



**n-6H-SiC YARIİLETKEN TABANLI ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP
ARAYÜZLÜ SCHOTTKY DİYOT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Hüseyin EZGİN

**DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hüseyin EZGİN

29/06/2022

n-6H-SiC YARIİLETKEN TABANLI ÇOK DUVARLI KARBON NANOTÜP
ARAYÜZLÜ SCHOTTKY DİYOT ÜRETİMİ VE KARAKTERİSTİKLERİNİN
BELİRLENMESİ

(Doktora Tezi)

Hüseyin EZGİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Bu tez çalışmasında, n-6H-SiC alttaş kristalinin üzerine çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) malzemenin damlat kurut yöntemiyle kaplanarak Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun üretilmesi ve üretilen diyotun elektriksel karakteristiklerinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Üretilen diyotun voltaja bağlı akım ve kapasitans ölçümleri 300-480 K sıcaklıkları arasında yapılmıştır. Yarıiletken üzerine kaplanan MWCNT'lerin yüzeyi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Raman Spektroskopisi cihazlarıyla karakterize edilmiştir. SEM görüntülerinden MWCNT'lerin birbirlerine dolanmış tüpler hâlinde ve rastgele bir şekilde kristal yüzeyine kaplandığı görülürken, Raman Spektroskopisi sonuçlarından D bandındaki yoğunluğun G bandından fazla olduğu belirlenmiştir. Termiyonik emisyon (TE) modelinden sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörü değerleri 1,64 ve 1,07 aralığında azalırken, bariyer yüksekliği değerleri 0,76 eV ve 1,10 eV aralığında artmıştır. MWCNT arayüzlü Schottky diyotun idealite faktörü ve bariyer yükseklikleri, güçlü bir şekilde sıcaklığa bağlıdır. Cheung-Cheung yöntemi, Norde yöntemi ve Richardson eğrilerinin analizi ile diyotun sıcaklığa bağlı seri direnç, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği parametreleri elde edilmiştir. Seri direncin üretilen diyot için düşük değerlerde olduğu ve sıcaklık artışına bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir. Arayüz malzemesi olarak kullanılan MWCNT'lerin seri direncin değişiminde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Schottky bariyer diyotun 1 Mhz frekansta 300-480 K sıcaklıkları arasındaki kapasitans ölçümlerinden elde edilen bariyer yükseklikleri 1,38 eV ve 0,89 eV aralığında değişim gösterirken, sıcaklık artışına bağlı olarak bariyer yüksekliği azalmıştır. Temel araştırma niteliği taşıyan bu çalışma konusu literatüre yeni katkılar sağlarken, çalışma kapsamının genişletilmesi ve farklı aygıt alanlarına uygulanması yeni çalışmaların yapılabilme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : Schottky bariyer diyot, MWCNT, n-6H-SiC, elektriksel özellikler, damlat kurut yöntemi, arayüz malzemeler, arayüz durumları

Sayfa Adedi : 77

Danışman : Prof. Dr. Metin ÖZER

FABRICATION OF n-6H-SiC SCHOTTKY DIODE WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE INTERFACE AND DETERMINATION OF CHARACTERISTICS

(Ph. D. Thesis)

Hüseyin EZGİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

In this thesis, it is aimed to produce Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky barrier diode by coating the multi-walled carbon nanotube (MWCNT) material on the n-6H-SiC substrate crystal by drop drying method and to investigate the electrical characteristics of the produced diode as a function of temperature. The voltage-dependent current and capacitance measurements of the produced diode were made in the temperature range of 300-480 K. The surface of MWCNTs coated on the semiconductor was characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Raman Spectroscopy. While it was seen from the SEM images that the MWCNTs are randomly coated on the crystal surface as entangled tubes, it is determined that the density in the D band was higher than the G band from the results of Raman Spectroscopy. The ideality factor values obtained from the thermionic emission (TE) model depending on the temperature decrease between 1.64 and 1.07, the barrier height values increase between 0.76 eV and 1.10 eV. The ideality factor and barrier heights of the Schottky diode with MWCNT interface are strongly temperature dependent. The temperature-dependent series resistance, ideality factor and barrier height parameters of the diode are obtained by the Cheung-Cheung method, the Norde method and the analysis of Richardson curves. It has been determined that the series resistance is low for the produced diode and decreases depending on the temperature increase. It has been concluded that MWCNTs used as interface materials are effective in changing the series resistance. When the barrier heights obtained from the capacitance measurements of the Schottky barrier diode at 1 Mhz frequency between 300-480 K temperatures are between 1.38 eV and 0.89 eV, the barrier height decreases depending on the temperature increase. While this study subject, which has the characteristics of basic research, provides new contributions to the literature, expanding the scope of the study and applying it to different device areas reveals the potential for new studies.

Science Code : 20227

Key Words : Schottky barrier diode, MWCNT, n-6H-SiC, electrical properties, drop drying method, interface materials, interface states

Page Number : 77

Supervisor : Prof. Dr. Metin ÖZER

TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışmasında katkıları bulunan ve çalışmalarım boyunca destek olan herkese minnettarlığımı birkaç kelime ile olsa da en iyi şekilde ifade edebilmek istiyorum.

Öncelikle, öğrencisi olduğum zaman diliminde yönlendiriciliği, akademik tecrübesi ve deneyimleriyle bana destek olan danışmanım sayın Prof. Dr. Metin ÖZER'e teşekkür ederim. Gerek değerli bilgilerini gerekse laboratuvar deneyimlerini paylaşırken son derece mutlu olan, işini önemseyen, ufku genişleten, bakış açımı değiştiren, karşılaştığım sorunları çözebilmemde desteğini esirgemeyen bir yol göstericiye sahip olduğum için çok şanslı olduğumu ifade etmek isterim. Değerli hocamın emeklilik hayatının kendisine ve ailesine mutluluk getirmesini temenni ediyorum.

Çalışmalarımızı birlikte sürdürdüğümüz ve eğlenceli vakitler geçirdiğimiz Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamlayan sayın Kürşat EKİZ'e destekleri için çok teşekkür ederim. Tez izleme jürisinde değerli bilgileri ve yönlendirmeleri ile destek olan sayın hocalarım Prof. Dr. Mehmet Mahir BÜLBÜL'e ve Prof. Dr. Celal BAYRAK'a teşekkürlerimi sunarım. Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Gaz Sensörleri Laboratuvarı'nda akım-voltaj (I-V) ile kapasitans-voltaj (C-V) ölçümlerini alabilme imkânı sağlayan ve çalışmalarımında desteğini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Selim ACAR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu ölçümlerin alınmasında destek olan sayın Araş. Gör. Ali Orkun ÇAĞIRTEKİN'e teşekkür ederim. Termal buharlaştırma sisteminde alttaş kristaline omik ve Schottky kontakların oluşturulmasında destek veren Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ve bu süreçlerin gerçekleştirilmesinde emeği bulunan sayın Öğr. Gör. Halil İbrahim EFKERE'ye, çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) solüsyonlarının hazırlanması ve alttaş kristaline kaplanması süreçlerinde destek olan sayın Doç. Dr. Ersin DEMİR'e ve sayın Prof. Dr. Recai İNAM'a, SEM ve Raman Spektroskopisi ile MWCNT'lerin yüzey karakterizasyonlarının incelenmesinde katkıları bulunan Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı'nda görevli sayın Öğr. Gör. Dr. Polat NARİN'e teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışmam boyunca sabır ve anlayış göstererek desteklerini her zaman yanımda hissettiğim, moral ve motivasyon kaynağım sevgili eşim Aslıhan Kıymet EZGİN'e ve biricik oğlum Akif Berk EZGİN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KURAMLAR.....	7
2.1. Schottky Diyotlara Tarihsel Bakış	7
2.2. Metal-Yarıiletken (MY) Kontaklar	10
2.2.1. Schottky (doğrultucu) kontak	11
2.2.2. Omik (doğrultucu olmayan) kontak	14
2.3. Schottky Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları	15
2.3.1. Termiyonik emisyon (TE)	16
2.3.2. Tünelleme	17
2.3.3. Yük taşıyıcılarının üretimi ve rekombinasyonu	18
2.3.4. Yarıiletkenin nötr bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu	19
2.4. Schottky Diyotlarında İdeal Olmayan Durumlar	20
2.5. Bariyer Potansiyelini Etkileyen Faktörler	21
2.5.1. Arayüz tabakası	21
2.5.2. Yüzey durumları	23
2.5.3. Görüntü kuvvetinin azaltılması	23
2.5.4. Metal kaynaklı boşluk durumları (MIGS).....	25
2.6. Sıcaklığın İdealite Faktörü Üzerine Etkisi	26

Sayfa

2.7. SiC Yarıiletkeninin Özellikleri.....	27
2.8. Karbon Nanotüplerin Özellikleri.....	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM	35
3.1. Kimyasal Temizleme.....	35
3.2. Omik Kontak Oluşturma	36
3.3. Arayüz Malzemenin Hazırlanması ve Yarıiletken Yüzeyine Kaplanması.....	37
3.4. Schottky Kontaktların Oluşturulması	38
4. DENEYSEL BULGULAR	41
4.1. Diyotun Yapısal Karakterizasyonu	41
4.2. Akım-Voltaj Karakteristiği	43
4.3. Elektriksel Parametreler	48
4.4. Kapasitans-Voltaj Karakteristiği	54
4.5. Arayüzey Durum Yoğunluğu	58
4.6. MWCNT/n-6H-SiC Schottky Bariyer Diyot Yapısı Üzerine Değerlendirmeler ..	60
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	77

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. SiC ve benzer yapıdaki malzemelere ait çeşitli fiziksel ve elektriksel özellikler.....	30
Çizelge 2.2. Farklı duvar sayısına sahip karbon nanotüplerin elektriksel, mekanik ve termal özellikleri	34
Çizelge 4.1. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için TE modeli ile sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan I_0 , n ve Φ_{b0} değerleri.....	46
Çizelge 4.2. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için Cheung-Cheung yöntemiyle hesaplanan R_S , n ve Φ_{b0} değerleri.....	50
Çizelge 4.3. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için Norde yöntemiyle hesaplanan R_S ve Φ_{b0} değerleri.....	51
Çizelge 4.4. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun ters beslem durumunda ve 300-480 K sıcaklıkları arasındaki C^{-2} -V eğrilerinden hesaplanan elektriksel parametreler	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal ve n-tipi yarıiletkenin (a) kontak oluşturmadan önceki ve (b) kontak oluşturduktan sonraki şematik enerji bant diyagramları	11
Şekil 2.2. Metal ve n-tipi yarıiletkenin (a) ileri beslem ve (b) ters beslem durumlarında şematik enerji bant diyagramları	13
Şekil 2.3. İş fonksiyonları arasında $\Phi_S > \Phi_M$ ilişkisi olan n-tipi bir yarıiletken ile metalin oluşturduğu omik kontak (a) öncesi, (b) sonrası, (c) ileri beslem ve (d) ters beslem durumlarının şematik enerji bant diyagramları	15
Şekil 2.4. İleri beslem durumunda Schottky diyotların akım iletim mekanizmaları	16
Şekil 2.5. İnce yalıtkan arayüz tabakalı MY kontağın ileri beslem durumundaki enerji bant diyagramı	22
Şekil 2.6. İnce yalıtkan arayüz tabakalı MY kontağın ileri beslem durumundaki enerji bant diyagramı	25
Şekil 2.7. Farklı akım iletim mekanizmaları için idealite faktörünün sıcaklıkla değişiminin teorik gösterimleri	27
Şekil 2.8. En yaygın SiC politip yapılarına ait gösterimler.....	29
Şekil 2.9. Tek ve çok duvarlı CNT yapılarına ait gösterimler	31
Şekil 2.10. CNT'lerin (a) zikzak, (b) kiral ve (c) koltuk dizimleri	32
Şekil 3.1. Deneysel üretim aşamaları ve Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun kesitsel görünümü	39
Şekil 4.1. (a) n-6H-SiC yarıiletkeni üzerine kaplanmış MWCNT'lerin SEM görüntüsü (b) dolanık hâlde ve rastgele dağılmış MWCNT'ler (c) dış çapı 17-22 nm arasında değişen MWCNT'ler (d) yarıiletken üzerine kaplanan ortalama 200 nm kalınlığa sahip MWCNT arayüzey tabakanın kesitsel görünümü	41
Şekil 4.2. n-6H-SiC yarıiletkeni üzerine kaplanmış MWCNT malzemesine ait Raman spektrumları	42
Şekil 4.3. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300-480 K sıcaklıkları arasındaki ileri ve ters beslem durumları için yarı-logaritmik I-V grafiği	45
Şekil 4.4. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300-480 K sıcaklıkları arasında sıfır beslem durumunda sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve bariyer yükseklikleri.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun oda sıcaklığındaki $dV/d(\ln I)$ 'ya karşı akım grafiği.....	49
Şekil 4.6. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun oda sıcaklığındaki $H(I)$ 'ya karşı akım grafiği.....	49
Şekil 4.7. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300-480 K sıcaklıkları arasındaki $F(V)$ 'ye karşı voltaj eğrileri.....	51
Şekil 4.8. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için belirlenen Richardson grafiği.....	53
Şekil 4.9. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için 300-480 K sıcaklıkları arasında sıfır beslem durumunda idealite faktörüne karşı bariyer yüksekliği.....	54
Şekil 4.10. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300 K sıcaklığında farklı frekanslar için ölçülen C-V özellikleri.....	55
Şekil 4.11. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun ters beslem durumunda ve 300-480 K sıcaklıkları arasındaki $C^{-2}-V$ eğrileri.....	56
Şekil 4.12. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için 300-480 K sıcaklıkları arasında N_{ss} 'ye karşı $E_c - E_{ss}$ grafikleri.....	59

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Kimyasal temizleme işlemi.....	36
Resim 3.2. Termal buharlaştırma sistemine yüklenen ve omik kontak oluşturulan n-6H-SiC yarıiletkeni.....	37
Resim 3.3. MWCNT çözeltisinin hazırlanması ve damlat kurut yöntemiyle yarıiletken üzerine aktarılması işlemi	38
Resim 3.4 Schottky bariyer diyot yapısının oluşturulması ve diyot ölçümleri	39



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
μL	Mikrolitre
μ_n	n-tipi yarıiletkenin mobilitesi
μ_p	p-tipi yarıiletkenin mobilitesi
ϵ_0	Boşluğun geçirgenliği
\AA	Angstrom veya Ångström
A	Diyot alanı
A^*	Richardson sabiti
D	Carbon nanotüpün dış çapı
D_p	Difüzyon sabiti
D_s	Arayüzey durumlarının yoğunluğu
E_{00}	Tünelleme parametresi
E_C	İletkenlik bandı
E_F	Fermi seviyesi
E_{ss}	Arayüzey durumlarının enerjisi
eV	Elektronvolt
E_V	Valans (değerlik) bandı
E_{vac}	Vakum seviyesi
F	Coulomb çekim kuvveti
$F(V)$	Norde fonksiyonu
h	Planck sabiti
$H(I)$	Cheung-Cheung fonksiyonu
Hz	Hertz
I	Net akım
I_0	Doyma (saturasyon) akımı
I_{MS}	Metalden yarıiletkene geçen elektron akımı
IR	Dirence bağlı voltaj düşüşü
I_{rg}	Rekombinasyon ve üretim akımı

Simgeler**Açıklamalar**

ISM	Yarıiletkenden metale geçen elektron akımı
J_e	Elektron akım yoğunluğu
J_h	Boşlukların akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
m_0	Durgun elektron kütlesi
mA	Miliamper
mbar	Milibar
mL	Mililitre
m_n^*	Etkin elektron kütlesi
n	İdealite faktörü
nm	Nanometre
N_c	İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_d	Donör konsantrasyonu
n_i	Elektron-boşluk çifti sayısı
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
p_0	Denge boşluk konsantrasyonu
q	Elektron yükü
ϵ_r	Dielektrik sabiti
R_s	Seri direnç
ϵ_s	Yarıiletkenin geçirgenliği
T	Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık
V	Uygulama voltajı
V_0	Kesme gerilimi
V_{bi}	Yerleşik bariyer potansiyeli
V_d	Difüzyon potansiyeli
V_R	Ters beslem gerilimi
V_{sat}	Elektronun sürüklenme hızı
V_T	Termal voltaj
W	Tüketim tabakası
W_d	Tüketim katmanının genişliği
x_m	Metalin elektronegatifliği
x_s	Yarıiletkenin elektronegatifliği

Simgeler γ_h δ τ_o χ_s Ω Φ Φ_B Φ_{b0} Φ_e Φ_M Φ_s ξ **Kısaltmalar****C****CNT****C-V****DI****DIGS****DWCNT****FE****FET****FIB****GaAs****H****IC****I-V****LED****MIG****MIGS****MOY****MPY****Açıklamalar**

Boşluk enjeksiyon oranı

Arayüzey tabakanın kalınlığı

Taşıyıcı ömrü

Yarıiletkenin elektron ilgisi

Ohm

İş fonksiyonu

Bariyer yüksekliği

Schottky bariyer yüksekliği

Etkin bariyer yüksekliği

Metalin iş fonksiyonu

Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Yarıiletkenin elektrik alanı

Açıklamalar

Karbon

Karbon nanotüp

Kapasitans-voltaj

Deiyonize su

Düzensizlik kaynaklı boşluk durumları

Çift duvarlı karbon nanotüp

Alan emisyonu

Alan etkili transistör

Odaklanmış İyon Işını

Galyum arsenit

Hidrojen

Entegre devre

Akım-voltaj

Işık yayan diyot

Metal kaynaklı boşluk

Metal kaynaklı boşluk durumları

Metal-oksit-yarıiletken

Metal-polimer-yarıiletken

Kısaltmalar**MWCNT****MY****MYY****PES****RF****RTEM****SB****SBD****SEM****Si****SiC****SWCNT****TE****TFE****Açıklamalar**

Çok duvarlı karbon nanotüp

Metal-yarıiletken

Metal-yalıtkan-yarıiletken

Fotoelektron Spektroskopisi

Radyo frekansı

Çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu

Schottky bariyeri

Schottky bariyer diyot

Taramalı Elektron Mikroskobu

Silikon

Silisyum karbür

Tek duvarlı karbon nanotüp

Termiyonik emisyon

Termiyonik alan emisyonu

1. GİRİŞ

Vakum altında farklı yöntemlerle bir metal ve bir yarıiletkenin kontak edilmesi sonucu metal-yarıiletken (MY) kontaklar ya da Schottky bariyer diyotlar (SBD'lar) üretilmektedir. İleri beslem durumunda düşük voltaj ve yüksek frekans değerlerinde çalışabilen, iletkenlik ile yalıtkanlık durumları arasındaki geçişlere çok hızlı cevap verebilen bir anahtarlama kabiliyetine sahip Schottky yapıların üretimi ve kullanımı günümüz elektronik devre elemanı endüstrisinde hızla yaygınlaşmıştır [1]. Schottky diyotlar, yüksek anahtarlama hızına ihtiyaç duyan bilgisayar ve radyo frekans (RF) devrelerinde, dedektör ve mikrodalga sistemleri gibi yüksek frekanslı sistemlerde, güç kaynağı ve bataryaların hızlı tükenmesini engellemek amacıyla güneş pillerinde, kurşun-asitli bataryalarda ve anahtar modlu güç kaynaklarında bir devre elemanı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [2].

