabildim.

Çalışmamda yer alan numunenin elde edilmesi aşamasından itibaren, numunelerin hazırlanması, ölçümü ve analizi süreçlerinde değerli yardımlarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL ve kıymetli çalışma ekibine teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, çalışma sürecim boyunca katkı ve desteğini her zaman hissettiren Sayın Doç. Dr. Esra EVCİN BAYDİLLİ’ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Emek ve sabır gerektiren bu süreçte yanımda yer alan, moral kaynağım olan kıymetli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan, her durumda beni destekleyen ve sevgileriyle bana güç veren değerli aileme de ne kadar teşekkür etsem azdır. Sabrınız, inancınız ve dualarınızla bu süreçte en büyük destekçim oldunuz.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında katkıda bulunan herkese en içten teşekkürlerimi sunuyorum...

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. LİTERATÜR ÖZETİ	5
BÖLÜM 2	12
KURAMSAL TEMELLER	12
2.1. METAL YARIİLETKEN (MS) YAPILAR.....	12
2.1.1. Metal/P Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar.....	14
2.1.2. Metal/P Tipi Yarıiletken Omik Kontak	16
2.2. MIS/MPS YAPILAR	17
2.3. MIS YAPILARDA ARAYÜZEY DURUMLARI.....	18
2.4. MS SCHOTTKY KONTAKLARDA DİRENÇ PARAMETRESİ.....	20
2.4.1. Şönt Direnç (R_{Sh}) Etkisi	20
2.4.2. Seri Direnç (R_S) Etkisi	21
2.5. SCHOTTKY YAPILARINDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARI.....	22
2.5.1. MS Schottky Diyotlarda Termiyonik Emisyon Teorisi.....	24
2.6. SCHOTTKY DİYOTLARDA İDEALİTE FAKTÖRÜ	25
2.7. SCHOTTKY DİYOTLARDA ENGEL YÜKSEKLİĞİ	26
2.8. SCHOTTKY DİYOTLARDA CHEUNG YÖNTEMİ	28

	<u>Sayfa</u>
2.9. SCHOTTKY DİYOTLARDA NORDE YÖNTEMİ	29
BÖLÜM 3	30
MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. ELMAS BENZERİ KARBON (DLC)	30
3.2. YARIİLETKEN SİLİSYUM (Si)	32
3.3. ALTIN (Au)	33
3.4. ALÜMİNYUM (Al)	34
3.5. ELEKTROKİMYASAL BİRİKTİRME YÖNTEMİ	36
3.6. DLC ARAYÜZEYE SAHİP SCHOTTKY YAPISININ ÜRETİM SÜRECİ	38
3.7. DENEYSEL ÖLÇÜM SİSTEMİ	41
BÖLÜM 4	43
ARAŞTIRMA BULGULARI	43
BÖLÜM 5	66
SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. MS p-tipi doğrultucu kontak enerji bant yapısı; kontak oluşmadan önce (a), kontak oluştuktan sonra ve termal dengeduumunda (b), pozitif gerilim ($V>0$) (c), negatif gerilim ($V<0$) (d) [54,90].	15
Şekil 2.2. MS p-tipi omik kontak enerji bant yapısı; kontak oluşmadan önce (a), kontak oluştuktan sonrası ve termal denge durumunda (b), $V>0$ doğru polarma durumu (c), $V<0$ ters polarma durumu (d) [54,90].	16
Şekil 2.3. MIS/MPS yapılı Schottky diyodun şematik gösterimi.	17
Şekil 2.4. Yalıtkan arayüzey tabakalı MS kontağın enerji bant diyagramı [55].	19
Şekil 2.5. MS yapılarındaki temel akım-iletim mekanizmaları [90].	22
Şekil 2.6. Bir Schottky diyodun engel homojensizliğini gösteren üç boyutlu enerji bant diyagramı.	27
Şekil 3.1. a) sp^2 hibridizasyonu (Grafıt) ve sp^3 hibridizasyonu (Elmas) [111].	30
Şekil 3.2. Silisyum (Si) elementinin yüzey merezli kübik görseli [117].	32
Şekil 3.3. DLC filmin elektrokimyasal yöntem kullanılarak biriktirilmesi için kullanılacak sistem [125].	37
Şekil 3.4. Termal metal buharlaştırma siteminin şematik gösterimi.	39
Şekil 3.5. a) Omik kontak, b) doğrultucu kontak oluşturabilmek için kullanılan maske.	40
Şekil 3.6. Elde edilen MIS yapıya ait şematik gösterim.	40
Şekil 3.7. a) DLC ve b) Cu-DLC filminin SEM görüntüleri [26,34].	41
Şekil 3.8. DLC ve Cu katkılı DLC ara katmanlı Schottky cihazlarının hazırlanma süreçleri.	42
Şekil 4.1. D1 ve D2 cihazları için yarı logaritmik I - V grafikleri [47,48].	44
Şekil 4.2. DLC ve Cu-DLC ara katmanlı Schottky cihazları için R_i - V grafikleri.	46
Şekil 4.3. D1 ve D2 cihazları için R_s - T - V , R_{sh} - T - V ve RR - T - V grafikleri.	48
Şekil 4.4. DLC ve Cu-DLC ara katmanlı Schottky cihazları için $n(V)$ grafikleri.	51
Şekil 4.5. DLC ve Cu-DLC ara katmanlı Schottky cihazları için $\Phi_B(V)$ grafikleri.	52
Şekil 4.6. DLC ve Cu-DLC ara tabakalı Schottky cihazları için N_{ss} enerji dağılımı.	54
Şekil 4.7. DLC ve Cu-DLC ara katmanlı Schottky cihazları için 80 K-410 K sıcaklık aralığında ölçülen Norde fonksiyonu-voltaj karakteristikleri.	60
Şekil 4.8. Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Parametre Analizi.	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. N ve P Tipi Yarıiletkenlerin İş Fonksiyonlarına Göre Kontak Çeşitleri.	13
Çizelge 3.1. Altın (Au) Metalinin Özellikleri.....	34
Çizelge 3.2. Saf Alüminyum (Al) Özellikleri [122].	35
Çizelge 4.1. TE, Cheung ve Norde Yöntemleri ile Hesaplanan Saf DLC Cihazının Özelliklerinin Karşılaştırılması.	57
Çizelge 4.2. TE, Cheung ve Norde Yöntemleri ile Hesaplanan Cu Katkılı DLC Cihazının Özelliklerinin Karşılaştırılması.	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$\text{\AA}$	: angstrom
A	: doğrultucu kontak alanı
A^*	: richardson sabiti
Al	: alüminyum
Au	: altın
Cu	: bakır
Si	: silisyum
C	: karbon
E_g	: yasak enerji aralığı
E_v	: değerlik bandı
E_c	: iletkenlik bandı
I_o	: doyma akımı
n	: idealite faktörü
N_{ss}	: arayüzey durumları
k	: boltzmann sabiti
Φ_s	: yarıiletken iş fonksiyonu
Φ_m	: metal iş fonksiyonu
Φ_{Bo}	: sıfır-beslem bariyer yüksekliği
Φ_B	: engel yüksekliği
Φ_e	: etkin bariyer yüksekliği
R_s	: seri direnç
R_{sh}	: şönt direnç
V	: uygulanan gerilim
V_F	: ileri ön-gerilim
I_F	: ileri ön-gerilim altındaki akım
V_R	: ters ön-gerilim

I_R	: ters ön-gerilim altındaki akım
q	: elektron yükü (1.602×10^{-19} C)
K	: kelvin cinsinden sıcaklık
δ	: arayüzey tabaka kalınlığı
χ_s	: elektron yakınlığı
γ	: idealite faktöründen büyük tamsayı
ϵ_0	: boşluğun elektrik geçirgenliği
ϵ_i	: yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	: yarıiletkenin dielektrik sabiti
Ω	: ohm
$k\Omega$	: kiloohm
eV	: elektron-Volt
f	: frekans
G/ω	: kondüktans
G	: iletkenlik
p-Si	: p tipi silisyum
SBD	: schottky engel diyot
E_F	: fermi enerji seviyesi

KISALTMALAR

MS	: Metal-Semiconductor (Metal-Yarıiletken)
MIS	: Metal-Insulator-Semiconductor (Metal-Yalıtkan-Yarıiletken)
BH	: Barrier Height (Bariyer Yüksekliği)
I-V	: Current-Voltage (Akım-voltaj)
TE	: Thermionic Emission (Termiyonik Emisyon)
DLC	: Elmas Benzeri Karbon (Diamond-Like Carbon)
TF	: Thermionic Field Emission (Termiyonik Alan Emisyonu)
SEM	: Scannig Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
RR	: Rectification Ratio (Doğrultma oranı)
FETs	: Field Effect Transistors (Alan etkili transistörler)
MESFET	: Metal-Yarıiletken Alan Etkili Transistör
MPS	: Metal-Polimer/Organik-Yarıiletken
MOSFET	: Metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör
N_{ss}	: Arayüzey Durum Yoğunluğu (Density Of Interface States)
C-V	: Capacitance-Voltage (Kapasitans-Voltaj)
G/ω -V	: Conductance-Voltage (Kondüktans-Voltaj)
HEMT	: Yüksek Elektron Hareketli Transistörler
CTMs	: Current Transport Mechanisms (Akım İletim Mekanizmaları)
HPPMS	: Yüksek Güçlü Darbeli Magnetron Püskürtme
PECVD	: Plazma İle Geliştirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme
PIIID	: Plazma Daldırma İyon Implantasyonu
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MS) yapılar/kontaklar olarak da bilinen Schottky cihazlarının geçmişten günümüze elektronik teknolojisindeki önemi azımsanamaz. Çünkü, bu yapılar alan etkili transistörler (FET'ler), metal-yarıiletken FET'ler (MESFET'ler), yüksek elektron hareketli transistörler (HEMT'ler), metal-oksit-yarıiletken MOSFET'ler ve birçok mikro veya nanoelektronik cihaz gibi yüksek performanslı cihazların geliştirilmesinde kritik bileşenlerdir [1,2]. Ayrıca, ara katman büyütme yöntemlerinin geliştirilmesi sayesinde, bu aygıtların fotodiyot, fotodedektör, sıcaklık sensörü, gaz sensörü, güneş pili, iyonlaştırıcı radyasyon sensörü ve diğer modern elektronik aygıtlar olarak da kullanılabileceği öngörülmektedir [3–12]. Bu cihazların sinyal-gürültü oranı, düşük voltaj seviyesi, enerji kapasitesi ve yüksek anahtarlama performansı açısından p-n yapılara göre çok daha üstün özelliklere sahip olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle son yıllarda bu cihazlar mikrodalgalar, uydu sistemleri, biyomedikal aletler, optik algılama sistemleri ve nükleer santraller gibi birçok uygulamada yer almaya başlamıştır [10].

Schottky cihazlar, ara tabaka olmadan ya da yalıtkan, polimer veya ferroelektrik malzemelerden yapılmış bir ara tabaka kullanılarak üretilebilir ve bu cihazların çalışma performansı; seri direnç (R_s), yüzey durumları (N_{ss}), bariyer yüksekliği (BH), frekans, öngerilim (beslem) voltajı, sıcaklık ve radyasyon gibi birçok faktöre olduğu kadar, kullanılan ara tabakanın türü, kalınlığı ve bu ara tabakanın doğal olarak oluşmuş ya da yapay olarak büyütülmüş olmasına da bağlıdır [13–23]. Temel yarıiletkenler arasında silisyum (Si) ön plana çıkar. Bunun nedeni ise silisyumun doğada çok fazla bulunması ve diğer alternatif yarıiletken malzemelere göre ucuz ve kararlı bir malzeme yapısına sahip olmasıdır. Schottky yapılarında arayüzey tabakası olarak genellikle SiO_2 (silisyum dioksit) ve SnO_2 (kalay dioksit) gibi geleneksel yalıtkan malzemeler tercih edilmektedir. Bu iki yalıtkan malzeme arasında da SiO_2 gibi geleneksel ara

katmanlar, yarıiletken yüzeyindeki aktif sarkan bağları yeterince pasifleştiremez veya kaçak akımı mümkün olduğunca düşük bir seviyeye indiremez. Bu nedenle, son teknolojiye çeşitli ara katmanlar tercih edilmekte ve Schottky cihazlarının kalitesini artırmak için ara katman büyütme yöntemleri geliştirilmektedir. Elmas benzeri karbon (DLC) son zamanlarda Schottky cihazları ve benzeri elektronik aletler için ara katman olarak tercih edilen kritik malzemelerden biri haline gelmiştir [24–31].

Karbon, amorf karbon ve hidrojenli amorf karbon filmlerini tanımlayan DLC teriminde geçtiği şekliyle, birçok formda bulunabilir ve bunların en yaygın olanları elmas ve grafitir [32]. DLC malzemesi diğer yalıtkan malzemelere göre üstün tribolojik, optik, mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir [33]. DLC filmleri aynı zamanda yüksek sıcaklıklara ve gerilimlere karşı dayanıklı olmasıyla da bilinmektedir [34]. Bu nedenle DLC, mikroelektronik, optik, mekanik gibi bazı uygulamalarda kritik bir malzeme haline gelmiştir [35,36]. Söz konusu avantajları nedeniyle, bu malzeme aynı zamanda MS kontaklar, güneş pilleri, heteroyapılar, sensörler ve transistörler için önemli bir araştırma malzemesi haline gelmiştir [37,38]. Schottky cihazları yüksek voltaj/sıcaklık ve radyasyon gibi zorlu koşullarda kullanılabildiğinden, DLC malzemesiyle üretilmeli ve incelenmelidir. Çünkü normal koşullar altında bile bu cihazların yüksek güç kapasitesi ve hızlı anahtarlama açısından p-n yapılarından daha iyi performans gösterdiği bilinmektedir. Özet olarak, DLC filmlerinin Schottky cihazlarında kullanılması, olağanüstü özellikleri nedeniyle umut verici bir yaklaşımdır.

Amorf DLC, sp^2 ve sp^3 hibrit bağlarının bir karışımı ile karakterize edilir. Ayrıca elmas ve grafit özelliklerinin bir kombinasyonu ile sonuçlanır. Metal ve yarıiletken arasındaki arayüzeyde DLC filmlerinin kullanımı, yüksek kalıcı gerilme, altaşa yetersiz düzeyde yapışma mukavemeti ve sınırlı termal kararlılık gibi çeşitli zorluklarla sınırlıdır. Bu faktörler toplu olarak mekanik özelliklerin bozulmasına yol açabilir [39,40]. DLC filmlerinin uygulama alanlarını geliştirmek için yukarıda belirtilen engellerin üstesinden gelmek zorunludur. Kalıntı gerilimi azaltmak ve filmlerin genel özelliklerini iyileştirmek amacıyla çok sayıda teknik araştırılmıştır. Bu teknikler arasında tavlama, geçiş katmanları ve metalik ile metalik olmayan elementlerin katkılanması yer alır. Ayrıca, katkı maddeleriyle oluşturulan DLC

filmleri, bazı yabancı atomların filme eklenmesiyle taşıyıcı yoğunluğunu artırabilir ve iletkenliğini ayarlayarak bu filmleri elektriksel ve elektronik uygulamalar için uygun hale getirebilir. Örneğin, Ahmed ve arkadaşları [39] çalışmalarında cam ve indiyum kalay oksit (ITO) yüzeylere kaplanan Cu katkılı DLC ince filmleri incelemiştir. Bu filmler, Cu'nun katılımıyla değişken sp^2/sp^3 oranları göstermiş ve bant aralığı altı kusur durumları oluşmuştur. Elektron alan emisyonu özelliklerinde bir artış gözlemlenmiş, bu artışın Cu atom yüzdesine ve sıcaklığa bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu tür çalışmalar ve elde edilen sonuçlar, bizim çalışmamıza da ilham kaynağı olmuştur.

DLC ara katmanlı Schottky kontağı veya geleneksel yalıtkan (SiO_2 , SnO_2) ara katmanlı cihazlar gibi metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi yapıların yalıtkan malzemeleri, genellikle akım iletimini iyileştirmek veya cihazların elektriksel özelliklerini geliştirmek için bazı malzemelerle katkılanır [41–46]. Geliştirilmesi beklenen özelliğe bağlı olarak tercih edilen malzemeler değişmekle birlikte, bu malzemeler genellikle Si, Al, Cu, Ag ve Ni gibi yarıiletkenler veya iletkenlerdir. Bu çalışma, DLC'deki bakır (Cu) katkısının Schottky cihazının elektriksel özellikleri, özellikle R_s ve yüzey durumları (N_{ss}) üzerindeki etkisini araştırmaya odaklanmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada saf DLC ve bakır katkılı DLC ara katmanlarına sahip cihazlar üretilmiş ve elektriksel özellikleri farklı sıcaklık ve öngerilim koşulları altında incelenmiştir. Ara katman olarak çeşitli malzemelerin kullanıldığı Schottky cihazlarının araştırılmasında sürekli artan bir eğilim olmasına rağmen, DLC filmlerinin temel özellikleri nedeniyle MIS tipi cihazlarda potansiyel kullanıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, elektrodepoze DLC filmlerinin bu cihazlarda kullanımı sınırlıdır ve bu araştırma, DLC filmlerinin yüksek sıcaklıklar ve voltajlar gibi zorlu koşullardaki dayanıklılığı sebebiyle kritik öneme sahiptir [34].

DLC filmlerinin, malzeme katkılama düzeyi, biriktirme (depozisyon) teknikleri, kafes bozukluğu ve sp^2 ile sp^3 hibrit bağların içerikleri gibi faktörlerden güçlü şekilde etkilendiği bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışma DLC'deki Cu katkısının DLC'nin temel elektriksel ve sıcaklığa bağlı özelliklerinin yanı sıra p-Si yarıiletkeninin bant aralığındaki yüzey durumlarının enerji dengesi dağılımı üzerindeki etkisini araştırmaya odaklanmıştır. Sadece tek bir sıcaklıkta ya da oda sıcaklığında (RT)

gerçekleştirilen I - V ölçümlerinin, temel elektriksel parametreler ve olası yük taşıma mekanizmaları (CTM'ler) hakkında yeterli doğrulukta ve güvenilir sonuçlar sağlayamadığı açıktır. Bu nedenle, BH oluşum şekli ve doğası ile CTM'ler hakkında daha kapsamlı veri elde edebilmek için çok geniş sıcaklık (hem çok düşük hem de çok yüksek sıcaklıkları içerecek şekilde) ve voltaj aralıklarında ölçümler yapılması gerekmektedir. Örneğin, RT'de ve daha düşük sıcaklıklarda, bazı CTM'ler tek başına yada belirli sıcaklık veya voltaj aralıklarında birlikte baskın hale gelebilir. Bu mekanizmalar arasında termiyonik emisyon (TE), tünelleme (örneğin termiyonik alan ve alan emisyonları (TFE ve FE), jenerasyon-rekombinasyon ve BH'lerin Gauss dağılımı gibi olasılıklar bulunmaktadır [47,48].

Diğer yandan nanomalzemelerin sentezi, karakterizasyonu ve uygulaması yenilikçi teknolojinin önemli bir parçası haline gelmiştir. DLC filmleri, mevcut teknolojiye düşük sürtünme, aşınma direnci, sertlik ve kimyasal inertlik özelliklerinden dolayı önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [26,28]. DLC filmler, yüksek sıcaklık ve voltaj direncinin yanı sıra dikkate değer optik, tribolojik, fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, bu çalışma DLC ara katmanlı Schottky cihazlarının elektriksel özelliklerini geniş bir sıcaklık aralığında (80-410 K) ve voltaj ön gerilim (± 4 V) incelemeye odaklanmıştır [34].

DLC ara katmanını elde etmek için kullanılabilecek birçok yöntem vardır. Kullanılan bu yöntemler genel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır: Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD). Bu yöntemlere örnek olarak; yüksek güçlü darbeli magnetron püskürtme (HPPMS), magnetron püskürtme, plazma ile geliştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD), plazma daldırma iyon implantasyonu (PIIID), darbeli lazer biriktirme gibi teknikler verilebilir [49–52]. Birbirinden farklı biriktirme yöntemleri, DLC ile katkılı DLC filmlerin elektriksel özelliklerini iyileştirebilmek ve bunları belirli uygulama gereksinimlerine uygun hale getirmek amacıyla önemli bilimsel ve teknolojik katkı sunmaktadır. PVD yönteminde malzeme yüzeyine fiziksel yollarla ince film kaplama işlemi gerçekleştirilir. CVD yönteminde ise kimyasal reaksiyonlarla yüzeyde ince film oluşturulur. Bu yöntemlerin çoğu karmaşık adımlar içermekte ve pahalı ekipmanlar gerektirmektedir. Bu yöntemlerin dışında DLC ara katmanı oluşturmak için kullanılabilecek yöntemlerden

biri de elektrokimyasal biriktirme yöntemidir. Karbon filmleri oluşturmak için organik bileşiklerin ayrıştırılmasına dayanan bu yöntem, basit deneysel kurulumu, düşük basınç veya sıcaklığı, düşük maliyeti ve büyük ve düzensiz numune yüzeylerine uygulanabilmesi nedeniyle önemli avantajlara sahiptir [53]. Bu nedenle, bu çalışmada DLC ara katmanını oluşturmak için elektrokimyasal biriktirme yöntemi tercih edilmiştir.

R_s ve N_{ss} , MS, MIS veya MOS tipi Schottky aygıtlar için kritik parametrelerdir. Bu nedenle, bu çalışma esas olarak R_s ve N_{ss} üzerine yoğunlaşmıştır. R_s tipik olarak arka/doğrultucu kontaklara, elektriksel ölçümler için kullanılan prob metal tellerine, yarıiletkenin kütle direncine ve yarıiletken ile arayüzey tabakasına katkılanmış homojensizliklere atfedilir [54–58]. Dahası, farklı gevşeme/ömürlere sahip olan ve voltaja veya enerjiye bağlı N_{ss} , tipik olarak kristal kafesteki doğal kusurlara, doymamış bağlara, yarıiletkendeki katkı atomlarına, laboratuvar ortamındaki bazı organik safsızlıklara, oksijen boşluklarına ve kimyasal temizleme koşullarına atfedilir [54,58–61]. N_{ss} 'nin ayrıca rekombinasyon merkezleri gibi davrandığı gözlemlenmiştir ki bu durum, tuzakların boş veya dolu olmasına bakılmaksızın harici bir etki altında elektronları yakalayabileceği veya serbest bırakabileceği anlamına gelir.

1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

MS yapılar, günümüz yarıiletken teknolojisindeki gelişmelerle birlikte önemli bir dönüşüm sürecine girmiştir. Özellikle yalıtkan ara katmanların entegre edilmesi, iletim karakteristiğinin istenen şekilde ayarlanmasına olanak tanıyarak bu yapıların işlevselliğine yeni bir boyut kazandırmıştır. Bu yenilikler, MS kontaklarının performansını artırarak yarıiletken cihaz tasarımında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, yarıiletken teknolojisi ve MS kontaklarının evrimine katkıda bulunan önemli ilerlemeleri tarihsel örneklerle şöyle özetleyebiliriz.

1874 yılında F. Braun, metal nokta kontaklar kullanarak bakır, demir ve kurşun sülfür yarıiletkenleri üzerinde MS yapısının ilk örneklerini elde etmiştir. Bu yapılar, doğrultma işlemi gerçekleştirerek tarihe ilk MS diyotlar olarak geçmiştir. Sonrasında, bu yapıların geliştirilmesiyle birlikte eklem bölgesindeki akım dağılımı ve kontak

potansiyeli daha homojen bir hale getirilmiş ve metal ile yarıiletken arayüzeyinin vakum ortamında oluşturulması konsepti ortaya atılmıştır [62].

1931 yılında Schottky, Waibel ve Störmer, MS kontakların anlaşılmasına önemli katkılarda bulunan bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, akımın etkisiyle kontak üzerindeki potansiyel düşüşünün ortaya çıkmasını sağlayarak engel yüksekliği kavramını gün yüzüne çıkarmıştır. Araştırma, MS kontakların elektriksel özelliklerinin anlaşılması için temel bir adım olmuş; bu sayede yarıiletken cihazların geliştirilmesine ve Schottky diyotlarının teorik temellerinin oluşturulmasına önemli bir zemin hazırlamıştır [63].

1938 yılında, Walter Schottky ve Sir Neville Mott MS arayüzündeki potansiyel engel yüksekliği üzerine birbirlerinden bağımsız olarak farklı teoriler geliştirmişlerdir. Mott'un geliştirdiği teoriye göre, bu engel yüksekliği, yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) ile metalin iş fonksiyonu (Φ_m) arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Mott ayrıca, bu bölgede arayüzün saflığı nedeniyle elektrik alanının sabit olduğunu ileri sürmüştür. Öte yandan, Schottky ise arayüzün saflığını sorgulamış ve safsızlıkların elektrik alanının doğrusal olarak artmasına yol açtığını savunmuştur. Bu iki teori, MS kontaklarının elektriksel davranışlarını anlamada önemli bir dönüm noktası oluşturarak, yarıiletken cihaz fiziği alanındaki teorik gelişmelere büyük katkılarda bulunmuştur [64,65].

1965 yılında Heine, Schottky yapıların arayüzey hallerini ele alan ilk teorik çalışmayı gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, metal tipine bağlı olarak ortaya çıkabilecek iki farklı arayüzey durumu tanımlamıştır. Bu durumlardan ilki, yarıiletkenine özgü "gerçek durum" olarak adlandırılırken, ikincisi metalden kaynaklanan "zahiri durum" şeklinde ifade edilmiştir. Heine'nin bu çalışması, Schottky yapıların arayüzey fiziksel özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına yönelik önemli bir teorik gelişme sunmuş ve metal-yarıiletken etkileşimlerinin derinlemesine incelenmesine olanak tanımıştır [66].

1969 yılında Crowell ve Roberts, Heine'nin öncülüğünü yaptığı arayüzey durumları üzerine yapılan araştırmaların ardından, Au/n-Si Schottky yapıların arayüzey durumlarının enerji dağılımlarını incelemişlerdir. Bu kapsamda, arayüzey

durumlarının enerji dağılım eğrileri, kapasitans-voltaj ($C-V$) karakteristiklerinden elde edilmiştir. Burada bahsi geçen çalışmada, Schottky yapılarının arayüzey durumlarının daha derinlemesine anlaşılabilmesine katkıda bulunulmuş olup yarıiletken cihazlarının elektriksel özelliklerinin analiz edilebilmesi açısından faydalı bir yöntem sunulmuştur [67].

1970'li yıllarda, Schottky engelleri üzerine yapılan çalışmalar iki ana ekseninde gelişmiştir. İlk olarak, Schottky engellerini kullanan cihazların endüstriyel üretimdeki uygulanabilirliğinin artırılmasına odaklanılmış, bu süreçte önceki yıllarda gerçekleştirilen Ar-Ge çalışmalarından elde edilen bilgilerin optimize edilmesi hedeflenmiştir. İkinci olarak ise, metal-yarıiletken arayüzeyinin fiziksel ve elektriksel özelliklerini daha iyi anlamaya yönelik temel bilimsel araştırmalara yoğunlaşmıştır. Burada bahsedilen iki yaklaşımda Schottky engellerine dayalı cihazların teorik kullanımları ve de pratik kullanım alanlarının genişlemesine faydalı katkılarda bulunmuştur [68].

Arayüzey tabakasının metal-yarıiletken kontaklarının parametreleri üzerindeki büyük etkisi anlaşıldıkça, farklı amaçlara hizmet eden çeşitli arayüzey tabakaları kullanılarak üretilen Schottky diyotları üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda, arayüzey tabakası olarak genellikle polimer olmayan organik maddeler ve polimer malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Bu tür çalışmalar, Schottky diyotların elektriksel özelliklerini optimize etmek ve farklı uygulama alanlarına uygun yeni tasarımlar geliştirmek amacıyla önemli katkılar sunmuştur [69–72].

Daha sonra 1986 yılında Cheung ve Cheung tarafından ideal ve ideal olmayan diyotlar için doğru besleme $I-V$ karakteristiklerini kullanarak Schottky diyotların engel yüksekliğini, idealite faktörünü ve seri direnç değerlerini hesaplamaya yönelik yeni bir model geliştirmiştir. Bu çalışma, Schottky diyotlarının elektriksel parametrelerinin daha doğru ve kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine önemli bir katkı sağlamıştır. Ayrıca, literatürde seri direnç üzerinde yoğunlaşan birçok önemli çalışma da yer almıştır [73–76].

Son yıllarda geleneksel MS yapılar yerine, daha gelişmiş özelliklere sahip alternatif arayüzey tabakaları kullanılmaya başlanmıştır. Bu doğrultuda, yüksek dielektrik sabitine sahip metaller, metal-oksit katkılı polimerler, ferroelektrik materyaller ve DLC ince film tabakaları, Schottky yapılarına yönelik tercih edilen yenilikçi malzemeler arasında yer almaktadır. Bu gelişmeler, cihaz performansını artırabilmek ve teknoloji ışığında gelişen yeni nesil elektronik uygulamalarına yönelik uygun çözümler sağlayabilmek açısından büyük bir potansiyele sahiptir [77,78]. MS yapılarda DLC arayüzey tabakası kullanılarak son yıllarda yapılan çalışmaların bazıları aşağıdaki gibidir:

Basman ve arkadaşları (2015), elektrodepozisyon yöntemi kullanarak p-Si yüzeyine DLC tabakası kaplayarak Au/DLC/p-Si yapısında Schottky diyotlar üretmişlerdir. Çalışma kapsamında bu yapıların $I-V$ karakteristikleri incelenmiş ve ortalama idealite faktörü 2.06, bariyer yüksekliği ise 0.84 eV olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler, DLC tabakasının arayüzde önemli değişikliklere neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, hidrostatik basınç altında yapılan ölçümler, basınç arttıkça bariyer yüksekliğinin arttığını, idealite faktörünün ise azaldığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, DLC ara tabakalı yapıların hem elektronik hem de basınç sensörü uygulamaları için uygun bir seçenek sunduğunu göstermektedir [32].

Çetinkaya ve arkadaşları (2023), elektrodepozisyon yöntemiyle p-tipi Si üzerine Cu katkılı DLC filmi kaplayarak Al/(Cu:DLC)/p-Si/Au Schottky diyotları üretmiştir. Yapılan 1 kHz–3 MHz frekans aralığındaki $C-V-f$ ve $G-V-f$ ölçümleri ile temel elektriksel parametreler (difüzyon potansiyeli V_D , Φ_B , R_s , N_{ss}) hesaplanmıştır. Araştırmada, Cu katkısının N_{ss} 'yi azalttığı, R_s 'yi düşürdüğü ve doğrultma oranını (RR) artırarak cihazın performansını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, Cu:DLC tabakasının elektronik aygıtlarda etkili bir ara tabaka olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır [79].