MY yapılar yarıiletken tabanlı devre elemanlarının temelini oluşturmanın yanı sıra, bu alandaki elektronik cihazların daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. MY kontakların arasına arayüz tabaka olarak yalıtkan oksit ve polimer malzemeler kullanılarak Schottky diyotların performansı artırılmaya çalışılmaktadır. Metal ile yarıiletkenin arasında arayüz tabaka olarak yalıtkan kullanıldığında, metal-yalıtkan-yarıiletken (MYI - Metal-Insulator-Semiconductor (MIS)), oksit tabaka kullanıldığında metal-oksit-yarıiletken (MOY - Metal-Oxide-Semiconductor (MOS)) ve polimer kullanıldığında metal-polimer-yarıiletken (MPY - Metal-Polymer-Semiconductor (MPS)) yapılar elde edilmektedir. Metal ile yarıiletken arasında farklı yöntemlerle elde edilen arayüz tabakalar, metali yarıiletkenden izole ettiği gibi her iki yapı arasındaki yük geçişlerinin düzenlenmesine katkı sağlar. Bu yapıdaki kontakların oluşum mekanizmaları ile ilgili olarak çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, metal ile yarıiletken arasında potansiyel bariyerinin oluşumu, bariyeri etkileyen faktörler ve bariyerde etkili olan akım iletim mekanizmaları Schottky bariyer diyotlarının endüstriyel ve teknolojik kullanım alanlarının belirlenmesi açısından önem taşır. Ayrıca Schottky yapıların performansını etkileyen MY kontaklar için yarıiletkenin çeşidi, omik ve Schottky kontak oluşturmada kullanılan metalin türü ve kontağın kalınlığı, arayüz malzeme, arayüz tabakanın kalınlığı, arayüzey durumları, sıcaklık ve seri direnç gibi unsurlar göz önüne alınarak elde edilen elektriksel parametreler Schottky bariyeri üzerindeki akım iletim mekanizmasının veya mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlar.

Nano ölçekte çaplara sahip karbon nanotüp (CNT) malzemeler, karbondan yapılmış ve tüp şeklinde tek boyutlu (1B) nano yapılarıdır. Silindirik şekilde yuvarlanmış grafen levhalar olarak tanımlanırlar. Bu levhalar sarmal şekilde ve altıgen benzeri bir ağ yapısına sahiptir. Grafen levhalar CNT'leri oluşturmak üzere yuvarlandığında, sadece silindirik şekiller etrafında düzenlenen karbon atomları değil, aynı zamanda elektronların kuantum mekaniksel dalga fonksiyonları da uyumlu bir şekilde düzenlenir. Karbon katman sayısı göz önüne alındığında tek, çift ve çok duvarlı bir yapıya sahip olabilirler. Tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler), genellikle altıgen olarak paketlenmiş demetlerden oluşan tek bir grafen katmanından oluşur. MWCNT'lerde grafen levhalar iki veya daha fazla silindirik yapıdan oluşur [3]. MWCNT'ler, kovalent olmayan van der Waals kuvvetleri tarafından farklı duvarlardaki karbon atomları arasında hareket edebilen bir ara katmana sahip iki veya daha fazla SWCNT'den oluşan bir yapıya sahiptir. Kimyasal olarak CNT'ler kenarlar ve yan duvarlar olarak iki bölgeye ayrılabilir. Moleküler yöne bağlı olarak, yuvarlanan grafen tabakası koltuk, zikzak ve kiral olmak üzere üç farklı şekle sahiptir [4]. Karbon atomları arasındaki bağların doğası gereği, CNT'ler ultra hafif, düşük yoğunluklu, yüksek elastikiyet, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek termal iletkenlik ve özel elektronik yapılara sahiptir [5]. Bu ilginç fiziksel ve kimyasal özellikler, CNT'leri elektronik, malzeme bilimi, optik, nanoteknoloji, biyoteknoloji, sağlık ve ilaç gibi çeşitli alanlarda değerli kılmaktadır. Karbon nanotüpler çok iyi elektriksel özelliklere sahip olduğundan, yüksek performanslı diyotlarda, alan etkili transistörlerde (FET'ler), entegre devrelerde (IC) ve sensörlerde kullanılırlar.

Topolojik olarak basit bir yapıya olmasına rağmen, CNT'lerin metalik ve yarıiletken davranışı nanoelektronikte önemli bir araştırma konusu olmuştur. Literatürde CNT/Y heteroeklemler aygıtlar birkaç çalışmada doğrultucu özellik göstermiştir. Liang ve Roth, yüksek katkılı bir GaAs altaş üzerine bir ucu ince bir yalıtkan tabaka ile izole edilmiş bir SWCNT yerleştirerek GaAs/SWCNT heteroeklem yapısı oluşturdu ve bu heteroeklem yapının akım-voltaj (I-V) ölçümlerinden doğrultucu davranış gösterdiği tespit etmiştir [6]. Tzolov ve diğerleri tarafından kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi kullanarak doğrudan n-tipi Si (n-Si) altaşlar üzerinde CNT yapıları üretilmiş ve ileri beslem durumunda belirgin bir doğrultma davranışı elde etmişlerdir [7]. Elde edilen bu sonuç, CNT/Si heteroeklemler yapılarının çeşitli kızılötesi algılama sistemlerindeki potansiyelini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca Kuo ve arkadaşları tarafından CVD yöntemiyle n-Si altaş üzerine CNT yapıları üretilmiş ve uzay yükü bölgesinde sınırlı iletimin sergilendiği doğrultucu bir davranış gözlemlenmiştir. CNT/Y heteroeklemler yapıları için gerçekleştirilen çalışmalar genel olarak

yarıiletken üzerine CNT'lerin yerleştirilmesi veya büyütülmesiyle ilgili olmuştur. Ancak bu çalışmalar, CNT'lerdeki karbon atomları ile yarıiletken malzemelerdeki kurucu atomların arayüzde birbirleriyle atomik bağlar oluşturabildiği CNT/Y heteroeklemlili yapıların elektronik özelliklerinin araştırılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

CNT'lerin diğer malzemelerle oluşturduğu yapıların arayüzey durumları, nano ölçekli elektronik cihazların çalışmasını ve performansını önemli ölçüde etkileyebilir. Ayrıca CNT'ler ile diğer malzemeler arasındaki arayüz yapılarının araştırılması CNT yapıları aygıt veya cihazların geliştirilmesi açısından önemlidir. CNT'lerin ve metallerin arayüzey davranışı üzerine çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen [3-5, 9-11], CNT'ler ve yarıiletken malzemeler arasında kontak oluşturmanın zorluğu, CNT/Y aygıt yapılarının ayrıntılı analizini engellemektedir [12]. Ayrıca CNT/Y yapısına sahip Schottky bariyer diyotlarının (SBD) elektriksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak analiz edildiği çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır. Chen ve Lue tarafından alan emisyon çalışmaları için sıcaklığa bağlı olarak hizalanmış MWCNT arayüzlü bariyer yüksekliğinin değişimi araştırılmış ve MWCTN'lerin 20-300 K sıcaklıkları arasındaki alan emisyon akımlarının değişimine duyarlı olmadığı rapor edilmiştir [13]. Bu çalışmada, sıcaklığın azalması sonucu metalik MWCNT'lerden yüzeye daha az elektronun aktığı, buna bağlı olarak Fermi enerjisi seviyesinin arttığı ve dolayısıyla arayüzdeki bariyer yüksekliğinin azaldığı belirlenmiştir. Maruyama ve arkadaşları, CNT/n-6H-SiC heteroeklem yapısının arayüzündeki enerji bandı hizalanmasını fotoelektron spektroskopisi (PES) kullanarak incelemişlerdir [12]. PES sonuçlarına göre, Schottky bariyerinin heteroeklem yapının arayüzeyinde olduğu ve oda sıcaklığında bariyer yüksekliğinin 1,38 eV olduğu belirtilmiştir. Uchino ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, 50-300 K sıcaklık aralığında SWCNT/Si heteroeklemlili diyot yapısının elektriksel taşıma karakterizasyonları incelenmiş ve 150 K'de arayüzdeki bariyer yükseklikleri 0,3 ile 0,5 eV arasında olduğu tespit edilmiştir [14]. Inaba ve arkadaşları, farklı katkı konsantrasyonlarında SiC alttaşın üzerine büyütülen Ti/CNT/SiC yapısı için Schottky bariyer yüksekliklerini araştırmışlardır [15]. Yapılan çalışmada, kontak direncinden elde edilen bariyer yüksekliklerinin 0,40-0,45 eV arasında değiştiği bildirilmiştir.

Schottky bariyer yüksekliğinin düşük ve yüksek olması farklı elektronik cihaz uygulamaları açısından anlamlıdır. Örneğin, kontak direncini azaltan ve iyi bir açma/kapama oranına sahip olan transistör uygulamalarında düşük bir yüksekliğe sahip Schottky bariyerleri tercih edilirken, yüksek frekanslı ve iyi doğrultma özelliklerine sahip sensör uygulamalarında

yüksek bir bariyer yüksekliği gerektirir. CNT/Y heteroeklemler Schottky aygıt yapılarının elektriksel davranışı üzerine yapılan çalışmalar, Schottky diyot parametreleri ve karbon nanotüplerin ve diğer malzemelerin arayüzündeki iletkenlik mekanizmaları hakkında bilgi sağlar. Buna ilaveten, Schottky bariyer diyotların elektriksel özelliklerinin sadece oda sıcaklıklarında yapılan ölçümleri, arayüzde meydana gelen Schottky bariyerinin doğası, özellikleri ve iletim işlevi hakkında kapsamlı bir bilgi sağlamamaktadır. Bu bağlamda, SBD'lerin sıcaklığa bağlı elektriksel ölçümleri, bu yapıların iletkenlik özellikleri hakkında farklı bir bakış açısı sağlar. Ayrıca oluşturulan aygıt yapılarının akım ve sıcaklık arasındaki ilişkisi Schottky bariyerinin varlığını ve etkisini ortaya koyar. Bu bağlamda, bir Schottky bariyerinde termal olarak aktive edilen akım, sıcaklıkla artış gösterir.

Bu tez çalışmasında, hem endüstriyel hem de akademik açıdan ilgi çekici konulardan biri olan çok duvarlı karbon nanotüp arayüzlü Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun deneysel olarak üretilmesi, üretilen diyotun akım iletim mekanizmasının ve elektriksel parametrelerinin 300-480 K sıcaklıkları arasında incelenmesi amaçlanmıştır. Düşük boyutlu malzemeler, elektronik endüstrisinde büyük ilgi görmekle birlikte, günümüzde kapsamlı bir şekilde çalışılmaktadır. Literatürde özellikle SWCNT'ler ile Si heteroeklem yapılarına yönelik uygulamalar geniş bir şekilde incelenmiştir [14,16-18]. Çok duvarlı karbon nanotüpler tek duvarlı karbon nanotüplerden daha yüksek elektrik iletkenliğine sahip olduklarından, çok duvarlı karbon nanotüplerin elektriksel özelliklerini heteroeklemler yapılar için uygun şekilde tasarlaması karbon nanotüp esaslı elektronik ve optoelektronik cihazların performansını artırabildiği görülmüştür [18]. Çalışma kapsamında, n-6H-SiC tabanlı yarıiletken ile çok katmanlı karbon nanotüp arayüzlü Schottky diyotlarının üretilmesi ve bu diyotların arayüz yapılarını etkileyen parametrelerin oda sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklarda incelenmesi, literatürde bu konuda ortaya çıkan eksikliğin giderilmesinde önemli katkılar sağlayacaktır.

Beş bölümden oluşan bu tez çalışmasının giriş bölümünde; yapılan araştırmanın amacına, önemine ve literatürdeki boşluğu nasıl dolduracağına ilişkin bilgiler verilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, metal-yarıiletken kontaklarda Schottky bariyerinin oluşumu, kontak bölgesinde oluşabilecek akım iletim mekanizmaları, Schottky diyotlarında ideal durumdan sapmalar ve bariyer potansiyelini etkileyen faktörler kuramsal olarak sunulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında Schottky bariyer diyot oluşturulmasında alttaş malzeme olarak kullanılan SiC yarıiletkeni ile MWCNT arayüz malzemenin elektriksel, mekanik ve termal

özelliklerine ilişkin bilgilendirmeler yapılmıştır. Üçüncü bölümde, Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun üretim aşamalarına ilişkin deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, üretilen Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun yapısal karakterizasyonuna, baskın akım iletim mekanizmasına, sıcaklığa bağlı akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçümlerinden elde edilen verilerin çeşitli yöntemlerle hesaplandığı elektriksel parametrelere ilişkin bulgulara yer verilmiştir. Tezin son bölümünde, elde edilen bulgulara ilişkin ulaşılan sonuçlara yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.





2. GENEL KURAMLAR

Tezin bu bölümünde, metal-yarıiletken kontaklarda bariyer oluşumu, akım iletim mekanizmaları, diyotun elektriksel parametrelerini etkileyen ideal durumdan sapmalar ve Schottky bariyer potansiyelini etkileyen faktörler ile ilgili teorik bilgilere yer verilmiştir. Bunlara ilaveten, çalışma kapsamında üretilen Schottky bariyer diyotun alttaş ve arayüz malzemelerinin mekanik, elektriksel ve termal özellikleriyle ilgili bilgiler sunulmuştur.

2.1. Schottky Diyotlara Tarihsel Bakış

Metal-yarıiletken (MY) kontakların ilk doğrultucu davranışı 1874 yılında Alman fizikçi Ferdinand Braun tarafından rapor edildi. Braun, ince metal teller ile kurşun sülfür benzeri sülfür kristalleri arasındaki nokta temasları incelerken bu davranışı gözlemledi [19]. Daha sonra, Si ve Ge gibi birçok elementin aynı doğrultucu davranışı gösterdiği ortaya konuldu. İletim mekanizmasının belirsizliğine rağmen, Hertz'in radyo dalgalarının varlığını doğruladığı 1887 yılına kadar bu deneyler sınırlı bir ölçüde devam etti. Başlangıçta, bu dalgalar, RF akımları tarafından uyarıldığında iletim sağlayan ancak zayıf bir temasa sahip koherer adı verilen bir cihaz (vakum tüplerinde kullanılan bir tür detektör) kullanılarak algılandı. Ancak bu cihazın kullanım zorluğu ve zayıf hassasiyeti nedeniyle yeni dedektörlere ihtiyaç duyuldu. 1898'de Braun nokta kontak doğrultucusunu karbon elektrot kıvılcım aralığı dedektöründe yüksek hassasiyetli bir cihaz ile ölçmeyi başardı [20]. Bunun üzerine, Braun kablosuz iletişim üzerine deneylerine başladı ve 1901'de yarıiletken doğrultucular kullanarak kablosuz sinyalleri toplamayı başardı [21]. 1904'te bu alanda çalışmalar yapan Sir J. Bose, nokta metal yarıiletken doğrultucular üzerine ilk patenti aldı [22]. Kontak, radyo sinyallerini algılamak için bir galenit kristaline hafifçe dokunan ince bir telden yapılmıştır. Bu buluş, kablosuz iletişimde bir sıçrama yaptı ve kablolu iletişimden kablosuz iletişime geçişin yolunu açtı. 1906'da Pickard, silikonun kullanıldığı bir nokta kontak doğrultucu geliştirdi ve kristallerde tek taraflı iletimi açıklamadan önce bazı ek verilere ihtiyaç olduğunu belirtti [23]. 1907'de yarıiletken üzerinde çeşitli püskürtme yöntemleriyle yüzeyde biriktirilen metallerin de doğrultucu özellikleri rapor edildi [24]. 1909 yılında ise Braun ve Marconi kablosuz telgraf ile Nobel Ödülü'nü aldı [25]. İlerleyen zaman diliminde, mevcut nokta temaslı doğrultucuların yerine plakalı doğrultucular kullanıldı ve icat edilen bakır oksit doğrultucunun patenti alındı [26]. 1915'te İsveçli bilim

insanı Carl Benedicks, bazı nadir elementlerin özellikleri üzerine yaptığı çalışmada, platin ve bakır kullanarak nokta kontaklı doğrultucular üretmek için germanyumu kullandı [21].

1929 yılına gelindiğinde, bakır ile bakır oksit ara yüzeyindeki dar blokaj katmanları boyunca voltaj düşüşü, Alman bilim adamı Walter Schottky ve arkadaşları tarafından gösterildi. [27,28]. C-V ölçümleri kullanılarak, bu tüketim tabakasının genişliği 3×10^{-5} cm olarak hesaplandı ve bu tabaka paralel plakalı kondansatör olarak modellendi. Ayrıca, bu çalışmada yarıiletken nüfuz eden negatif yüklü bir yüzey tabakasının olduğu sonucuna da varıldı. 1931 yılında, Schottky ve arkadaşları metal ve yarıiletken kontakların doğrultucu etkisini anlamaya ve netleştirmeye yönelik ilk adımı atarak doğrultucu kontakların potansiyel bir bariyer (engel) olduğunu gösterdi [27,29]. Kontak boyunca yarıiletkenden metale elektron akışı esnasında voltaj düşüşünden dolayı metal ve yarıiletken arayüzünde potansiyel bir bariyer oluşumu kanıtlandı. Bu nedenle, metal ve yarıiletken kontaklar Schottky diyot olarak adlandırıldı.

1938'de hem Schottky hem de Mott potansiyel bariyer oluşumunun arkasındaki mekanizmaya ilişkin bağımsız açıklamalar getirdiler [28,30]. Ayrıca bariyerin yüksekliğini ve şeklini bulmak için modeller önerdiler. Schottky-Mott modeline göre, bariyer yüksekliği MY kontağın arayüz özellikleri dikkate alınmadan metalin ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir. 1942'de Bethe tarafından MY kontak yapısının anlaşılmasına yönelik, termiyonik emisyon (TE) teorisi ortaya konuldu. Bu teori, elektronların bariyer üzerinden iletimini içeren bir akım iletim mekanizması olarak ifade edildi [31]. Deneysel ölçümler Schottky-Mott modelinden bir sapma göstermiş ve bazı yarıiletkenler için bariyer yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız sadece yarıiletkenin bir fonksiyonu olduğu bulundu. Gözlemlenen bu sapmayı açıklığa kavuşturmak için birçok teori ortaya atıldı. Bu teorilerin çoğu, MY arayüzünde Fermi seviyesinin konumunu sabitleyen yarıiletkenin bant aralığında arayüz durumlarının varlığını içeriyordu. İlk olarak, 1947 yılında Bardeen tarafından "yüzey durumları teorisi" ortaya konuldu [32]. Bu teoriye göre, bariyer yüksekliğinin belirlenmesindeki sapma, yarıiletkenin askıda duran bağlarından kaynaklanan yüzey durumlarının varlığına bağlanmıştır. Yüzey durum teorisinden sonra, çok çeşitli ve çoğu zaman belirsiz deneysel çalışmalar ortaya çıktı. III-V yarıiletkenlerin aksine, silikon kontaklar Schottky modeliyle çok iyi bir uyum göstermiştir. 1963 yılında Archer ve Atalla'nın bölünmüş silikon yüzeyleri kullanarak oluşturduğu Au/Si kontakları üzerindeki deneysel sonuçlar, Schottky tarafından önerilen teori ile iyi bir uyum gösterdi

[33]. 1964'te Mead ve Spitzer'in bölünmüş III-V yarıiletken yüzeyleri kullanan çeşitli metal-yarıiletken sistemleri üzerinde yaptıkları çalışma, yüzeydeki Fermi seviyesinin konumunun metal iş fonksiyonundan bağımsız olduğunu ve değerlik bandının sınırından enerji aralığının neredeyse üçte birine eşit olduğunu gösterdi [34]. Aynı yıl, Crowell ve Sze Au/Si kontakları üzerine yaptıkları çalışmada, bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağımlılığının silikon enerji aralığının sıcaklığa bağımlılığı ile aynı olduğunu gözlemlediler [35]. Ayrıca metal-yarıiletken eklemesindeki Fermi seviyesinin değerlik bandı sınırına göre sabitlendiğini de gösterdiler. Bu iki bulgu, 1965 yılında Cowley ve Sze tarafından teorik olarak desteklendi ve deneysel sonuçlardaki çelişki metalin yarıiletken yüzeyine büyütmeden önce yarıiletkene uygulanan yüzey işlemine atfedildi [36]. Cowley ve Sze, metal iş fonksiyonunun bariyer yüksekliği bağımlılığı, yüzey durumlarının yoğunluğu ve arayüzey tabaka kalınlığı için teorik bir ifade türetti. Aynı yıl, Heine tarafından "metal kaynaklı boşluk durumları" (Metal-Induced Gap States - MIGS) teorisini ortaya attı [37]. Bu teoride, metalin iletkenlik bandının yarıiletkenin enerji boşluğu ile örtüşmesi nedeniyle arayüzey durumlarının oluştuğu varsayılmaktadır. Bu boşluk durumları, Fermi seviyesini sabitler ve yarıiletken yüzey durumlarını değil, MY eklemesinin özelliklerini kontrol eder. Bu model 1976'da Louie ve Cohen tarafından deneysel olarak doğrulandı [38].

Bir diğer önemli teori olan "birleşik kusur modeli" (Unified Defect Model - UDM), Spicer ve arkadaşları tarafından tanıtıldı [39]. Metalizasyon işlemi nedeniyle doğal kusurların oluşumunu ve bu kusurların ayırık yüzey durumlarında Fermi seviyesinin sabitlenmesini önerdi. 1986'da Hasegawa ve Ohno, kesikli kusur seviyeleri yerine, bant boşluğunda yüzey durumlarının sürekliliğini varsayarak, düzensizlik kaynaklı boşluk durumları (Disorder Induced Gap States - DIGS) teorisini sundu. Bu süreklilik durumlarının, metalizasyon esnasında yarıiletken yüzeyinin kristal mükemmelliğinde bir bozulma nedeniyle uyarıldığı öne sürüldü. 1993 yılında Raymond Tung tarafından uygulanan epitaksiyel MY kontakların deneysel ve teorik çalışması, arayüz yapısındaki herhangi küçük bir değişikliğin bariyer yüksekliğinde $E_g/3$ 'ten fazla bir varyansa yol açtığı gösterildi [40]. Tung tarafından önerilen bu bulgu, birkaç deneysel çalışma ile kanıtlandığı gibi epitaksiyel olmayan MY kontakları üzerinde homojen olmayan bir bariyer oluşturma olasılığını ifade eder. Polikristal kontaklarda bariyer homojensizliğinin varlığı ilk olarak 1980'li yıllarda farklı çalışmalarda ifade edildi. 1999'da Fowell ve arkadaşları, Au/n-CdTe kontaklarında balistik elektron emisyon mikroskobu kullanarak nano ölçekli Schottky bariyerlerini uzaysal olarak haritalandırdı. Genel olarak, polikristal arayüzlerin balistik elektron emisyon

mikroskobunda gözlemlenen bariyer yüksekliklerinde artan ve azalan bariyer yüksekliklerinin yamalarının oluşumunu gösteren Gauss dağılımlarını sergilediği bulundu [41]. 2000 yılında, polikristal arayüzlerde bariyer homojensizliğinin gözlemine ve tek kristal arayüzde Schottky bariyer yüksekliğinin arayüz-yapı bağımlılığını açıklayabilen “bağ polarizasyon teorisi” olarak bilinen Schottky bariyer oluşumu ile ilgili başka bir teori Tung tarafından ortaya konuldu [42]. Metal ve yarıiletken arasında bir arayüzey kimyasal etkileşimini varsayan polarizasyon teorisi, MY arayüzünde yükün yeniden dağılımına neden olmaktadır. Polarizasyon etkisinden dolayı oluşan bariyer, biraz da metalin iş fonksiyonuna bağlıdır ve bu reaksiyondan elde edilen polarize kimyasal bağlar Fermi seviyesinin sabitlenmesinden sorumludur. Polikristal kontaklar için, MY kontaklarında homojen olmayan bir etkileşimin homojen olmayan bir bariyer ile sonuçlandığı ifade edilmektedir.

Schottky bariyeri (SB) üzerine yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu, MY arayüzünün benzersiz bir konumda Fermi seviyesinin sabitlendiğini varsaymaktadır. Epitaksiyel MY arayüzleri üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, Fermi seviyesinin sabitlenmediğini ve arayüz yapısının Schottky bariyer yüksekliğini şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, çeşitli MY arayüzlerinde Schottky bariyer yüksekliği varyasyonlarının derecesinin incelenmesi, SB modelleri açısından açıklayıcı olabilir. SB deneylerinde gözlemlenen anormalliklerin çoğu, Schottky bariyer yüksekliğinin homojen olmaması veya homojensizliği ile açıklanmaktadır.

Sonuç olarak, Schottky diyotların bariyer yüksekliği metal, yarıiletken ve atomik arayüz yapısının bir fonksiyonudur. Kontak özellikleri üzerinde etkili olan üretim süreci, yüzey kusurları ve yüzey durumlarında meydana gelen yerel bozulmalar nedeniyle atomik arayüz yapısına daha fazla karmaşıklık katabilir. Bu nedenle, günümüzde MY arayüzü atomik özellikleri hakkında elde edilebilecek olan her tür bilgi ve çalışma, Schottky bariyer oluşum mekanizmasının anlaşılmasına önemli katkılar sağlayabilir.

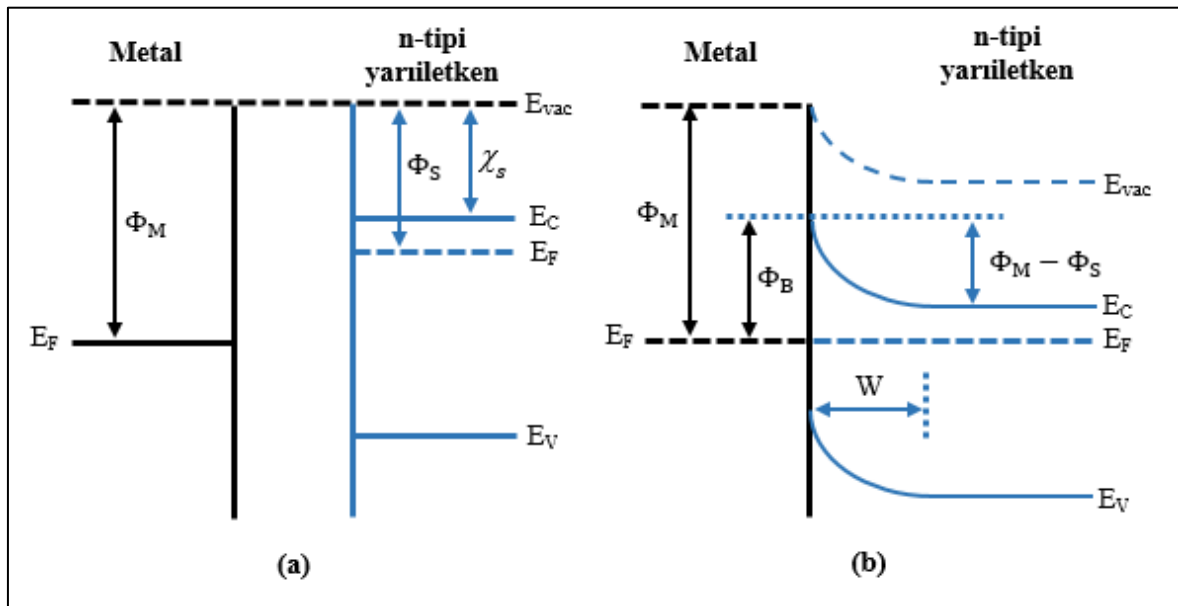
2.2. Metal-Yarıiletken (MY) Kontaklar

Vakum altında farklı yöntemlerle metal ve yarıiletken yapıların kontak edilmesi sonucu, elde edilen aygıt yapısı Schottky (doğrultucu) veya omik (doğrultucu olmayan) kontak davranışı sergiler. Kontak yapısının doğrultucu veya omik olmasında, kullanılan yarıiletken malzemenin türü (n-tipi veya p tipi olması), metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonları, metalin

yariletkene nüfuz etmesi gibi durumlar etkili olmaktadır. Doğrultucu kontaklar, ileri beslemde tek bir yönde akım geçirir ve ters yöne doğru yüksek direnç göstererek akımın zıt yönde akmasını engeller. Buna ilaveten, doğrultucu kontaklar uygulanan voltajın polaritesini değiştirirken, doğrusal olmayan bir akım-voltaj (I-V) karakteristiği sergiler. Diğer taraftan, omik kontaklar uygulanan voltaj polaritesinden bağımsız şekilde doğrusal bir I-V karakteristiği gösterir. Omik kontakların bu şekilde bir davranış göstermesi, akımın her iki beslem yönünde kolayca ve eşit şekilde geçmesine izin veren düşük bir kontak direncini gerektirir. Metal ve yariletkenlerin bir araya geldikten sonra oluşan doğrultucu veya omik kontaklar elektronik cihazların performansı açısından kilit bir rol oynamaktadır.

2.2.1. Schottky (doğrultucu) kontak

Schottky-Mott modeline göre, metal ile yariletkenin iş fonksiyonları arasında ortaya çıkan fark potansiyel bariyer yüksekliğidir. İş fonksiyonu (Φ), bir elektronu malzeme yüzeyinden vakum seviyesine (E_{vac}) taşımak için gereken olan enerji miktarıdır. Metalin iş fonksiyonunun yariletken malzemeden büyük olması durumunda ($\Phi_M > \Phi_S$) n-tipi bir yariletken, küçük olması durumunda ($\Phi_M < \Phi_S$) ise p-tipi bir yariletken ile Schottky kontak oluşturulduğu anlamı taşır. Şekil 2.1’de bir metal ile n-tipi bir yariletkenin Schottky kontak oluşumu öncesi ve sonrasına ait enerji bant diyagramları gösterilmiştir [43,44].