Feizollahi Vahid ve arkadaşları (2023), Al/(Cu-DLC)/p-Si/Au yapısına sahip Schottky diyotların frekansa bağlı dielektrik özelliklerini ve AC iletkenlik davranışını empedans spektroskopisi kullanarak incelemiştir. Elektrodepozisyon yöntemi ile elde edilen Cu katkılı DLC ara tabakası, 3 kHz ile 3 MHz arasında ve ± 4 V aralığında test edilmiştir.

Düşük ve orta frekanslarda yüzey durumlarının dielektrik yanıt üzerinde belirgin bir etkisi gözlemlenirken, yüksek frekanslarda bu etkilerin azaldığı ve yapının daha kararlı bir elektriksel davranış sergilediği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, Cu katkılı DLC filminin MIS yapılar için işlevsel bir ara tabaka olabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, elektrot yerleştirilmiş (Cu-DLC) filmin morfolojik değerlendirmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır, bu sayede yüzey yapısı ve film kalitesiyle ilgili tamamlayıcı veriler elde edilmiştir [34].

Şafak Asar ve arkadaşları (2023), Al/DLC/p-Si yapısında üretilen Schottky diyotların frekansa bağlı elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Elektrodepozisyon yöntemiyle elde edilen DLC ara tabakalı yapı, -1 V ila 4 V voltaj aralığı ve 1 Hz ile 1 MHz arasındaki frekanslar için test edilmiştir. Çalışma sırasında, R_s ve N_{ss} parametreleri iletkenlik yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, R_s 'nin frekansla birlikte azaldığı ve N_{ss} 'nin $10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$ seviyelerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, artan frekansla engel yüksekliğinin (Φ_B) yükseldiği ve yüzey durumlarının yeniden yapılandığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, DLC tabakasının dielektrik özelliklerini iyileştirdiğini ve MIS yapılar için alternatif bir ara tabaka olabileceğini ortaya koymaktadır [26].

Berkün ve arkadaşları (2023), Al/(Ti-DLC)/p-Si/Au yapısına sahip MIS yapıların elektriksel özelliklerini frekansa ve gerilime bağlı olarak empedans spektroskopisi yöntemiyle detaylı bir şekilde incelemiştir. Ti katkılı DLC ara tabakasının yapısal karakterizasyonu ise SEM, EDX ve XPS analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Yapının C-V ve G-V ölçümleri, 1 kHz ile 4 MHz ve $\pm 2.5 \text{ V}$ gerilim değerleri aralığında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, N_{ss} ve taşıyıcı ömürleri (τ) ise hem iletkenlik hem de düşük-yüksek frekans kapasitans farkı yöntemleriyle belirlenmiştir. Sonuçlar, düşük frekanslarda N_{ss} etkisinin baskın olduğunu, yüksek frekanslarda ise R_s daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır. N_{ss} değerlerinin, artan gerilimle birlikte yükseldiği; buna karşılık taşıyıcı ömürlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, Ti katkılı DLC ara tabakasının arayüzey durumlarını azaltarak cihaz performansını artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir [80].

Hameed ve arkadaşları (2024), Al/(Ti-DLC)/p-Si/Au yapılandırmasına sahip Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini incelemiştir. Bu çalışmada, elektrokimyasal yöntemle sentezlenen Ti katkılı DLC ara tabakası kullanılarak oluşturulan diyotların ileri-geri yönlü I - V ve kapasitans/iletkenlik-gerilim (C/G - V) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_B), R_s ve şönt direnç (R_{sh}) gibi temel parametreler, hem TE teorisi hem de Cheung fonksiyonları ile detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. N_{ss} seviyeleri ise Card-Rhoderick yöntemiyle hesaplanarak enerjiye bağlı dağılımı sunulmuştur. Bu çalışma, Ti katkılı DLC ara tabakasının MS iletken yapılar için elektriksel özellikleri iyileştirme potansiyelini ortaya koymaktadır [81].

Kaymaz (2024), DLC ara tabakalı Al/p-Si Schottky yapılarının engel yüksekliği dağılımı ve akım iletim mekanizmalarını incelemiştir. 80–410 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilen sıcaklığa bağımlı I - V ölçümleri ile, cihazın engel yüksekliğinin homojen olmayan bir yapıya sahip olduğu ve bu yapının üç farklı sıcaklık bölgesinde farklılaştığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, engel yüksekliğinin Multi-Gaussian dağılım (MGD) gösterdiğini ve iletim mekanizmalarının sıcaklığa bağlı olarak alan yayını (FE), termiyonik alan yayını (TFE) ve termiyonik yayını (TE) şeklinde değiştiğini ortaya koymuştur [47].

Baydilli (2024), Al/Cu-katkılı DLC/p-Si Schottky diyotların sıcaklığa bağlı akım iletim mekanizmalarını ve engel yüksekliği dağılımını incelemiştir. 80–410 K sıcaklık aralığında alınan I - V ölçümleri sonucunda, düşük ve orta sıcaklıklarda TFE ve FE , yüksek sıcaklıklarda ise FE mekanizmasının etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olarak homojen olmayan bir yapıda dağıldığı ve bu dağılımın MGD modeliyle açıklandığı sonucuna varmıştır [48].

Bozkurt ve arkadaşları (2025), DLC ara tabakalı Al/p-Si Schottky yapılarının sıcaklığa bağlı dielektrik özelliklerini incelemiştir. 80–410 K aralığında gerçekleştirilen C - V ve G/ω - V ölçümleriyle, dipol ve tuzak kutuplaşmasının düşük sıcaklıklarda, Maxwell–Wagner kutuplaşmasının orta sıcaklıklarda, uzay yük kutuplaşmasının ise yüksek sıcaklıklarda baskın olduğu belirlenmiştir. Çalışma, DLC'nin arayüzey

kutuplaşma mekanizmaları üzerindeki etkisini vurgulayarak, bu tür yapıların yüksek sıcaklık koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir [82].

Şahin ve arkadaşları (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, saf ve bakır katkılı DLC ara tabakalı Al/p-Si Schottky yapılarının elektriksel özellikleri geniş bir sıcaklık aralığında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, bakır katkısının; R_s , N_{ss} , idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi temel parametreler üzerinde sıcaklık ve gerilim bağımlı olarak daha kararlı ve düzenli bir elektriksel davranış sağladığını göstermektedir. Ayrıca, yapının engel yüksekliğinin çoklu Gauss dağılımı sergilediği ve iletim mekanizmalarının sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir [83].

Bu çalışmanın birinci bölümü, konuya giriş niteliğinde olup ilgili literatür taramasına yer verilmiştir. İkinci bölümde; metal-yarıiletken yapılar, akım iletim mekanizmaları, Cheung ve Norde yöntemleri, yüzey durumları ile direnç parametrelerine ilişkin teorik altyapı detaylı şekilde ele alınmıştır. Üçüncü bölümde ise numunelerin üretim aşamaları, kullanılan malzemelerin özellikleri ve deneysel ölçüm sistemine ilişkin bilgiler sunulmuştur. Dördüncü bölümde; akım-gerilim karakteristikleri, seri direnç, idealite faktörü, yüzey durum yoğunluğu ile Cheung ve Norde yöntemlerine ilişkin analiz sonuçlarına dayalı olarak elde edilen grafikler sunulmuş; bu grafikler üzerinden ilgili parametreler arasındaki ilişkiler ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Son bölümde ise çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda genel sonuçlara ulaşılmış, ayrıca gelecekte yapılabilecek araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1. METAL YARIİLETKEN (MS) YAPILAR

Schottky yapıları olarak da bilinen MS kontaklar, elektronik devre elemanlarının temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu yapılar, kullanılan malzemelerin çeşitliliği ve üretim yöntemlerindeki farklılıklar nedeniyle çeşitli özellikler sergilemektedir. MS kontakların elektriksel ve yapısal karakteristiklerinin, değişen parametrelere bağlı olarak detaylı bir şekilde incelenmesi, günümüz elektronik teknolojisinde kritik bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

N-tipi veya p-tipi bir yarıiletken ile bir metal arasında elektriksel temas sağlanarak oluşturulan ve akımın yalnızca tek yönde iletimine olanak tanıyan yapılar Schottky kontak olarak adlandırılmaktadır. Bu yapılar, Schottky tarafından açıklanan fiziksel prensipler doğrultusunda adını almıştır. Schottky diyotlar, yüksek anahtarlama hızları, düşük açma voltajları ve düşük jonksiyon kapasiteleri ile öne çıkmaktadır. Geleneksel diyotlar, genellikle 200 kHz ile 2 MHz arasındaki çok yüksek frekanslarda gerilim yönünün değişimine hızlı bir şekilde yanıt veremezler. Bu nedenle, iletimden yalıtıma ve yalıtımdan ilettime geçiş süreleri uzundur. Ancak, Schottky diyotlar bu geçiş sürelerini önemli ölçüde kısaltır. Standart diyotlar 0.6–1.7 V arasında ilettime geçerken, Schottky diyotlar 0.15–0.45 V arasında ilettime geçmektedir. Hızlı tepki süreleri nedeniyle, güç dönüştürücü devrelerde ve çeşitli güç kaynağı devrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte, bu diyotların 50 V gibi düşük ters gerilim değerlerinde çalışabilmeleri ve aşırı ısınma gibi dezavantajları bulunmaktadır. Özel olarak, 200 V'a kadar çalışabilen Schottky diyotlar da üretilmiştir [84].

Schottky diyotların karakteristik özelliklerini anlamak için öncelikle metal-yarıiletken kontak yapılarını incelemek gerekmektedir. İdeal bir kontak elde edilebilmesi için,

kullanılan metal ve yarıiletken yüzeylerinin olabildiğince pürüzsüz, temiz ve düşük dirençle birleşecek şekilde hazırlanması büyük önem taşımaktadır [85]. Bir metal ile yarıiletken arasında temas sağlandığında, termal denge sağlanana kadar ve Fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar her iki malzeme arasında çift yönlü (metalden yarıiletkene veya tersi) yük transferi gerçekleşir. Bu süreç, metal ve yarıiletken arasındaki enerji seviyelerinin dengelenmesi açısından gereklidir. Termal denge sonunda, metal/yarıiletken arayüzeylerindeki yüklerin ayrışması sonucunda bir engel yüksekliği veya bir iç elektrik alan oluşur. Hareketli yük taşıyıcılarının bulunmadığı bu bölge, yüksek dirençli yalıtkan bir yapı sergileyen Schottky tabakası olarak tanımlanır [86].

Metal-yarıiletken Schottky kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna göre doğrultucu ve omik kontaklar olarak incelenirler. Bu kontakların omik kontak ve doğrultucu kontak olmalarını metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları tanımlar. Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu ise Φ_s olarak ifade edilmektedir. Metalin ve yarıiletkenin çeşidine bağlı olarak oluşan iş fonksiyonuna göre kontak türleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. N ve p tipi yarıiletkenlerin iş fonksiyonlarına göre kontak çeşitleri.

İş Fonksiyonu	Yarıiletkenin Çeşidi	Oluşan Kontak Çeşidi
$\Phi_s > \Phi_m$	n	Omik Kontak
$\Phi_s < \Phi_m$	n	Doğrultucu Kontak
$\Phi_s > \Phi_m$	p	Doğrultucu Kontak
$\Phi_s < \Phi_m$	p	Omik Kontak

P-tipi MS kontaklarda $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda doğrultucu, $\Phi_s < \Phi_m$ durumunda ise omik kontak oluşurken; N-tipi MS kontaklarda ise $\Phi_s < \Phi_m$ durumunda doğrultucu, $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda omik kontak oluşur.

Omik kontak, bir metal ile bir yarıiletken arasındaki yük taşıyıcıların (eletron ve holl) birbirlerine her iki yönde de hiç zorlanmadan daha kolay geçiş yaptığı doğrultucu olmayan bir kontak türüdür. Bu türdeki kontaklar en düşük dirence sahiptir. Ek olarak, düşük

özdirence sahip olan omik kontakların yarıiletkeninin arka mat kısmındaki tarafında büyütülmüş saf metalin uygun olan sıcaklık değerinde çöktürülmesi önemlidir [68].

Doğrultucu kontak, lineer olmayan akım-voltaj karakteristiği gösteren bir yapıda olup, Schottky kontak olarak da ifade edilmektedir. Doğrultucu kontaklarda, metalden yarıiletkene veya tam tersi olarak yarıiletkenenden metale doğru elektronların ve hollerin iletiminin kolay bir şekilde tek bir yönde olması haline “doğrultucu kontak” bu davranışıda “doğrultma” olarak ifade edilmektedir. Buradaki doğrultma diyotun tam iletme geçmesi halinde doğru besleme akımının (I_F), ters besleme akımına (I_R) oranı, diyotun kalitesini belirten bir parametre olan doğrultma oranı (RR)’dır. İdeal diyotlarda I_F/I_R oranı yaklaşık olarak 10^8 - 10^{10} arasında olmalıdır [87].

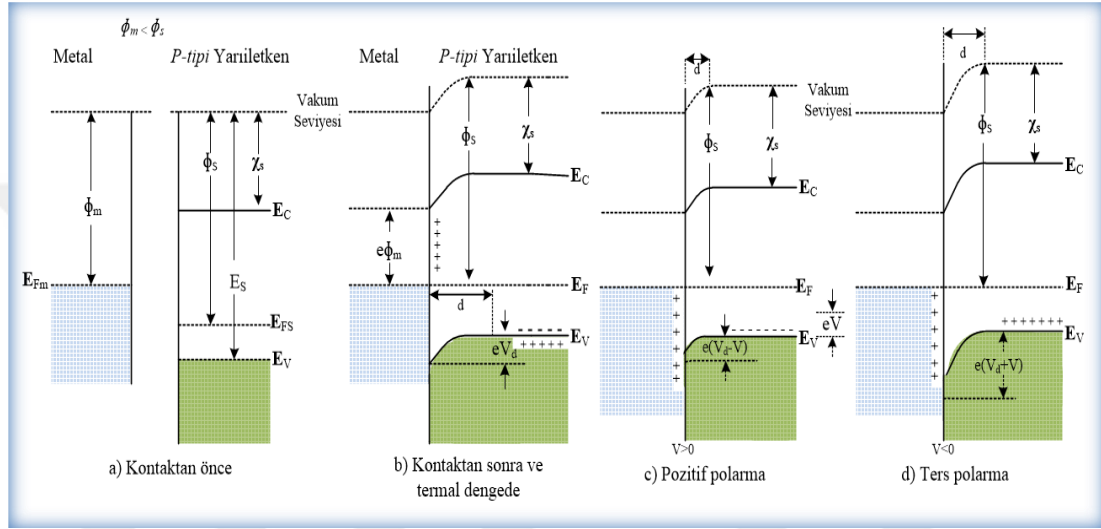
2.1.1. Metal/P Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

MS p-tipi kontaklar ile n-tipi yarıiletken kontakların benzer yaklaşımlarla açıklanabileceği bilinmektedir. Aralarındaki en önemli ve temel fark; n-tipi yarıiletkenlerde elektronlar en önemli akım taşıyıcıları olmasına rağmen p-tipi yarıiletkenlerde azınlık akım taşıyıcılarıdır. P-tipi yarıiletkenlerde akım taşıyıcılarının çoğu hollerdir. Metal p-tipi yarıiletken kontaklarda, malzemelerin iş fonksiyonlarına göre $\Phi_m < \Phi_S$ durumlarında doğrultucu kontak, $\Phi_m > \Phi_S$ durumlarında da bir omik kontak oluşur. Şekil 2.1.’de MS p-tipi bir yarıiletken yapının doğrultucu (Schottky) kontağının enerji bant diyagramlarını gösterilmektedir. Şekil 2.1. a’da görülebileceği gibi Φ_S, Φ_m ’den büyük olduğu durumlarda Fermi enerji seviyesi arasındaki fark $\Phi_S - \Phi_m$ kadardır. Metaldeki fazla elektronlar, metal/p tipi bir yarıiletken kontak oluşuncaya (Şekil 2.1.b.) ve termal dengeye ulaşıncaya ve Fermi enerji seviyeleri hizalanana kadar yarıiletkene akar. Burada elektronların akışı yarıiletken kısımdaki hollerin iyonlaşmasına neden olur. P-tipi yarıiletkenlerin yüzeyinde iyonize olan negatif yüklü alıcılar d kalınlığındaki bir uzay yükü bölgesine dağıtılır. Termal denge oluşuktan sonra, yarıiletken kısımdaki holler için görülen bariyer yüksekliği,

$$eV_d = (\Phi_S - \Phi_m) \quad (2. 1)$$

dir [88]. Buradaki V_d , kontak yapısındaki potansiyel farkı ifade eder. Buradaki potansiyel fark yarıiletken taraftan, metal taraftaki yüzeye göre alınır. Metal yarıiletken p tipi kontak yapının metal kısmındaki boşluklar (holler) için bariyer yüksekliği ise Eşitlik 2.2'deki gibidir [89].

$$e\Phi_B = (E_S - \Phi_m) \quad (2.2)$$



Şekil 2.1. MS p-tipi doğrultucu kontak enerji bant yapısı; kontak oluşmadan önce (a), kontak oluşuktan sonra ve termal dengeduumunda (b), pozitif gerilim ($V > 0$) (c), negatif gerilim ($V < 0$) (d) [54,90].

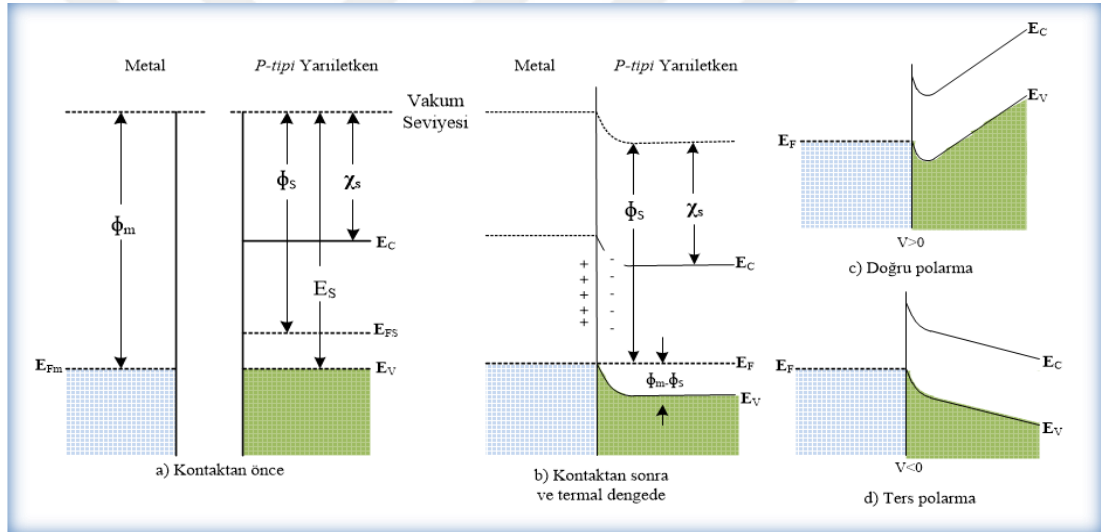
Termal dengeye ulaşılan kadar, p/tipi yarıiletken ile metal kısımdaki bazı holler potansiyeli aşabilecek kadar enerji kazanırlar ve p/tipi yarıiletkenden metale ya da metalden p/tipi yarıiletkene geçiş sağlarlar. Isıl denge sonucunda hollerin p/tipi yarıiletkenden metale ya da metalden yarıiletkene hollerin geçişi dengelenir, karşılıklı olarak iki I_0 akımı oluşturulur. Oluşan bu I_0 akımı doyma akımıdır. Şekil 2.1.c'de gösterildiği gibi, yarıiletkene pozitif voltaj ($V > 0$) uygulandığında, p/tipi yarıiletkenden metale giden hol akımı $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar azalır. Ters yöndeki hol akımı değişmez. Bu nedenle, p/tipi yarıiletken kısımdan metal kısma geçen hollerin potansiyel bariyer yüksekliği eV kadar azalır. Eğer hollerin etkisi nedeniyle oluşan akım pozitif olarak kabul edilirse, metal/p tipi yarıiletken yapı için akım Eşitlik 2.3'teki gibidir.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \quad (2.3)$$

Bu durumda doğrultucu bir kontak elde edilir [54].

2.1.2. Metal/P Tipi Yarıiletken Omik Kontak

MS p/tipi Schottky yapılarında $\Phi_m > \Phi_s$ olduğu durumlarda uygulanan voltjın polaritesi ne olursa olsun, her iki yönde de akıma karşı minimum dirence sahip olan kontak yapısına "omik kontak" denir. Kontak oluşmadan önce (Şekil 2.2. a), p/tipi yarıiletken taraftaki Fermi enerji seviyesi, $\Phi_m - \Phi_s$ metal taraftaki Fermi enerji seviyesinin üzerindedir [91].



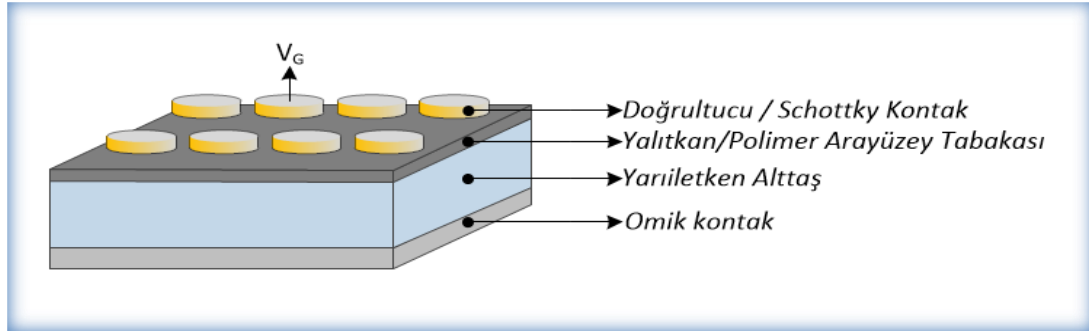
Şekil 2.2. MS p-tipi omik kontak enerji bant yapısı; kontak oluşmadan önce (a), kontak oluşuktan sonrası ve termal dengede (b), $V>0$ doğru polarma durumu (c), $V<0$ ters polarma durumu (d) [54,90].

Kontak oluşma durumunda (Şekil 2.2.b), p/tipi yarıiletken üzerindeki elektronlar metal tarafa doğru göç ederek geride pozitif yüzey yükleri bırakır ve bunun sonucunda metal yüzeyinde negatif yükler ortaya çıkar. P/tipi yarıiletken tarafında elektron yoğunluğunun azalması sonucunda p/tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesinde $\Phi_m - \Phi_s$ kadar azalma olur. Doğru polarma ($V>0$) ile metaldeki elektronlar kolaylıkla yarıiletken içerisindeki izin verilen durumlara geçebilir (Şekil 2.2.c). Bu aynı zamanda p/tipi bir yarıiletken bir metale doğru hollerin akışına da karşılık gelir. Yüksek

elektron yoğunluğundan metale doğru geçiş yapan holler nötr hale gelir. Ters polarıma ($V < 0$) termal dengesinde, metalin iletım bandında oluşan holler kolaylıkla p/tipi yarıiletkenin yanına gidebilir (şekil 2.2.d). Bu durum, verilen voltajın polaritesi ne olursa olsun, en düşük dirençle her iki yönde de akım akışına izin verildiğini göstermektedir [54].

2.2. MIS/MPS YAPILAR

Schottky diyotların metal ile yarıiletken kısımlarını izole etmek ve eklem bölgelerindeki yük geçişini kontrol edebilmek için, metal kısım ile yarıiletken kısmın arasına doğal olarak veya yapay (özel yöntemlerle büyütölmüş) olarak yalıtkan/polimer bir malzeme eklenir. Yapılan bu işleme göre Schottky diyotlar arayüzey kısımda kullanılan malzemenin çeşidine göre farklı isimler alırlar. Eğer arayüzey kısımda kullanılan malzeme yalıtkan bir malzeme ise yani Schottky diyot metal-yalıtkan-yarıiletken bir malzemeden oluşuyorsa bu diyotlar MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) yapılı Schottky diyotlar olarak isimlendirilirler. Eğer arayüzey kısım polimer bir malzemeden oluşuyorsa bu tip Schottky diyotlar ise metal-polimer-yarıiletken (MPS) tipi Schottky diyot olarak isimlendirilir [92].



şekil 2.3. MIS/MPS yapılı Schottky diyodun şematik gösterimi.

şekil 2.3.'te MIS/MPS yapılı Schottky diyot gösterilmektedir. MIS/MPS schotkky diyotlar ile ilgili çalışmalar ilk olarak 1965'te A. M. Cowley ve S. M. Sze tarafından yapılmıştır [85]. Buradaki V_G metal kontağın üzerine uygulanan gerilimi göstermektedir. Metal plaka omik kontağa göre pozitif bir gerilim ile beslenirse V_G gerilimi pozitif olur, negatif bir gerilim ile beslenirse negatif olur. MIS yapılarındaki doğru besleme geriliminin bir kısmı yarıiletkenin tüketim tabakasına düşerken diğer

bir kısmı da yalıtkan tabakanın üzerine düşmektedir ve bu durum Eşitlik 2.4'deki gibi ifade edilmektedir,

$$V_G = V_{yi} + V_y \quad (2.4)$$

Burada, V_G gerilimine uygulanmakta olan gerilimin yarıiletken üzerine düşen kısmını V_{yi} , yalıtkan üzerine düşen kısmını ise V_y ifade eder.

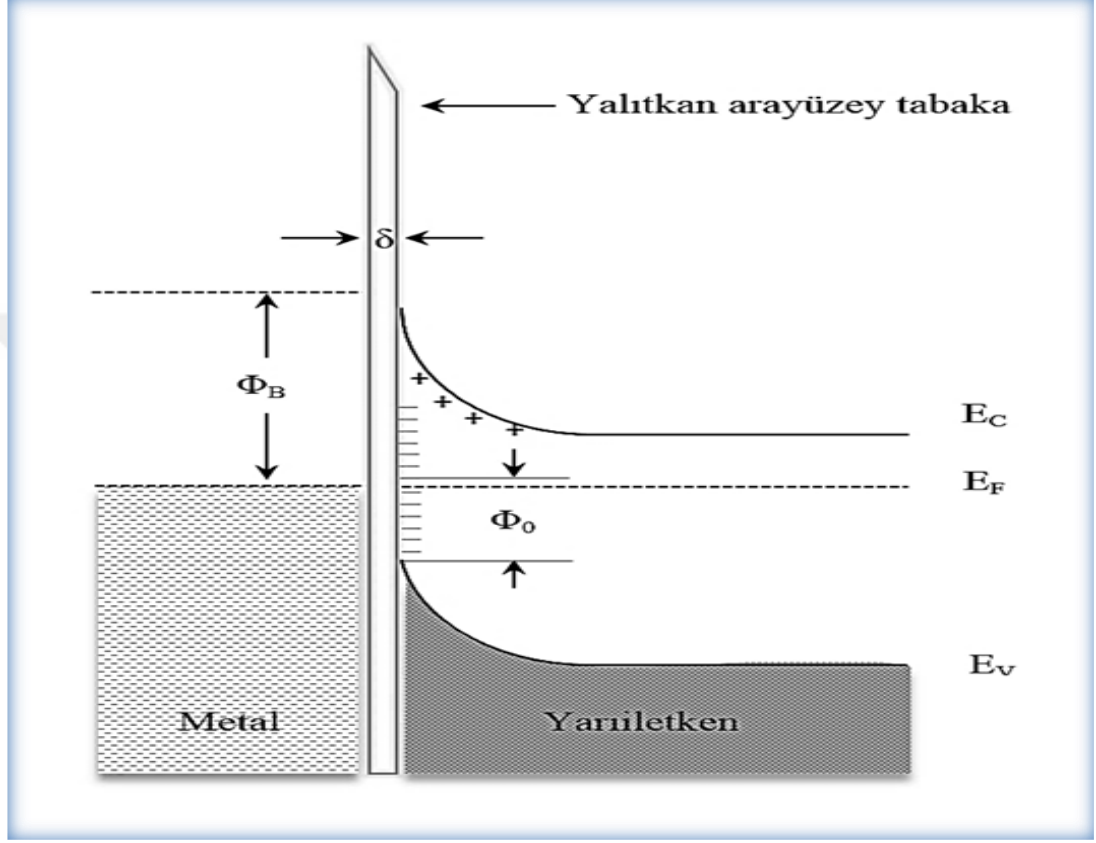
2.3. MIS YAPILARDA ARAYÜZEY DURUMLARI

MIS tipi ara tabakaya sahip metal/yalıtlan/yarıiletken Schottky yapılarındaki oksit yükleri ve arayüzey tuzakları, MIS yapıların elektriksel parametreleri üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır [93]. Schottky yapıların arayüzey durumları iki gruba ayrılır. Bu arayüzey durumu hızlı yüzey durumları ve yavaş yüzey durumlarıdır. Hızlı yüzey durumları, yalıtkan ile yarıiletken arasındaki arayüzeye yakın bölgelerde yer alır ve enerji seviyeleri genellikle yarıiletkenin yasak enerji bölgesinin orta seviyelerine denk gelmektedir. Bu durumlar, bant bükülmesi ve yüzey potansiyelindeki değişimlerle etkin bir şekilde iletkenlik bandı ve valans bandı arasında hızlı yük alışverişi olur. Arayüzeyde bulunan ve yasak enerji bölgesi dışındaki enerjilere sahip yüzey durumlarına "sabit yüzey durumu" ve bu durumların taşıdığı yüke ise "sabit yüzey yükleri" veya "oksit yükü" denir.

Yavaş yüzey durumları ise yalıtkanın metal tarafındaki yüzeyde yer alır ve genellikle oksit yapısındaki hareketsiz yüklerin ısısal olarak uyarılması ile meydana gelir. Bu durumlar, elektrik alan etkisi altında hareket eden iyonlardan kaynaklanmaktadır. Ancak yapılan gözlemler, bu yavaş yüzey durumlarının MIS yapısının kapasitesini etkilemediğini ortaya çıkarmıştır.

MS Schottky kontaklarda fabrikasyon sırasında metal biriktirmeden önce kristal yapının parlak yüzeyine uygulanan kimyasal temizleme işlemi sonrasında, yüzeyde doğal bir oksit tabakası ya da isteğe bağlı olarak yalıtkan özellik gösteren ince bir oksit tabakası oluşturulabilir. Yüzey hazırlama koşulları, bu yalıtkan arayüzey tabakasının kalınlığını doğrudan etkiler. Eğer yalıtkan tabaka kalınlığı 20 Å'den azsa, bu durum

iyi bir doğrultucu kontak oluşumunu belirtir. Şekil 2.4’de, yalıtkan arayüzey tabakasına sahip bir MS kontak için enerji bant diyagramı gösterilmiştir. Bu tür yüzey modifikasyonlarının kontrolü, kontak performansının optimize edilmesi açısından oldukça kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 2.4. Yalıtkan arayüzey tabakalı MS kontağın enerji bant diyagramı [55].