Şekil 2.1. Metal ve n-tipi yariletkenin (a) kontak oluşturmadan önceki ve (b) kontak oluşturduktan sonraki şematik enerji bant diyagramları

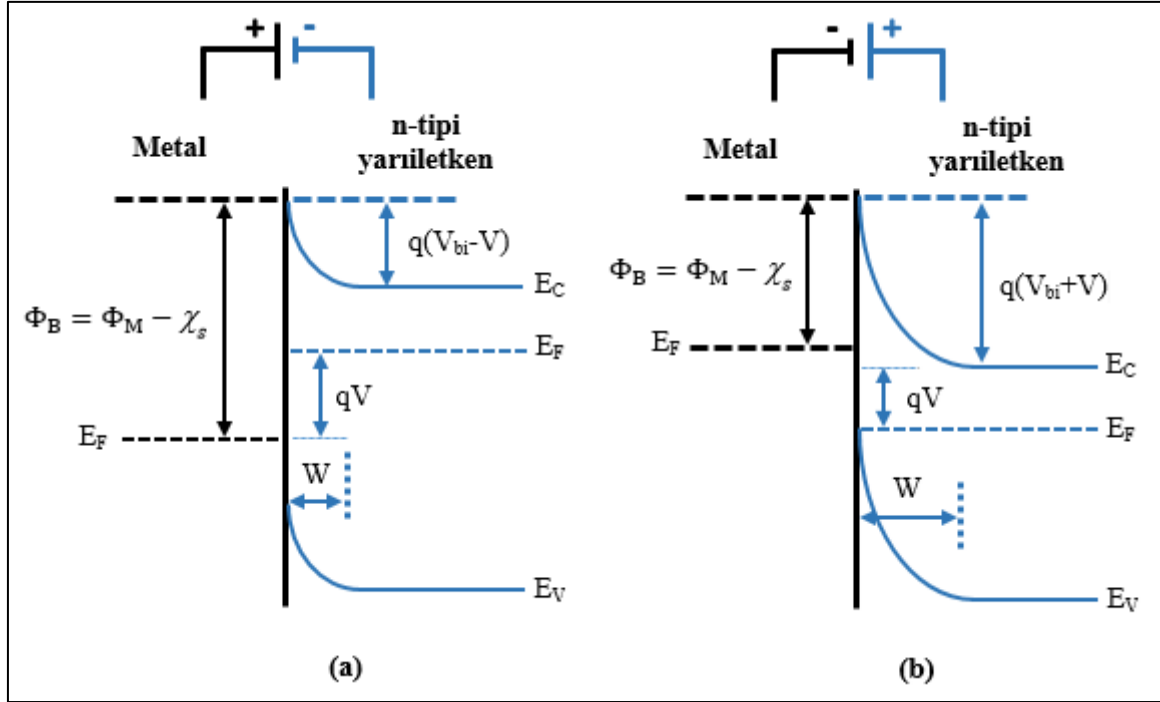
İletkenlik bandının (E_c) alt kenarı ile vakum seviyesi (E_{vac}) arasındaki enerji farkı, yarıiletkenin elektron ilgisi (χ_s) olarak bilinir. Şekil 2.1'de yarıiletken elektronların enerjilerinin, Fermi seviyelerindeki farklılıktan dolayı metal elektronların enerjilerinden daha yüksek olduğu görülür. Metal ve yarıiletken kontakta akım geçmeye başladığında, elektronlar yarıiletkenden metale doğru termal dengeye ulaşılana kadar akar ve bu durum metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri (E_F) hizalanana (veya eşitlenene) kadar devam eder. Elektron akışı, yarıiletkende tüketim tabakası (W) oluşturur (Şekil 2.1(b)). Metalin negatif yüklü uzay yükü bölgesinin genişliği, yarıiletkene kıyasla metaldeki elektronların yüksek yoğunluğu nedeniyle bu ölçekte ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Termal denge durumunda, metal tarafındaki elektronların potansiyel bariyeri,

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi_s \quad (2.1)$$

eşitliği ile verilir. Eş. 2.1'deki Φ_B ifadesi, Schottky bariyer yüksekliğidir. Buna ilaveten, yarıiletkenden metale hareket eden elektronlar, V_{bi} olarak ifade edilen yerleşik potansiyel bariyeri ile karşılaşır. Yerleşik potansiyel bariyeri, metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$V_{bi} = \Phi_M - \Phi_s. \quad (2.2)$$

Şekil 2.1(b) içerisinde bariyer oluşum sürecine ilişkin enerji bant diyagramı açık bir şekilde gösterilmiştir. Termal denge durumunda, yarıiletken ve metalin iş fonksiyonları aynıdır, ancak katkı yoğunluğu ile Fermi seviyesinin değişmesinden dolayı iş fonksiyonu değişken bir niceliktir [44]. Arayüz durumları ve bariyer alçaltma ideal kontaklarda dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle, oluşan bariyerin şekli, uzay yük bölgesindeki yük dağılımından belirlenebilir. Genel olarak, bariyer yüksekliği q/kT olan ısı voltaj değerinden daha yüksektir ve yarıiletkenin mobil taşıyıcılardan tükenen uzay yük bölgesi yüksek bir öz direnç alanına dönüşür. Schottky'nin yaptığı analizde, yarıiletkenin düzgün katkılandığı ve tüketim bölgesinde yük yoğunluğunun eşit dağıtıldığı varsayılmıştır. Artan mesafe ile bu uzay yük bölgesindeki elektrik alan kuvvetinin lineer artışı, uzay yük bölgesinin sınırına yaklaşırken, parabolik bir Schottky bariyeri oluşturur. Termal denge durumunda, elektronların metalden yarıiletkene geçişinden kaynaklanan akım, elektronların yarıiletkenden metale geçişinden kaynaklanan akıma eşittir (Şekil 2.2). Bu nedenle, MY kontakta geçen net akım sıfırdır.



Şekil 2.2. Metal ve n-tipi yarıiletkenin (a) ileri beslem ve (b) ters beslem durumlarında şematik enerji bant diyagramları

Metale göre n-tipi yarıiletkene bir negatif voltaj uygulandığında, MY kontak ileri beslem altındadır. İleri beslemde, tüketim tabakasının genişliği azalır ve yerleşik potansiyelin değeri termal dengedeki qV_{bi} değerinden $q(V_{bi}-V)$ değerine düşer. Bariyer alçalması nedeniyle, yarıiletkenden metale daha fazla elektron kolayca akabilir. Yarıiletkenden metale geçen elektronların akımı,

$$I_{SM} = I_0 \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) \quad (2.3)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eş. 2.3'te yer alan V_T terimi, kT/q ifadesine eşit olan termal voltajdır. k , T ve q terimleri sırasıyla Boltzmann sabitini, Kelvin cinsinden sıcaklığı ve elektron yükünü temsil etmektedir. Schottky bariyer yüksekliği (Φ_B), beslem ile sabit kalır ve I_{SM} değeri, termal dengedeki değeri I_0 ile aynı kalır. Bu nedenle, ileri beslemde kontak boyunca net akım (I) aşağıdaki eşitlik ile verilir:

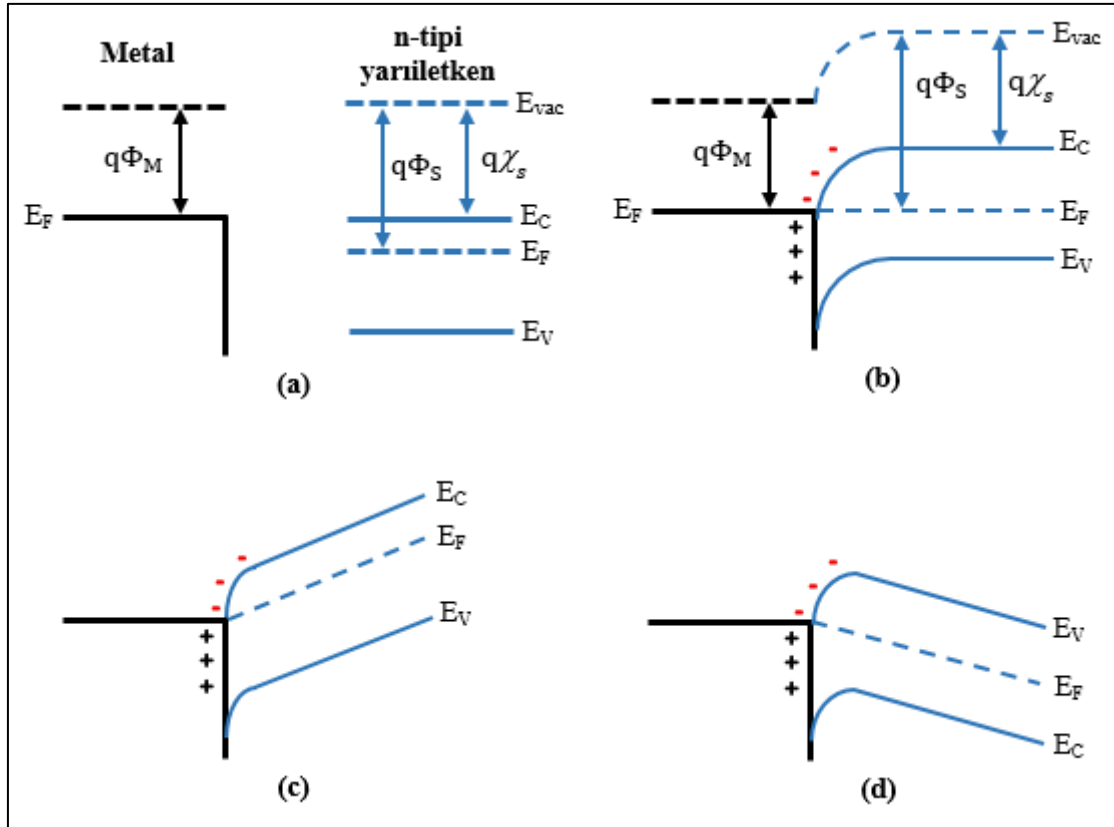
$$I = I_{SM} - I_{MS} = I_0 \exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - I_0 = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right]. \quad (2.4)$$

Metale göre n-tipi yarıiletkene pozitif bir voltaj uygulandığında, kontak ters beslem altındadır. Ters beslemde, tüketim bölgesinin genişliği artar ve yerleşik potansiyelin değeri

termal dengedeki qV_{bi} değerinden $q(V_{bi}+V)$ değerine yükselir. Böylece, yarıiletken den metale doğru hareket eden elektronların önündeki bariyer yüksekliği artar. Bariyer yüksekliği $q(V_{bi}+V)$ değerinden daha düşük olduğundan, yarıiletken den metale elektron taşınmasını durdurmak için yeterlidir. Bu nedenle, yarıiletken den metale elektron akışından kaynaklanan I_{SM} akımı sıfır olur. Bununla birlikte, Schottky bariyer yüksekliği sabit kaldığından metalden yarıiletkene I_{MS} akımı I_0 ile aynı kalır. Özetle, pozitif bariyer yüksekliğine sahip bir MY kontağı, ileri beslem durumunda büyük bir akım iletirken, ters beslem durumunda akımı engelleyerek doğrultucu bir davranış gösterir.

2.2.2. Omik (doğrultucu olmayan) kontak

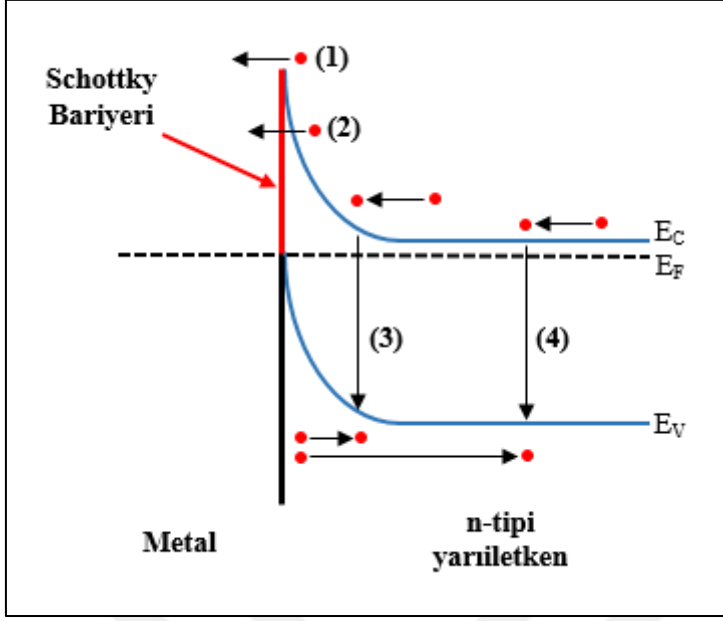
MY kontak oluşturulduktan sonra elektronlar, termal dengeye ulaşılana kadar veya her iki malzemenin Fermi seviyeleri hizalanana kadar metalden yarıiletkene akmaya devam eder. Elektronların iletimi metal yüzeyinde pozitif bir yük oluşmasına ve yarıiletken tarafında elektronların bir katmanda birikmesine neden olur. Burada tüketim tabakası olmadığından akım sadece yarıiletkenin yük bölgesinin direnci ile sınırlıdır. İletkenlik bandında kısa bir mesafede küçük bir bükülme, birçok elektronu akıma katmak için yeterli olacaktır. Bu nedenle, kontak ileri beslem durumunda olduğunda elektronlar yarıiletken den metale kolayca akabilirken, ters beslem durumunda kontağa uygulanan küçük bir voltaj elektronların küçük bariyeri aşmasına ve metalden yarıiletkene akmasına yardımcı olur. Bu şekilde bir MY kontak, yakın doğrusallıkla akımı her iki yönde iletmediği için omik kontak olarak adlandırılır. İş fonksiyonları arasında $\Phi_S > \Phi_M$ ilişkisi olan bir n-tipi yarıiletken ile metalin kontak yapısına ilişkin enerji bant diyagramları Şekil 2.3 içerisinde sunulmuştur. Diğer taraftan, iş fonksiyonlarının $\Phi_M > \Phi_S$ olduğu bir durumda, katkı oranı yüksek bir yarıiletken kullanılarak omik kontak oluşturulabilir. Yarıiletkenin katkı oranı yoğunluğunun artırılması, tüketim tabakasının azalmasına neden olur. Ancak burada omik benzeri bir kontak veya akımın bariyer boyunca termiyonik olarak akmasından ziyade, tünelleme mekanizmasının baskın hâle gelerek bariyer boyunca tünelleme akımını artırması durumu söz konusudur [43,44].



Şekil 2.3. İş fonksiyonları arasında $\Phi_S > \Phi_M$ ilişkisi olan n-tipi bir yarıiletken ile metalin oluşturduğu omik kontak (a) öncesi, (b) sonrası, (c) ileri beslem ve (d) ters beslem durumlarının şematik enerji bant diyagramları

2.3. Schottky Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

Bir Schottky bariyeri boyunca akım iletimi, yarıiletkenden metale doğru hareket eden yük taşıyıcıları aracılığıyla gerçekleşir ve akım iletimi bunun tersi durumlar için de geçerlidir. İleri beslem durumunda, akım iletimi Şekil 2.4 içerisinde gösterilen dört temel mekanizmada meydana gelebilir. Bunlar; (1) bariyer üzerinden akan elektronların termiyonik emisyonu (TE), (2) bariyerden tünelleme, (3) tüketim bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu ve (4) yarıiletkenin nötr bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu şeklinde gerçekleşir. İdeal bir Schottky diyot davranışı, tamamen termiyonik emisyon akımını varsayar. Mevcut diğer akım iletim mekanizmalarının katkısı ideal davranıştan uzaklaşmaya yol açar [43]. Normal düzeyde katkılanmış yarıiletkenlerde termiyonik emisyon oda sıcaklığında baskın akım mekanizması iken, düşük sıcaklıklarda ve ayrıca yoğun katkılı yarıiletkenlerde tünelleme akımı baskındır. Buna ilaveten, bir Schottky diyotta bir akım iletim mekanizması baskın olabileceği gibi, birden fazla akım iletim mekanizması ile akımın iletimi mevcut olabilir, ancak genel olarak bir akım mekanizmasının baskın olduğu durumlar görülür.



Şekil 2.4. İleri beslem durumunda Schottky diyotların akım iletim mekanizmaları

2.3.1. Termiyonik emisyon (TE)

TE teorisine göre, yalnızca potansiyel bariyerinden daha yüksek enerjiye sahip yük taşıyıcıları bariyerin üstünden aşarak diyot akımını üretebileceği varsayılır. Yarıiletkenenden metale yük geçişlerinde, tüketim bölgesindeki elektrik alanının varlığında genel sürüklenme ve difüzyon akımları yoluyla tüketim tabakasından geçmek zorundadırlar. Yük taşıyıcıları arayüze ulaştığında, metaldeki emisyonları arayüz boyunca aktarım hızları ile belirlenir. Bu iki mekanizma seri hâlinededir ve akım iletiminin baskın mekanizması, yük taşıyıcıların iletimine maksimum direnç gösteren mekanizmadır. Uygulanan beslem altında, Schottky diyotlarındaki net akım (I) aşağıdaki gibidir [1]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2.5)$$

Eş. 2.1’de doyma akımı I_0 , elektron yükü q , uygulama voltajı V , Boltzman sabiti k , mutlak sıcaklık T ’dir. Doyma akımının ifadesi;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2.6)$$

ile ifade edilir. Eş. 2.6 içerisinde yer alan A diyotun alanı, A^* Richardson sabiti ve Φ_{b0} bariyer yüksekliğidir. Bu eşitlikte, TE akımı için Richardson sabitinin ifadesi;

$$A^* = \frac{4\pi q k^2 m_n^*}{h^3 m_0} \quad (2.7)$$

şeklindedir. Eş. 2.7’de m_n^* elektronların etkin kütlesi, m_0 vakum seviyesindeki elektronların durgun kütlesi ve h Planck sabitidir. Richardson sabiti, elektron etkin kütesinin vakum seviyesindeki durgun elektron kütlesi oranına bağlı olan yarıiletken malzemenin bir fonksiyonudur. TE modeline göre, ileri beslemde diyot akımı katlanarak artarken, ters beslemde ise voltaj termal enerjiden yaklaşık dört kat daha büyük olduğunda ($V > 4q/kT$) akım doygun hâle gelir [43,45].

2.3.2. Tünelleme

Bariyer yüksekliğinden daha az enerjiye sahip elektronlar, kuantum tünelleme ile bariyerden geçebilir. Kuantum tünelleme, Fermi seviyesinin iletkenlik bandının üzerinde ve potansiyel bariyerin çok daha ince olduğu yoğun katkılı yarıiletkenlerde meydana gelir. Tünel oluşturma, hem ileri hem de ters beslem durumlarında gerçekleşebilir. Düşük sıcaklıklarda, ileri beslem akımı, elektronların Fermi seviyesindeki enerjilerle tünellenmesinden kaynaklanır. Böyle bir mekanizma alan emisyonu (field emission - FE) olarak bilinir. Sıcaklık yükseltildiğinde, önemli sayıda elektron Fermi seviyesinin üzerinde enerji kazanabilir ve elektronlar daha ince bir bariyeri tünelleme ile geçme olasılığı artar. Termal olarak uyarılmış elektronlardan kaynaklanan tünelleme mekanizmasına termiyonik alan emisyonu (thermionic field emission - TFE) adı verilmektedir. Fermi seviyesinin üzerindeki elektron yoğunluğunun ve bariyer yüksekliğinin azalması nedeniyle, elektronların belirli bir enerji seviyesinde maksimum değere ulaşana kadar artan sıcaklıkla tünelleme olasılığı artar. Sıcaklıktaki herhangi bir artış, TFE’nin ihmal edilebilir hâle gelene kadar kademeli olarak azalmasına yol açarken, bariyeri termal olarak geçebilen elektronların sayısının artmasının bir sonucu olarak TE baskın olmaya başlar [43,44]. Tünelleme kaynaklı I-V özellikleri aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [46]:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \quad (2.8)$$

I_0 terimi doyma akımı ifadesidir. Bu terim bariyer yüksekliği, sıcaklık ve yarıiletkenin özellikleri gibi çeşitli faktörlere ve uygulanan gerilime bağlıdır. Eş. 2.8’deki E_0 ifadesi;

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.9)$$

ile verilir. Eş. 2.9'daki E_{00} ifadesi tünelleme parametresidir ve malzeme ile ilgili bir enerji sabitidir. Bu ifade aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \left(\frac{N_d}{m^* \epsilon_s}\right). \quad (2.10)$$

Eş. 2.10 içindeki ϵ_s terimi yarıiletkenin geçirgenliği ve N_d donör konsantrasyonudur. Enerji sabiti E_{00} , tünellemenin ve termiyonik emisyonun katkısını belirlemek için kullanılabilir. Düşük sıcaklıklarda enerji sabiti yüksek bir değer alır ve $kT/qE_{00} \ll 1$ ve $E_0 \cong E_{00}$ olur. Akımın gerilime karşı yarı-log grafiğinin eğimi sıcaklıktan bağımsız olduğu anlamına gelir. Bu durumda, alan emisyonu baskın olan akım iletim mekanizmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda enerji sabiti düşük bir değer alır ve $kT/qE_{00} \gg 1$ ve $E_0 \cong kT$ olur. Bu durumda, akım-voltaj eğrisinin yarı-log grafiğinin eğimi q/kT değerine eşittir. Bu değer, termiyonik emisyon katkısı baskın bir akım iletim mekanizması olduğu anlamına gelir.

2.3.3. Yük taşıyıcılarının üretimi ve rekombinasyonu

Tüketim bölgesinde elektron-boşluk çiftlerinin üretilmesi ve rekombinasyonu (yeniden birleşimi), Schottky diyotların ana akım bileşenine katkıda bulunabilir. Termal dengede, üretilen elektron-boşluk çiftlerinin oranı, onların rekombinasyon hızına eşittir. Üretilen elektron-boşluk çiftinin sayısı n_i^2 'ye eşit olduğunda net akım sıfırdır. Bariyere voltaj uygulandığında üretim hızı n_i^2 'den ayrılır ve beslem yönüne bağlı olarak bir net üretim akımı veya bir net rekombinasyon akımı oluşur. Schottky bariyerine ters bir beslem uygulanırsa, tüketim bölgesinde elektron-boşluk çiftlerinin üretim hızı artar. Bu çiftler, ters akım bileşeni üretimini bariyer boyunca elektrik alanının etkisi altında tüketim bölgesinin dışına enjekte eder. Diyot ileri kutuplandığında, elektronlar yarıiletkenden ve boşluklar metalden tüketim bölgesine akar. Elektronlar, tüketim bölgesinde birikmeleri nedeniyle bir ileri rekombinasyon akımı bileşeni oluşturan boşluklar ile yeniden birleşir. Yani ileri beslemde akım, yük taşıyıcılarının rekombinasyondan kaynaklanırken, ters beslemde akım, yük taşıyıcılarının üretiminden kaynaklanır. Tüketim bölgesindeki toplam üretim ve rekombinasyon akımı şu şekilde verilir [47]:

$$I_{rg} = I_{R0} \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right]. \quad (2.11)$$

Bu eşitlikteki I_{R0} ifadesi,

$$I_{R0} = \frac{qAn_i w}{2\tau_0} \quad (2.12)$$

ile verilir. Eş. 2.12'de tüketim bölgesinin kalınlığı w ve tüketim bölgesindeki taşıyıcı ömrü τ_0 'dır. I_{rg} akımı, MY kontağındaki termiyonik emisyon akımına eklendiğinde idealite faktörünün değeri 1'den büyük olur. Tüketim bölgesindeki yeniden birleşme kaynaklı akımlar, sadece yüksek bariyer yüksekliğine sahip MY kontakları için düşük sıcaklıkta ve hafif katkılı yarıiletkenlerde önemlidir [48, 49].

2.3.4. Yarıiletkenin nötr bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu

Schottky diyotlar çoğunluk yük taşıyıcı aygıtlardır ve özellikle düşük ileri beslem durumunda azınlık yük taşıyıcıları nedeniyle akım ihmal edilebilir bir düzeydedir. Genellikle, MY kontağının bariyer yüksekliği, n-tipi yarıiletkenler için bant aralığının yarısından fazladır. Böyle bir durumda, yarıiletken tarafında metale yakın boşluklar mevcuttur ve yarıiletken p-tipi bir malzeme görevi görecektir. İleri beslem altında, bu boşluklar yarıiletkenin nötr bölgesinde yayılabilir ve yarıiletkenin nötr bölgesinde bulunan elektronlar metale doğru kayabilir. Boşluk enjeksiyonu, yarıiletkenlerin ilk günlerinde incelenmiş ve Henisch tarafından rapor edilmiştir [50]. Enjekte edilen boşluklar, yarıiletkenin nötr bölgesinde bulunan elektronlarla yeniden birleşir. Bu türden bir boşluk akışı, yarıiletkenin değerlik bandından metale doğru boşlukların akışına eşdeğerdir. Bir yarıiletkendeki yarı Fermi seviyesindeki boşlukların metaldeki Fermi seviyesi ile çakıştığı ve tüketim bölgesinin tamamında düz kaldığı varsayılırsa, p-n eklem teorisi kullanılarak boşluğun akım yoğunluğu aşağıdaki gibi verilir:

$$J_h = \frac{qD_p p_0}{w} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (2.13)$$

Eş. 2.11'de J_h boşlukların akım yoğunluğu, p_0 tüketim bölgesinin sınırlarında denge boşluk konsantrasyonu, D_p yarıiletkenin kütesindeki boşluklar için difüzyon sabitidir. Eş. 2.11 kullanılarak boşluk enjeksiyon oranı [50],

$$\gamma_h = \frac{J_h}{J_h + J_e} \approx \frac{J_h}{J_e} = \frac{qD_p n_i^2}{N_d w A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right)}. \quad (2.14)$$

Eş. 2.14’de J_e elektron akım yoğunluğudur. Deneysel ölçümler, γ_h değerinin mA düzeyinde olduğunu ve Schottky diyotların “çoğunluk yük taşıyıcı” aygıtları olarak çalıştığını göstermektedir. Ayrıca, γ_h değeri n_i^2 ’ye bağlı olduğundan, düşük bant aralıklı yarıiletkenlerde enjeksiyon oranı yüksektir.

2.4. Schottky Diyotlarında İdeal Olmayan Durumlar

Schottky diyotlarda deneysel I-V özellikleri hem ileri hem de ters beslem durumlarında TE modelinin ideal durumundan sapar. Bu bağlamda, termiyonik I-V modeli, deneysel verilere uyacak şekilde elde edilir. İdeal Schottky diyot denkleminin üstel terimine Eş. 2.15’te olduğu gibi “idealite faktörü (n)” olarak bilinen bir parametre eklenir [43,44]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]. \quad (2.15)$$

İdeal Schottky diyot için idealite faktörünün değeri 1 olmakla birlikte, yarı-logaritmik I-V grafiğinde bu değer lineer bir değişimin karşılığıdır. İdeal olmayan Schottky diyotta idealite faktörünün değeri 1’den büyük olur ve yarı-logaritmik I-V grafiği lineerlikten sapar. Birçok faktör n değerinin ideallikten sapmasına neden olabilir. Tünelleme, üretim ve rekombinasyon akımları ile diğer akım iletim mekanizmalarının diyot toplam akımına katkısı bu faktörlerden bazıları olabilir. Diğer faktörler, bariyer yüksekliğinin ve görüntü-kuvvet etkisinin besleme bağımlılığına atfedilir [43,44]. Homojen olmayan bariyer teorisine göre, yüksek n değerini uzaysal olarak homojen olmayan bir MY arayüzünde oluşan geniş bir düşük Schottky bariyer yüksekliklerinin dağılımı akım mekanizmasına etki etmektedir [51]. İleri beslemde idealite faktörü arttıkça akımın yoğunluğu azalır. Bir diğer ideal olmayan durum, ters beslemde akımın artmaya devam ettiği ve I_0 akımının doyuma ulaşmadığı durumda olabilir. Ters beslemde doymamış akım genellikle iki ana etki ile açıklanır. Birinci etki, görüntü kuvveti etkisi ya da metal ve yarıiletken arasında ince bir arayüzey tabakasının varlığından kaynaklanan bariyer yüksekliğinin azalmasıdır. İkinci etki, kuantum tünelleme sonucu uygulanan voltaj ile kaçak akım oluşumlarının aşırı artmasıdır.

2.5. Bariyer Potansiyelini Etkileyen Faktörler

Buraya kadar, diyota uygulanan herhangi bir voltajda Schottky bariyerinin yüksekliğinin sabit kaldığı varsayılmıştır. Bununla birlikte, bariyer yüksekliğinin hem ileri hem de ters beslem koşullarında besleme bağlı bir fonksiyon olarak düşünülmüştür. Bazı diyotlarda, yarıiletken yüzeyindeki yüksek elektrik alan (ξ) nedeniyle bariyer yüksekliği azalır [44]. Besleme bağlı bariyer yüksekliği; arayüz tabakası, yüzey durumları, uygulanan beslemin türü ve elektrik alan, görüntü kuvvet azalması, metal kaynaklı boşluk (MIG) durumları gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Tüm bu etkiler, Φ_B 'nin elektrik alan kuvvetinin (ξ) azalan bir fonksiyonu olması gerektiğini tahmin eder. Elektrik alan kuvveti ters beslemde daha yüksektir ve ters voltajın artan bir fonksiyonudur. Bu durum, ters beslem arttıkça Φ_B 'nin azalmasına neden olur. Bu nedenle, ters beslemdeki akım $\exp\left(\frac{q\Delta\Phi_B}{kT}\right)$ şeklinde artmaya devam edecektir.

2.5.1. Arayüz tabakası

MY kontağındaki arayüz tabakası, diyot performansını değiştirebilen bir yalıtkan tabaka görevi görür. Bir arayüz tabakanın varlığında oluşturulan MY kontağının enerji bant diyagramı Şekil 2.5 içinde verilmiştir. Arayüz tabaka enerji bant diyagramını değiştirmedikleri gibi Schottky diyot performansını etkilemektedir. Hem bariyer yüksekliği hem de idealite faktörü bu katmandan farklı şekillerde etkilenebilir. Arayüz tabakanın varlığı, yarıiletkenin elektrik alanı (ξ), arayüz tabaka boyunca potansiyeli (V_i) ve bariyer yüksekliğini değiştirir. Arayüz tabaka boyunca uygulanan voltaj düşüşü nedeniyle, sıfır beslemdeki Schottky bariyer yüksekliği, arayüz katmanı olmadan önceki hâline göre daha düşüktür. Bu nedenle, bir arayüz tabakasının varlığında bariyer yüksekliği şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Phi_B = \Phi_M - x - V_i. \quad (2.16)$$

$\partial\Phi_b/\partial V$ kadar bariyer yüksekliğinde bir değişikliğe neden olur. Bu değişiklik, idealite faktörü cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$n^{-1} = \left(1 - \frac{\partial\Phi_b}{q\partial V}\right). \quad (2.19)$$

Bu eşitlikteki n terimi, yalnızca yarıiletken ve arayüz katmanının enerji durumları düzgün bir şekilde dağılmışsa beslemeden bağımsızdır. Ters beslem durumunda, bir yalıtkan tabakanın varlığında bariyer yüksekliğindeki azalma, ters akımın doygunluğunun engellenmesine yol açar. Bariyer yüksekliğindeki azalma nedeniyle, daha kalın bir arayüz katmanına sahip diyotlar için ters akım, çok ince bir katmana sahip diyotlardan daha yüksek olabilir. Bu durumda, elektronlar yalıtkan bariyerden tünelleme de yapabilir, ancak bariyer azalmasının etkisi daha belirgindir.

2.5.2. Yüzey durumları

Uygulama açısından Eş 2.1'in uygulanamaz olması, MY kontağındaki yüzey durumlarının etkisi temelinde açıklanmıştır [52]. Bant aralığının ortasındaki safsızlık seviyeleri, elektronların kristaldeki kusur veya yabancı safsızlıklar etrafında lokalize olduğu durumları temsil eder. Bu safsızlıklara veya kusur seviyelerine ek olarak, kristal yüzeyinde (sarkan bağlardan dolayı) enerjileri kristalin yasak enerji aralığında bulunan lokalize durumlar da olabilir. Bunlar; yüzeydeki yabancı atomların ve yüzeydeki kusurların neden olduğu yüzey durumlarıdır. Bu yüzey durumlarının enerji seviyeleri, yarıiletkenin yasak bant boşluğunda ayrık veya sürekli olarak dağıtılır. Yüzey durumlarının yoğunluğu çok yüksek ise, lokalize elektronlar nedeniyle yüzey yükünden çift bir katman oluşabilir. Böyle bir durumda, metal ve yarıiletken arasında bir daralma olursa, aralarındaki potansiyel fark, uzay yükü yerine yüzey yükü tarafından telafi edilir ve dolayısıyla bariyer yüksekliği metalin iş fonksiyonundan bağımsız olur [52,53].

2.5.3. Görüntü kuvvetinin azaltılması

Bir metal-yarıiletken kontakta, metalden yarıiletkene bir elektronun enjeksiyonu, metal içinde eşit bir pozitif görüntü yüküne neden olur. Yarıiletken tarafındaki kontak noktasından x mesafesinde bulunan bir elektron, metalin yüzeyine dik olarak elektrik alanı uygular ve elektrik alanın yönü yarıiletkenden metale doğrudur. Bu elektrik alan, MY kontağın metal

tarafında (-x) uzaklıkta bulunan pozitif bir görüntü yükü (+q) varsayılarak hesaplanır. Uyarılmış pozitif görüntü yükü, $F=q^2/16\pi\epsilon_s x^2$ Coulomb çekim kuvveti ile elektronu metale çekme eğilimindedir. Bu çekici kuvvet nedeniyle, yarıiletkendeki elektronun potansiyel enerjisi bir elektrona göre negatiftir ve Schottky bariyer potansiyel enerjisine $-qE_x$ olarak eklenir. Maksimum potansiyel, görüntü kuvveti nedeniyle elektrik alanın ve tüketim bölgesinden kaynaklanan alanın eşit ve zıt olduğu, yani ortaya çıkan elektrik alanının kaybolduğu yerde oluşur. Bu nedenle, bariyer yüksekliği azaltılır ve Eş. 2.20’de verildiği şekilde aşağıda ifade edilir:

$$\Delta\Phi_{bi} = \left\{ \frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_d^2 \epsilon_s} (\Phi_b - V - \xi - \frac{kT}{q}) \right\}^{\frac{1}{4}}. \quad (2.20)$$

Görüntü kuvvetinin etkisi, metalden yarıiletkene geçerken iletilen elektronlarının $\Delta\Phi_{bi}$ ile verilen azaltılmış bir bariyeri algılamasıdır.

$$x_m = \frac{1}{4} \left[\frac{q \epsilon_s}{2\pi^2 \epsilon_d^2 N_d} \right]^{\frac{1}{4}} (\Phi_b - V - \xi - \frac{kT}{q})^{-\frac{1}{4}}. \quad (2.21)$$

Eş. 2.21’de x_m terimi, bariyer yüksekliğindeki azalmanın meydana geldiği mesafeyi ifade eder. Görüntü kuvveti etkisinden dolayı Schottky bariyerinin azalmasını gösteren enerji bant diyagramına Şekil 2.6 içerisinde yer verilmiştir. Fermi enerji seviyesinin üzerinde E_C ’ye yakın alanlardaki MIGS alıcı şeklinde, E_V ’ye yakın MIGS donör gibi davranır. E_F ile E_C arasındaki alıcı benzeri durumlar negatif yükler ile doldurulurken, E_F ile E_V arasındaki verici benzeri durumlar pozitif yükler ile doldurulur.

seviyesinin, yarıiletken tarafında negatif yüklü oluşturulan dipolün E_F Fermi seviyesi E_{CNL} 'ye doğru hareket etmeye ve onunla hizaya zorlaması için E_{CNL} 'nin üzerinde uzandığı durumu gösterir. MIGS ve Φ_{CNL} 'deki Fermi seviye sabitlemesi ile Schottky bariyer yüksekliği aşağıdaki gibi değiştirilir [54]:

$$\Phi_B = E_{CNL} - S(x_m - x_s). \quad (2.22)$$

Φ_{CNL} , Fermi seviyesinden ölçülen nötr seviye yüklerin potansiyelidir ve $x_m - x_s$ terimi metal ve yarıiletken elektronegatiflikleri arasındaki farktır. MIGS teorisi, yarıiletken katkısını E_{CNL} üzerinden ve metal ve yarıiletken katkılarını elektronegatiflik farkı aracılığıyla açıklar. Schottky bariyer yüksekliği esas olarak E_{CNL} ve MY elektronegatiflik farkından dolayı yüzey dipolü tarafından belirlenir.