Şekil 2.4.’de metal ve yarı-iletkenin E_F seviyelerinin eşitlendiği ve yalıtkan arayüzey tabaka boyunca vakum seviyesinin süreklilik gösterdiği bir durum tasvir edilmektedir. Arayüzeydeki tabakanın hareketli yüklerden arınmış ideal bir yalıtkan olduğu varsayıldığında, arayüzey oksit tabakası boyunca potansiyelin lineer bir şekilde azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durumda, yalıtkanın iletim bandının alçak kenarının vakum seviyesinin altına doğru uzandığı kabul edilir. Yarıiletkenin tükenim bölgesindeki potansiyel düşüş dikkate alındığında, yalıtkan arayüzey tabakasının kalınlığının $\delta \leq 20 \text{ \AA}$ olduğu koşullarda, yalıtkan tabaka boyunca gerçekleşen potansiyel düşüşün önemsiz olduğu görülmektedir [68]. Böyle ince bir yalıtkan tabaka, elektronların metalden yarıiletkene ve buradan tekrar metale geçişini

kolaylaştırarak elektronlar açısından geçirgen bir yapıdır. Bu nedenle, ince yalıtkan arayüzey tabakasının varlığı, Φ_B değerlerini etkilememektedir. Ayrıca MS kontaktlar arasına yerleştirilen ince yalıtkan tabaka, elektriksel karakteristiklerinin daha kolay analiz edilmesine yardımcı olmaktadır.

MS kontaktlardaki arayüzey tabakasının etkilerine kısaca değinmek gerekirse;

- a) $V=0$ durumunda engel yüksekliği, ideal diyot engel yüksekliğinden daha düşük bir seviyede kalmaktadır.
- b) Elektronlar açısından bakıldığında, yalıtkan arayüzey tabakası belirli bir gerilim değeri uygulandığında geçirgenlik özellikleri gösterebilmektedir.
- c) Yalıtkan arayüzeye sahip MIS kontaktlara bir voltaj uygulandığında ise, yalıtkan tabakanın etkisiyle engel yüksekliğinde bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum, arayüzey tabakasının elektriksel özellikler üzerindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

2.4. MS SCHOTTKY KONTAKLARDA DİRENÇ PARAMETRESİ

Direnç faktörü, Schottky diyotların I - V karakteristikleri üzerinde önemli bir etki oluşturur. Bu diyotlar, iki temel direnç parametresine sahiptir: R_S ve R_{Sh} . Ters besleme gerilimi uygulandığında, diyot performansında R_{Sh} belirleyici bir rol oynarken, doğru besleme gerilimi altında ise R_S ön plana çıkar. Bu parametreler, Schottky diyotların elektriksel davranışını anlayabilmek için önemlidir.

2.4.1. Şönt Direnç (R_{Sh}) Etkisi

Schottky diyotlarda, metal-yarıiletken kontak direnci, “şönt direnci” olarak adlandırılır ve R_{Sh} ile gösterilir. Teorik olarak, ideal bir diyot için R_{Sh} ’ın sıfırdan farklı bir değere sahip olması ve sonsuza yaklaşması beklenir. Ancak, deneysel veriler bu ideal durumu tam olarak yansıtmamaktadır. Deneyler, şönt direncinin $R_{Sh} \geq 10^9 \Omega$ olması gerektiğini ve R_S değerinin bu değerin altında kalması gerektiğini ortaya koymuştur. R_{Sh} değerinde

bir azalma, kaçak akımların oluşmasına zemin hazırlayabilir. Bu durum, diyotun doğrultma oranını ve genel performansını ciddi şekilde olumsuz etkileyerek cihazın işlevselliğini azaltır.

R_{sh} oluşumu aşağıdaki nedenlerden kaynaklı oluşabilir [94].

- a) Diyotun eklem bölgesindeki yapısal bozulmalar
- b) Ölçüm sistemine bağlı oluşan hatalar veya etkileri
- c) MS tabakalar arasında oluşan oksit bölgelerinin varlığı

2.4.2. Seri Direnç (R_s) Etkisi

Schottky engel diyotlarında, yarıiletken tarafındaki tüketim tabakasının dışındaki nötr bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği direnç "seri direnç" olarak adlandırılır ve R_s ile gösterilir. R_s , özellikle I - V hesaplamasında uygulanan gerilimin yüksek olduğu durumlarda ortaya çıkar ve bu da akım değerinde bir düşüşe yol açabilir. Sonuç olarak, diyotun verimliliği ve performansı olumsuz etkilenir. Ayrıca, R_s , kapasitans-voltaj (C - V) ve kondüktans-voltaj (G/ω - V) hesaplamalarında ve en önemlisi frekansın yüksek olduğu ($f \geq 1$ MHz) durumlarda, seri direnç yığılma bölgesinde daha belirgin etkiler gösterir [88,95].

Seri direncin oluşumu, aşağıda belirtilen beş temel nedene dayanmaktadır [94].

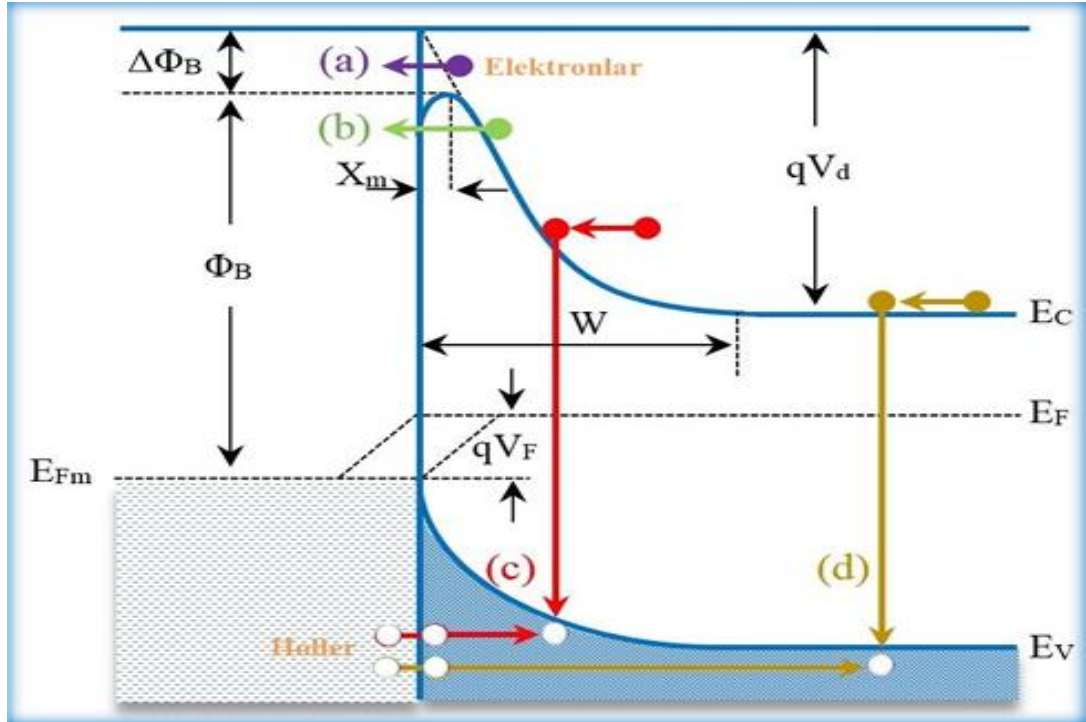
- a) Yarıiletken ve omik kontak arasında gerçekleştirilen büyütme işlemi sırasında filmin yüzeyinde oluşan kirlilik, toz veya organik kalıntılar,
- b) Yarıiletkenin arka yüzeyinde uygulanan omik kontak işlemi,
- c) Kontak üzerinden ölçüm alınırken kullanılan bağlantı telleri,
- d) Yarıiletken ile metal arasında bulunan katkılanmış veya doğal bir arayüzey bölgesi,
- e) Yarıiletkenin doğrultucu kontak bölgesindeki tüketim tabakası.

Bu faktörler, seri direncin artmasına neden olarak cihazın elektriksel performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, seri direncin en aza indirilmesi için bu unsurların dikkatlice kontrol edilmesi son derece önemlidir.

2.5. SCHOTTKY YAPILARINDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARI

Schottky diyotlara dış bir elektrik alan uygulandığında, çeşitli parametreler, diyotun akım iletim davranışını belirgin şekilde etkileyebilir. Bu parametreler arasında sıcaklık, arayüzey tabakasının kalınlığı ve bileşimi, kullanılan yarıiletkenin fiziksel özellikleri ile uygulanan gerilimin yönü ve büyüklüğü yer almaktadır. Her bir bu parametredeki değişim, Schottky diyotlarda etkin olan akım taşıma mekanizmasının farklılaşmasına yol açar. Bu nedenle, belirli çalışma koşullarında hangi akım iletim mekanizmasının baskın olduğunu tespit etmek, yalnızca diyot performansının optimize edilmesi açısından değil, aynı zamanda Schottky diyotların çalışma prensiplerinin daha iyi anlaşılması açısından da son derece önemlidir.

Schottky diyotlarda akım iletimi için dört temel taşıyıcı iletim mekanizması vardır. Bu iletim mekanizmalarını özetleyen şematik bir gösterim Şekil 2.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. MS yapılarındaki temel akım-iletim mekanizmaları [90].

Şekilden görülebileceği gibi, akım taşıyıcılarının metal taraftan karşılaştığı potansiyel bariyer yüksekliği, yarıiletken taraftan gözlemlenen bariyer yüksekliğinden daha yüksektir. Akım her iki yönde de akabilmesine rağmen, akımın yarıiletkenden metale doğru akması daha kolaydır. Şekil 2.5.'de gösterilen akım iletim mekanizmaları, Schottky kontaklarında gözlemlenen ana akım iletim süreçlerini temsil eder ve genel olarak aşağıdaki başlıklar altında kısaca açıklanmaktadır.

- a) **Termiyonik Emisyon Teorisi (TE):** Yeterli termal enerjiye sahip yük taşıyıcıları, karşılaştıkları potansiyel bariyerleri aşarak akım iletimini gerçekleştirebilirler. Bu iletim mekanizması, özellikle oda sıcaklığı ve üzerindeki sıcaklık koşullarında daha etkili hale gelmektedir [96].
- b) **Kuantum Mekaniksel Tünelleme:** Bu iletim mekanizması, Termiyonik Alan Emisyonu ile Alan Emisyonu'nun birlikte etkili olduğu bir iletim mekanizmasıdır. Özellikle düşük sıcaklıklarda ve yüksek katkı yoğunluğuna sahip yarıiletkenlerde belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. "Yüksek katkılı yarıiletken" terimi, katkı atomu yoğunluğunun 10^{17} cm^{-3} 'ün üzerinde olduğu durumları ifade etmektedir. Bu iletim mekanizması, literatürde ayrıca "Difüzyon Mekanizması" olarak da bilinir [96].
- c) **Uzay yükü Bölgesinde Yeniden Birleşme (Rekombinasyon):** Schottky diyotlarda yeniden birleşme (rekombinasyon) akımı, genellikle bant aralığındaki tuzak seviyeleri üzerinden, özellikle de enerji bant ortasına yakın seviyelerde meydana gelir. Bu mekanizma, sıcaklık, taşıyıcı ömrü, bariyer yüksekliği ve uygulanan gerilim gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Düşük sıcaklık ve yüksek gerilim durumlarında, yüksek bariyerli yapıların etkisiyle bu rekombinasyon akımı daha belirgin hale gelir. Toplam akım yoğunluğu ise termiyonik emisyon ve rekombinasyon akımlarının birleşiminden oluşur [97].
- d) **Nötral Bölgede Oluşan Rekombinasyon (Boşluk Enjeksiyonu):** Schottky diyotlarda akım genellikle çoğunluk taşıyıcılar tarafından taşınır. Ancak, bir metal ve n-tipi yarıiletken arasındaki temas durumunda, eğer bariyer yüksekliği yarıiletkenin yasak enerji aralığının yarısından büyükse, metalin temas ettiği

yarıiletken bölgesi p-tipi özellikler gösteren, yüksek sayıda azınlık taşıyıcısı içeren bir yapıya dönüşebilir. Bu durumda, doğru polarizasyonda metalden yarıiletkene boşluk enjeksiyonu gerçekleşir ve bu boşluklar, nötr bölgede elektronlarla birleşerek yeniden bir araya gelir. Böylece, azınlık taşıyıcı akımı meydana gelir ve bu akım, özellikle yüksek bariyerli yapılar söz konusu olduğunda ilettime önemli bir katkı sağlar [98].

2.5.1. MS Schottky Diyotlarda Termiyonik Emisyon Teorisi

Schottky-Mott teorisi, zamanla Bethe tarafından geliştirilerek akım iletiminin engel yüksekliği üzerinden gerçekleştiğini temel alan Termiyonik Emisyon (TE) teorisine dönüşmüştür [99].

Bu teoriye göre, bir metal ile yarıiletken arasındaki temas noktasında akım iletimi esas olarak çoğunluk taşıyıcıları tarafından belirlenmektedir [89]. Termal denge koşullarında, metal-yarıiletken temasındaki engel yüksekliği kT/q değerinden çok daha büyük olduğunda, difüzyon ve sürüklenme akımları ihmal edilebilecek düzeye gelir ve birbirlerini dengeleyebilir. Bu durumda, yalnızca kinetik enerjisi potansiyel engel yüksekliğini aşan elektronlar ilettime katkıda bulunur. Dolayısıyla, akım iletimi bu elektronların potansiyel bariyeri aşabilme yeteneğine bağlı olarak gerçekleşir.

Termiyonik emisyon teorisine göre, MS arasındaki I - V ilişkisi:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5' teki gibi ifade edilmektedir [100]. Eşitlik 2.5'te verilen denklemde, I diyot üzerinden geçen akımı (Amper), V ise diyot uçlarına uygulanan gerilimi (Volt) ifade etmektedir. Ayrıca, I_0 ters polarlama altında ölçülen doyma akımını (Amper), q bir elektronun yükünü (Coulomb), T ortam sıcaklığını (Kelvin cinsinden), k ise Boltzmann sabitini (Joule/Kelvin) temsil etmektedir. Son olarak, n idealite faktörünü (birimsiz) göstermektedir.

Doyma akımı I_0 ise Eşitlik 2.6' daki gibi ifade edilmektedir [101].

$$I_0 = AA^*T^2 e^{\frac{-q\Phi_{B0}}{kT}} \quad (2.6)$$

Burada, Φ_{B0} sıfır beslem ($V=0$ besleme) durumundaki Schottky potansiyel bariyer yüksekliğini (eV), A yarıiletkenin Schottky kontak alanını, A^* ise Richardson sabitini ifade etmektedir. Bu ifade, sıcaklık ve engel yüksekliğinin doyma akımı üzerindeki etkisini açıklamaktadır.

Termiyonik Emisyon teorisinde Richardson sabiti, Eşitlik 2.7' deki gibi ifade edilmektedir.

$$A^* = \frac{4\pi q m_e^* k^2}{h^2} \quad (2.7)$$

2.6. SCHOTTKY DİYOTLARDA İDEALİTE FAKTÖRÜ

Schottky diyotlarda idealite faktörü (n), Eşitlik 2.8 kullanılarak N_{ss} ve yalıtkan tabaka kalınlığı (δ) parametrelerine dayanarak hesaplanabilmektedir.

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{\varepsilon_i}\right)\left(\frac{\varepsilon_s}{W_D + qN_{sb}}\right)}{1 + \left(\frac{\delta}{\varepsilon_i}\right)qN_{sa}} \quad (2.8)$$

Burada ε_i oksit tabakasının geçirgenliğini, ε_s yarıiletkenin geçirgenliğini, N_{sa} metal ile dengede olan arayüzey durumlarının yoğunluğunu, N_{sb} yarıiletken ile dengede olan durumların yoğunluğu, W_D ise tüketim bölgesinin genişliğini belirtmektedir.

Arayüzey durumları göz önüne alındığında, Schottky temasında üç farklı karakteristik durum ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, arayüzey durumlarının yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda;

$$n = 1 + \left(\frac{\delta \varepsilon_s}{W_D \varepsilon_i}\right) \quad (2.9)$$

metal ile dengede olduğu durumlarda;

$$n = 1 + \left(\frac{d_{ox}\epsilon_s}{W_D(\epsilon_i + \delta_q N_{sa})} \right) \quad (2.10)$$

yariletken ile dengede olduğunda;

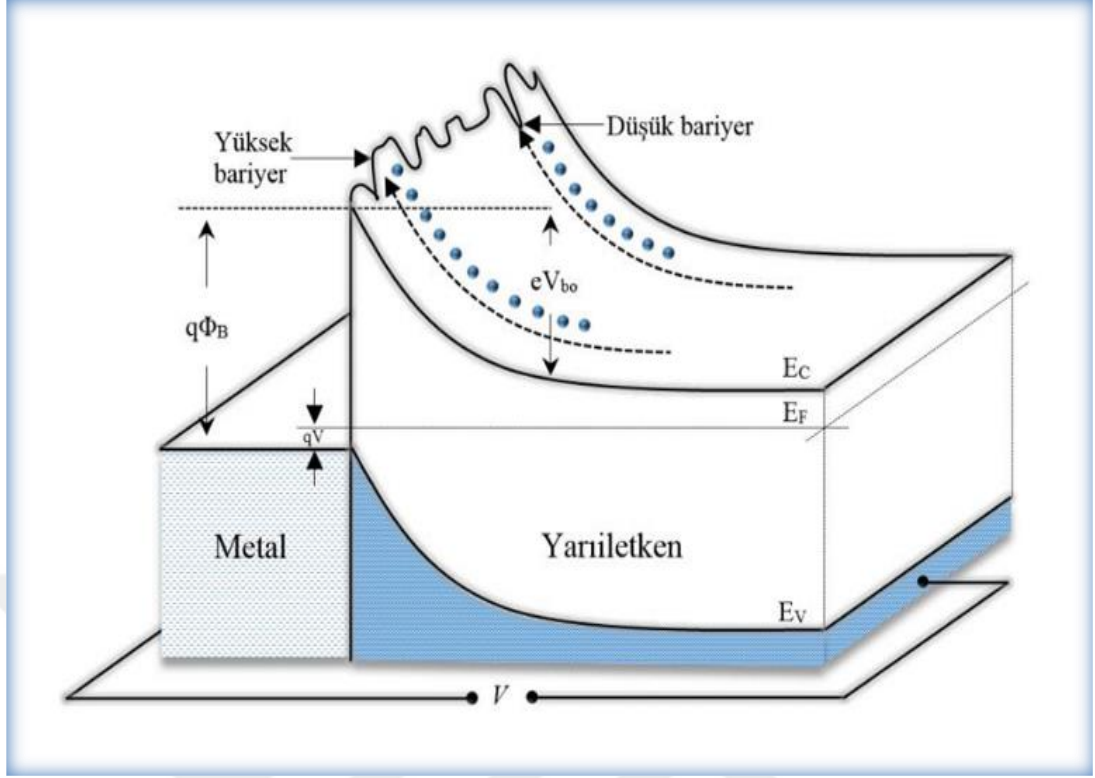
$$n = 1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i} \right) \left(\frac{\epsilon_s}{W_D + qN_{sb}} \right) \quad (2.11)$$

gösterilen ifadelerdeki gibi elde edilir.

Arayüzey durum yoğunluğunun düşük olduğu ve bu durumun metal ile termodinamik dengede olduğu koşullarda, hem oksit tabakasının hem de arayüzey durumlarının idealite faktörüne katkısı oldukça sınırlıdır. Bu tür sistemler ideal Schottky diyot davranışı sergiler. Ancak, arayüzey durum yoğunluğunun yariletken ile dengede olması durumunda yüzey durumlarının sayısı artar. Oksit tabakası kalınlaşarak taşıyıcı geçişini zorlaştırır ve bunun sonucunda idealite faktöründe bir artış görülür [102]. Öte yandan, sıcaklık artışı, toplam MIS yapılarına ait akımın difüzyon bileşenini artırarak taşıyıcı taşınımını kolaylaştırmakta ve dolayısıyla idealite faktörünün azalmasına neden olmaktadır [102].

2.7. SCHOTTKY DİYOTLARDA ENGEL YÜKSEKLİĞİ

MS ve MIS tipi SBD'ler, ileri yönlü ön gerilim altında elde edilen $I-V$ karakteristikleri ile ters yönde ön gerilimle yapılan $C-V$ ölçümleri, Φ_B açısından değişik sonuçlar ortaya koymaktadır. $I-V$ ve $C-V$ teknikleri ile belirlenen sıcaklığa bağlı engel yüksekliği değerlerindeki değişimler ile idealite faktörünün 1'den fazla ($n > 1$) olması, çeşitli fiziksel etkenlerle ilişkilendirilerek açıklanmaktadır. Bu etkenler, arayüzey durumları, yük tuzakları, tünelleme etkileri ya da uzamsal bariyer yüksekliği farklılıkları gibi çeşitli fiziksel etkenlerle ilişkilidir. Özellikle metal ve yariletken arasındaki arayüzeyde bulunan mikroskobik pürüzlülük, potansiyel bariyerin uzaysal olarak homojen olmayan bir dağılım sergilemesine yol açar. Bu durum, Şekil 2.6'da gösterildiği üzere, potansiyel bariyerin farklı noktalarda uzaysal olarak değişim göstermesine ve buna bağlı olarak temas bölgesinde heterojen bir enerji bariyeri yapısının oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.6. Bir Schottky diyotun engel homojensizliğini gösteren üç boyutlu enerji bant diyagramı.

MS arayüzeyindeki pürüzlülük, çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörler arasında yarıiletken yüzey morfolojisi, metalin atomik yapısı, kristal yapı bozuklukları (yerdeğiştirmeler) ve metal tabakasının kalınlığındaki mikroskopik değişimler yer almaktadır. Bu tür yapısal düzensizlikler, özellikle bölgesel bariyer yüksekliğinde alan emisyonu nedeniyle meydana gelen azalmalarla sonuçlanarak, arayüzeyde potansiyel dağılımının değişimine neden olabilir. Ayrıca, arayüzde oluşan farklı metalik fazlar da potansiyel varyasyonlarına katkıda bulunabilir. Bunun yanı sıra, Φ_B 'deki değişimler, düzenli yarıiletken kristal örgüsündeki rastgele yerleşmiş donör atomlarının konumsal uzaklık farklılıklarından kaynaklanabilmektedir. Bu durum, lokal elektrik alanı şiddetinde dalgalanmalara ve dolayısıyla bariyer özelliklerinde heterojen bir dağılıma yol açmaktadır [103].

2.8. SCHOTTKY DİYOTLARDA CHEUNG YÖNTEMİ

Metal-yarıiletken Schottky diyotların temaslarının elektriksel parametrelerini belirlemek için başvuru yöntemlerinden biri Cheung yöntemidir [104]. Bu yöntemde yer alan Cheung fonksiyonları, temasın karakteristik parametrelerini (n , R_s ve Φ_B gibi) belirlemeye yarayan analitik ifadelerdir. Bu fonksiyonlar, aşağıdaki gibi kısaca açıklanabilir.

Bir diyot üzerindeki seri direnç etkisi, genellikle diyot ile seri bağlı bir dirençten oluşan bir eşdeğer devre modeli ile gösterilir. Bu eşdeğer devre bir gerilim kaynağına bağlandığında, diyot üzerindeki gerilim (V_D), uygulanan toplam gerilim (V) ile seri direnç üzerindeki gerilim düşümü (IR_s) arasındaki fark olarak ifade edilir. Bu durumda, diyot üzerindeki gerilim, Eşitlik 2.12'deki gibi ifade edilir.

$$V_D = V - IR_s \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.5'te bulunan V ifadesinin yerine seri direnç etkisi göz önüne alınarak $V - IR_s$ ifadesi yazılır ve her iki tarafın da logaritması alındıktan sonra gerekli matematiksel işlemler yapıldığında, Eşitlik 2.13'deki türevsel ifade elde edilir.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.13)$$

Burada, n idealite faktörünü, k Boltzmann sabitini, T mutlak sıcaklığı, q elektron yükünü ve R_s seri direncini temsil etmektedir.

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{A A^* T^2}\right) \quad (2.14)$$

$$H(I) = IR_s + n \Phi_B \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.13'e göre, I - V karakteristiğinin logaritmik doğru besleme bölgesindeki doğrunun y eksenini kestiği noktadan idealite faktörü hesaplanabilir. Ayrıca grafiğin eğimine bakılarak R_s değerleride bulunur. $H(I)$ ve I grafiği üzerinden de doğrunun y

eksenini kestiği noktadan Schottky engel yüksekliği ve eğimden de seri direnç değeri hesaplanabilir [105].

2.9. SCHOTTKY DİYOTLARDA NORDE YÖNTEMİ

Norde, diyot üzerindeki gerilimin $3kT/q$ 'dan büyük olduğu durumlarda seri direnç ve Schottky engel yüksekliği gibi parametrelerin belirlenebilmesi için alternatif bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde kullanılan Norde fonksiyonları, Eşitlik 2.16'da olduğu gibi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [106,107].

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (2.16)$$

Burada $F(V)$ Norde fonksiyonunu; V uygulanan gerilimi, I akımı A^* Richardson sabitini, T mutlak sıcaklığı ve γ idealite faktöründen yani n 'den biraz büyük seçilen sayısal bir parametreyi ifade etmektedir. Ayrıca voltajın minimum değeri V_{min} olarak tanımlandığında, Schottky diyotunun Φ_B ve R_s değerleri Eşitlik 2.17-2.18'deki gibi ifade edilir.

$$\Phi_B = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (2.17)$$

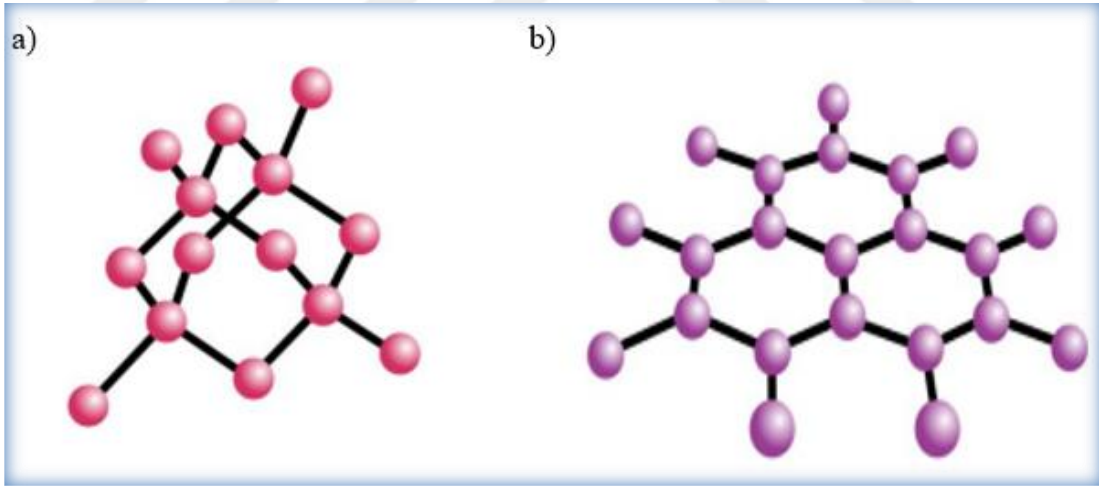
$$R_s = \frac{(\gamma-n)kT}{qI_{min}} \quad (2.18)$$

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. ELMAS BENZERİ KARBON (DLC)

DLC terimi, isminden de anlaşılacağı gibi amorf karbon (a-C) ve hidrojene edilmiş amorf karbon (a-C:H) filmlerini ifade etmektedir [108]. Karbon, farklı hibridizasyon türlerine sahip birçok yapısal forma sahiptir; bunlar arasında en yaygın olanları elmas (sp^3 hibridizasyonu) ve grafitir (sp^2 hibridizasyonu) [109]. Şekil 3.1’ de sp^2 ve sp^3 allotrop yapısı gösterilmiştir. DLC filmleri, sp^3 ve sp^2 hibridizasyon bağlarının bir kombinasyonundan oluşur ve bu bağların göreceli oranları, filmlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilerler [110].



Şekil 3.1. a) sp^2 hibridizasyonu (Grafir) ve sp^3 hibridizasyonu (Elmas) [111].

DLC filmler, yüksek sertlik, mükemmel termal iletkenlik, yüksek elektriksel direnç, kimyasal stabilite, geniş bant aralığı, üstün tribolojik özellikler, mekanik, optik ve çeşitli kimyasal özelliklere sahiptir. Ayrıca DLC filmlerinin üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri, bu filmlerin yüksek sıcaklık, voltaj veya radyasyon gibi zorlu ortam koşullarında güvenilir ve etkin bir şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır ve

bunlar gibi çeşitli birçok özelliklerden dolayı metal/yarıiletken yapılarında ara katman olarak tercih edilebilecek benzersiz bir malzemedir [26].

DLC filmlerinin özellikleri, element katkısı yoluyla özelleştirilebilir. Bu bağlamda, yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri arasında niyobyum (Nb), tungsten (W), molibden (Mo), krom (Cr), titanyum (Ti), alüminyum (Al), bakır (Cu) ve gümüş (Ag) gibi metaller bulunmaktadır. Metal dopantlarla modifiye hale gelmiş DLC filmleri, düşük artık gerilme, artırılmış film yoğunluğu, iyileştirilmiş tribolojik ve mekanik özellikler ile artan hidrofobiklik gibi gelişmiş özellikler sunmaktadır. Bunun yanı sıra, indirgenmiş grafen oksit (rGO), silikon, çinko oksit (ZnO) ve seryum oksit (CeO₂) gibi metal olmayan katkı maddeleri de DLC filmlerinde sürtünmeyi azaltmak, aşınma direncini artırmak ve sertlik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmıştır [112]. Ek olarak eklenen üçüncü elementin türüne ve konsantrasyonuna bağlı olarak, elmas benzeri karbon filmlerinin elektriksel özelliklerinin, Co, Ni, Au, H ve N gibi çeşitli dopantlarla yapılan katkılardan önemli ölçüde etkilendiği bildirilmektedir [113].