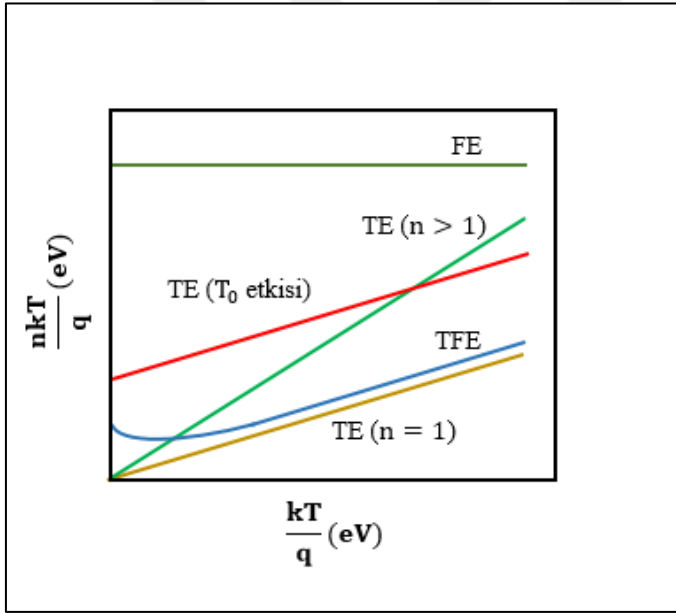
2.6. Sıcaklığın İdealite Faktörü Üzerine Etkisi

Schottky diyotu için termiyonik emisyonun temel I-V modeline göre, n idealite faktörü teorik olarak 1 değerine eşittir. Bununla birlikte, diyotun ideal durumdan ayrılmasına birçok unsur neden olabilir ve bu unsurlar idealite faktörünü 1 değerinin üzerine çıkarır. Metal ve yarıiletken arasında bir arayüz tabakasının bulunması, idealite faktörü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Termiyonik emisyon akımından beklenenin aksine, idealite faktörü sıcaklıktan bağımsızdır. Ancak, bariyer yüksekliğinin homojensizliği veya bariyer yüksekliğine etki eden durumlar idealite faktörünün sıcaklığın azalmasıyla anormal bir şekilde artmasına ya da sıcaklığın artmasıyla anormal bir şekilde azalmasına yol açar [32,55]. Yine Schottky diyot akımında kuantum mekaniksel tünellemenin (FE ve TFE) veya taşıyıcı rekombinasyonunun önemli bir katkısı, sıcaklığa bağlı bir idealite faktörü ile sonuçlanır. İdealite faktörünün sıcaklığa bağlılığı,

$$n = \left(1 + \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.23)$$

eşitliği ile verilir. Eş. 2.23'teki T_0 ifadesi bir erişim sıcaklığı parametresidir [56]. Bu davranış “ T_0 etkisi” olarak bilinir. Levine, T_0 etkisini arayüz durumlarının üstel dağılımının varlığına bağlamıştır [57].

Farklı sıcaklıklardaki I-V ölçümlerinin bir Schottky diyotunun akım iletim mekanizmasını idealite faktörünün sıcaklıkla değişimini tanımlamak için kullanılabilir. Sıcaklığa bağlı akım voltaj ölçümlerinden, idealite faktörü her bir sıcaklıkta değerlendirilebilir ve Şekil 2.7’de verilen grafik ile temsil edilebilir. Şekil 2.7’den görülebileceği üzere, TE’nin baskın mekanizma olduğu durumda, nkT/q değeri ideal diyotta $n = 1$, ideal olmayan diyotta $n > 1$ ve T_0 etkisi için güçlü bir sıcaklık bağıllığı gösterir. Diğer taraftan, FE akım iletim mekanizması baskın ise, tünelleme sabiti nkT/q ekseninde düz bir doğru olacaktır, buna karşılık TFE düşük sıcaklıkta zayıf bir sıcaklık bağıllığına sahiptir ve ancak sıcaklık arttıkça bu bağıllık artar. TE mekanizmasında $n > 1$ durumu için T_0 anormalliği görülür. T_0 değerinin sıfıra yaklaşması, diyotu ideal durumuna yaklaştırır. T_0 etkisi genellikle arayüzeyin homojen olmayan yapısına atfedilir.



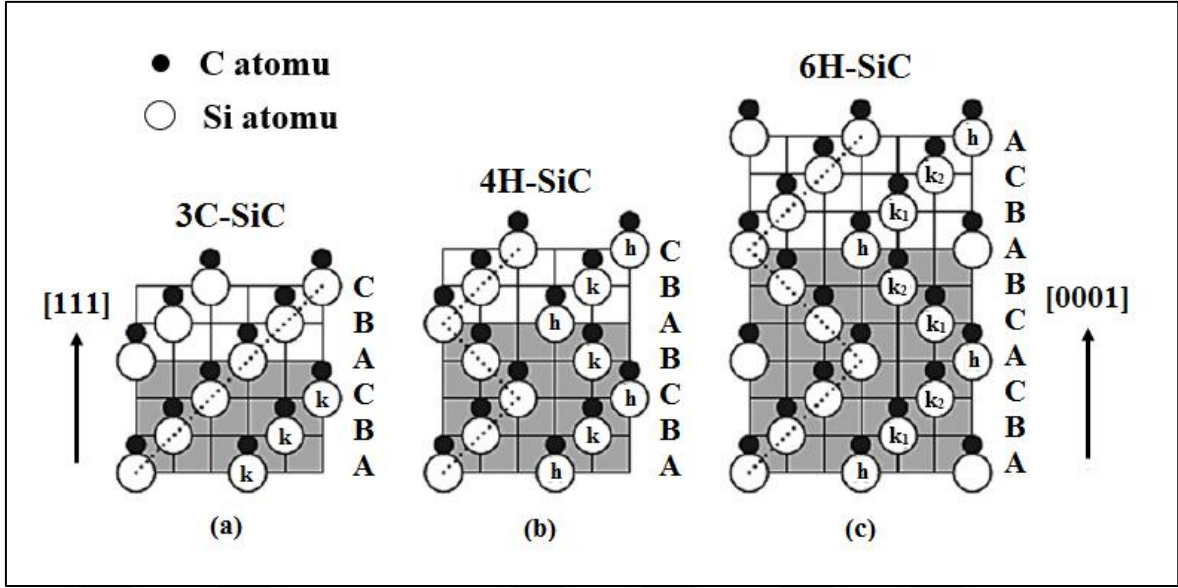
Şekil 2.7. Farklı akım iletim mekanizmaları için idealite faktörünün sıcaklıkla değişiminin teorik gösterimleri

2.7. SiC Yarıiletkeninin Özellikleri

Üretilen Schottky diyotunda alttaş malzeme olarak silikon karbür (SiC) kristali kullanıldığından, tezin bu bölümde SiC kristaline ve bu kristalin özelliklerine genel bir bakış sunulmaktadır. SiC’nin doğal olarak elde edilebildiği tek yer meteorlardır. 1824 yılında SiC malzemesini ilk kez Jons J. Berzelius tarafından sentezledi ve Berzelius ürettiği bu malzemede silikon (Si) ile karbon (C) arasında kimyasal bir bağ oluştuğunu öne sürdü [58-60]. Daha sonra, Acheson ergitme fırınında kok kömürü ve silikon kullanarak

“Carborundum” adı verilen kristalli bir ürün elde etmiş ve bu kristali SiC şeklinde formülize etti. 1907 yılına gelindiğinde, çeşitli fırınlama tekniklerinden elde edilebilen SiC kristalinden ilk LED (Light Emitting Diode) üretildi [61]. İlerleyen zamanlarda, Lely üretim süreçlerinin kontrol edilebilir özellikleri ile yüksek saflıkta SiC kristali sentezledi [62-63]. 1970’li yılların sonlarına gelindiğinde, SiC’nin sabit ve tekdüze termal gradyan ortamı ile tohumlanmış süblimleşme büyütmesi Tairov ve Tsvetkov [64] tarafından tanıtıldı. Bu gelişme, SiC wafer yapılarının doğmasına zemin hazırladı [65]. 1987 yılında düşük sıcaklıklarda “adım kontrollü epitaksi” kullanılarak eksen dışı altaşlar üzerinde yüksek kaliteli epitaksin yapılabilmesi bir dönüm noktası oldu [66]. Bu buluş, 1989 yılında Cree Araştırma Şirketi ABD’de SiC ve SiC wafer yapılar üzerinde ilk mavi LED’i üreterek ticarileştirmesi ile sonuçlandı. 1990’lı yıllardan günümüze, SiC kristali Schottky diyotlar, transistör, sensör uygulamaları gibi birçok elektronik aygıtta kullanım alanı buldu.

Bir SiC kristali içinde Si ve C atomları, sp^3 hibrit orbitallerinde elektron çiftlerinin paylaşılması yoluyla çok güçlü tetrahedral kovalent bağlar (4,6 eV bağ enerjili) oluşturur. Si-Si atomları arasındaki mesafe 3,08 Å ve Si-C atomları arasındaki mesafe 1,89 Å’dır. SiC kristali, bu birimlerin ilişkili olarak tekrarlanmasıyla oluşur [67]. SiC, politip adı verilen birçok kristal yapı sergiler. SiC politiplerinin isimlendirilmesi için genellikle Ramsdell notasyonu kullanılır. Bu notasyonda ilk harf periyodikliği korumak için katman sayısını ve son harf Bravais kafesini (kübik yapı için C, altıgen yapı için H ve rombohedral yapı için R) ifade eder. SiC’nin bilinen 250’den fazla politipi vardır, ancak bunlardan yalnızca birkaçı yeniden üretilebilir biçimde büyütülebilir ve yarıiletken malzeme olarak kullanım için kabul edilebilir. SiC’nin bugüne kadar elektronik için geliştirilmekte olan en yaygın politipleri 3C-SiC, 4H-SiC ve 6H-SiC’dir. Bu politipler arasında 3C-SiC yapısı β -SiC olarak adlandırılır ve kübik kristal kafes yapısını içeren tek SiC formudur. 4H ve 6H’nin en yaygın olduğu ve esas olarak tüm SiC aygıtların üretildiği politipler olan çok çeşitli düzenli, daha büyük periyotlu, istiflenmiş altıgen veya rombohedral yapılar veren daha karmaşık formlarda meydana gelir. Kübik olmayan tüm yapılar topluca α -SiC olarak bilinir. 3C-, 4H- ve 6H-SiC kristal yapılarının dizilim şemaları Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Şekilde verilen açık ve kapalı daireler sırasıyla Si ve C atomlarını gösterirken, A, B ve C şeklindeki örgü yapıları Si ve C’nin hegzagonal sıkı bir şekilde paketlenmiş iki katmanındaki işgal edilen yerleri temsil eder [68].



Şekil 2.8. En yaygın SiC politip yapılarına ait gösterimler

SiC'nin doğal formu mozanit adı verilen son derece nadir bir mineralde bulunur. SiC, renksiz ve şeffaf görümlü bir kristal yapıya sahiptir. Azot ve alüminyum gibi safsızlıklar SiC'nin yapısına eklendiğinde, safsızlık seviyesine bağlı olarak SiC kristalleri yeşil veya mavi renkte görünür. Yarıiletken özellikleri SiC kristalinin yüksek voltajlı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı aygıtlar üretilmesine olanak sağlar [69]. SiC'nin Mohs sertlik derecesi 9'dur. Bor karbür (9,5) ve elmadan (10) sonra mevcut durumda en sert malzeme olarak göze çarpmaktadır. SiC'nin yüksek termal direnci, yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerin üretimine izin veren bir özelliktir. SiC'nin atomik yapısının bozulma sıcaklığı 2000°C civarında başlar [70]. SiC kristali saflaştırıldığında, bir elektrik yalıtkanının davranışını gösterir. Diğer taraftan, safsızlıklar kontrol edildiğinde SiC kristali iyi bir yarıiletkenin elektriksel özelliklerini sergiler. Genel olarak, endüstriyel bir SiC kristali yaklaşık %98 ile %99,5 saflığa sahiptir.

Farklı amaçlar için çeşitli elektronik aygıtların üretiminde alttaş malzeme olarak 4H-SiC ve 6H-SiC yapıları oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [63,68]. SiC ve benzer yapıdaki malzemelere ait çeşitli fiziksel ve elektriksel özellikler Çizelge 2.1 içerisinde verilmiştir. Çizelge 2.1 incelendiğinde, tez çalışmasında alttaş malzeme olarak kullanılan 6H-SiC'nin sahip olduğu özellikler, elektronik aygıt üretimi için doğru ve uygun bir malzeme olduğunu gösterir.

Çizelge 2.1. SiC ve benzer yapıdaki malzemelere ait çeşitli fiziksel ve elektriksel özellikler

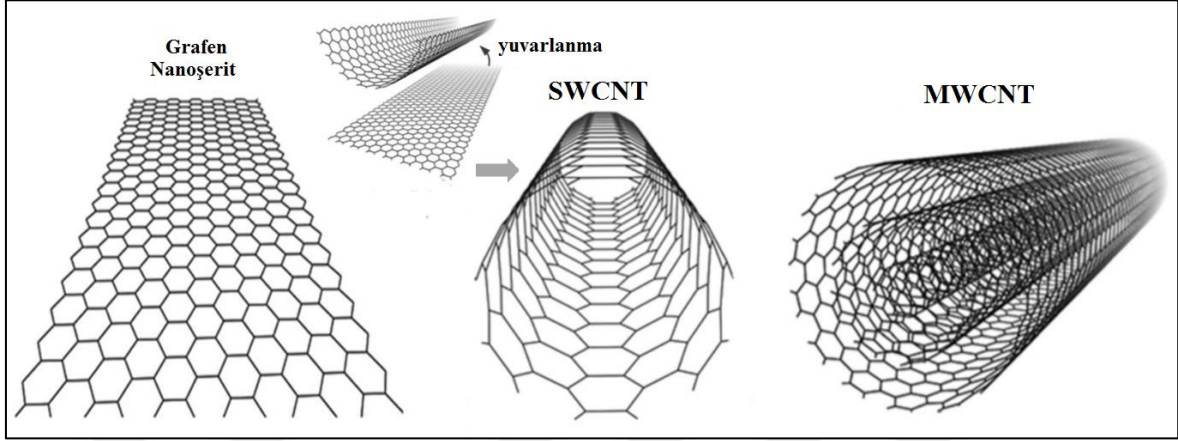
	Ge	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	Elmas
Bant aralığı (eV)	0,66	1,12	1,43	2,4	3	3,2	5,47
Kritik elektrik alan (MV/cm)	0,1	0,25	0,3	2,0	2,5	2,2	10
Mobilite (μ_n & μ_p) (cm ² /Vs)	3 900 1 900	1 350 480	8 500 400	1 000 40	500 80	1 000 120	2 200 1 600
Taşıyıcı konsantrasyonu (cm ⁻³)	10 ¹³	10 ¹⁰	10 ⁶	10 ¹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻²⁷
Dielektrik sabiti (ϵ_r)	16	11,9	13,1	9,7	10	10	5,68
Termal iletkenlik (W/cmK)	1,6	1,5	0,46	≥3,5	≥3,5	≥3,5	20
Yoğunluk (cm ⁻³)	5,3	2,3	5,3	3,2	3,2	3,2	3,5
Örgü yapısı	Kübik	Kübik	Kübik	Kübik	Hegzagonal	Hegzagonal	
Örgü sabiti (a & c) (Å)	5,65 -	5,43 -	5,65 -	4,36 -	3,08 15,12	3,08 10,08	3,567
Erime sıcaklığı (°C)		1 420	1 240		2 830	2 830	4 000
Doymuş elektronların sürüklenme hızı (V _{sat}) x 10 ⁷ cm/s	0,5	1	1	2	2	2	2,7

Metal/Silisyum karbür (M/SiC) Schottky kontakları, uygun arayüz koşulları ile potansiyel bariyer oluşumunda en ilginç konulardan biridir [71]. Kontakların fiziksel ve elektriksel özelliklerinden dolayı M/SiC yapıları büyük önem taşımaktadır [72]. Bu özelliklerinden dolayı M/SiC yapıları yüksek güç ve frekans, düşük ve yüksek sıcaklık uygulamaları için çok uygundur. Potansiyel bariyerli M/SiC kontakları, silikon ile elde edilemeyen birçok uygulamada birçok avantaj sağlar. Güç elektroniğinde M/SiC yapıları aygıtların kullanılması, geleneksel M/Si tabanlı elektronik sistemlerden daha hafif, daha küçük ve elektriksel olarak daha verimli sistemler sağlayabilir [73]. M/SiC yapıları ise güneş pilleri, transistörler, sensörler, savunma ve uzay teknolojilerindeki cihazların yapımında önemli ölçüde kullanılmaktadır. Ayrıca lazer diyotlarda, ışık yayan diyotlarda (LED) ve optoelektronik endüstrisinde fotodedektör olarak kullanılır [2].