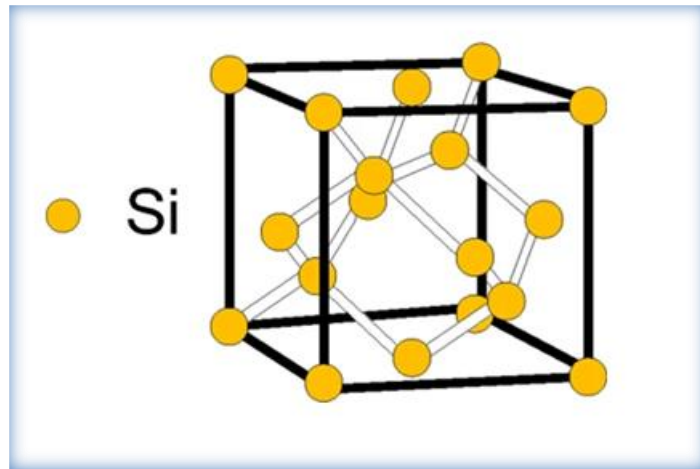
DLC filmleri veya katmanları, CVD ve PVD yöntemleri kullanılarak üretilmektedir [114]. Bununla birlikte, organik bileşiklerin elektrokimyasal ayrıştırılması prensibine dayanan elektrokimyasal biriktirme yöntemi, diğer iki yöntemin kullanım kolaylığına rağmen belirgin avantajlar sunmaktadır. Elektrokimyasal biriktirme yöntemi, basit bir işleme sahip olması, düşük maliyetli ekipman gerektirmesi, düşük sıcaklık ve basınç koşullarında çalışabilmesi ve büyük ölçekli üretime uygunluğu nedeniyle öne çıkmaktadır [114].

DLC'nin kendine özgü yapısı, metallerle kaplanmasına, alaşımlanmasına ve katkılanmasına olanak tanıyarak, yarıiletken teknolojisi gibi alanlarda önemli bir malzeme haline gelmesini sağlamıştır. Bu yapı sayesinde, DLC filmlerinin belirli özellikleri vurgulanabilir ve kullanım amacına uygun şekilde modifiye edilebilir. Literatürde, DLC malzemesine sıklıkla Al, Ni, S⁻², P, Ti ve Cu gibi elementlerin katkılındığına dair birçok çalışma bulunmaktadır [80,114,115].

3.2. YARIİLETKEN SİLİSYUM (Si)

Silisyum (Si) elementi periyodik tablonun 4A grubunda bulunan atom numarası 14 olan yarıiletken bir metaldir. 300 °K sıcaklıkta örgü parametresi 0,5431 nm ile erime noktası 1687 °K olan Si, yeryüzünde çok sayıda bulunan elementlerden biridir. Atomlar arası kovalent bağlara sahip olan Si, Czochralski metodu kullanılarak tek kristal formda büyütüldüğünde, içerisinde önemli bir miktarda safsızlık bileşenleri içerdiğinden bir elementer yarıiletken olarak tanınır. Bunun yanı sıra, kristal örgüsünde bulunan fazlalık atomları nedeniyle ortaya çıkan kristal kusurları, silisyumun safsızlık oranlarını önemli bir şekilde etkiler. Özellikle, oksijen (milyonda 20) ve karbon (milyonda 3) safsızlık oranları, sırasıyla 1. ve 2. sırada yer alarak kristal yapısındaki safsızlık bileşenlerini oluşturur.

Silisyum, elmas tipi Bravais kristal örgü yapısına sahip olup yüzey merkezli kübik kristal ailesine dahildir. Birim hücresinde, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, toplamda 8 atom bulunmaktadır. Si kristalleri, katkılama süreçlerine bağlı olarak farklı yarıiletken özellikler kazanır. Örneğin, 5. grup (P,As,S) elementleri ile katkılındığında n-tipi yarıiletken özellikleri, 3. grup (B,Al,Ga,In) elementleri ile katkılındığında ise p-tipi yarıiletken özellikler gösterdiği bilinmektedir. Si için katkılama atomu konsantrasyonu genellikle 10^{13} ile 10^{18} cm^{-3} arasında kabul edilirken, 10^{18} cm^{-3} üzerindeki oranlar yoğun katkılama (heavy doping) olarak sınıflandırılmaktadır [89,116].



Şekil 3.2. Silisyum (Si) elementinin yüzey merkezli kübik görseli [117].

Silisyum üzerine yapılan kapsamlı araştırmalar, bu malzemenin yarıiletken teknolojisinde en yaygın kullanılan materyal olmasını sağlamıştır. Silisyumun kolay işlenebilirliği, yüksek sıcaklıklarda kararlı yapısı ve doğada bol miktarda bulunması, bu tercihlerin başlıca nedenleridir. Bu özellikler, silikonun elektronik ve yarıiletken cihazlar için önemli bir malzeme olarak kullanılmasında temel bir rol oynamaktadır.

3.3. ALTIN (Au)

Metal ve yarıiletkenin sıkı bir şekilde temas ettirilmesiyle oluşturulan metal/yarıiletken (M/S) kontakları, diğer bir deyişle Schottky diyotlar, yarıiletken teknolojisinin temel bileşenlerinden biridir. Bu tür diyotların performansı, yalnızca kullanılan yarıiletkenin özelliklerine değil, aynı zamanda temas için seçilen metalin fiziksel ve kimyasal özelliklerine de bağlıdır. Özellikle metalin çalışma fonksiyonu, elektriksel iletkenliği ve kimyasal kararlılığı, M/S kontaktın enerji bant yapısını ve dolayısıyla diyotun elektriksel karakteristiklerini belirleyen temel unsurlar arasında yer alır. Schottky diyotların üretiminde genellikle yüksek iletkenliğe ve kimyasal kararlılığa sahip metaller tercih edilmektedir. Altın (Au), gümüş (Ag), paladyum (Pd) ve platin (Pt) gibi metaller, düşük dirençli elektriksel iletim ve yarıiletken yüzeyi ile uyumlu bir temas sağlamaları nedeniyle sıkça kullanılmaktadır. Bu metallerin yüksek çalışma fonksiyonları, Schottky bariyer yüksekliğinin kontrol edilmesine olanak tanır ve cihazın doğrultma özelliklerini optimize eder. Ayrıca, bu metallerin korozyona karşı dirençli olmaları, diyotun uzun ömürlülüğünü ve güvenilirliğini artırmaktadır. Dolayısıyla, seçilen metalin özellikleri, Schottky diyotların performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir ve bu seğim, cihaz tasarımı sürecinde büyük bir titizlikle değerlendirilmelidir [118].

Bu çalışmada, omik ve Schottky kontakların hazırlanmasında, elektriksel iletkenliği bakır ve gümüşten sonra en yüksek olan, %99.999 saflıktaki altın (Au) metali tercih edilmiştir. Altının bu seğimi, yüksek iletkenlik değerinin yanı sıra, kimyasal kararlılığı ve çevresel etkilere karşı dirençli olması gibi üstün özelliklerine dayanmaktadır. Altın, kolayca kimyasal reaksiyonlara girmemesi sayesinde oksidasyon ve korozyona karşı yüksek dayanıklılık gösterir. Ayrıca, üzerine düşen kızılötesi ışınların neredeyse

tamamını yansıtabilmesi, optik ve termal uygulamalarda altını önemli bir malzeme haline getirmektedir [54,119].

Bu nitelikleri nedeniyle altın, yalnızca Schottky diyotlarda değil, aynı zamanda geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Baskı devreleri, transistörler, yarıiletken cihaz kaplamaları, uzay ve havacılık teknolojileri ile işlemci bağlantı uçlarının üretimi gibi alanlarda tercih edilmektedir. Altın metalinin bu geniş kullanım alanları, üstün fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır [120]. Altın (Au) metalinin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Altın (Au) metalinin özellikleri.

Au Özellikler	
Erime Noktası	1064 °C
Kaynama Noktası	2700 °C
Elektriksel İletkenlik	43 Mega-Siemens/m
Elektriksel Direnç	23 nano.Ω.m
Isıl İletkenlik	314 W/mK

3.4. ALÜMİNYUM (Al)

Alüminyum metali ve alaşımları, sahip oldukları üstün mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda giderek artan bir talep görmektedir. Bu özellikler, alüminyumun çeşitli sektörlerde geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımakta ve tüketiminin sürekli artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, alüminyum ve alaşımlarına yönelik yeni kullanım alanlarının keşfedilmesi, bu malzemenin stratejik önemini ve endüstriyel uygulamalardaki vazgeçilmezliğini daha da pekiştirmektedir.

Günümüz endüstrisinde, alüminyum metali, saf haliyle elektrik iletkenliği, yüksek termal iletkenlik ve korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde stratejik bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, alaşımlama yöntemi, alüminyumun temel özelliklerini daha da çeşitlendirerek ve iyileştirerek, çok daha geniş bir uygulama yelpazesi sunmasına olanak sağlamaktadır. Alaşımlama ile mekanik dayanım, sertlik, işlenebilirlik ve

termal genleşme gibi özellikler optimize edilmekte, bu da alüminyumun farklı mühendislik uygulamalarında kullanımını artırmaktadır [121]. Günümüzde, inşaat, otomotiv, havacılık, elektronik, enerji ve denizcilik gibi çeşitli sektörlerde kullanılmak üzere tasarlanmış, farklı bileşim ve özelliklere sahip yüzden fazla alüminyum alaşımı bulunmaktadır. Bu alaşımlar, hem yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamalarında hem de günlük yaşamda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının bu kadar geniş çapta kullanılabilmesi, onların hafiflik, mukavemet, geri dönüştürülebilirlik ve ekonomik üretim maliyetleri gibi avantajlarına dayanmaktadır. Bu durum, alüminyumun ve türevlerinin modern endüstriyel süreçler için vazgeçilmez malzemeler haline gelmesini sağlamıştır. Çizelge 3.2’de saf alüminyum (Al) malzemesinin bazı özellikleri verilmiştir [121].

Çizelge 3.2. Saf alüminyum (Al) özellikleri [122].

Özellik	Değer
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı (g/mol)	26.98
Yoğunluk (g/cm ³) (20 °C’de)	2.6989
Ergime sıcaklığı (°C)	660.2
Isıl iletkenliği (WK ⁻¹ /m)	237
Elektrik iletkenliği (mΩ ⁻¹ /mm ²)	37.6

Saf alüminyumun özgül ağırlığı yaklaşık olarak 2,7 g/cm³’tür ve bu değeriyle oldukça hafif bir metal olarak sınıflandırılmaktadır. Kütleli olarak değerlendirildiğinde, alüminyumun yoğunluğu bakırın yaklaşık %29’u, demirin ise %35’i kadardır. Bu düşük yoğunluk, alüminyumun başta havacılık ve otomotiv endüstrisi olmak üzere, ağırlığın kritik bir parametre olduğu birçok sektörde tercih edilmesine neden olmaktadır [123].

Alüminyum alaşımlarında, ihtiyaca bağlı olarak sertlik, mukavemet, tokluk ve diğer mekanik özellikler, ısıtıl işlem uygulanarak optimize edilebilmektedir. Günümüzde, özellikle çinko (Zn), silikon (Si), bakır (Cu) ve magnezyumun (Mg) düşük oranlarda eklenmesiyle mukavemet artırılmış alüminyum alaşımlarında, ısıtıl işlem süreçleri sayesinde çok yüksek çekme mukavemeti değerleri elde edilmektedir. Bu yöntem,

alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini belirli uygulama gereksinimlerine uygun şekilde uyarlamayı mümkün kılmaktadır [123].

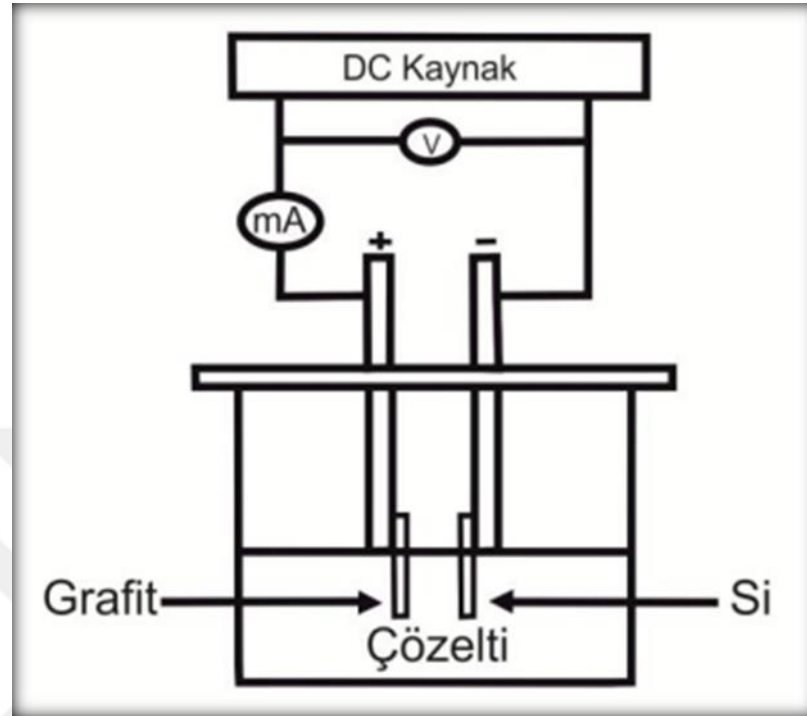
Alüminyum yüzeyleri, atmosferik korozyona maruz kaldıklarında, kısa bir süre içinde yaklaşık 20-25 Å kalınlığında ince ve görünmez bir oksit tabakası oluşur. Bu doğal oksit tabakası, alüminyum yüzeyini çevresel etkilere karşı koruyarak daha fazla oksitlenmeyi önleyen bir bariyer görevi görür. Alüminyumun yüksek korozyon direncinin temel kaynağı, bu kendiliğinden oluşan koruyucu oksit tabakasıdır. Ancak, bazı alkaliler, bu koruyucu oksit tabakasını tahrip etme kapasitesine sahiptir. Bu durum, alüminyumun belirli kimyasal ortamlarda korozyona karşı direncini azaltabilir. Dolayısıyla, alüminyumun kullanılacağı ortam koşulları, malzemenin uzun vadeli dayanıklılığını etkileyebilecek bu faktörler göz önünde bulundurularak dikkatlice değerlendirilmelidir [123].

Alüminyum ve alaşımları, ısıyı son derece iyi iletirler ve bu ısı iletkenlik, çeliğin yaklaşık altı katıdır. Alüminyumun yüksek ısı iletkenliği, yüksek gerilimli elektrik nakil hatlarında, transistör soğutucularında, veri kayıt disklerinde, kimya, havacılık, savunma sanayinde ve birçok sektörde alüminyum ısı değiştiricilerinin yaygın olarak tercih edilmesine neden olmuştur. Ayrıca, alüminyum ve alaşımları elektriği de çok iyi iletirler. Ticari alüminyumun elektrik iletkenliği yaklaşık 37 siemens olup, bu değer bakırın %62'sine tekabül etmektedir. Alüminyumun yoğunluğu 2,7 gr/cm³ iken, bakırın yoğunluğu 8,9 gr/cm³'tür. Bu bağlamda, ağırlık bakımından kıyaslandığında alüminyumun bakırdan daha iyi bir iletken olduğu, ancak daha fazla alan kapladığı ortaya çıkmaktadır [123].

3.5. ELEKTROKİMYASAL BİRİKTİRME YÖNTEMİ

Elektrokimya, elektrot ile bir kimyasal tür, yani elektrolit arasındaki elektrik transferi süreçlerini inceleyen bir bilim dalıdır. Temelde, elektrot, reduksiyon-oksidasyon (redoks) reaksiyonlarının gerçekleştiği elektrolit çözeltisine yerleştirilmiş bir iletken çubuk veya levhadan oluşur. Şekil 3.3 'de görüldüğü gibi, bir güç kaynağı devreye alındığında, çözeltideki elektrik akımı yüklü parçacıkların, yani iyonların hareketiyle sağlanır. Bu süreçte, pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) negatif elektrota, negatif yüklü

iyonlar (anyonlar) ise pozitif elektrota yönelir. İyonların bu hareketi sayesinde elektrik devresi tamamlanır ve süreç kesintisiz bir şekilde devam eder [124].



Şekil 3.3. DLC filmin elektrokimyasal yöntem kullanılarak biriktirilmesi için kullanılacak sistem [125].

PVD ve CVD yöntemleri, yüksek basınç ve sıcaklık gereksinimleri nedeniyle karmaşık ekipmanlara ihtiyaç duyan tekniklerdir. Bu durum yüksek dereceli sıcaklığa ve basınca dayanıklı yüzeylerin kaplama işlemlerinde seçenekleri sınırlamaktadır. Ancak, filmlerin düşük sıcaklıklarda üretilmesi, sadece yüzey malzemelerinin kullanım alanlarını genişletmekle kalmaz; aynı zamanda film ile alttaş arasında oluşabilecek termal stresi en aza indirerek daha stabil ve dayanıklı kaplama yapılarının elde edilmesini sağlar [126].

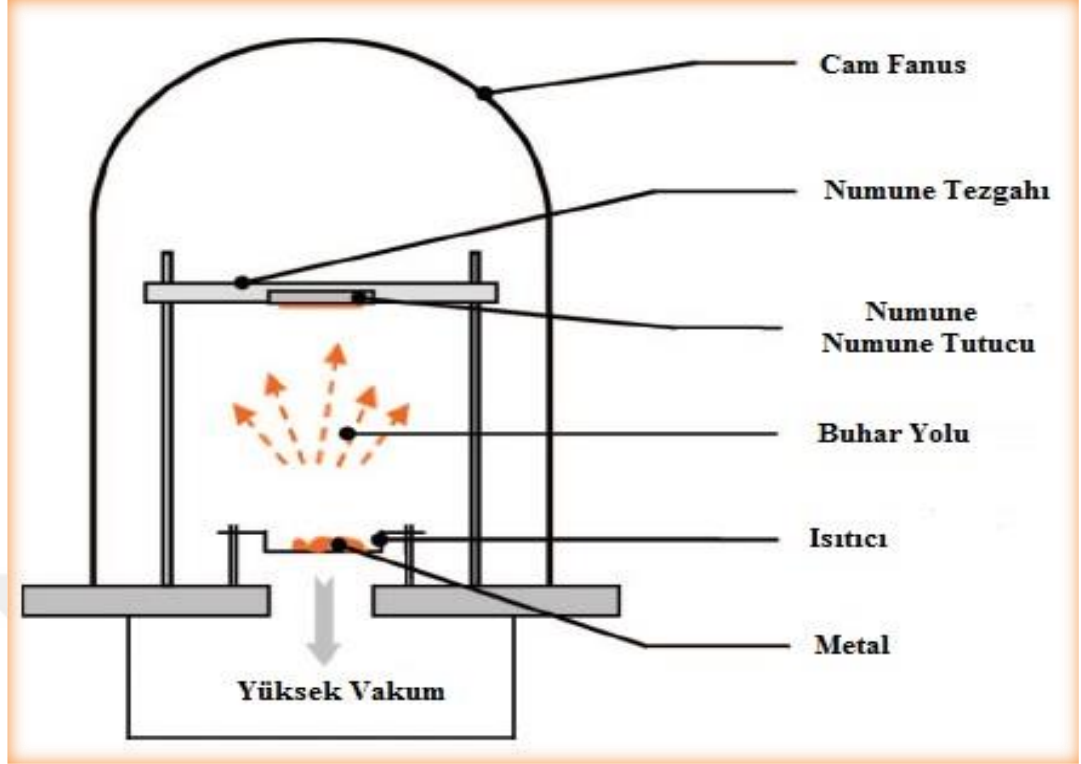
Elektrokimyasal yöntem, düşük çalışma sıcaklığı, basit kurulum gereksinimi ve elektro biriktirme işlemlerinde reaksiyon hızının ayarlanabilir bir potansiyelle kontrol edilebilmesi gibi avantajlarıyla oldukça caziptir. Ancak, bu yöntemin etkinliği, elektrolit olarak kullanılan organik sıvıların kaynama noktalarıyla sınırlı kalmaktadır [127].

3.6. DLC ARAYÜZEYE SAHİP SCHOTTKY YAPISININ ÜRETİM SÜRECİ

Bu çalışma için hazırlanan iki tip cihazın (Saf-DLC ve Cu katkılı DLC ara tabakalı Schottky yapıları; bundan sonra sırasıyla D1 ve D2 cihazları olarak anılacaktır) genel üretim süreçleri yaklaşık olarak aynıdır. Her iki cihazında, ohmik ve Schottky kontaklarını oluşturmak için termal metal buharlaştırma sistemi kullanılmıştır. Kontakların kalınlığı da yaklaşık 120 nm olarak ayarlanmış ve Schottky kontak alanı $7.35 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca 300 μm kalınlığında p-tipi silisyum yarıiletken alttaşlar D1 ve D2 cihazlarının üretiminde kullanılmıştır. Saf-DLC ve Cu katkılı DLC ara tabakalarının elde edilmesi için elektrokimyasal biriktirme yöntemi kullanılmıştır. Bu cihazların üretim sürecinde aşağıda sıralanan adımlar sırasıyla uygulanmıştır.

Üretim sürecinden önce, yarıiletken plaka, üzerindeki metalik ve organik kirleticilerin tamamen giderilmesi amacıyla bir dizi temizlik işlemine tabi tutulmuştur. Bu aşamada, p-tipi silisyum alt tabakası, yüksek dirençli deiyonize su, HF ve ($\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}$) karışımı kullanılarak geleneksel kimyasal temizleme yöntemleriyle ultrasonik bir banyoda detaylı şekilde temizlenmiştir. Temizlik işleminin ardından alt tabaka, N_2 gazı kullanılarak kurutulmuştur.

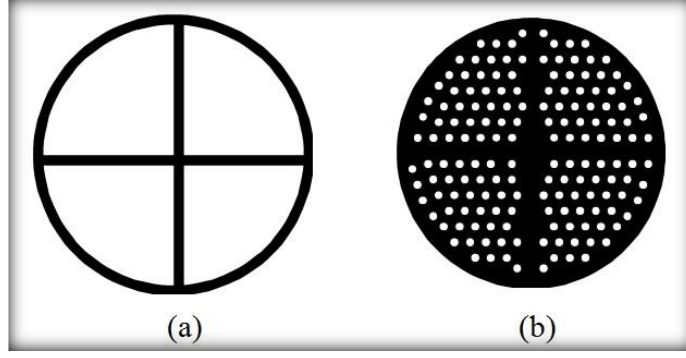
Kimyasal temizleme işlemi uygulanan p-Si kristalinin parlatılmamış mat kısmında omik kontak oluşturmak için Al metali tercih edilmiştir. Bu işlem için, p-Si kristalinin mat yüzeyi aşağı bakacak şekilde numune tutucu üzerine konumlandırılarak termal buharlaştırma ünitesine yerleştirildi. Kullanılan örnek bir termal buharlaştırma sistemine ait şematik gösterim Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Omik kontak için gerekli olan Al metali termal buharlaştırma ünitesine yerleştirildi ve p-Si kristalinin mat yüzeyine, yüksek vakum koşullarında ($\approx 10^{-6}$ Torr basınçta) buharlaştırıldı [128]. Uygulanan bu işlemler sonucunda Al/p-Si omik kontağı başarıyla oluşturulmuştur.



Şekil 3.4. Termal metal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.

Buharlaştırmanın yapıldığı ünite de kontrol paneli, çalışma odası, rotari ve difüzyon pompalarından oluşan bir düzendir. Bu sistemin çalışma odasında, buharlaştırma kaynağı ve kalınlık ölçüm sistemi vardır. Buharlaştırma işlemi sırasında, çalışma odası yüksek vakum seviyesine ($\approx 10^{-6}$ Torr basınç) ulaşır. Düşük çalışma basıncı, kaplama işlemi için gereken metal atomlarının ortalama serbest yolunu yeterince uzun hale getirerek kaplamanın homojenliğini artırır. Aynı zamanda, düşük vakum durumu, metal atomlarının oksijenle tepkimeye girmesini önleyerek kaplama kalitesini korur. Bu sayede, kaplama işleminin verimliliği ve kalitesi önemli ölçüde artar.

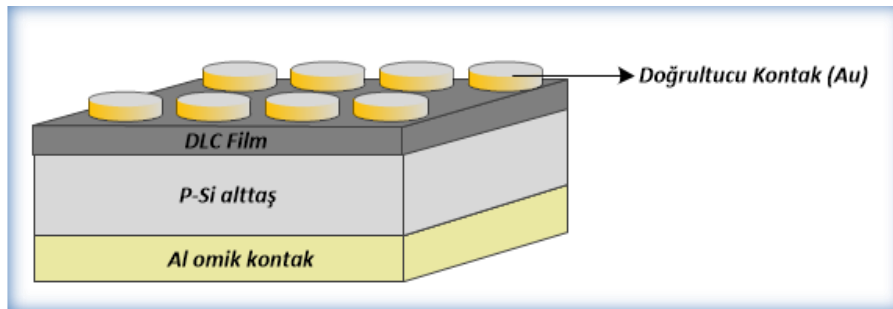
Omik kontağı oluşturulan p-Si kristalinin ön yüzeyine, elektrokimyasal biriktirme yöntemi kullanılarak DLC filmi kaplanmıştır. DLC filminin kaplanmasının ardından, doğrultucu kontak alanını sınırlamak amacıyla, Şekil 3.5b’de gösterildiği gibi çapı 1 mm olan deliklerden oluşan bir maske yüzeye yerleştirilmiştir [128]. Bu adımı takiben, Schottky tipi doğrultucu kontaktları oluşturmak üzere %99.999 saflıkta Au metali tercih edilmiş ve bu metal, termal metal buharlaştırma sistemi kullanılarak DLC kaplı yüzeye yüksek vakum koşullarında buharlaştırılarak kontakt işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. a) Omik kontak, b) doğrultucu kontak oluşturabilmek için kullanılan maske.

Cu katkılı DLC nanokompozit filminin elektrokimyasal biriktirme işlemi ise şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Başlangıçta ilk olarak, 0.05 gram toz bakır metali, bir beher içindeki 150 mL hidrojen peroksit'e eklenmiştir. Bu çözelti, daha fazla bakır iyonu elde edilebilmesi amacıyla manyetik karıştırıcı ile iki hafta boyunca karıştırılmıştır; bu süre zarfında çözeltinin rengi mavimsi bir hal almıştır (bu aşamada bakır tozunun büyük bir kısmının beherin dibinde çözünmeden kaldığı not edilmelidir). Daha sonra, 1.5 mL Cu tozu + H_2O_2 çözeltisi 80 mL analitik dereceli metanol içerisine eklenmiş ve elektrolizden önce 2 dakika boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Elde edilen bu çözeltinin elektroliziyle, 550 V uygulama gerilimi altında ve 5 saat süreyle Cu-DLC filminin kaplanması gerçekleştirilmiştir.

Böylece Al omik kontaklı Au/ DLC/p-Si/Al doğrultucu Schottky kontak Şekil 3.6 'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.

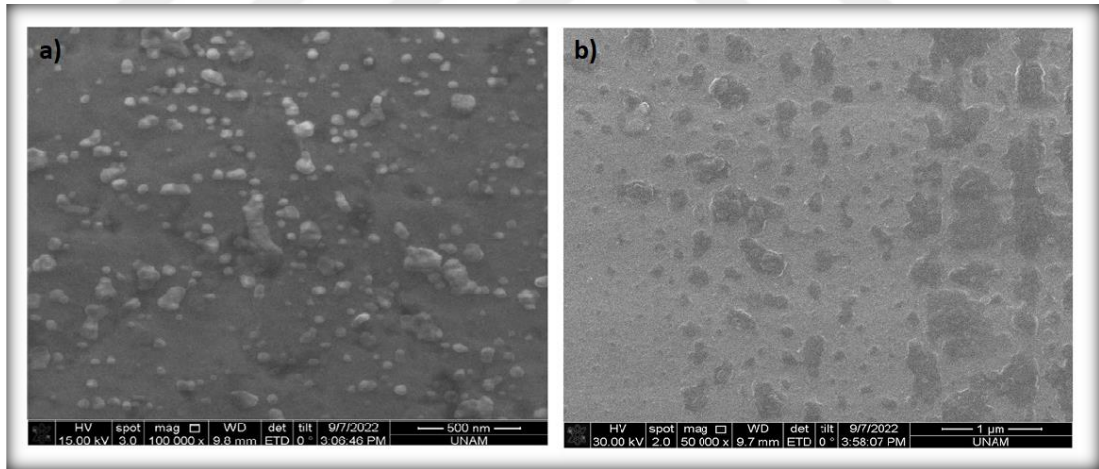


Şekil 3.6. Elde edilen MIS yapıya ait şematik gösterim.

Cihazların üretim süreci kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- a) Si alttaşların standart kimyasal temizlik işlemleri
- b) Omik kontak oluşturma süreci
- c) Arayüzey tabaka büyütme süreci
- d) Schottky/doğrultucu kontak oluşturma süreci.

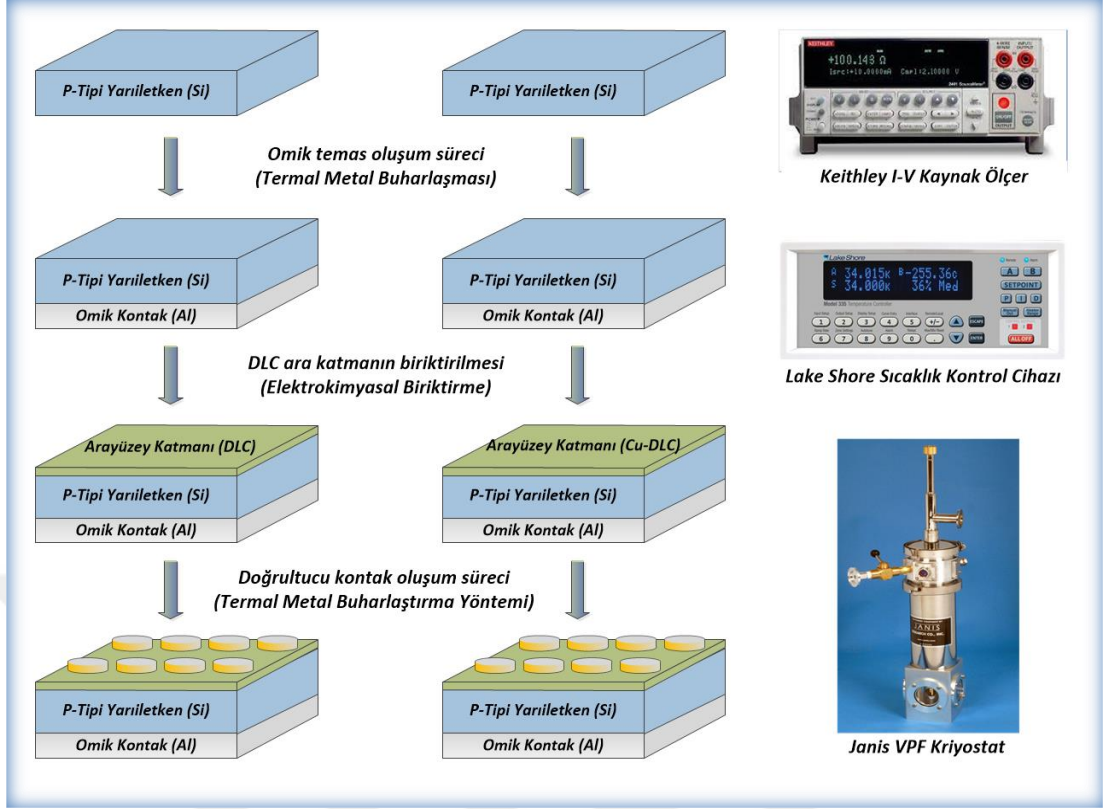
Her iki cihazın üretim süreci görsel olarak deneysel ölçüm sistemlerindeki Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Cihazların üretim aşamaları, yapısal özellikleri ve bazı kritik karakterizasyonlara (örneğin SEM ve XRD) ilişkin daha ayrıntılı bilgiler [26,34,79] numaralı referanslarda yer almaktadır. Ayrıca, DLC ara tabakalı cihazların bariyer yüksekliğinin şekli, akım iletim mekanizmaları ve enerji bant diyagramlarına ilişkin bilgiler [47,48] numaralı referanslarda bulunabilir. Bu kapsamda, saf DLC ve Cu DLC cihazlarının yüzey yapısını karşılaştırmak için elde edilen SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 3.7 a,b’de yer almaktadır.



Şekil 3.7. a) DLC ve b) Cu-DLC filminin SEM görüntüleri [26,34].

3.7. DENEYSEL ÖLÇÜM SİSTEMİ

Fabrikasyon adımları yukarıda detaylandırılan, D1 ve D2 cihazlarının hazırlanma süreçlerini gösteren deneysel ölçüm sisteminin şematik görüntüsü Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. DLC ve Cu katkılı DLC ara katmanlı Schottky cihazlarının hazırlanma süreçleri.

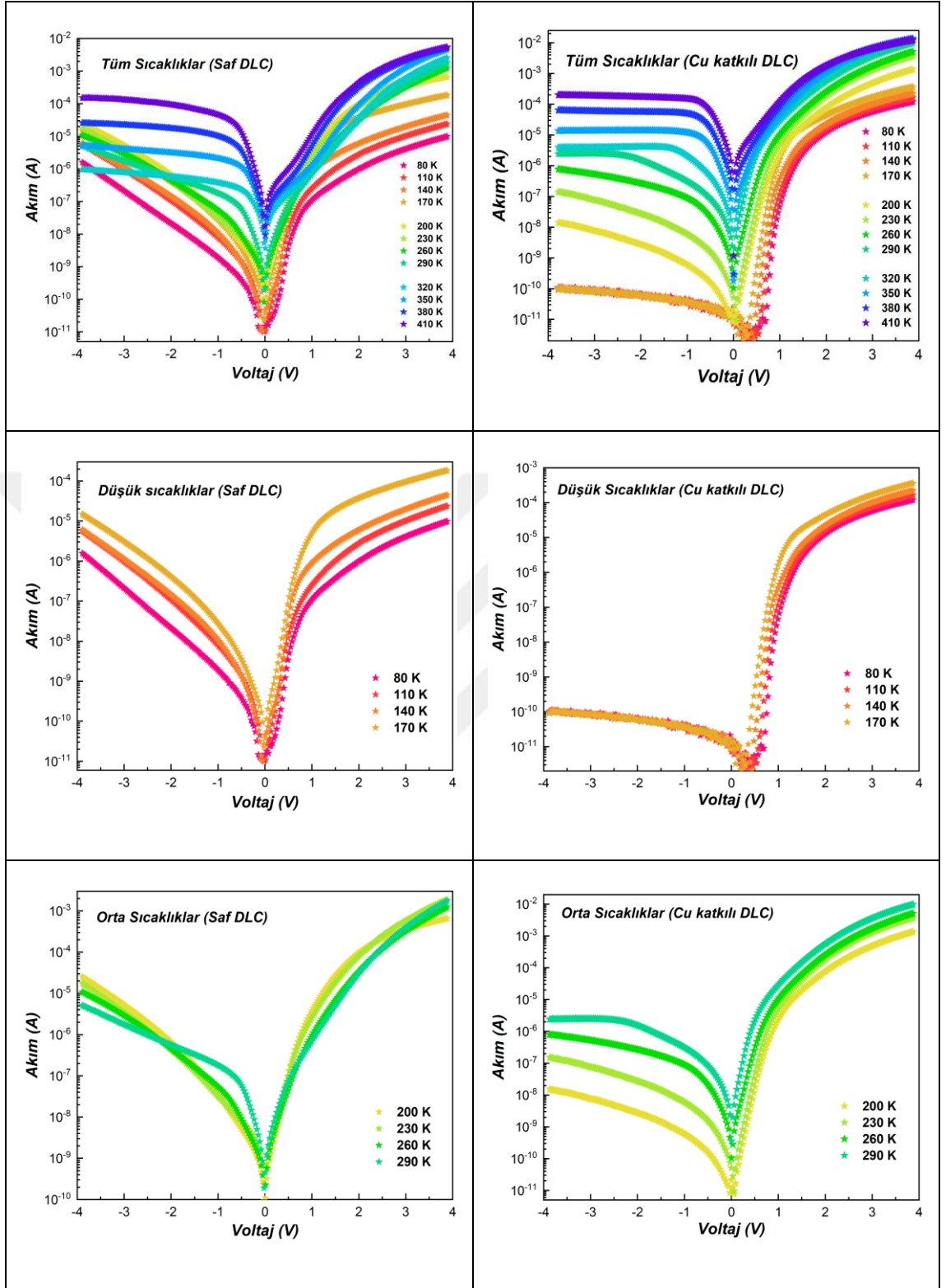
D1 ve D2 cihazları için I - V ölçümleri, 80 K ile 410 K arasındaki sıcaklık aralığında (30 K'lık adımlarla) ve $-4V$ ile $+4V$ arasındaki gerilim aralığında (30 mV'luk adımlarla) gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sürecinde, dış etkenlerin etkisini ortadan kaldırmak amacıyla Janis VPF kriyostatı kullanılmış; I - V karakterizasyonu için Keithley kaynak ölçer cihazı tercih edilmiş ve oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıkları düzenlemek için Lake Shore sıcaklık kontrol cihazı kullanılmıştır.

BÖLÜM 4

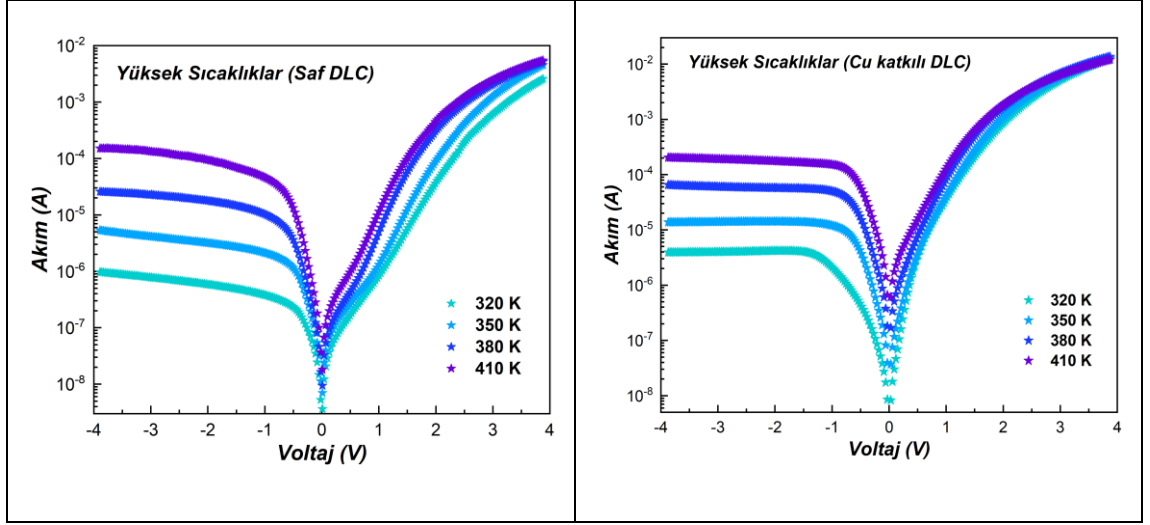
ARAŞTIRMA BULGULARI

Schottky cihazlarının elektriksel/dielektrik özellikleri hakkında bilgi edinmenin en iyi yollarından biri, bu cihazların I - V veya C - G/ω - V karakteristiklerinin farklı koşullara (örneğin sıcaklık değişimleri veya radyasyon etkisi) bağlı olarak elde edilmesidir. Bu sayede cihazların hangi ortamlarda ve hangi amaçlarla kullanılabileceği daha net bir şekilde belirlenebilir. Bu çalışmada, D1 ve D2 cihazları için I - V verileri/karakteristikleri geniş bir sıcaklık aralığında elde edilmiş ve Şekil 4.1’de yarı-logaritmik grafik olarak sunulmuştur. Aslında bu çalışma, özellikle D1 ve D2 cihazlarının R_s ve N_{ss} gibi bazı spesifik elektriksel parametrelerin karşılaştırılmasına odaklanmıştır. Literatürde de iyi bilindiği üzere, bu parametreler $\ln(I)$ - V grafiği kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu nedenle, her iki cihazın I - V verileri ve diğer kritik elektriksel parametreleri, (80–410 K) sıcaklık ve (± 4 V) voltaj aralıklarında belirlenmiştir. Sonuç olarak, iki cihazın voltaj ve sıcaklık değişimlerine verdiği tepkilerin karşılaştırılması mümkün olmuş, böylece cihazların farklı sıcaklık ve voltaj tepkilerinin daha derinlemesine anlaşılması kolaylaştırılmıştır.

Şekil 4.1’de gösterildiği üzere, her iki cihazın (D1 ve D2) I - V karakteristikleri üç farklı sıcaklık bölgesinde (80–170 K, 200–290 K ve 320–410 K) sunulmuştur. Bu sıcaklık bölgeleri, Kaymaz (2024) ile Evcin Baydilli (2024)’nin çalışmalarında belirlendiği gibi, sırasıyla düşük sıcaklıklar (LTs), orta sıcaklıklar (MTs) ve yüksek sıcaklıklar (HTs) olarak sınırlandırıldı [47,48]. Bu sınıflandırma, DLC ve Cu katkılı DLC ara tabakalı cihazların farklı sıcaklık aralıklarında gösterdiği farklı davranışların gözlemlenmesine dayanmaktadır. Toplu olarak incelendiğinde şekil 4.1’ den de anlaşılacağı üzere 80–410 K aralığı için I - V karakteristikleri karmaşık bir davranış göstermektedir. Ancak, belirlenen sıcaklık bölgelerine ayrıldığında daha belirgin bir davranış gözlemlenmektedir. Bu nedenle, tüm elektriksel parametrelerin değerlendirilmesinde bu üç sıcaklık bölgesi ayrı ayrı ele alınmıştır.



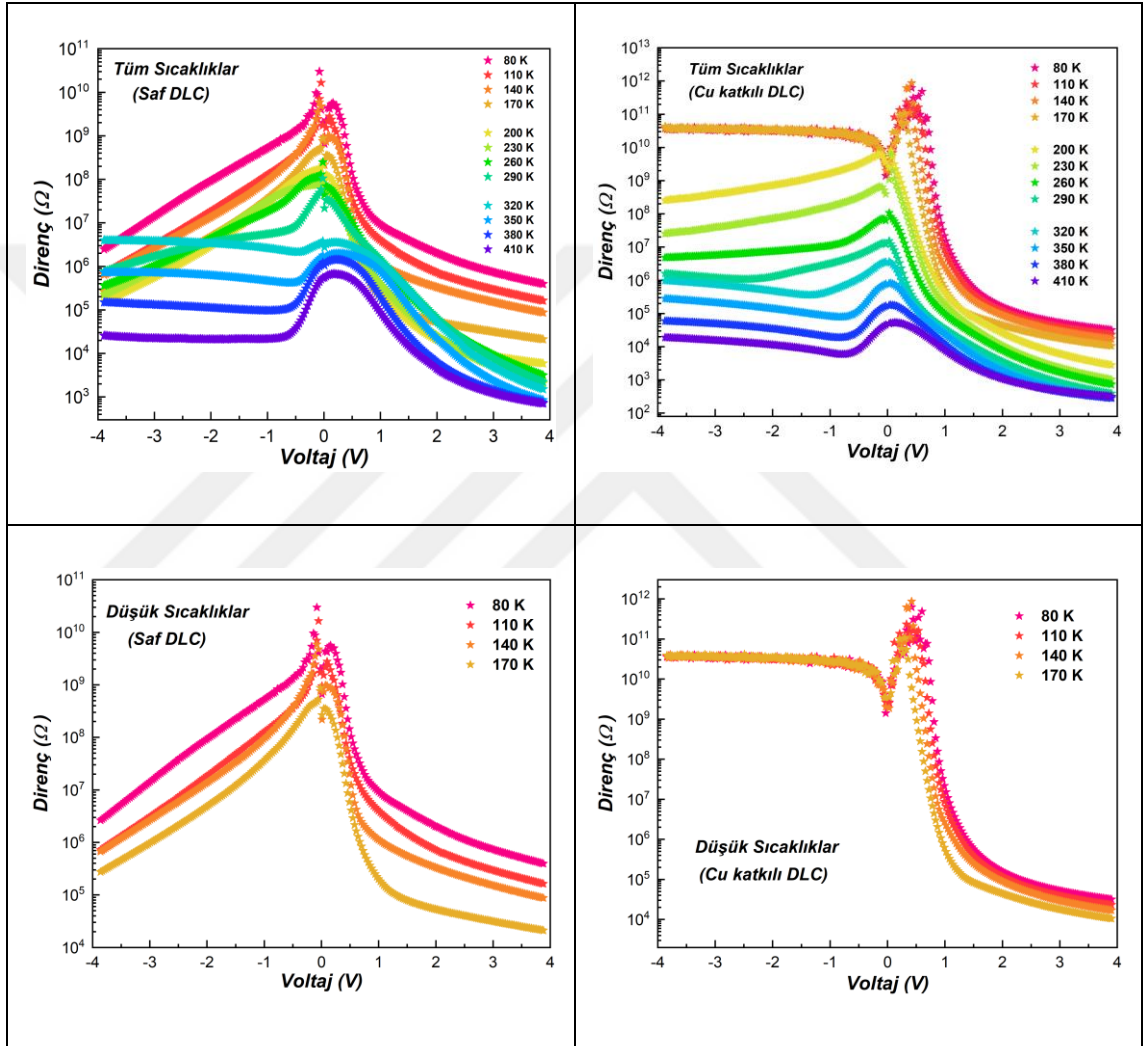
Şekil 4.1. D1 ve D2 cihazları için yarı logaritmik I-V grafikleri [47,48].



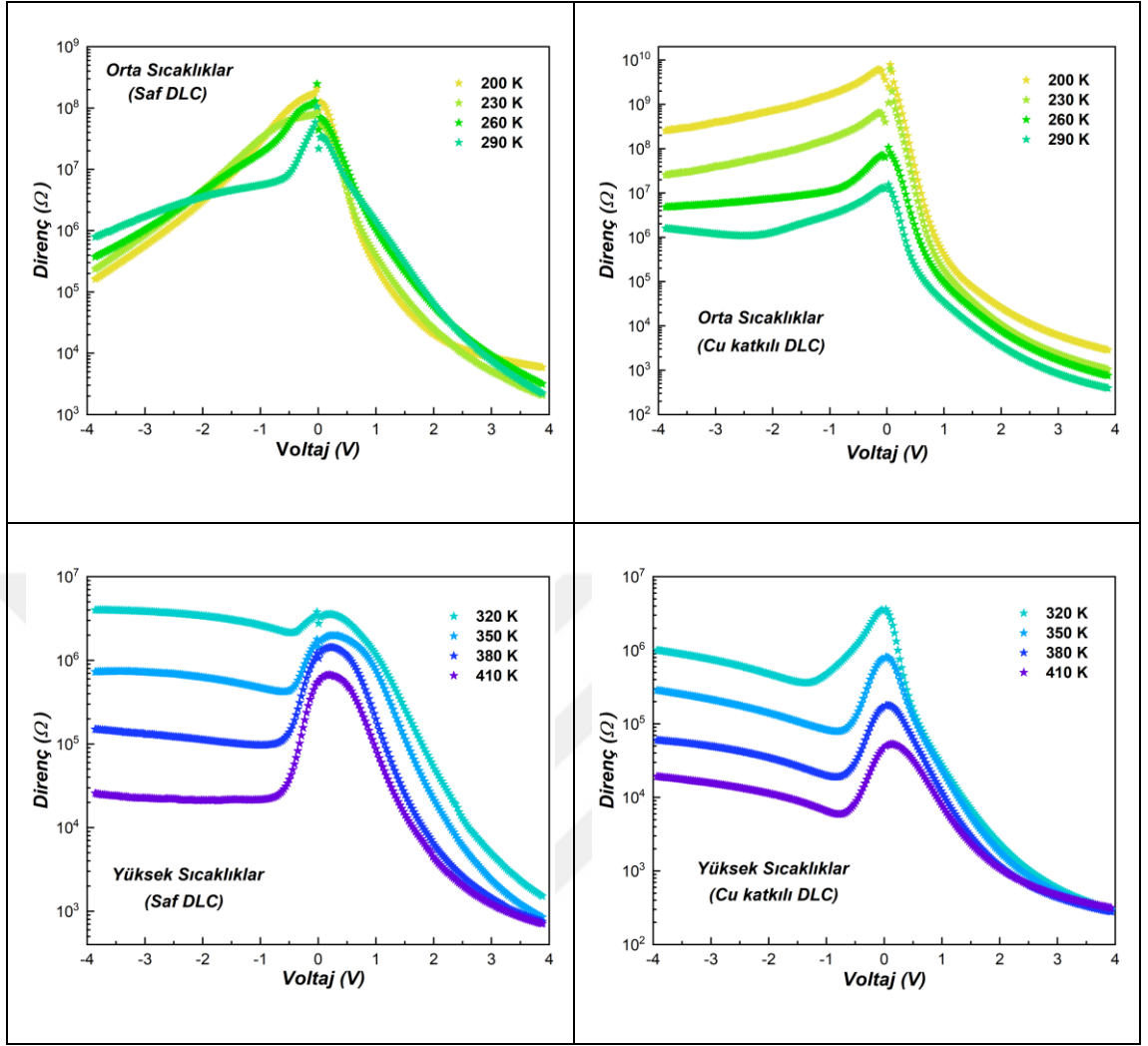
Şekil 4.1. (Devam ediyor).

Şekil 4.1'de görülebileceği gibi, tüm sıcaklıklar için ileri öngerilim akımları D2 için D1'den daha yüksek ölçülürken, ters öngerilim akımları D2 için daha düşük olarak ölçülmüştür. Örneğin, oda sıcaklığı civarında (290 K) 4 V'ta ölçülen ileri besleme akımı D1 için 2.08 mA iken, D2 için 11.2 mA olarak ölçülmüştür. Aynı sıcaklıkta -4 V'ta ölçülen ters yön akımı ise D1 için 5.93 μ A, D2 için 2.40 μ A olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, Cu katkılı cihazın (D2) her sıcaklık bölgesinde yeterince yüksek/düşük gerilimlerde daha yüksek bir doğrultma oranına (RR) sahip olduğunu ve bakır katkılama işlemi sayesinde daha kaliteli bir diyot davranışı sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, D1 cihazının I - V karakteristikleri, gerilim ve sıcaklık etkileri birlikte değerlendirildiğinde farklı bölgelerde karmaşık bir davranış sergilemiştir. Buna karşın, D2 cihazı daha düzenli özellikler sergilemiştir. Ancak her iki cihaz da belirli sıcaklık bölgelerinde (LTs, MTs ve HTs) farklı davranışlar göstermiştir. Bu nedenle, her iki cihazın bariyer şeklinin çoklu Gauss dağılımı (MGD) gösterdiği sonucuna varılmıştır [47,48]. D1'in I - V karakteristikleri dikkatle incelendiğinde, cihazın belirli sıcaklık bölgelerinde iki veya çoklu paralel diyot modeli davranışı sergilediği görülmektedir [71]. Doğal olarak, cihazların elektriksel özellikleri bakır katkılama oranı değiştirilerek incelenebilir ve farklı sonuçlar elde edilebilir. Ancak cihazların bu yönü mevcut çalışmanın kapsamına dahil değildir, çünkü bu çalışma yalnızca arayüzey tabakasında Cu katkısının varlığına veya yokluğuna odaklandığı için bu konu kapsam dışında bırakılmıştır.

R_s , R_{sh} ve RR , Schottky cihazlarının elektriksel özelliklerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir ve mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, bu çalışmada cihazların gerilime bağlı statik dirençleri ($R_i = V_i/I_i$) hesaplanmış ve bu veriler Şekil 4.2’de grafiksel olarak sunulmuştur. Ayrıca, D1 ve D2 cihazları için voltaja bağlı R_s , R_{sh} ve RR değerleri de elde edilerek Şekil 4.3’de görsel olarak sunulmuştur.



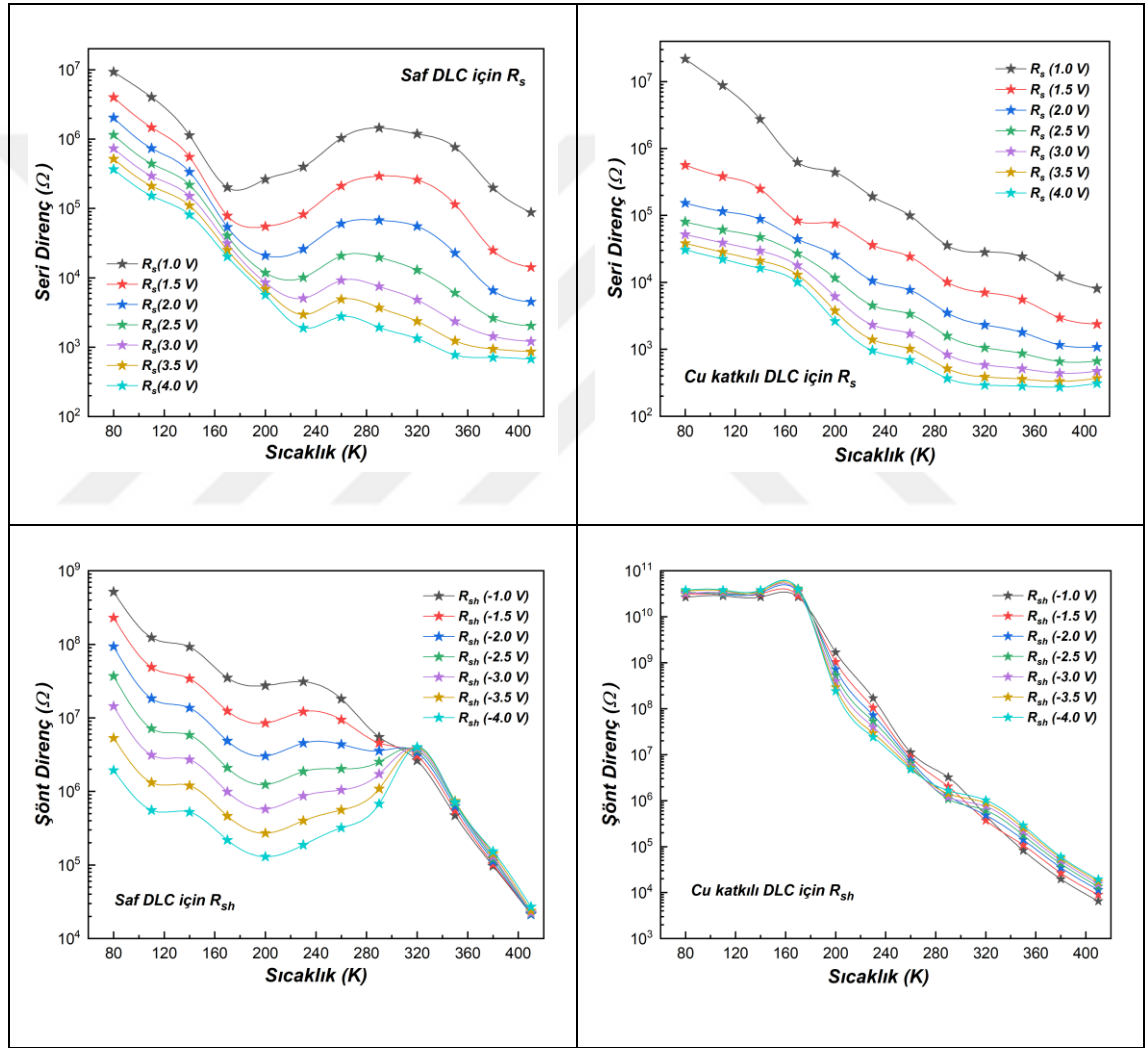
Şekil 4.2. DLC ve Cu-DLC ara katmanlı Schottky cihazları için R_i -V grafikleri.



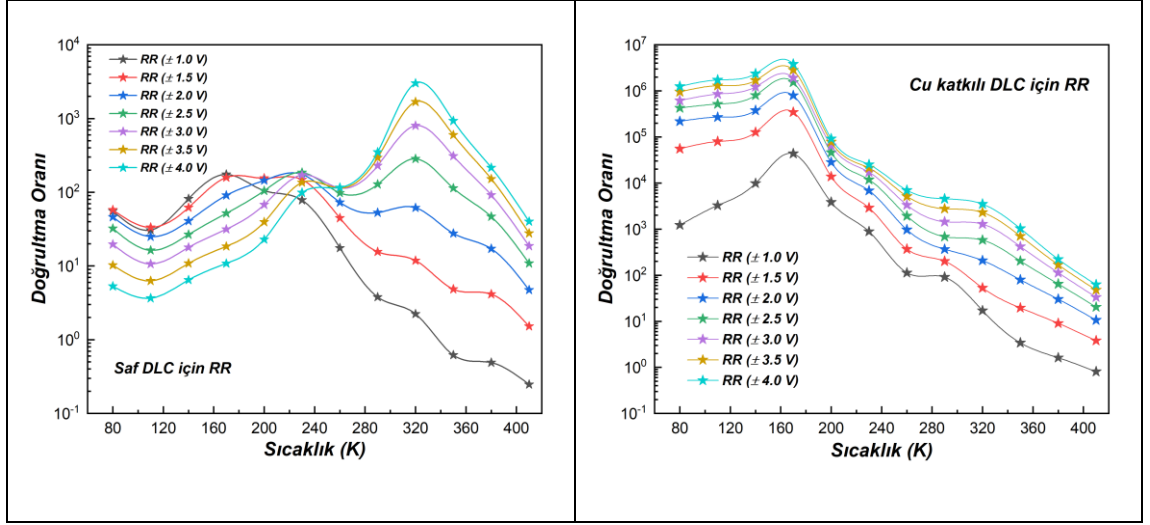
Şekil 4.2. (Devam ediyor).

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, yeterince yüksek negatif ve pozitif voltajlarda, özellikle yüksek sıcaklıklar (HTs) için, her iki cihazın direnç değerleri neredeyse sabit seviyelere ulaşmıştır. Ancak, bakır katkılı cihazın tüm sıcaklık bölgelerinde daha düzenli ve kararlı bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, her iki cihaz için de arayüzey tabakasının kalınlığı (yaklaşık 3 μm) cihazların yüksek direnç seviyeleri sergilemesine neden olmuştur. Bu durum, cihazların diyottan çok kapasitör gibi davrandığını ortaya koymaktadır. Bu direnç seviyelerinde cihazların diyot olarak kullanılması da mümkün görünmemektedir; çünkü 10^5 seviyelerine ulaşan bir seri direnç davranışı ve 10^{10} seviyelerine ulaşan bir şönt direnç davranışı söz konusudur. Ayrıca cihazların yaklaşık 0 V seviyelerinde yüzey durumlarının özel dağılımından kaynaklanan pikler verdiği ve bu piklerin her iki cihaz için de artan sıcaklıkla birlikte azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde Schottky cihazlarının yeterince pozitif ileri voltajlarda elde edilen direnç değerlerinin seri dirence yakın olduğu ve yeterince yüksek ters voltajlarda elde edilen direnç değerlerinin şönt direncine yeterince yakın olduğu iyi bilinmektedir. Ayrıca, yeterli ileri ve ters voltaj seviyeleri genellikle ± 1 V'tan büyük voltaj olarak kabul edilse de bu seviye her cihaz için, özellikle kalın ara tabakaya sahip cihazlar için değişkenlik gösterebilir. Sonuç olarak, Şekil 4.3'de gösterildiği gibi farklı voltajlar için seri ve şönt direnç davranışlarının analiz edilmesi faydalı bilgiler sağlayabilir.



Şekil 4.3. D1 ve D2 cihazları için R_s -T-V, R_{sh} -T-V ve RR-T-V grafikleri.



Şekil 4.3. (Devam ediyor).

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, D1 cihazında R_s , R_{sh} ve RR değerleri karmaşık bir davranış sergilerken, D2 cihazında daha düzenli bir tepki gözlemlenmiştir. Örneğin, D1 cihazında R_s değerleri sıcaklığa bağlı olarak artan ve azalan eğilimler gösterirken, D2 cihazında genellikle azalan bir eğilim gözlenmiştir. Aslında, D1 cihazında R_s değerleri çoğunlukla azalma eğilimindeyken, özellikle düşük voltajlarda ve oda sıcaklığı civarında artma eğilimi göstermesi dikkat çekici bir davranıştır. Bu nedenle, hem yalıtkan hem de kalın olan DLC ara katmanının, metal ve yarıiletken arasındaki taşıyıcı iletimini zorlaştırdığını ve böylece cihazın sıcaklığa bağlı tepkisini karmaşıktırdığını söylemek mümkündür. Ancak yalıtkan tabakaya katkılanan iletken bakır sayesinde cihazda iletkenlik daha kolay ve daha düzenli hale gelmiştir. Bu da cihazın daha kararlı bir tepki vermesi ile sonuçlanmıştır. Öte yandan, DLC ara tabakalı cihazların oda sıcaklığının altında ve üstünde çok farklı davranışlar sergilediği anlaşılmaktadır. Bu davranış, D1 cihazı için karmaşık sonuçlara yol açmaktadır. Şekil 4.3'te gösterilen bakır katkısız cihazdaki (D1) R_{sh} değerlerinin oda sıcaklığından önceki ve sonraki tepkisi de bu iddiayı doğrulamaktadır.