2.8. Karbon Nanotüplerin Özellikleri

Karbon nanotüp (Carbon nanotube - CNT), çapları nanometre ölçeğinde karbon tüplerden oluşan ve elmas, grafit, fulleren gibi karbon allotroplarından biridir. Karbonun hekzagonal yapıda kristallenmiş olduğu grafen plakalarının silindirik şekilde kıvrılarak tüp hâline gelmiş olan yapılardır. Çok büyük uzunluk/çap oranına sahip tüp şeklindeki bu yapılar, fiziksel

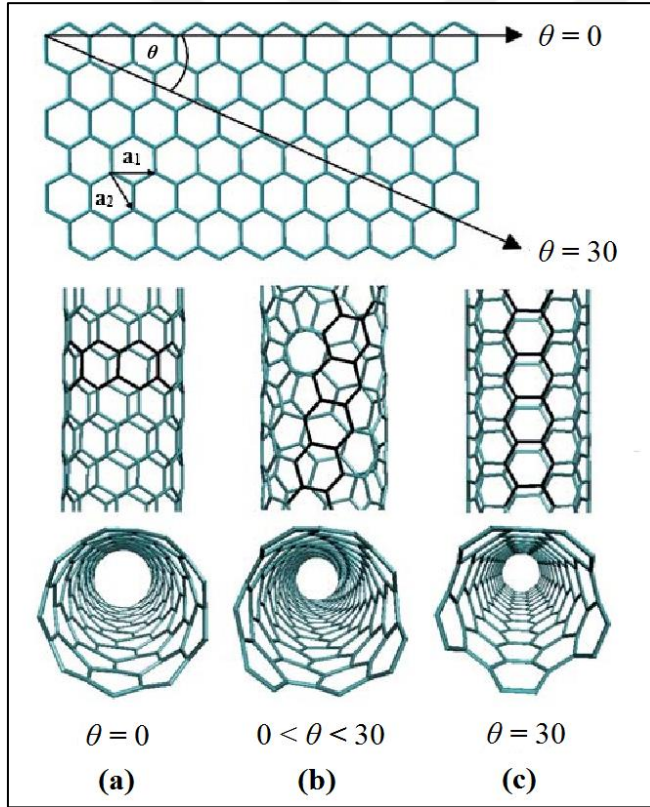
açından çok iyi bir özellikleri içerisinde barındırmaktadır [74]. CNT'ler tek duvarlı olabildiği gibi, iç içe geçmiş olarak kristallenen çok duvarlı yapıda da olabilir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Tek ve çok duvarlı CNT yapılarına ait gösterimler [75]

Bir boyutlu (1B) bir yapıda olan CNT'ler, sp^2 karbon ağlarının biçimleridir. Bir ile birkaç düzine eşmerkezli grafen kabuk içerebilir ve tipik olarak 1-50 nm çapında ve birçok mikrometre uzunluğunda olabilirler. İlk olarak, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) olarak bilinen bu yeni karbon sınıfı, 1991 yılında Iijima tarafından Yüksek Çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu (RTEM) kullanılarak keşfedildi [76]. Bu keşiften birkaç yıl sonra, Iijima ve arkadaşları tarafından tek duvarlı karbon nanotüplerin (SWCNT'ler) sentezi yapıldı [77]. Daha sonra, benzer çaplarda çok sayıda tüp içeren sıkı bir şekilde paketlenmiş SWCNT'lerin kristal yapıları Smalley ve çalışma arkadaşları tarafından sentezlendi [78]. Tek ve çok duvarlı CNT yapılarının yanı sıra, biri diğerinin içine geçmiş iki eş merkezli SWCNT'den oluşan çift duvarlı karbon nanotüp (DWCNT) yapıları da bulunmaktadır [79]. Son 20 yılda, CNT'ler yoğun ilgi görmüş ve önemli sayıda ortaya konulan çalışmaların sonucunda CNT'lerin beklenmedik yapısal, optik, elektriksel, mekanik ve kimyasal özellikleri ortaya çıkarılmıştır. CNT'lerin özellikleri büyük ölçüde yapısına, boyutuna ve kusurlara bağlıdır. Bu özellikleri, CNT'lerin en dayanıklı ve en iletken malzemeler arasında yerini almasını sağlamıştır. Grafitin yapısal kusurları, üretim yöntemi ve kimyasal işlevselleştirme, CNT'lerin özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilir. CNT'lerin üretim ve karakterizasyon teknikleri geliştikçe, elektronik, optik, malzeme bilimi, nanoteknoloji, biyoteknoloji, sağlık ve ilaç gibi çeşitli alanlarda değerli bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır [80].

CNT gibi grafen benzeri malzemeler, karbon-karbon (C-C) sp^2 -hibritlenmiş bağdan türetilen ortak karakterleri paylaşır. Bu bağlar, bir karbon atomunun büyük ölçüde genişletilmiş bir ağda σ bağları ile üç komşu karbona kovalent olarak bağlanan doğadaki en güçlü bağlardan biridir. Bu sistemlerdeki π elektronları delokalize edilerek ilginç elektriksel özelliklere yol açar. CNT'ler, kısmen elektronların ve fononların 1B kuantum hapsi nedeniyle diğer grafit malzemelerden ayırt edilir [81]. Bir SWCNT, kavramsal olarak tek bir grafen tabakasından yuvarlanabilen atom kalınlığında bir silindirdir. Bu nedenle, bir SWCNT'nin yapısı, yuvarlanan vektörü tanımlayan bir çift tamsayı (n, m) ile indekslenebilir [82]. Nanotüpler $n = m$ olduğunda koltuk, $m = 0$ olduğunda zikzak veya geri kalan (n, m) türleri için kiral olarak sınıflandırılır. Şekil 2.10 içerisinde CNT yapılarına ait zikzak, koltuk ve kiral dizilimlerine yer verilmiştir.



Şekil 2.10. CNT'lerin (a) zikzak, (b) kiral ve (c) koltuk dizilimleri [87]

SWCNT'lerin elektronik özellikleri (n, m) türlerine karşı hassastır. SWCNT'ler, farklı bant aralıklarına sahip metalik veya yarıiletken özellik gösterebilir [83]. Tüm koltuk SWCNT'ler metaldir [84]. SWCNT'lerin diğer iki türü, bant aralıkları çaplarıyla ters orantılı veya yaklaşık olarak $0,9 \text{ eV/D}$ olan yarıiletkenlerdir. Bu ifadede D, nanometre cinsinden nanotüpün dış çapıdır [84,85]. Bir CNT, duvardan duvara mesafe yaklaşık $0,34 \text{ nm}$ olan, bir

grafitteki iki bitişik katman arasındaki ayırım ile eşmerkezli olarak iç içe geçmiş birden fazla SWCNT içerebilir. Bu yapılardaki her duvarın kendine özgü bir (n, m) indeksi vardır. Bununla birlikte, bireysel özellikleri duvardan duvara etkileşimlerden güçlü bir şekilde etkilenir. DWCNT'ler, toplu olarak hem iç hem de dış duvarların kiralitesine bağlı olarak yarıiletken veya metaliktir [86]. MWCNT'lerin çoğunluğu genel olarak metalik özelliklere sahiptir.

Yüksek kaliteli (kusursuz) ark deşarjlı MWCNT'lerde ve katalitik olarak üretilmiş metalik SWCNT'lerde elektronik iletimin balistik olarak gerçekleştiği bulunmuştur. Oda sıcaklığında mikro ölçekte bu CNT'lerde elektronik geri saçılma veya enerji kaybı yoktur [88]. Daha uzun CNT'lerde veya yüksek öngerilimde, birçok saçılma çarpışması meydana gelebilir ve akım geleneksel iletkenlerin bir özelliği olan dağınık taşıma olarak tanımlanabilir. SWCNT'lerin mümkün olan en küçük direnci, bir CNT'nin iki iletken alt bandı ve cihaz uçları arasındaki kuantum mekaniksel bağlantı nedeniyle $h/4e^2$ veya $6,5 \text{ k}\Omega$ 'dur [89]. Ancak yüksek kontak dirençleri genellikle böyle bir değer görülmesini engeller. Tek bir SWCNT'deki elektrik akım $\sim 20 \text{ mA}$ 'da doyuma ulaşırken [90], düşük kusur yoğunluğuna sahip ark deşarjlı MWCNT'ler için 1 mA 'ya kadar akımlar elde edilebilmiştir [91]. Ark-deşarjlı MWCNT'lerde akım sadece dış tabaka üzerinden akmaktadır [91,92]. Katalitik olarak üretilen MWCNT'lerin, mikrometre uzunluk başına $1 \text{ M}\Omega$ mertebesinde bir dirence sahip iletkenler olduğu bulunmuştur [93]. Bu artan direnç, nanotüplerdeki bozukluğun (kusurların) neden olduğu katmanlar arası elektron taşınımından kaynaklanabilir. CNT'lerin mekanik özellikleri, kusurların yoğunluğuna, deneysel parametrelere ve sentez tekniklerine duyarlıdır. Literatürdeki mekanik parametreler, Young modülünü ve çekme mukavemetini tanımlamak için iki farklı yolun (toplam işgal edilen kesit alanı veya van der Waals alanı) kullanılması nedeniyle çelişkilidir. Çizelge 2.2'de farklı duvarlara sahip CNT'lerin elektriksel, mekanik ve termal özelliklerine yer verilmiştir [94]. Tablo 2.2'de sunulan deneysel veriler, CNT'leri bilinen en kullanışlı malzemeler arasında yer almasını sağlamaktadır. Bu nedenle, yüksek performanslı mühendislik malzemeleri için ideal yapı taşları olarak düşünülür. CNT'lerin dikkate değer yapısal, mekanik, termal ve elektronik özellikleri bu malzemelerin yüksek performanslı diyotlarda, alan etkili transistörlerde (FET'ler), enerji depolama ve dönüştürme cihazlarında, alan emisyonlu cihazlarda, entegre devrelerde (IC) ve sensörlerde temel çalışma ve uygulama alanı bulmasında rol oynamaktadır.

Çizelge 2.2. Farklı duvar sayısına sahip karbon nanotüplerin elektriksel, mekanik ve termal özellikleri

CNT Türü	Elektriksel Özellikler			Mekanik Özellikler		Termal Özellikler	
	Akım	İletkenlik	Direnç	Young modülü	Gerilme direnci	Termal kararlılık	Termal iletkenlik
SWCNT	20-25 mA	$\sim 2 G_0$	$\sim 7 \text{ k}\Omega/\mu\text{m}^{-1}$	1,25 Tpa	$\sim 1 \text{ Tpa}$	$\sim 1 \text{ 800 } ^\circ\text{C}$	$>3 \text{ 500 Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
DWCNT		$< 2 G_0$	$\sim 7 \text{ K}\Omega$	0,73-1,25 Tpa	17-31 Gpa	$\sim 2 \text{ 000 } ^\circ\text{C}$	$>600 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
MWCNT	7,27 mA	$490 G_0$	$34,4 \Omega$	0,27-0,95 Tpa	11-63 Gpa	Çap ve uzunluğa göre değişir	$>3 \text{ 000 Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

CNT'lerin sahip olduğu üst seviye elektriksel özellikler, nanoelektronikte önemli bir araştırma konusu olmasında etkili olmuştur. CNT aygıtlarını üretebilmek için CNT'ler ile diğer malzemeler arasındaki arayüz yapılarının anlaşılması önemlidir. CNT'lerdeki karbon atomlarının ve yarıiletken malzemelerdeki kurucu atomların arayüzde birbirleriyle atomik bağlar oluşturur. CNT/Y heteroeklem yapıları aygıtların elektronik özelliklerinin açıklığa kavuşturulmasında bu aygıtların üretilebildiği yöntemlerin ve elektriksel özelliklerin araştırılması gerekir. Bu nedenle, tez çalışmasında n-6H-SiC alttaş üzerine damlat kurut yöntemiyle arayüz olarak kaplanan MWCNT'li Schottky bariyer diyotunun elektronik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun deneysel üretim aşamalarına yer verilmiştir. Diyotun üretim aşamaları sırasıyla; n-6H-SiC yarıiletken kristalinin kesilmesi, kristalin kimyasal malzemeler ile temizlenmesi, kristalin mat yüzeyine omik kontak oluşturulması, arayüzey katman için MWCNT çözeltisinin hazırlanması, kristalin parlak yüzeyine MWCNT kaplanması ve MWCNT üzerine Schottky kontakların oluşturulması süreçlerini kapsamaktadır.

3.1. Kimyasal Temizleme

Schottky bariyer diyotunun üretiminde Cree Incorporation firmasından temin edilen 275 µm kalınlığında, $2,6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ donör konsantrasyonlu ve [0001] yönelimli n-tipi 6H-SiC yarıiletken kristaller alttaş malzeme olarak kullanıldı. Yarıiletken kristalinin mat yüzeyine omik kontak oluşturmak için termal buharlaştırma sistemine alınmadan önce, yarıiletken kristali, saf Au metali ve vakum içerisine girecek olan maske ve tutucu gibi malzemeler kimyasal temizleme işlemine alındı. Kimyasal temizleme işleminde sırasıyla aşağıdaki adımlar uygulandı:

- ✓ Yarıiletken kristal ve diğer malzemeler sırasıyla izopropanol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$), aseton ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) ve metanol (CH_3OH) içerisinde tutularak 5'er dakika ultrasonik banyoda tutuldu.
- ✓ Her bir işlemten sonra kristal ve diğer malzemeler deiyonize su (DI) ile yıkandı.
- ✓ Kristalin üzerindeki doğal oksit tabakasını kaldırmak için $\text{HF}+\text{H}_2\text{O}$ (1:10) çözeltisi hazırlanarak 15 saniye süreyle çözelti içerisinde tutuldu.
- ✓ Daha sonra, çözelti içerisinde çıkarılan kristal saf azot (%99,99) gazıyla kurutuldu.

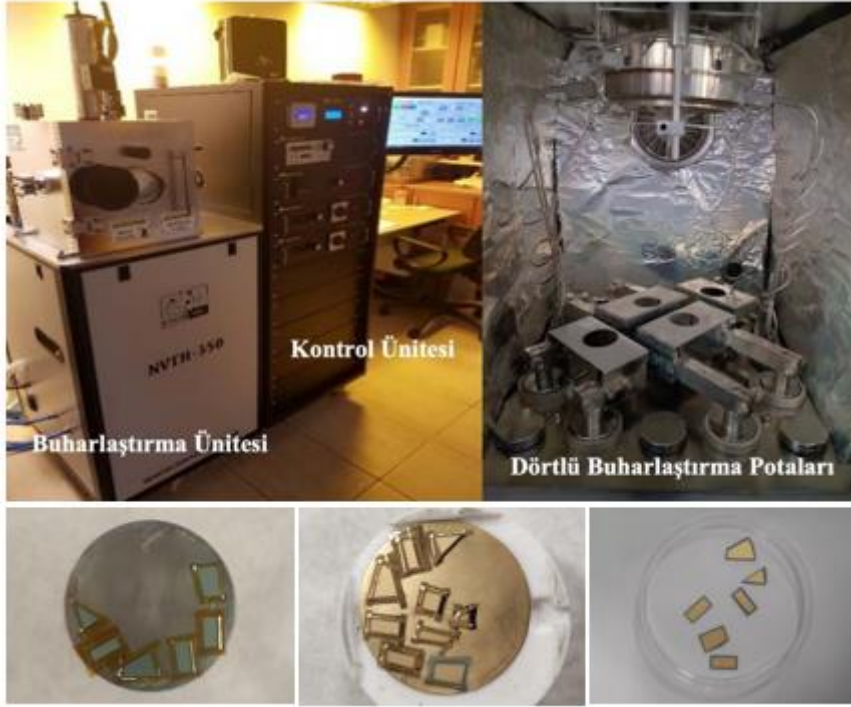
Kimyasal temizleme işlemi ile ilgili görsellere Resim 3.1 içerisinde yer verilmiştir.



Resim 3.1. Kimyasal temizleme işlemi

3.2. Omik Kontak Oluşturma

Kimyasal temizliği yapılan yarıiletkenler, mat yüzeyinin iç kısmının tamamı boş olacak şekilde maskelendi. Maskelenen yarıiletkenler Nanovak NVTH350 Termal Buharlaştırma Sistemi'ne konuldu ve sistem yaklaşık 10^{-6} mbar basınç seviyesine kadar vakumlandı. Yarıiletkenin mat yüzeyi 170 nm civarı bir kalınlıkta saf Au (%99,995) metali ile kaplandı. Daha sonra, yarıiletken aynı basınçta ve azot ortamında 400 °C sıcaklıkta 3 dakika tavlansak Au tabakanın SiC kristal içerisine çökmesi sağlandı (Resim 3.2). Termal buharlaştırma, yarıiletken yüzeylerine metal biriktirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, omik kontak yapılması amacıyla kullanılacak olan metal, buharlaştırma sisteminin alt kısmındaki potalara konulur. Pota içerisindeki metal, ısıtıcı flaman etkisiyle buharlaştırılır ve alttaş numune üzerine 10^{-5} ile 10^{-7} mbar arasındaki düşük bir basınç altında biriktirilir. Yüksek vakum ortamında çalışıldığından, yarıiletken üzerine biriktirilen metalin ortamdaki yabancı atomlar ile etkileşimi en aza indirgenir. Bu sayede istenilen kalitede ince filmlerin malzeme yüzeyine biriktirilmesi sağlanır.