D1 cihazında R_{sh} değerleri daha düzenli bir yanıt verse de genel olarak R_{sh} ve RR değerlerinin seri dirençte olduğu gibi karmaşık bir tepki verdiği görülmektedir. Ancak, bakır katkılı cihazda (D2), özellikle düşük sıcaklıktan orta sıcaklığa geçiş noktası olan 170 K sıcaklığından önce ve sonra R_{sh} ve RR tepkilerinin önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmektedir. Ayrıca, D1 cihazında R_{sh} değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi,

özellikle oda sıcaklığının üzerinde belirgin bir değişim gösterirken, gerilime bağlı değişim tepkisinin azaldığı görülebilir. D2 cihazında ise, R_{sh} değerlerinin voltaja bağlı değişiminin her zaman düşük seviyede olmasına rağmen, sıcaklığa bağlı değişimin 170 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda daha belirgin olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, RR değerleri D2 cihazında düzenli bir davranış sergilemekte; ancak 170 K sıcaklığının öncesi ve sonrası arasında belirgin bir farklılık göstermektedir. Ancak, D1 cihazındaki RR değeri oldukça karmaşıktır ve hatta belirli bir sıcaklık bölgesinden sonra (yaklaşık 240 K) çapraz hale gelerek tam tersi bir davranış göstermektedir.

Schottky cihazlarının n , Φ_{B0} ve I_0 gibi önemli parametreleri belirlenebilir, böylece sonuçları tartışılabilir. Söz konusu parametrelerin $\ln(I)$ - V verileri kullanılarak aşağıdaki denklemler (Eşitlik 4.1-4.3) yardımıyla kolayca elde edilebileceği de bilinmektedir. Ayrıca buna ek olarak, gerilime bağlı idealite faktörü ($n(V)$) ve bariyer yüksekliği ($\Phi_B(V)$) Eşitlik 4.5-4.6 kullanılarak hesaplanabilir. Gerilime bağlı bu grafikler de bu çalışmanın kapsamına dahil edilmiştir. Ancak, sıcaklığa bağlı grafikler (yani akım iletim mekanizmaları) diğer kaynaklarda [47,48] ayrıntılı olarak ele alındığından, bu çalışmada sıcaklık etkileri hakkında ayrıntılı bilgi verilmemiştir. Sonuç olarak, $n(V)$ ve $\Phi_B(V)$ verileri hesaplanmış ve Şekil 4.4 ve 4.6'da grafiksel olarak verilmiştir.

$$I = I_0[\exp(q(V - IR_s)/nkT)][1 - \exp(-q(V - IR_s)/kT)] \quad (4.1)$$

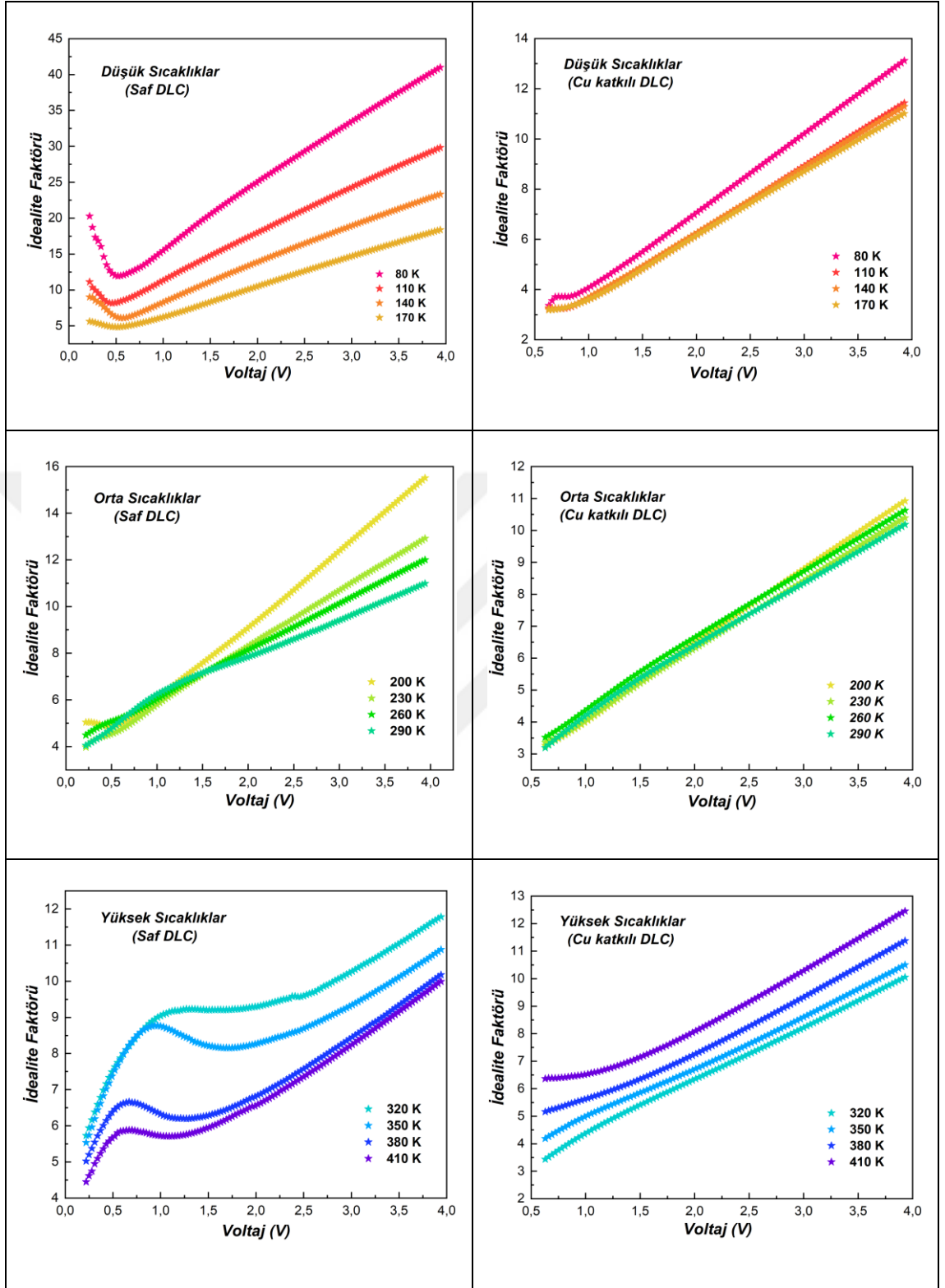
$$I_0 = AA^*T^2 \exp(-q\Phi_{B0}/kT) \quad (4.2)$$

$$\ln(I) = \ln\{I_0[\exp(qV/nkT) - 1]\} = \ln(I_0) + (q/nkT)V \quad (4.3)$$

$$\Phi_{B0} = (kT/q) \ln(AA^*T^2/I_0) \quad (4.4)$$

$$n(V) = (q/kT) \cdot V / \ln(I/I_0) \quad (4.5)$$

$$\Phi_B(V) = (kT/q) \ln(AA^*T^2/I) \quad (4.6)$$

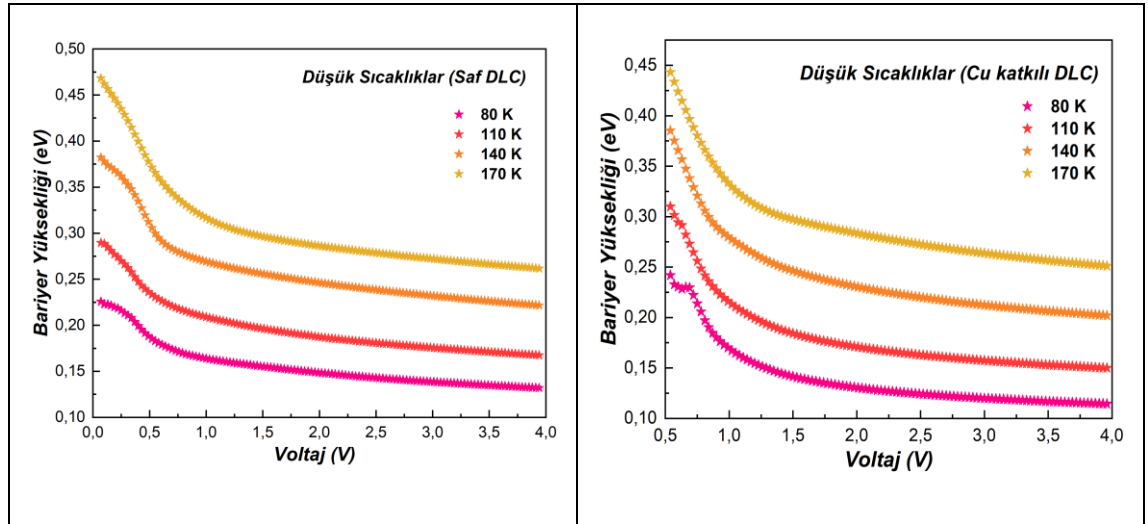


Şekil 4.4. DLC ve Cu-DLC ara katmanlı Schottky cihazları için $n(V)$ grafikleri.

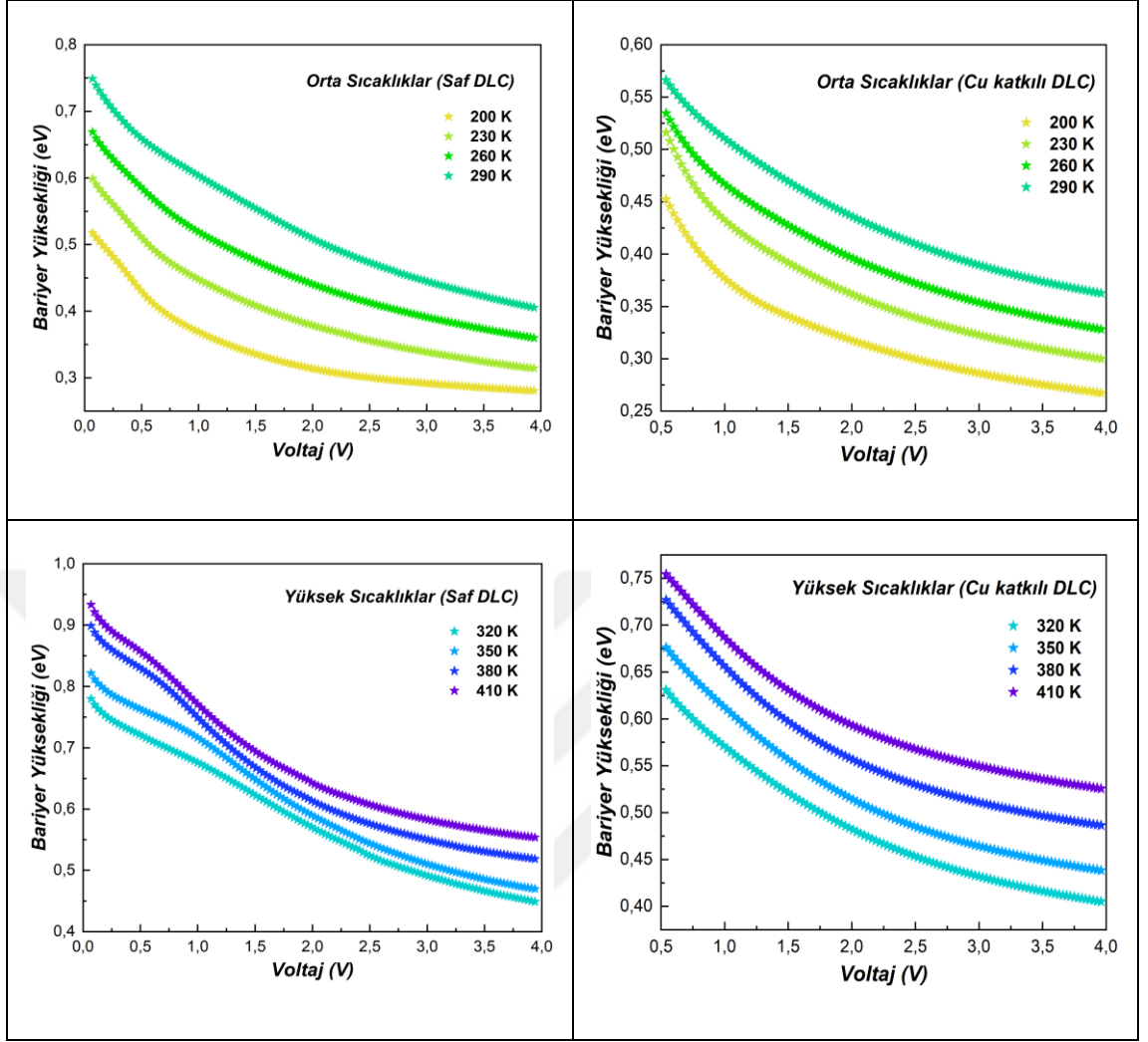
Şekil 4.4, farklı sıcaklık koşulları için idealite faktörünün gerilime bağlı değişimlerini göstermektedir. Genel olarak, hem D1 hem de D2 cihazları için $n(V)$ 'deki değişimler,

artan öngerilime bağlı olarak n değerlerinde artan bir eğilim göstermesi açısından klasik sonuçlar vermiştir [129]. Bununla birlikte, D1 cihazı, kalın ve yalıtkan arayüzey tabakası nedeniyle özellikle düşük voltajlarda MTs ve HTs bölgelerinde bazı karmaşık ve beklenmedik davranışlar sergilemiştir. Dahası, bakır katkılama işlemi ile sadece bu karmaşık davranışlar ortadan kalkmakla kalmamış, aynı zamanda cihazın sıcaklığa bağımlılığı da özellikle düşük ve orta sıcaklıklarda oldukça düşük hale gelmiştir. Bu sonuçlar, D2 cihazının önceki elektriksel özelliklerde olduğu gibi daha kararlı ve daha düzenli bir davranış sergilediği anlamına gelmektedir.

Şekil 4.5, farklı sıcaklık koşulları için bariyer yüksekliğindeki gerilime bağlı değişimleri göstermektedir. Şekilde de görülebileceği gibi, literatürde olduğu gibi, bariyer yüksekliği tüm sıcaklık bölgelerinde artan öngerilim ile azalma eğilimindedir [129–132]. Ayrıca, her sıcaklık bölgesi ve voltaj seviyesi için artan sıcaklıkla birlikte bariyer yüksekliğinin arttığı da görülebilir. Bu durum literatürdeki sonuçlarla da uyumlu görünmektedir [133–135]. Gözlemlenen bir diğer durum ise bakır katkılama işleminin cihaz üzerindeki bariyer yüksekliği seviyesini düşürdüğü ve bu cihazın özellikle yüksek sıcaklık bölgesinde daha düzenli bir davranış sergilediğidir.



Şekil 4.5. DLC ve Cu-DLC ara katmanlı Schottky cihazları için $\Phi_B(V)$ grafikleri.



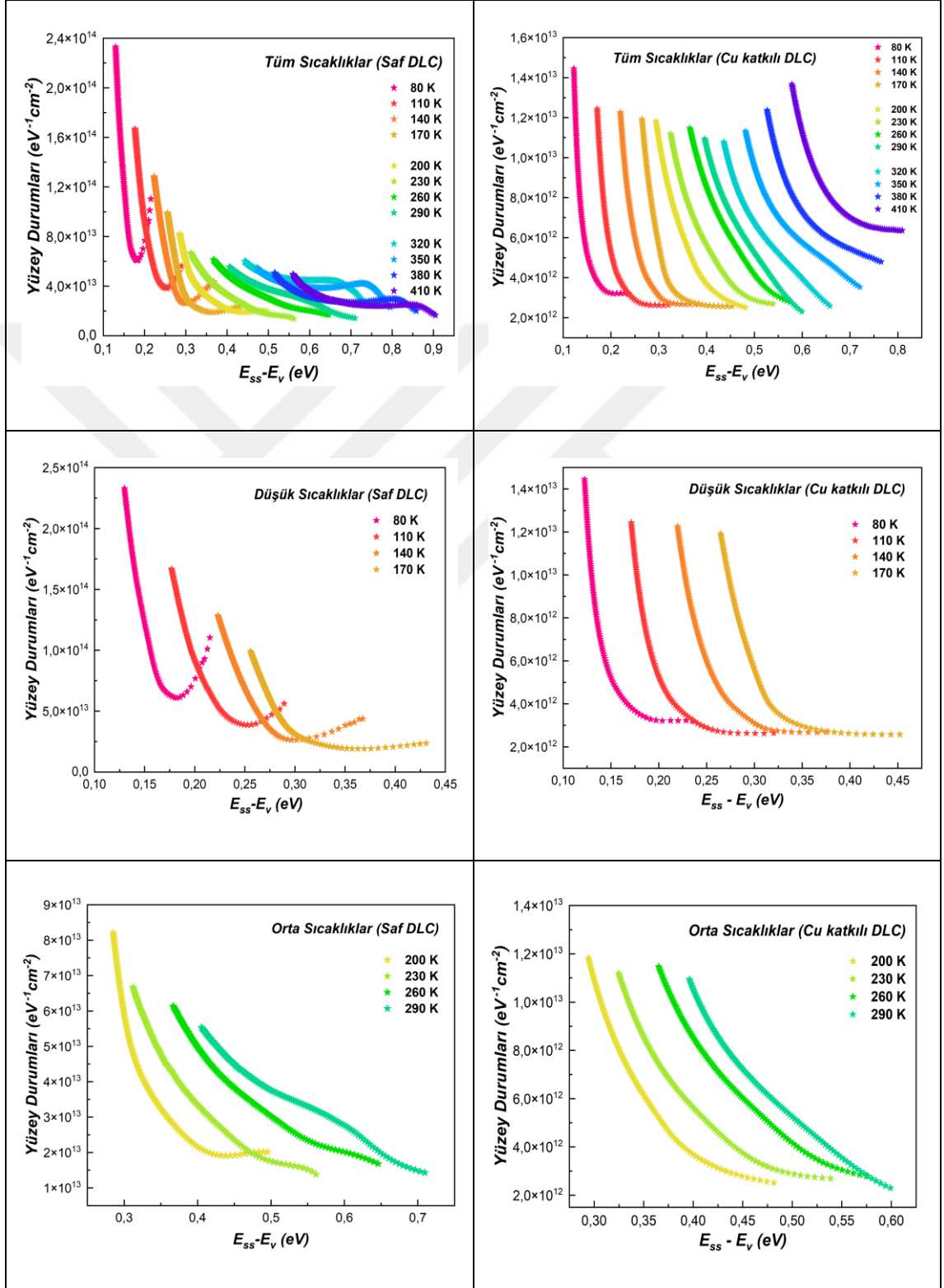
Şekil 4.5. (Devam ediyor).

Schottky cihazlarının arayüzey durumları, bu cihazların elektriksel davranışını anlamak için oldukça önemli bir parametredir ve Eşitlik 4.7 kullanılarak elde edilebilir [59]. Bu denklemde ε_s ve ε_i sırasıyla yarıiletkenin geçirgenliğine ve ara katmanın geçirgenliğine karşılık gelmektedir. Öte yandan, δ ara katmanın kalınlığına (3 μm) karşılık gelir ve W_D tükenme bölgesinin genişliğidir. Orta bant aralığından (E_{ss}) değerlik bandına (E_v) doğru enerji denklemi, etkin bariyer yüksekliği (Φ_e) dikkate alınarak p-tipi bir yarıiletken için Eşitlik 4.8 ile yazılabilir ve Φ_e Eşitlik 4.9 ile verilir [136]. Böylece, enerjiye bağlı arayüzey durumları hesaplanmış ve D1 ile D2 cihazları için Şekil 4.6'da grafiksel olarak sunulmuştur.

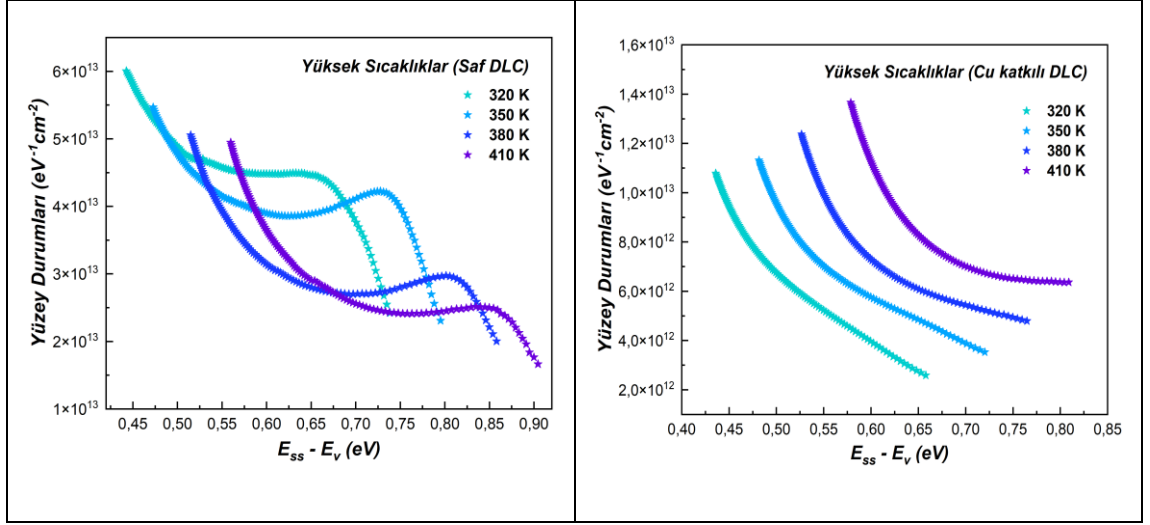
$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right] \quad (4.7)$$

$$E_{ss} - E_v = q(\Phi_e - V) \quad (4.8)$$

$$\Phi_e = \Phi_{B0} + [1 - 1/n(V)]V \quad (4.9)$$



Şekil 4.6. DLC ve Cu-DLC ara tabakalı Schottky cihazları için N_{ss} enerji dağılımı.



Şekil 4.6.(Devam ediyor).

Enerjiye bağlı arayüzey durumlarını içeren grafikler incelendiğinde (Şekil 4.6), yüzey durumlarının genellikle orta aralıktan valans bandına doğru üstel olarak azaldığı ve hatta özellikle LTs'ler için bazı sıcaklık bölgelerinde U şeklinde bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bu davranış literatürde yüzey durumlarının spesifik dağılımı ile açıklanmaktadır. Ancak, bu davranışın özellikle D1 cihazında yüksek sıcaklıklarda bozulduğu görülebilir. Öte yandan, D1 cihazında artan sıcaklıkla birlikte N_{ss} değerlerinin sürekli azaldığı gözlemlenirken, D2 cihazında sürekli net bir azalma görülmemektedir. Ayrıca D1 cihazında N_{ss} değerleri 10^{13} - 10^{14} eV seviyeleri arasında değişirken, D2 cihazında daha düşük değerler (10^{12} - 10^{13} eV seviyeleri) gözlenmiştir. Sonuç olarak D2 yani bakır katkılı cihazın daha önceki elektriksel parametrelerde olduğu gibi yüzey durumları için daha düzenli/kararlı ve daha kaliteli sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

Son olarak da temel cihaz parametrelerinin farklı voltaj aralığında sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiğini anlamak ve sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapmak amacıyla bazı parametrelerin çeşitli hesaplama yöntemleriyle belirlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda n , Φ_{B0} ve R_s parametreleri, ikinci bir yöntem olarak Cheung fonksiyonları (Cheung-1 ve Cheung-2) ve üçüncü bir yöntem olarak da Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilmiştir. R_s değerlerinin de hesaba katıldığı ileri besleme akımlarının formülüne karşılık gelen Eşitlik 4.10'dan faydalanılarak Cheung fonksiyonlarını temsil eden Eşitlik 4.11 ve Eşitlik 4.12 türetilebilir [137]. Bu durumda,

$dV/d(\ln I)$ - I grafiklerinin (Cheung-1 fonksiyonları) farklı sıcaklık koşullarında elde edilmesiyle bu grafiklerin lineer kısımlarından R_s ve n değerleri bulunabilir. Benzer şekilde, $H(I)$ - I grafiklerinin (Cheung-2 fonksiyonları) lineer parçaları kullanılarak da R_s ve Φ_{B0} değerleri hesaplanabilir.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV(I-R_s)}{nkT} - 1\right) \quad (4.10)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.11)$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = IR_s + n \Phi_{B0} \quad (4.12)$$

Üçüncü yöntem cihaz parametrelerini hesaplamak için kullanılan Norde fonksiyonlarıdır. İdealite faktöründen daha büyük bir sabit olan γ ile tanımlanan geliştirilmiş Norde yöntemi, Eşitlik 4.13 ile gösterilmektedir. Buna karşın Eşitlik 4.14 engel yüksekliğini hesaplamak için, Eşitlik 4.15 ise seri direnç değerini bulmak amacıyla kullanılmaktadır. Burada $F(V_0)$ ifadesi, $F(V)$ eğrisinin minimum noktasına karşılık gelmekte olup, bu nokta bariyer yüksekliğinin hesaplanmasında esas alınmaktadır.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (4.13)$$

$$\Phi_{B0} = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.14)$$

$$R_s = \frac{kT}{q} \frac{(\gamma-n)}{I_i} \quad (4.15)$$

Yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak, Cheung ve Norde fonksiyonları ayrı ayrı hesaplanmıştır. TE yönteminin yanında Cheung Ve Norde yöntemleriyle elde edilen saf DLC'nin temel diyot parametrelerine dair bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. TE, Cheung ve Norde yöntemleri ile hesaplanan Saf DLC cihazının özelliklerinin karşılaştırılması.

Sıcaklık (K)	<i>Ln(I)-V</i>			<i>Cheung-1</i>		<i>Cheung-2</i>		<i>Norde</i>	
	<i>n</i>	Φ_{B0} (eV)	R_S (k Ω)	<i>n</i>	R_S (k Ω)	Φ_{B0} (eV)	R_S (k Ω)	Φ_{B0} (eV)	R_S (k Ω)
80	18,683	0,226	364,964	29,022	1500	0,192	1070	0,218	2133,273
110	12,707	0,309	151,86	22,584	378	0,261	324	0,298	752,055
140	8,770	0,392	81,021	19,071	162	0,317	142	0,376	224,081
170	5,533	0,470	20,151	14,460	26,8	0,367	19,8	0,486	62,205
200	5,022	0,539	5,64	11,202	7,15	0,461	5,82	0,568	79,769
230	4,949	0,617	1,89	9,489	14,9	0,548	8,97	0,639	114,21
260	4,530	0,695	2,764	8,439	38,8	0,626	25,53	0,729	316,89
290	4,091	0,764	1,923	6,805	343	0,729	277	0,784	1031,128
320	5,825	0,777	1,33	3,022	3280	0,771	2010	0,786	1134,617
350	5,650	0,835	0,773	2,542	1990	0,822	1350	0,819	672,781
380	5,110	0,902	0,709	1,716	1600	0,897	997	0,889	423,247
410	4,529	0,954	0,674	1,680	705	0,947	429	0,941	183,686

Çizelge 4.1'e bakıldığında sıcaklık aralığı 80-410 K arasında değişen Schottky diyotun elektriksel parametreleri incelendiğinde her bir yöntemin farklı teorik yaklaşımlarına bağlı olarak değişiklik gösterdiği ancak genel eğilimler açısından önemli ölçüde tutarlılık sergilediği görülmektedir. Ayrıca n , özellikle düşük sıcaklıklarda oldukça yüksek değerler gösterirken, sıcaklık arttıkça düzenli bir şekilde azalma eğilimi göstermiştir. Bu durum, düşük sıcaklıklarda taşıyıcı geçişinin ideal diyot davranışından sapmasının arayüzey tuzakları, bariyerin homojensizlikleri veya geçiş bölgelerinde yük birikimi gibi etkenlerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Burada Φ_{B0} ise tüm analiz yöntemlerinde sıcaklığın artmasıyla birlikte yükselmiştir. Bu yükseliş, düşük sıcaklıklarda var olan bariyer düzensizliklerinin, sıcaklık arttıkça ortalama bir bariyer durumuna evrilmesini ve cihazın daha düzenli bir temas performansı göstermesini açıklamaktadır. Bu sonuç, sıcaklık etkisiyle temas yapısındaki enerji engellerinin daha tutarlı bir potansiyel dağılımına dönüştüğünü ortaya koymaktadır. R_s değerleri de sıcak artışı ile birlikte önemli ölçüde düşmüştür. Bu düşüş, taşıyıcıların hareketliliğinin sıcaklığa bağlı olarak artması ve temas direncinin azalması ile bağlantılıdır. Özellikle Norde ve Cheung-1 teknikleri, düşük sıcaklık bölgelerinde oldukça yüksek R_s değerleri verirken, bu durum söz konusu tekniklerin sıcaklık değişimlerine karşı duyarlılığını ortaya koymuştur.

Yöntemler arasında karşılaştırma yapıldığında, $\ln(I)-V$ ve Cheung yöntemlerinin genellikle aynı sonuçlara ulaşmış olduğu, ancak düşük sıcaklıklar için Norde yönteminin daha büyük bir bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri sunduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, Norde yönteminin arayüzey etkilerine daha duyarlı olmasından kaynaklanabilir.

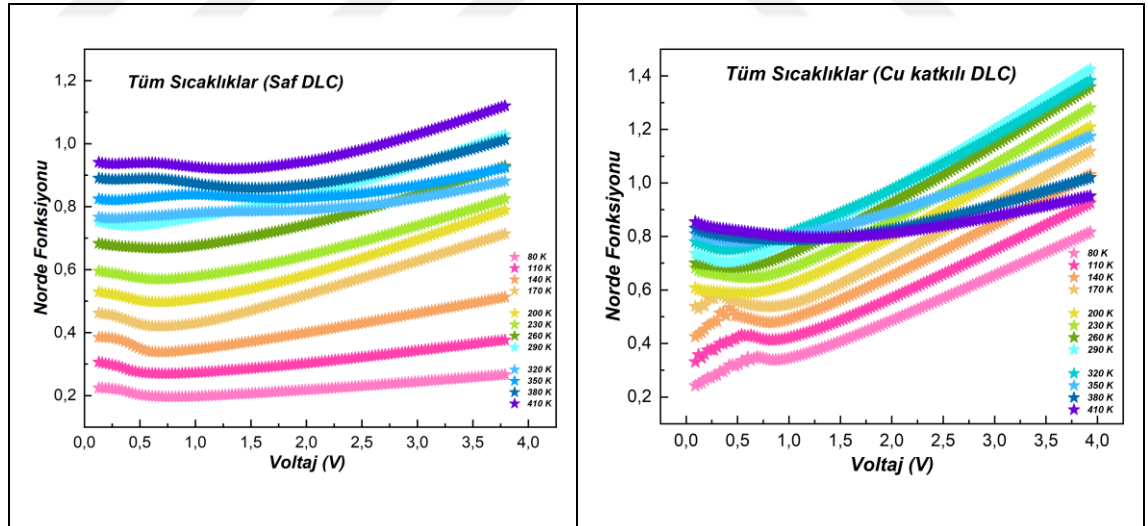
Benzer şekilde Çizelge 4.2'de Cu katkılı DLC'nin temel diyot parametrelerine dair bilgiler incelendiğinde elde edilen sonuçlara göre tüm yöntemlerde benzer eğilimler görülmektedir.

Çizelge 4.2. TE, Cheung ve Norde yöntemleri ile hesaplanan Cu katkılı DLCcihazının özelliklerinin karşılaştırılması.

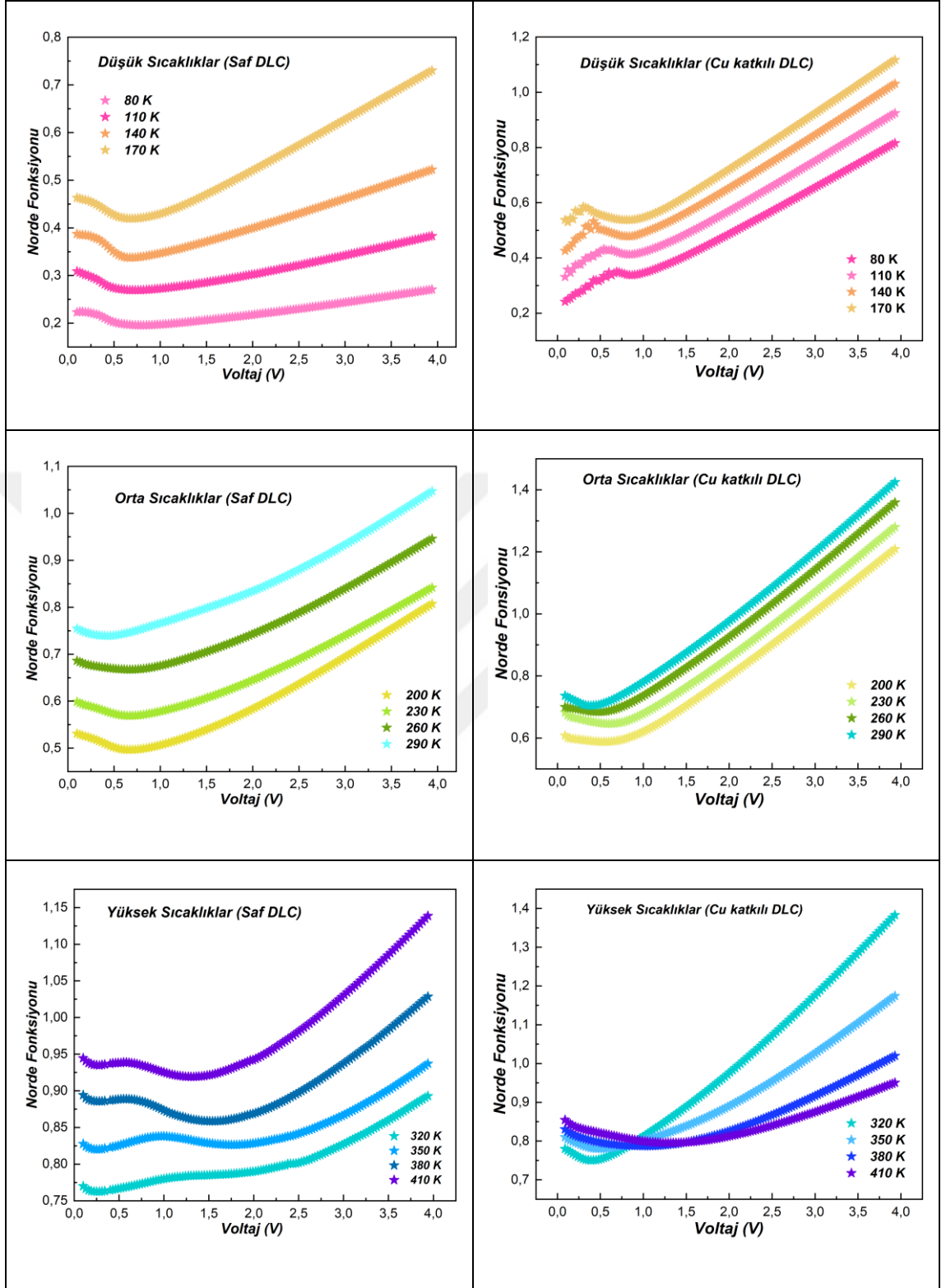
Sıcaklık (K)	<i>Ln(I)-V</i>			<i>Cheung-1</i>		<i>Cheung-2</i>		<i>Norde</i>	
	<i>n</i>	Φ_{B0} (eV)	R_S (k Ω)	<i>n</i>	R_S (k Ω)	Φ_{B0} (eV)	R_S (k Ω)	Φ_{B0} (eV)	R_S (k Ω)
80	3,726	0,422	30,505	6,675	14,6	0,385	24,1	0,486	6935,399
110	3,418	0,515	22,204	5,341	11,4	0,5	18,3	0,566	3837,883
140	3,165	0,568	16,239	4,617	9,22	0,6	14,6	0,637	1364,708
170	3,004	0,622	10,071	3,878	3,14	0,694	9,21	0,702	360,638
200	2,794	0,654	2,621	3,169	1,23	0,775	1,84	0,741	518,361
230	2,667	0,703	0,957	2,894	0,567	0,854	0,673	0,776	475,172
260	2,558	0,735	0,687	2,710	0,425	0,918	0,493	0,787	347,641
290	2,468	0,782	0,366	2,546	0,231	0,983	0,243	0,784	111,768
320	2,664	0,827	0,291	3,274	0,097	0,989	0,168	0,82	81,477
350	3,573	0,856	0,281	4,365	0,089	0,991	0,147	0,845	38,737
380	4,882	0,872	0,271	5,578	0,099	0,968	0,136	0,898	2,294
410	6,243	0,894	0,309	6,923	0,126	0,939	0,147	0,901	0,865

Sıcaklık arttıkça idealite faktöründe yükselme, bariyer yüksekliğinde artış ve seri dirençte düşüş gözlemlenmiştir. İdealite faktöründeki artış, cihazın ideal diyot davranışından sapmalarını ve taşıyıcı geçişi üzerindeki sıcaklık etkisini yansıtırken; bariyer yüksekliğinin artması, temas arayüzündeki potansiyel engelin sıcaklıkla birlikte yükseldiğini göstermektedir. Seri direnç değerlerinin yüksek sıcaklıklarda belirgin şekilde azalması ise taşıyıcıların mobilitesindeki artışla ilişkilendirilmiştir. Özellikle Norde yöntemi, düşük sıcaklıklarda diğer analiz yöntemlerine kıyasla daha yüksek seri direnç ve nispeten yüksek bariyer yüksekliği değerleri vermesiyle ayrılmakta olup, bu durum yöntemin arayüz durumlarına ve taşıyıcı tuzaklarına karşı daha hassas olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.7’deki grafiklerde, Schottky diyotların sıcaklık değişimine bağlı Norde fonksiyonu-voltaj özellikleri derinlemesine incelenmiştir. 80 K ile 410 K aralığında toplanan veriler, düşük, orta ve yüksek sıcaklık bölgeleri olarak üç grupta değerlendirilerek her iki yapının taşıyıcı geçiş mekanizması, Schottky bariyer davranışları ve sıcaklığa olan hassasiyetleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.7. DLC ve Cu-DLC ara katmanlı Schottky cihazları için 80 K-410 K sıcaklık aralığında ölçülen Norde fonksiyonu-voltaj karakteristikleri.



Şekil 4.7.(Devam ediyor).

Düşük sıcaklık aralığında (80–170 K), her iki yapı için Norde fonksiyonu değerleri oldukça düşük kalmaktadır. D1 cihazında fonksiyon eğrileri, düşük voltajda daha

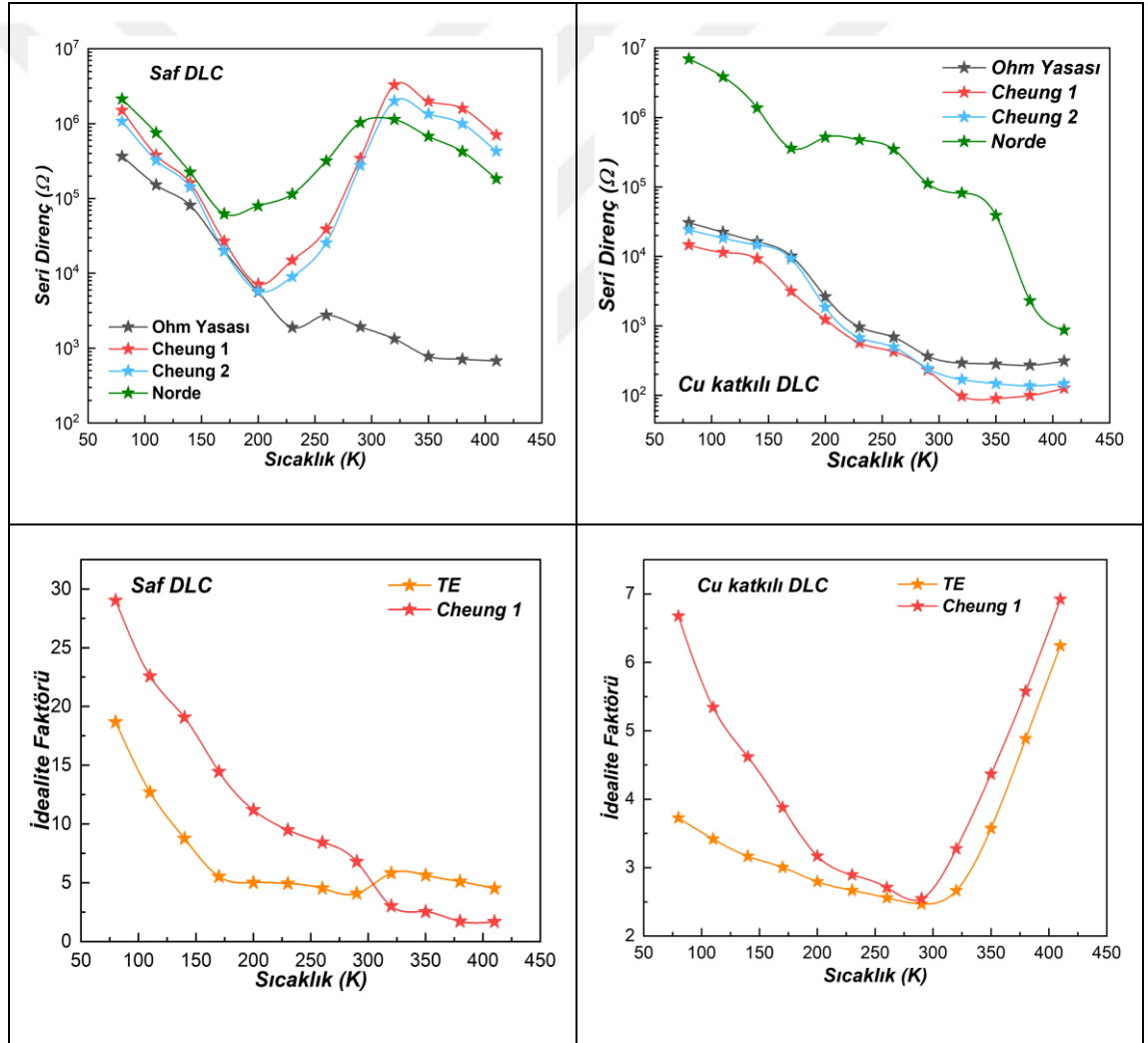
yatay bir seyir gösterirken, sıcaklığın artmasıyla birlikte yavaş ama belirgin bir yükseliş gözlemlenir. Bu durum, düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların donma etkisi nedeniyle etkilendiğini ve arayüzdeki potansiyel tuzakların Schottky bariyer yüksekliğini etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, D2 cihazında Norde fonksiyonu değerleri daha yüksek başlangıç seviyelerine sahip olup, sürekli bir artış göstermektedir. Bu durum, katkının taşıyıcı hareketini kolaylaştırdığını ve düşük sıcaklıklarda bile diyotun etkili çalışmasını sağladığını göstermektedir.

Orta sıcaklık aralığında (200–290 K), her iki yapının Norde fonksiyonlarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. D1 cihazındaki fonksiyon eğrileri, sıcaklıkla birlikte yukarı yönlü bir kayma göstermekte, bu da sıcaklık etkisinin belirgin olduğunu vurgulamaktadır. Ancak bu artış doğrusal değildir ve taşıyıcı geçişinde farklı direnç unsurlarının etkili olabileceğini ifade etmektedir. D2 cihazında ise bu sıcaklık aralığında daha düzgün ve lineer bir artış göstermiş, sıcaklığa daha kararlı bir yanıt verebilmiştir. Bu durum, Cu katkısının arayüzey kalitesini artırdığını ve sıcaklıkla birlikte taşıyıcı geçişini daha kontrollü hale getirdiğini göstermektedir.

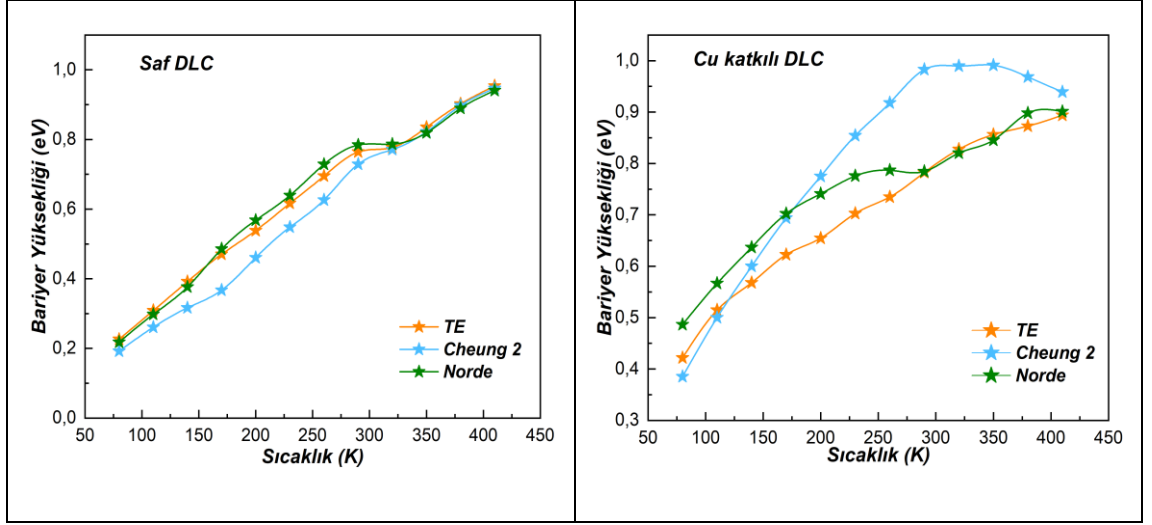
Yüksek sıcaklık aralığında (320–410 K) ise farklılıklar belirginleşmektedir. D1 cihazındaki Norde fonksiyonu değerleri hızla yükselmekte ve düşük voltaj bölgesinde eğri kırılmaları gözlemlenmektedir. Bu, yüksek sıcaklıklarda bile arayüzde kararsız taşıyıcı geçişlerinin veya tuzak durumlarının etkili olabileceğini düşündürmektedir. D2 cihazında ise eğriler daha düzgün ve stabil bir artış göstermektedir. Ayrıca artan sıcaklıkla birlikte eğriler arasındaki mesafenin azalması, D2 cihazının sıcaklığa karşı daha dayanıklı bir Schottky bariyer yüksekliği sunduğunu ve yüksek sıcaklıklarda cihaz performansının stabil kaldığını ortaya koymaktadır.

Tüm sıcaklık aralıklarında elde edilen verilerin bir arada incelenmesi sonucunda, D2 cihazı D1 cihazı ile karşılaştırıldığında Schottky diyotların performansını önemli ölçüde artırdığı anlaşılmıştır. D2 cihazındaki Cu katkısı, daha yüksek Norde fonksiyonu değerleri, daha düzgün eğri profilleri ve sıcaklık değişimlerine karşı daha az hassas bir bariyer karakteristiği ile öne çıkmıştır. Bu durum, hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda daha güvenilir, termal açıdan kararlı ve etkili çalışan diyot yapılarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 4.8 farklı hesaplama yöntemleri için elde edilen R_s , n ve BH değerlerinin grafiksel sonuçlarını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, R_s değerleri Ohm Yasası ile birlikte Cheung 1, Cheung 2 ve Norde yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. D1 cihazındaki R_s değerleri oldukça yüksek seviyelerde olup (10^2 – $10^7 \Omega$ aralığında) sıcaklıkla birlikte önemli değişiklikler göstermektedir. Hesaplama yöntemine göre 170-230 K civarında en düşük R_s değeri tespit edilirken, daha sonra yüksek sıcaklıklarda çoğunlukla sıcaklık artışına bağlı R_s değerlerinde de bir artış trendi gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların donması ve yüksek sıcaklıklarda artan tuzak etkisiyle açıklanabilir.



Şekil 4.8. Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Parametre Analizi



Şekil 4.8. (Devam ediyor).

Bunun aksine, D2 cihazındaki seri direnç değerleri genel itibarıyla daha düşüktür ve sıcaklık arttıkça düzenli bir azalma göstermektedir. Özellikle 300 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda dirençte sabitlenme eğilimi görülmüştür. Bu durum, Cu katkısının karbon matrisinde iletken yollar oluşturduğunu ve arayüzdeki direnç unsurlarını azalttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, tüm sıcaklık aralığında kullanılan yöntemler arasında uyumun katkılı yapıda daha iyi olduğu belirlenmiştir.

İdealite faktörünün sıcaklıkla değişim etkisi, TE ve Cheung 1 yöntemleri kullanılarak hesaplanmış ve sunulmuştur. D1 cihazı düşük sıcaklık değerlerinde oldukça yüksek ($n > 20$) idealite faktörü değerleri göstermiştir. Bu durum, arayüz üzerindeki dengesizlikler, tuzak etkileri ve taşıyıcı kapanması gibi, idealiteyi etkileyen fiziksel mekanizmaların devrede olduğunu ortaya koymaktadır. 250 ile 350 K arasında idealite faktörü daha düşük ve sabit bir düzeyde kalmıştır ki bu aralık cihazın en stabil çalışma bölgesi olarak değerlendirilmektedir.

D2 cihazında ise idealite faktörü genelde daha düşük seviyelerde ($n \approx 2.5-7$) seyretmiştir; buda cihazın ideal diyot davranışına daha iyi bir uyum sağladığını göstermektedir. 300 K civarında en düşük n değerlerine ulaşılmış, yüksek sıcaklıklarda ise hafif bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, D2 cihazındaki Cu katkısının düşük ve orta sıcaklıklarda taşıyıcı geçişini stabilize ettiğini, yüksek sıcaklıklardaki etkilerin ise geri akım ve termal uyarılma olduğunu düşündürmektedir.

TE , Cheung 2 ve Norde yöntemleri kullanılarak hesaplanan bariyer yüksekliği değerleri, sıcaklığın artmasıyla birlikte her iki cihaz için de belirgin bir şekilde yükselmektedir. D1 cihazında düşük sıcaklıklarda Φ_B değeri yaklaşık 0,2 eV seviyesinde iken, yüksek sıcaklıklarda bu değer 1,0 eV civarlarına ulaşmıştır. Bu durum, düşük sıcaklıklardaki etkin bariyerin daha az olmasının arkasında, arayüzdeki homojen olmayan durumlar ve sınırlı taşıyıcı geçişi gibi etkenlerin varlığını göstermektedir.

D2 cihazında ise, düşük sıcaklıklarda bile yüksek bir bariyer yüksekliği (~0,45 eV) tespit edilmiştir; bu da katkının arayüz yapısının iyileştirilmesine yardımcı olarak taşıyıcı geçişini daha iyi yönetebildiğini ortaya koymaktadır. 300 K sonrasında bazı yöntemler (özellikle Cheung 2 ile) elde edilen değerlerin doygunluğa ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu eğilim, katkılı yapının sıcaklıkla birlikte daha kararlı hale geldiğini ve belirgin bir enerji bariyeri sağladığını göstermektedir.

Tüm bu incelemelerin bir arada ele alınması sonucunda, Cu katkılanmış DLC yapısının saf DLC ile karşılaştırıldığında hem daha küçük seviyelerde seri direnç hem de daha düşük idealite faktörü sunduğu, ayrıca daha yüksek ve stabil bir Schottky bariyer yüksekliği sağladığı gözlemlenmektedir. Cu katkısı, cihazların sıcaklık değişimlerine bağlı elektriksel özelliklerini dengeleyerek daha ideal diyot davranışı, daha güvenilir taşıyıcı akışı ve daha stabil bir arayüz yapısı sunmaktadır.

Bu bağlamda, bakır (Cu) katkılı yapılar, sıcaklık değişimlerinin belirleyici olduğu uygulamalarda daha kararlı ve yüksek performanslı Schottky diyotların geliştirilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Bu çalışma, DLC (D1) ve Cu katkılı DLC (D2) ara katmanlı Schottky cihazlarının bazı elektriksel parametrelerinin (özellikle seri direnç ve yüzey durumları) farklı sıcaklık koşulları altında karşılaştırılmasına odaklanmıştır. Bu nedenle I - V verileri geniş bir sıcaklık aralığında (80-410 K) 30 K adımlarla elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, cihazların bariyer yüksekliğinin Çoklu (Multi) Gaussian dağılımı nedeniyle her iki cihazın da belirli sıcaklık bölgelerinde (LTs, MTs ve HTs) farklı davranışlar sergilediğini göstermiştir. Öte yandan, yeterince yüksek negatif ve pozitif voltajlarda, her iki cihazın direnç değerlerinin özellikle HTs'ler için neredeyse kararlı seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir. Ancak bakır katkılı cihazın her sıcaklık bölgesinde daha düzenli ve kararlı bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, her iki cihaz için de arayüzey tabakasının kalınlığı (yaklaşık 3 μ m) cihazların yüksek direnç seviyeleri sergilemesine neden olmuştur. Bu da cihazların bir diyottan ziyade bir kapasitör gibi davrandığını ortaya koymaktadır.

R_S , R_{sh} ve RR , D1 cihazında karmaşık bir davranış sergilerken, D2 cihazında daha düzenli bir yanıt vermiştir. Örneğin, D1 cihazında R_S değerleri için sıcaklığa bağlı olarak artan ve azalan eğilimler görülürken, D2 cihazında genellikle azalan bir eğilim gözlenmiştir. Bu durum daha detaylı açıklanacak olursa: R_S değerleri D1 cihazında çoğunlukla azalma eğiliminde olmasına rağmen, ilginç bir davranış olarak oda sıcaklığı civarında, özellikle düşük voltajlarda artma eğilimindedir.

D1 ve D2 cihazlarında $n(V)$ değerlerindeki değişiklikler, artan öngerilime bağlı olarak n değerlerinde artış eğilimi gösterme açısından klasik sonuçlar verdi. Ancak D1 cihazı, kalın ve yalıtkan ara katman nedeniyle düşük voltajlarda özellikle MTs ve HTs bölgelerinde bazı karmaşık ve beklenmedik davranışlar sergilemiştir. Dahası, bakır katkılama işlemi ile sadece bu karmaşık davranışlar ortadan kaldırılmakla kalmamış,

aynı zamanda cihazın sıcaklığa bağımlılığı da özellikle düşük ve orta sıcaklıklarda oldukça düşük hale gelmiştir. Bu sonuçlar, idealite faktörünün voltaj ve sıcaklıkla değişimi göz önüne alındığında D2 cihazının daha kararlı ve daha düzenli davranışlar sergilediği anlamına gelmektedir.

Bariyer yüksekliği, literatürde olduğu gibi tüm sıcaklık bölgelerinde artan ön gerilim ile azalma eğilimindedir. DeneySEL sonuçlar ayrıca bariyer yüksekliğinin her sıcaklık bölgesi ve voltaj seviyesi için artan sıcaklıkla birlikte arttığını göstermektedir. Bu durum da literatürdeki sonuçlarla tutarlı görünmektedir. Gözlemlenen bir diğer durum ise bakır katkılama işleminin cihaz üzerindeki bariyer yüksekliği seviyesini düşürdüğü ve bu cihazın özellikle yüksek sıcaklık bölgesinde daha düzenli bir davranış sergilediğidir.

Yüzey durumları genellikle orta bant aralığından valans bandına doğru üssel olarak azalır ve hatta enerjiye bağlı yüzey durumları incelendiğinde özellikle LTs'ler için bazı sıcaklık bölgelerinde U şeklinde bir dağılım sergiler. Bu davranış literatürde yüzey durumlarının spesifik dağılımı ile açıklanmaktadır. Ancak, bu davranış özellikle D1 cihazında yüksek sıcaklıklarda bozulmaktadır. Öte yandan, N_{ss} değerleri D1 cihazında sıcaklık arttıkça sürekli olarak azalmış; fakat D2 cihazında sürekli bir azalma görülmemiştir. Ayrıca D1 cihazında N_{ss} değerleri 10^{13} - 10^{14} eV⁻¹ cm⁻² seviyeleri arasında değişirken, D2 cihazında daha düşük değerler (10^{12} - 10^{13} eV⁻¹ cm⁻² seviyeleri) gözlenmiştir. Sonuç olarak D2 yani bakır katkılı cihazın daha önceki elektriksel parametrelerde olduğu gibi yüzey durumları için de daha kararlı ve daha kaliteli sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

Tüm bu incelemelerin bir arada ele alınması sonucunda, Cu katkısı yapılmış DLC yapısının saf DLC ile karşılaştırıldığında hem daha az seri direnç hem de daha düşük idealite faktörü sunduğu, ayrıca daha yüksek ve stabil bir Schottky bariyer yüksekliği sağladığı gözlemlenmektedir. Cu katkısı, cihazların sıcaklık değişimlerine bağlı elektriksel özelliklerini dengeleyerek daha ideal diyot davranışı, daha güvenilir taşıyıcı akışı ve daha stabil bir arayüzey yapısı sunmaktadır.

Bu bağlamda, bakır (Cu) katkılı yapılar, sıcaklık değişimlerinin belirleyici olduğu uygulamalarda daha kararlı ve yüksek performanslı Schottky diyotların geliştirilmesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.



KAYNAKLAR

1. Efeoğlu, H., Turut, A., and Gül, M., "Current–Voltage Characteristics of Pt Metal-based and PtSi Silicide-based n-Si Schottky Diodes over a Wide Measuring Temperature Range", *Journal Of Electronic Materials*, 52 (2): 1410–1418 (2023).
2. Kim, D. M., Kim, D. H., and Lee, S. Y., "Characterization and modeling of temperature-dependent barrier heights and ideality factors in GaAs Schottky diodes", *Solid-State Electronics*, 51 (6): 865–869 (2007).
3. Hadi, H. A., Ismail, R. A., and Abdulwahhab, A. R., "Effect of Gamma Irradiation on the Optoelectronics Properties of Porous Si/c-Si Heterojunction photodetector", *Silicon*, 16 (3): 1097–1106 (2024).
4. Akila, T., Gayathri, P., Alan Sibü, G., Balasubramani, V., Al-Lohedan, H., and Al-Dhayan, D. M., "Augmented photovoltaic performance of Cu/Ce-(Sn: Cd)/n-Si Schottky barrier diode utilizing dual-doped Ce-(Sn: Cd) thin films", *Optical Materials*, 149: 115133 (2024).
5. Cicek, O., Arslan, E., Altindal, S., Badali, Y., and Ozbay, E., "21.2 mV/K High-Performance Ni(50 nm)-Au(100 nm)/Ga₂O₃/p-Si Vertical MOS Type Diode and the Temperature Sensing Characteristics with a Novel Drive Mode", *IEEE Sensors Journal*, 22 (24): 23699–23704 (2022).
6. Anjankar, S. C. and Dhavse, R., "Design and Optimization of MOS Capacitor based Radiation Sensor for Space Applications", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 49 (5): 7013–7028 (2024).
7. Kaymaz, A. and Baydilli, E. E., "The Role of Co/Zn-Doped Organic Interlayer on the Operating Performance of Schottky Devices as an Ionizing Radiation Sensor", *IEEE Sensors Journal*, 24 (11): 17693–17700 (2024).
8. Sarıtaş, S., Yıldırım, F., Orhan, Z., and Aydoğan, Ş., "Dual-functional CuO:Fe₂O₃/n-Si heterojunction with applications in gas sensors and self-powered visible photodetectors", *Optical Materials*, 151: 115315 (2024).
9. Yılmaz, M., Yıldırım, F., Aydoğan, Ş., and Kocyigit, A., "Photodiode behavior and capacitive performance of ZnO nanoflakes synthesized by electrochemical deposition", *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 56 (49): 495109 (2023). Tan, S. O., "Schottky Yapılar Üzerine İnceleme ve Analiz Çalışması", *Politeknik Dergisi*, 21 (4): 977–989 (2018).

10. P, V., Liu, X., Ramesh Babu, R., Sathiya, M., Salem Alsaiani, N., Mohammed Alzahrani, F., Tariq Nazir, M., Elamurugu, E., and Zhang, F., "Chemically sprayed CdO: Cr thin films for formaldehyde gas detection and optoelectronic applications", **Chemosphere**, 329: 138535 (2023).
11. Güçlü, Ç. Ş., Ulusoy, M., and Altındal, Ş., "A comparison electrical characteristics of the Au/(pure-PVA)/n-Si and Au/(CdTe doped-PVA)/n-Si (MPS) type Schottky structures using I–V and C–V measurements", **Journal Of Materials Science: Materials In Electronics**, 35 (12): 1–10 (2024).
12. Agarwal, S., Dwivedi, D. K., Lohia, P., Sharma, S. K., Habila, M. A., and Hossain, M. K., "Phenomenology of M–N rule and high-field conduction in Ge–Te–Se–Sc rare-earth doped glasses", **Journal Of Materials Science: Materials In Electronics**, 35 (6): 1–11 (2024).
13. Bhattacharya, G. and Venimadhav, A., "Temperature dependent electron transport and interface state studies on Ni/n-Si/Al/Ag lateral Schottky junction", **Microelectronics Reliability**, 153: 115302 (2024).
14. Badali, Y., Altan, H., and Altındal, S., "Thermal dependence on electrical characteristics of Au/(PVC:Sm2O3)/n-Si structure", **Journal Of Materials Science: Materials In Electronics**, 35 (3): 1–10 (2024).
15. Akın, B., Ulusoy, M., and Altındal Yerişkin, S., "Investigation of the interface state characteristics of the Al/Al2O3/Ge/p-Si heterostructure over a wide frequency range by capacitance and conductance measurements", **Materials Science In Semiconductor Processing**, 170: (2024).
16. İzdeş, M., Ertuğrul Uyar, R., and Tataroğlu, A., "Influence of ionizing radiation on admittance measurements of Au/TiO2/n-Si (MIS) capacitor", **Journal Of Materials Science: Materials In Electronics**, 35 (6): 1–9 (2024).
17. Demirezen, S., Arslan Alsaç, A., Çetinkaya, H. G., and Altındal, "The investigation of current-transport mechanisms (CTMs) in the Al/(In2S3:PVA)/p-Si (MPS)-type Schottky barrier diodes (SBDs) at low and intermediate temperatures", **Journal Of Materials Science: Materials In Electronics**, 34 (14): 1–13 (2023).
18. Gumus, I. and Aydogan, S., "Thermal sensing capability of metal/composite-semiconductor framework device with the low barrier double Gaussian over wide temperature range", **Sensors And Actuators A: Physical**, 332: 113117 (2021).
19. Efeoğlu, H. and Turut, A., " Thermal sensing capability and current–voltage–temperature characteristics in Pt/ n -GaP/Al/Ti Schottky diodes ", **Journal Of Vacuum Science & Technology B**, 41 (2): (2023).

20. Zeghdar, K., Dehimi, L., Pezzimenti, F., Megherbi, M. L., and Della Corte, F. G., "Analysis of the Electrical Characteristics of Mo/4H-SiC Schottky Barrier Diodes for Temperature-Sensing Applications", *Journal Of Electronic Materials*, 49 (2): 1322–1329 (2020).
21. Altındal, Ş., Özdemir, A. F., Aydoğan, Ş., and Türüt, A., "Discrepancies in barrier heights obtained from current–voltage (IV) and capacitance–voltage (CV) of Au/PNoMPhPPy/n-GaAs structures in wide range of temperature", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 33 (15): 12210–12223 (2022).
22. Basman, N., Uzun, R., Gocer, E., Bacaksiz, E., and Kolemen, U., "Electrodeposition of Si–DLC nanocomposite film and its electronic application", *Microsystem Technologies*, 24 (5): 2287–2294 (2018).
23. Meškiniš, Š., Peckus, D., Vasiliauskas, A., Čiegis, A., Gudaitis, R., Tamulevičius, T., Yaremchuk, I., and Tamulevičius, S., "Photovoltaic Properties and Ultrafast Plasmon Relaxation Dynamics of Diamond-Like Carbon Nanocomposite Films with Embedded Ag Nanoparticles", *Nanoscale Research Letters*, 12 (1): 1–10 (2017).
24. Şafak Asar, Y., Feizollahi Vahid, A., Basman, N., Çetinkaya, H. G., and Altındal, "Frequency-dependent electrical parameters and extracted voltage-dependent surface states in Al/DLC/p-Si structure using the conductance method", *Applied Physics A: Materials Science And Processing*, 129 (5): 1–10 (2023).
25. Berkün, Ulusoy, M., Altındal, and Avar, B., "On frequency and voltage dependent physical characteristics and interface states characterization of the metal semiconductor (MS) structures with (Ti:DLC) interlayer", *Physica B: Condensed Matter*, 666: 415099 (2023).
26. Erbilten Tanrikulu, E., Berkün, Ulusoy, M., Avar, B., Durmuş, H., and Altındal, "Evaluation of the current transport mechanism depending on the temperature of Schottky structures with Ti:DLC interlayer", *Materials Today Communications*, 38: 107992 (2024).
27. Malisz, K., Świeczko-Żurek, B., and Sionkowska, A., "Preparation and Characterization of Diamond-like Carbon Coatings for Biomedical Applications—A Review", *Materials* 2023, Vol. 16, Page 3420, 16 (9): 3420 (2023).
28. Kara, S., Aslan, N., and Kurt, M. Ş., "Surface Morphology, Structural, Photovoltaic and Optoelectronic Properties of Diamond Like Carbon-Copper Nanostructures", *Materials Science And Engineering: B*, 289: 116271 (2023).
29. Kijaszek, W., Wiatrowski, A., Mazur, M., Wojcieszak, D., Paszkiewicz, R., and Kováč, J., "Study on properties of diamond-like carbon films deposited by RF ICP PECVD method for micro- and optoelectronic applications", *Materials Science And Engineering: B*, 296: 116691 (2023).

30. Basman, N., Aslan, N., Uzun, O., Cankaya, G., and Kolemen, U., "Electrical characterization of metal/diamond-like carbon/inorganic semiconductor MIS Schottky barrier diodes", *Microelectronic Engineering*, 140: 18–22 (2015).
31. Xu, W., Zhou, K. S., Lin, S., Dai, M., Shi, Q., and Wei, C., "Structural properties of hydrogenated Al-doped diamond-like carbon films fabricated by a hybrid plasma system", *Diamond And Related Materials*, 87: 177–185 (2018).
34. Feizollahi Vahid, A., Alptekin, S., Basman, N., Ulusoy, M., Şafak Asar, Y., and Altındal, "The investigation of frequency dependent dielectric properties and ac conductivity by impedance spectroscopy in the Al/(Cu-doped Diamond Like Carbon)/Au structures", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 34 (13): 1–11 (2023).
35. Aslan, N., Kurt, M. Ş., and Koç, M. M., "Silver-Doped Diamond-Like Carbon (DLC:Ag) Nanocomposite Films for Solar Tracking Applications", *Journal Of Electronic Materials*, 52 (4): 2807–2818 (2023).
36. Vahidi, A., Ferreira, F., and Oliveira, J., "Comparative study of dry high-temperature tribological performance of hydrogen-free and hydrogenated DLC films deposited by HiPIMS in DOMS mode", *Tribology International*, 195: 109639 (2024).
37. Kim, I. S., Shim, C. E., Kim, S. W., Lee, C. S., Kwon, J., Byun, K. E., and Jeong, U., "Amorphous Carbon Films for Electronic Applications", *Advanced Materials*, 35 (43): 2204912 (2023).
38. Tataroglu, A., Durmuş, H., Vahid, A. F., Avar, B., and Altındal, "High-temperature sensitivity complex dielectric/electric modulus, loss tangent, and AC conductivity in Au/(S:DLC)/p-Si (MIS) structures", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 35 (3): 1–11 (2024).
39. Ahmed, S. F., Alam, M. S., and Mukherjee, N., "Cu incorporated amorphous diamond like carbon (DLC) composites: An efficient electron field emitter over a wide range of temperature", *Physica E: Low-Dimensional Systems And Nanostructures*, 97: 120–125 (2018).
40. Balıkçı, L. M., Taşçıoğlu, Ulusoy, M., Vahid, A. F., and Altındal, "Investigation of the electrical properties of electrochemically grown DLC films doped with specific elements (S, N, Cu) in Schottky structures as interlayers", *Journal Of Alloys And Compounds*, 1010: 178096 (2025).
41. Son, M. J., Zhang, T. F., Jo, Y. J., and Kim, K. H., "Enhanced electrochemical properties of the DLC films with an arc interlayer, nitrogen doping and annealing", *Surface And Coatings Technology*, 329: 77–85 (2017).

42. Patnaik, L., Maity, S. R., and Kumar, S., "Comprehensive structural, nanomechanical and tribological evaluation of silver doped DLC thin film coating with chromium interlayer (Ag-DLC/Cr) for biomedical application", **Ceramics International**, 46 (14): 22805–22818 (2020).
43. Yu, W., Wang, J., Huang, W., Cui, L., and Wang, L., "Improving high temperature tribological performances of Si doped diamond-like carbon by using W interlayer", **Tribology International**, 146: 106241 (2020).
44. Bootkul, D., Supsermpol, B., Saenphinit, N., Aramwit, C., and Intarasiri, S., "Nitrogen doping for adhesion improvement of DLC film deposited on Si substrate by Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA) technique", **Applied Surface Science**, 310: 284–292 (2014).
45. Song, Y., Han, C., Zhen, N., Wang, Y., Leng, Y., Wu, Z., Deng, Q., and Wen, F., "Nitrogen-Doped Diamond-like Carbon Buffer Layer Enhances the Mechanical and Tribological Properties of Diamond-like Carbon Films Deposited on Nitrile Rubber Substrate", **Coatings**, 14 (4): 515 (2024).
46. Eroğlu Tezcan, A., A. hameed, S., Feizollahi Vahid, A., Ulusoy, M., Altındal, Ş., Eroğlu Tezcan, A., A. hameed, S., Feizollahi Vahid, A., Ulusoy, M., and Altındal, Ş., "A study on the complex dielectric (ϵ^*)/electric-modulus (M^*)/impedance (Z^*), tangent-loss ($\tan\delta$), and ac conductivity (σ_{ac}) of the Al/(S:DLC)/p-Si/Au (MIS)-type Schottky structures in a wide range of frequency and voltage at room temperature (RT)", **PhyB**, 684: 415959 (2024).
47. Kaymaz, A., "Multi-Gaussian distribution of barrier height in diamond-like carbon interfacial-layered Schottky devices", **Materials Science In Semiconductor Processing**, 177: 108380 (2024).
48. Evcin Baydilli, E., "The effect of Cu-doping to the DLC interlayer on the temperature dependent current-conduction mechanisms and barrier shape of the Schottky devices", **Materials Science In Semiconductor Processing**, 184: 108828 (2024).
49. Aslan, N., Kurt, M. Ş., and Mehmet Koç, M., "Morpho-structural and optoelectronic properties of diamond like carbon–germanium (DLC-Ge) composite thin films produced by magnetron sputtering", **Optical Materials**, 126: (2022).
50. Gao, M., Kim, S. Bin, Li, Y., Ramaswamy, S. H., and Choi, J., "Triboelectric nanogenerator with enhanced output and durability based on Si-DLC films", **Nano Energy**, 105: (2023).
51. Fayed, S. M., Chen, D., Li, S., Zhou, Y., Wang, H., and Sadawy, M. M., "Corrosion behavior and passive stability of multilayer DLC-Si coatings", **Surface And Coatings Technology**, 431: 128001 (2022).

52. Zhao, Y., Xu, F., Xu, J., Li, D., Sun, S., Gao, C., Zhao, W., Lang, W., Liu, J., and Zuo, D., "Effect of the bias-graded increment on the tribological and electrochemical corrosion properties of DLC films", ***Diamond And Related Materials***, 130: 109421 (2022).
53. Liu, G., Wei, X., Qiang, L., Zhang, B., and Gao, K., "Electrochemical Deposition of DLC Films Embedded with Crystalline Graphite and Multilayer Graphene", ***Journal Of Electronic Materials***, 50 (3): 1552–1557 (2021).
54. Sze, S. M. and Ng, K. K., "Physics of Semiconductor Devices", ***Physics Of Semiconductor Devices***, (2006).
55. B.L. Sharma, "Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications", ***Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions And Their Applications***, (1984).
56. Akın, B., A.Hameed, S., Altındal Yerişkin, S., Ulusoy, M., and Durmuş, H., "The probe of current conduction mechanisms, interface states, and the forward bias intersection point of the al/Al₂O₃/Ge/p-Si heterostructures depending on temperature", ***Materials Science In Semiconductor Processing***, 184: 108781 (2024).
57. Erbilen Tanrikulu, E. and Taşçıoğlu, I., "Variation of the Surface States and Series Resistance Depending on Voltage, and Their Effects on the Electrical Features of a Schottky Structure with CdZnO Interface", ***Journal Of Electronic Materials***, 52 (4): 2432–2440 (2023).
58. Nicollian, E. and Brews, J., "MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology", (2003).
59. Card, H. C. and Rhoderick, E. H., "Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes", ***Journal Of Physics D: Applied Physics***, 4 (10): 1589 (1971).
60. Ulusoy, M., Badali, Y., Pirgholi-Givi, G., Azizian-Kalandaragh, Y., and Altındal, Ş., "The capacitance/conductance and surface state intensity characteristics of the Schottky structures with ruthenium dioxide-doped organic polymer interface", ***Synthetic Metals***, 292: 117243 (2023).
61. Sharma, M. and Tripathi, S. K., "Analysis of interface states and series resistance for Al/PVA: N-CdS nanocomposite metal-semiconductor and metal-insulator-semiconductor diode structures", ***Applied Physics A: Materials Science And Processing***, 113 (2): 491–499 (2013).
62. Braun, F., "Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle", ***Annalen Der Physik***, 229 (12): 556–563 (1875).

63. Sze, S., Crowell, C., Physics, D. K.-J. of A., and 1964, undefined, "Photoelectric determination of the image force dielectric constant for hot electrons in Schottky barriers", ***Pubs.Aip.Org***, (1964).
64. Schottky, W., "Halbleitertheorie der Sperrschicht", ***Die Naturwissenschaften***, 26 (52): 843 (1938).
65. Society, N. M.-P. of the C. P. and 1938, undefined, "Note on the contact between a metal and an insulator or semi-conductor", ***Cambridge.OrgNF MottMathematical Proceedings Of The Cambridge Philosophical Society, 1938•cambridge.Org***, (1938).
66. Heine, V., "Theory of surface states", ***Physical Review***, 138 (6A): (1965).
67. Crowell, C., Physics, G. R.-J. of A., and 1969, undefined, "Surface State and Interface Effects on the Capacitance-Voltage Relationship in Schottky Barriers", ***Pubs.Aip.Org***, (1969).
68. Sharma, B., "Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications", ***Books.Google.Com***, (2013).
69. Bilkan, Zeyrek, S., San, S. E., and Altındal, "A compare of electrical characteristics in Al/p-Si (MS) and Al/C20H12/p-Si (MPS) type diodes using current–voltage (I–V) and capacitance–voltage (C–V) measurements", ***Materials Science In Semiconductor Processing***, 32: 137–144 (2015).
70. Kaymaz, A., Evcin Baydilli, E., Tecimer, H., Uslu Tecimer, H., and Altındal, Ş., "Determination of temperature sensitivity and current-transport mechanisms of the GaAs-based MS contact", ***Materials Today Communications***, 35: 106380 (2023).
71. Evcin Baydilli, E., Kaymaz, A., Uslu Tecimer, H., and Altındal, "On the Multi-parallel Diodes Model in Au/PVA/n-GaAs Schottky Diodes and Investigation of Conduction Mechanisms (CMs) in a Temperature Range of 80–360 K", ***Journal Of Electronic Materials***, 49 (12): 7427–7434 (2020).
72. Tecimer, H., Uslu, H., Alahmed, Z. A., Yakuphanoglu, F., and Altındal, S., "On the frequency and voltage dependence of admittance characteristics of Al/PTCDA/P-Si (MPS) type Schottky barrier diodes (SBDs)", ***Composites Part B: Engineering***, 57: 25–30 (2014).
73. Aydin, M., Akkiliç, K., Science, T. K.-A. S., and 2006, undefined, "The importance of the series resistance in calculating the characteristic parameters of the Schottky contacts", ***ElsevierME Aydin, K Akkiliç, T KiliçoğluApplied Surface Science, 2006•Elsevier***, (2006).
74. Lee, T., Fung, S., Beling, C., physics, H. A.-J. of applied, and 1992, undefined, "A systematic approach to the measurement of ideality factor, series resistance, and barrier height for Schottky diodes", ***Pubs.Aip.Org***, (1992).

75. Sato, K., physics, Y. Y.-J. of applied, and 1985, undefined, "Study of forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance", ***Pubs.Aip.Org***, (1985).
76. Türüt, A., Bati, B., Kökçe, A., Sağlam, M., Scripta, N. Y.-P., and 1996, undefined, "The bias-dependence change of barrier height of Schottky diodes under forward bias by including the series resistance effect", ***Iopscience.Iop.OrgA Türüt, B Bati, A Kökçe, M Sağlam, N YalçınPhysica Scripta, 1996•iopscience.Iop.Org***, (1996).
77. Karadaş, S., Yerişkin, S., ... M. B.-J. of P. and, and 2021, undefined, "Complex dielectric, complex electric modulus, and electrical conductivity in Al/(Graphene-PVA)/p-Si (metal-polymer-semiconductor) structures", ***ElsevierS Karadaş, SA Yerişkin, M Balbaş, Y Azizian-KalandaraghJournal Of Physics And Chemistry Of Solids, 2021•Elsevier***, (2021).
78. Ata, D., Yeriskin, S., Tataroğlu, A., and, M. B.-J. of P., and 2022, undefined, "Analysis of admittance measurements of Al/Gr-PVA/p-Si (MPS) structure", ***ElsevierD Ata, SA Yeriskin, A Tataroğlu, M BalbasJournal Of Physics And Chemistry Of Solids, 2022•Elsevier***, (2022).
79. Cetinkaya, H. G., Feizollahi Vahid, A., Basman, N., Demirezen, S., Şafak Asar, Y., and Altındal, S., "On the wide range frequency and voltage dependence of electrical features and density of surface states of the Al/(Cu:DLC)/p-Si/Au Schottky diodes (SDs)", ***Journal Of Materials Science: Materials In Electronics***, 34 (9): 1–11 (2023).
80. Berkün, Ulusoy, M., Altındal, and Avar, B., "On frequency and voltage dependent physical characteristics and interface states characterization of the metal semiconductor (MS) structures with (Ti:DLC) interlayer", ***Physica B: Condensed Matter***, 666: (2023).
81. Hameed, S. A., Berkün, Ö., and Altındal Yerişkin, S., "On the voltage dependent series resistance, interface traps, and conduction mechanisms in the Al/(Ti-doped DLC)/p-Si/Au Schottky Barrier Diodes (SBDs)", ***GU J Sci, Part A***, 11 (1): 235–244 (2024).
82. Bozkurt, R. B., Evcin Baydilli, E., Kaymaz, A., Altındal, Ş., and Durmuş, H., "Dielectric properties and polarization mechanisms of the DLC-interlayered Schottky structures under low-moderate and high-temperatures", ***Materials Science And Engineering: B***, 320: 118406 (2025).
83. Şahin, M., Kaymaz, A., Feizollahi Vahid, A., Özerden, E., and Altındal, Ş., "Comparison of electrical properties of pure and copper-doped diamond-like carbon interfacial-layered Schottky devices under different temperature conditions", ***Journal Of Materials Science: Materials In Electronics***, 36 (5): 1–18 (2025).
84. Göçer, E., "Ag/SiOx-DLC/p-Si Schottky diyodun elektriksel karakterizasyonu", ***Acikbilim.Yok.Gov.Tr***, (2016).

85. Cowley, A., Physics, S. S.-J. of A., and 1965, undefined, "Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems", **Pubs.Aip.Org**, (1965).
86. A. Van der Ziel, "Solid State Physical Electronics", 2. Ed., New Jersey: Prentice-Hall, (1968).
87. Uslu, H., ""Au/(Co, Zn- Katkılı) Polivinil Alkol/n-Si Schottky Engel Diyotlarının Hazırlanması Ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı İncelenmesi"", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2010).
88. Rhoderick, E. and Williams, R., "Metal-semiconductor contacts", **Scholar.Archive.Org**, (1988).
89. Neamen, D. A., "Semiconductor physics and devices 3rd Edition", **Editorial: Mc Graw Hill**, (2003).
90. Çiçek, Osman., "Polivinil Alkol Arayüzey Tabakalı Schottky Engel Diyotların Hazırlanması Ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi 2016 Doktora Tezi Elektrik-Elektronik Mühendisliği", Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2016).
91. Milnes, A. G., "Heterojunctions and Metal Semiconductor Junctions", **Elsevier**, (2012).
92. Singh, A., Reinhardt, K., physics, W. A.-J. of applied, and 1990, undefined, "Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions", **Pubs.Aip.Org**, (1990).
93. Nanotechnology, S. T.-I. T. on and 2019, undefined, "Identification of the frequency-and voltage-dependent dielectric characterization of metal-Zn/PVA-semiconductor structures", **Ieeexplore.Ieee.OrgSO TanIEEE Transactions On Nanotechnology 2019,•ieeexplore.Ieee.Org**, (2019).
94. Nicollian, E. H. and Brews, J. R., "Metal Oxide Semiconductor (MOS) Phys. and Tech" Wiley New York.(1982).
95. Altındal, Ş., ... Ö. S.-I. T. on, and 2019, undefined, "The structural and electrical properties of the Au/n-Si (MS) diodes with nanocomposites interlayer (Ag-doped ZnO/PVP) by using the simple ultrasound-assisted", **Ieeexplore.Ieee.OrgŞ Altındal, Ö Sevgili, Y Azizian-KalandaraghIEEE Transactions On Electron Devices, 2019•ieeexplore.Ieee.Org**, (2019).
96. Kaymaz, Ahmet., "Organik Arayüzey Tabakalı Metal-Yarıiletken Yapıların Elektriksel Özelliklerinin Radyasyona Bağlı İncelenmesi", Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2020).

97. Schmitsdorf, R. F., Kampen, T. U., and Mönch, W., "Correlation between barrier height and interface structure of AgSi(111) Schottky diodes", *Surface Science*, 324 (2–3): 249–256 (1995).
98. Tyagi, M. S., "Introduction to Semiconductor Materials and Devices :John Wiley & Sons", New York, (1991).
99. Bethe, H. A., "Theory of the boundary layer of crystal rectifiers", Semiconductor Devices: Pioneering Papers, *World Scientific*, 387–399 (1991).
100. Sze, S. M., Li, Y., and Ng, K. K., "Physics of Semiconductor Devices", *John Wiley & Sons*, (2021).
101. Ezgin, Hüseyin., "N-6h-Sic Yariiletken Tabanlı Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Arayüzlü Schottky Diyot Üretimi Ve Karakteristiklerinin Belirlenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2022).
102. Krawczyk, S. K., Jakubowski, A., and Żurawska, M., "Effect of temperature on electrical and photoelectrical properties of silicon MIS solar cells", *Physica Status Solidi (A)*, 67 (1): 313–323 (1981).
103. Werner, J., dergisi, H. G.-U. fizik, and 1991, undefined, "Schottky temaslarında bariyer homojensizlikleri", *Pubs.Aip.Org*, (1991).
104. Cheung, S., letters, N. C.-A. physics, and 1986, undefined, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", *Pubs.Aip.Org*, (1986).
105. Asıl Uğurlu, H., "Ti/p-Si Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi için I–V Yöntemlerinin Karşılaştırılması", *Dergipark.Org.TrHA UğurluYüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi•dergipark.Org.Tr*, (3220).
106. Physics, H. N.-J. of applied and 1979, undefined, "A modified forward IV plot for Schottky diodes with high series resistance", *Ui.Adsabs.Harvard.Edu*, (1979).
107. Physics, K. B.-J. of A. and 1986, undefined, "Generalized Norde plot including determination of the ideality factor", *Ui.Adsabs.Harvard.Edu*, (1986).
108. He, X. M., Lee, D. H., Walter, K. C., Li, D. Q., and Nastasi, M., "Structure and optical properties of diamondlike carbon synthesized by plasma immersion ion processing", *Journal Of Materials Research*, 14 (5): 2080–2087 (1999).
109. Guo, Z., Wang, R., Yang, H., Chen, J., Lin, R., Wei, S., Coatings, B. L.-, and 2022, undefined, "Preparation and performance study of Si-DLC based on ion deposition of different multiple gradient transition layers", *Mdpi.ComZ Guo, R Wang, H Yang, J Chen, R Lin, S Wei, B LiCoatings, 2022•mdpi.Com*, (2022).

110. Gu, W., Qi, S., He, W., Chu, K., Lu, Z., and Zhang, G., "Different Tribological Behaviors in Multilayer 2D Graphene and 3D Graphene Foam Modified DLC/H-DLC Film in Moist Air", ***Tribology Letters***, 70 (1): (2022).
111. Erdemir, A., Fenske, G., Terry, J., Technology, P. W.-S. and coatings, and 1997, undefined, "Effect of source gas and deposition method on friction and wear performance of diamondlike carbon films", ***ElsevierA Erdemir, GR Fenske, J Terry, P WilburSurface And Coatings Technology, 1997•Elsevier***, (1997).
112. Buathong, S., Harnchana, V., Pimsawat, A., Jarernboon, W., Pimanpang, S., and Amornkitbamrung, V., "Electrodeposition of Ag-doped diamond-like carbon films on stainless steel for supercapacitor applications", ***Journal Of Alloys And Compounds***, 1010: 177942 (2025).
113. Ohtake, N., Hiratsuka, M., Kanda, K., Materials, H. A.-, and 2021, undefined, "Properties and classification of diamond-like carbon films", ***Mdpi.ComN Ohtake, M Hiratsuka, K Kanda, H Akasaka, M Tsujioka, K Hirakuri, A Hirata, T OhanaMaterials, 2021•mdpi.Com***, (2021).
114. Yan, X., Xu, T., Chen, G., Yang, S., and Liu, H., "Study of structure, tribological properties and growth mechanism of DLC and nitrogen-doped DLC films deposited by electrochemical technique", ***Applied Surface Science***, 236 (1–4): 328–335 (2004).
115. Cetinkaya, H. G., Feizollahi Vahid, A., Basman, N., Demirezen, S., Şafak Asar, Y., and Altındal, S., "On the wide range frequency and voltage dependence of electrical features and density of surface states of the Al/(Cu:DLC)/p-Si/Au Schottky diodes (SDs)", ***Journal Of Materials Science: Materials In Electronics***, 34 (9): (2023).
116. Sze, S. M., "Semiconductor Devices: Physics and Technology", ***John Wiley & Sons***, (2008).
117. Ahn, D., Reports, S. P.-S., and 2016, undefined, "Cuprous halides semiconductors as a new means for highly efficient light-emitting diodes", ***Nature.ComD Ahn, SH ParkScientific Reports, 2016•nature.Com***, (2016).
118. Hajimazdarani, M., Derakhshandeh, M., Materials, M. E.-O., and 2021, undefined, "Investigation of optoelectrical and Schottky behavior of diamond-like carbon coating deposited by hollow cathode PACVD method", ***ElsevierM Hajimazdarani, MR Derakhshandeh, MJ Eshraghi, A MassoudiOptical Materials, 2021•Elsevier***, (2021).
119. Korvink, J. G. and Greiner, A., "Semiconductors for Micro- and Nanotechnology", ***Semiconductors For Micro- And Nanotechnology***, (2002).
120. Oktyabrsky, S., Nishi, Y., Koveshnikov, S., Wang, W. E., Goel, N., and Tsai, W., "Materials and technologies for III-V MOSFETs", ***Fundamentals Of III-V Semiconductor MOSFETs***, 195–250 (2010).

121. Gökhan, Alper., ""Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş 5052 – 5182 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetlerinin Belirlenmesi"", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2003).
122. Erdoğan, Mehmet., ""Çelik Takviyeli Alüminyum Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi"", Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, (2005).
123. Alper, G., "Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş 5052 – 5182 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetlerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2013).
124. Pingsuthiwong, C., "Investigation of the structure and properties of diamond-like carbon films deposited electrochemically at low temperatures", **Search.Proquest.Com**, (2004).
125. Pingsuthiwong, C., "Investigation of Structure and Properties of Low Temperature Deposited Diamond-Like Carbon Films", (2004).
126. Iwaki, M., Watanabe, H., ... M. M.-S. and C., and 1998, undefined, "Synthesis of diamond-like carbon structure by Na-ion implantation in graphite and polyacetylene", **ElsevierM Iwaki, H Watanabe, M Matsunaga, K TerashimaSurface And Coatings Technology, 1998•Elsevier**, (1998).
127. Vacuum, Y. N.-J. of V. S. & T. A. and 1992, undefined, "Attempt to grow diamond phase carbon films from an organic solution", **Pubs.Aip.Org**, (1992).
128. Uslu, H., Altındal, Ş., Physics, İ. D.-J. of A., and 2010, undefined, "Illumination effect on electrical characteristics of organic-based Schottky barrier diodes", **Pubs.Aip.Org**, (2010).
129. Kaymaz, A., Evcin Baydilli, E., Uslu Tecimer, H., Altındal, Ş., and Azizian-Kalandaragh, Y., "Evaluation of gamma-irradiation effects on the electrical properties of Al/(ZnO-PVA)/p-Si type Schottky diodes using current-voltage measurements", **Radiation Physics And Chemistry**, 183: 109430 (2021).
130. Ru, G. P., Van Meirhaeghe, R. L., Forment, S., Jiang, Y. L., Qu, X. P., Zhu, S., and Li, B. Z., "Voltage dependence of effective barrier height reduction in inhomogeneous Schottky diodes", **Solid-State Electronics**, 49 (4): 606–611 (2005).
131. Türüt, A., Bati, B., Kökçe, A., Sağlam, M., and Yalçın, N., "The bias-dependence change of barrier height of Schottky diodes under forward bias by including the series resistance effect", **Physica Scripta**, 53 (1): 118 (1996).

132. Intonti, K., Faella, E., Kumar, A., Viscardi, L., Giubileo, F., Martucciello, N., Lam, H. T., Anastasiou, K., Craciun, M., Russo, S., and Di Bartolomeo, A., "Temperature-Dependent Conduction and Photoresponse in Few-Layer ReS₂", **ACS Applied Materials And Interfaces**, 15 (43): 50302–50311 (2023).
133. Gupta, S., Kumar, A., Mukherjee, S., Kushwah, K. K., Mahobia, S. K., Patharia, P., Kushwaha, A., Yadav, D., Dwivedi, U. K., Kumar, S., and Choubey, R. K., "Temperature-dependent study of the fabricated ZnS/p-Si heterojunction", **Physica B: Condensed Matter**, 657: 414831 (2023).
134. Deniz, A. R., "Analysis of temperature dependent current-voltage and frequency dependent capacitance-voltage characteristics of Au/CoO/p-Si/Al MIS diode", **Microelectronics Reliability**, 147: 115114 (2023).
135. Bengi, S., Yükseltürk, E., and Bülbül, M. M., "Investigation of electrical characterization of Al/HfO₂/p-Si structures in wide temperature range", **Journal Of Materials Science: Materials In Electronics**, 34 (3): 1–9 (2023).
136. Altindal, Ş., Yücedağ, I., and Tataroğlu, A., "Analysis of surface states and series resistance in Au/n-Si Schottky diodes with insulator layer using current–voltage and admittance–voltage characteristics", **Vacuum**, 84 (3): 363–368 (2009).
137. Cheung, S., letters, N. C.-A. physics, and 1986, undefined, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", **Pubs.Aip.Org**, 49: 1221 (1986).

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa ŞAHİN, ilk ve orta öğrenimini Gaziantep’te, lise öğrenimini Kilis Anadolu Teknik Lisesi’nde tamamlamıştır. 2017 yılında Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazanmış ve 2021 yılında da bu bölümden mezun olmuştur. 2023 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Tezli Yüksek Lisans programına başlamış olup, çalışmalarını bu program kapsamında sürdürmektedir.

Yayınlar

ŞAHİN, M., KAYMAZ, A., FEİZAOLLAHİ, V.A., ÖZERDEN, E., ALTINDAL, Ş. (2025) "Comparison of electrical properties of pure and copper-doped diamond-like carbon interfacial-layered Schottky devices under different temperature conditions", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 36 (5) p. 307 [SCI Expanded].