Resim 3.2. Termal buharlaştırma sistemine yüklenen ve omik kontak oluşturulan n-6H-SiC yarıiletkeni

3.3. Arayüz Malzemenin Hazırlanması ve Yarıiletken Yüzeyine Kaplanması

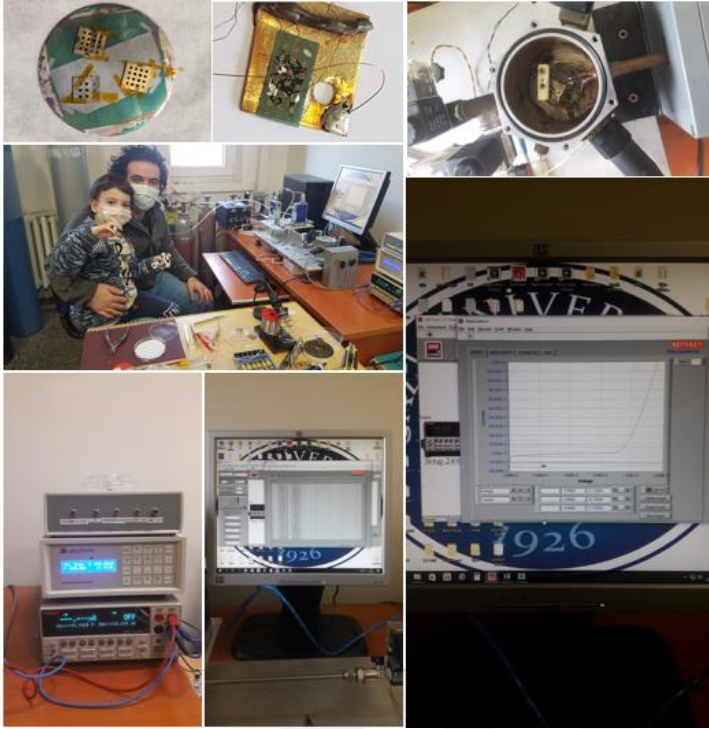
Sigma-Aldrich firmasından toz hâlde temin edilen MWCNT'ler (> %90 karbon bazında ve 10-15 nm x 2-6 nm x 0.1-10 µm boyutunda) 2 mg tartılarak, 1 mL dimetilformamid (DMF) (C_3H_7NO) çözücü ile süspansiyon çözelti olarak hazırlandı. Oluşturulan süspansiyon çözelti ultrasonik banyoda 50 °C'lik sıcaklıkta 2 saat boyunca karıştırıldı. Kimyasal bir yöntem olan *damlat kurut yöntemi* ile 20 µL saf MWCNT çözeltisi yarıiletkenin parlak yüzeyine mikropipet aracılığıyla kaplandı [95-97]. Çözeltinin yarıiletken yüzeyinden uçması ve MWCNT'lerin yarıiletken yüzeyine yapışması için termal fırında -10 PSI vakum altında yaklaşık 50 °C'lik sıcaklıkta 2 saatlik bir süreyle kurutuldu (Resim 3.3). Damlat kurut yöntemi, çözülmüş bir matris, analit ve katkı maddelerinin bir damlasının, çözücünün buharlaşmaya bırakıldığı bir hedef plaka üzerine manuel veya otomatik olarak pipetlendiği bir yöntemdir. Bu yöntemde, tipik olarak hedef plaka üzerinde matris malzemesi ve analitin heterojen şekilde dağılır. Fiziksel kimya ve ıslatma biliminde, karmaşık sıvıların, çözeltilerin ve süspansiyonların damlalarının buharlaşmasıyla heterojen tortuların oluşması “kahve lekisi etkisi” olarak ifade edilmektedir.



Resim 3.3. MWCNT çözeltisinin hazırlanması ve damlat kurut yöntemi yarıiletken üzerine aktarılması işlemi

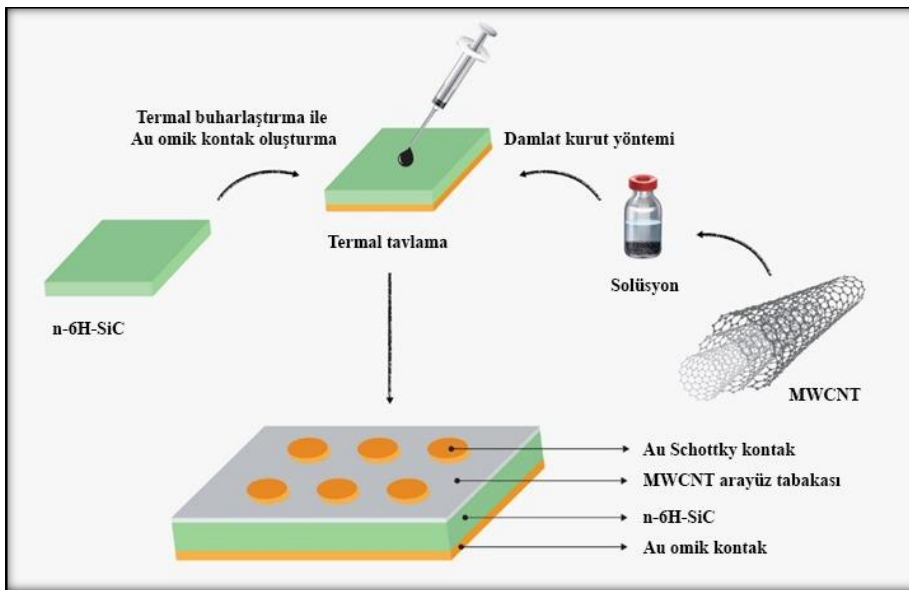
3.4. Schottky Kontakların Oluşturulması

Schottky kontakları oluşturmak için, saf MWCNT ile kaplanmış yarıiletken yüzeyinin üzerine 1 mm çapında deliklere sahip bir maske yerleştirildi. Nanovak NVTH350 Termal Buharlaştırma Sistemi'nin potasına yerleştirilen maske, yaklaşık 10^{-6} mbar basınç altında ve azot ortamında 180 nm kalınlığında saf Au (%99,95) ile kaplandı (Resim 3.4). Ortalama kalınlığı 200 nm olan bir arayüz olarak SiC yarıiletkeni üzerine kaplanmış MWCNT'ler kontak yapmak için yeterli yoğunluğa sahip olduğundan, MWCNT'lerin içindeki Au metalinin difüzyonu ihmal edilebilir bir düzeydedir [12,15]. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun omik kontaklı tarafı bakır levhaya, iletken teller ise diyotların üzerine gümüş pastasıyla yapıştırıldı. Akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) özellikleri Keithley 2400 Sourcemeter ve Keysight E4990A Empedans Analizörü kullanılarak ölçüldü. Üretilen diyotun akımı ile sıcaklığı arasındaki ilişki, 20 K'lik adımlarla 300-480 K sıcaklık aralığında -3 V ile +3 V arasındaki voltaj aralığında en iyi diyot karakteristiğini göstermiştir. Ayrıca, diyota ait C-V özelliklerinin ölçümü aynı sıcaklık ve voltaj aralıklarında ölçülmüştür.



Resim 3.4. Schottky bariyer diyot yapısının oluşturulması ve diyot ölçümleri

Şekil 3.1 içerisinde Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotuna ait üretim aşamaları özetlenmiş ve diyotun yapısal katmanlarına ilişkin kesitsel görünüm sunulmuştur.



Şekil 3.1. DeneySEL üretim aşamaları ve Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun kesitsel görünümü

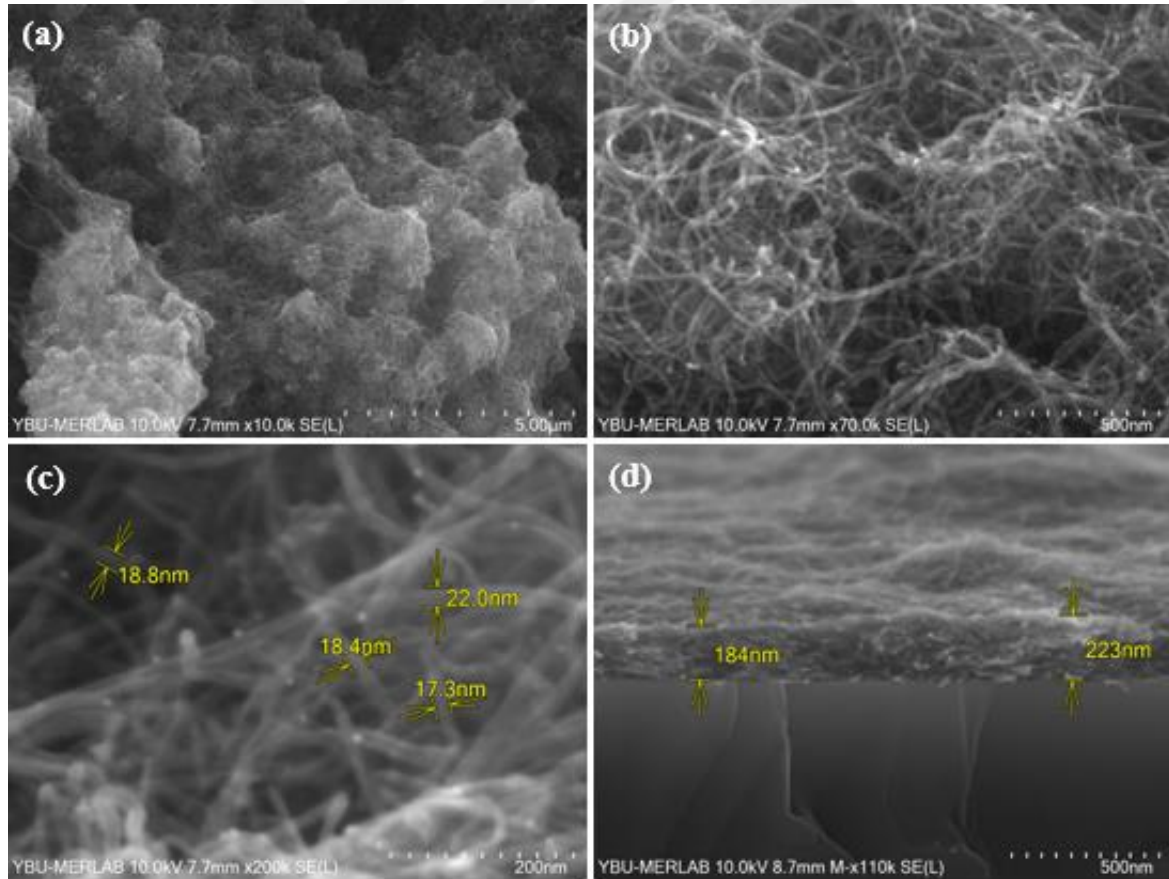


4. DENEYSEL BULGULAR

Tezin bu bölümünde, üretilen Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun yapısal karakterizasyonu, akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçümlerinden elde edilen bulguların çeşitli yöntemler ile hesaplandığı elektriksel parametrelere yer verilmiştir.

4.1. Diyotun Yapısal Karakterizasyonu

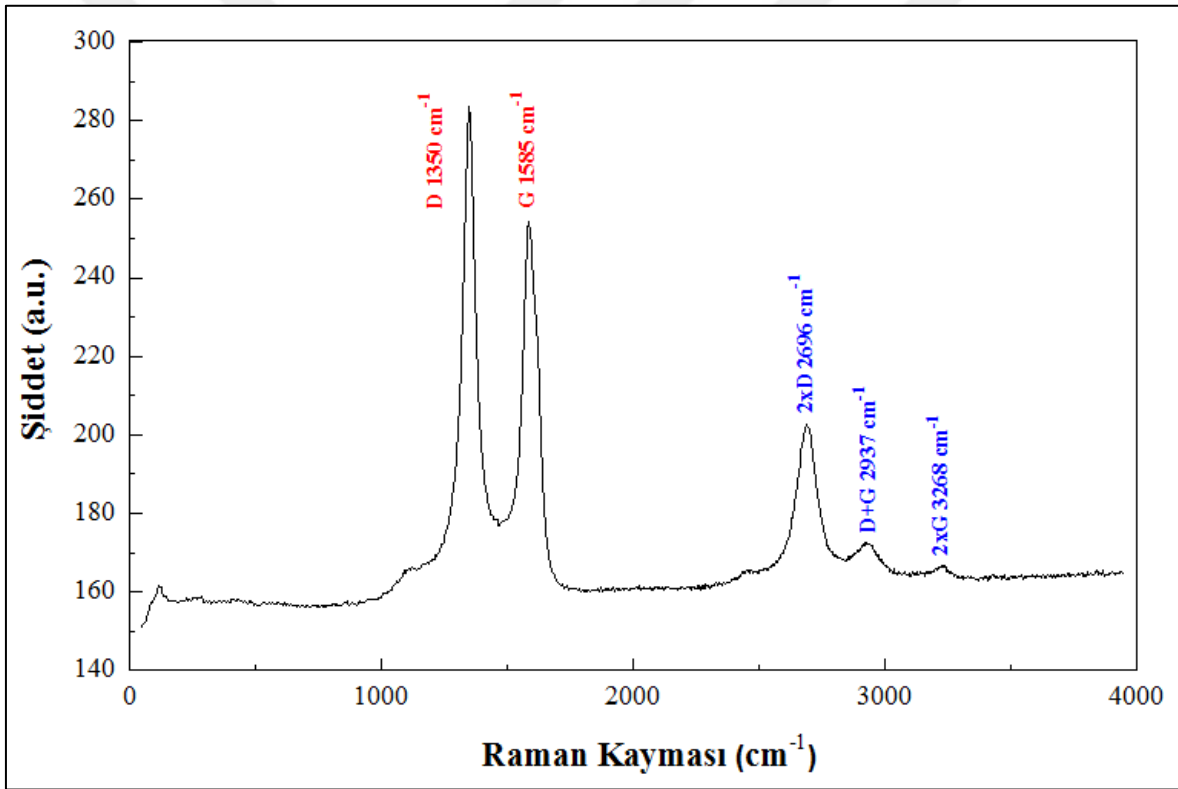
Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun yapısal karakterizasyonu SEM ve Raman Spektroskopisi cihazları kullanılarak belirlendi. SEM, CNT'lerin yüzey morfolojisi ile ilgili bilgiler sağlarken, Raman Spektroskopisi karbonlu safsızlıkların belirlenmesinde rol oynar. SiC yarıiletkeni üzerine kaplanan MWCNT yapısına ait farklı çözünürlüklerdeki SEM görüntüleri Şekil 4.1 içerisinde verilmiştir.



Şekil 4.1. (a) n-6H-SiC yarıiletkeni üzerine kaplanmış MWCNT'lerin SEM görüntüsü (b) dolanık hâlde ve rastgele dağılmış MWCNT'ler (c) dış çapı 17-22 nm arasında değişen MWCNT'ler (d) yarıiletken üzerine kaplanan ortalama 200 nm kalınlığa sahip MWCNT arayüzey tabakanın kesitsel görünümü

MWCNT'lerin kristal yüzeyine büyütülmesinde hizalama ile ilgili herhangi bir mekanizma kullanılmadığından, spagetti görünümüne benzeyen birbirlerine dolanmış tüpler hâlinde ve rastgele bir şekilde kristal yüzeyinde büyümektedir (Şekil 4.1(a) ve Şekil 4.1(b)). MWCNT'lerin dış çapı 18-25 nm arasında değişim gösterirken (Şekil 4.1(c)), büyütülen tabakanın enine kesitinden alınan kalınlık ortalama 200 nm civarındadır (Şekil 4.1(d)).

Başlangıçta küresel toz parçacıkları formunda olan MWCNT yapısı, DMF çözeltisi ve tavlama sıcaklığının etkisi ile yumuşayarak silindirik bir şekil alır. Uygun bir yüzey aktif madde kullanılması, MWCNT'lerin boyutunda değişime yol açmasının yanı sıra, MWCNT'lerin aglomera (topaklanma) eğiliminin de engellenmesinde etkilidir [98,99].



Şekil 4.2. n-6H-SiC yarıiletkeni üzerine kaplanmış MWCNT malzemesine ait Raman spektrumları

n-6H-SiC kristal yüzeyi üzerine kaplanan saf MWCNT yapısının Raman spektrumlarına ait ölçümler Şekil 4.2’de verilmiştir. 1350 cm^{-1} piki D bandı ve 1585 cm^{-1} piki G bandı varlığını açıkça ortaya koymaktadır. Raman piklerinin yüksek dereceli çizgileri çoğunlukla birincil dereceli D ve G pikleriyle ilişkilendirilir. D ve G bandının kombinasyonu olmayan 2696 ve 2937 cm^{-1} piklerinde ikincil mertebeden iki pik daha görülür. Şekil 4.2’de gözlemlenen pik değerleri, literatürde MWCNT ile ilgili raporlanan diğer çalışmalarla uyumludur [100-102].

MWCNT'lerde D bandını gösteren 1350 cm^{-1} sinyali, amorf veya düzensiz karbon varlığını gösterir ve C-C bağlarının düzensizliğe bağlı titreşimlerini ifade eder [103]. 1585 cm^{-1} piki civarındaki G bandı ise sp^2 yörüngesindeki C-C karbon malzeme frekansı ile ilişkilidir ve yapının E_{2g} optik moduna karşılık gelir. Malzemenin yapısında yüksek oranda kristal olduğundan grafitli malzemelerin E_{2g} modunun yoğunluğu güçlü ve keskindir [104]. Şekil 4.2'den görüleceği üzere, D bandındaki yoğunluk G çizgisinden ($I_D > I_G$) daha fazladır. D bandının yoğunluğu, yüzeyde kusurların oluşması ile ilgilidir. Malzeme yüzeyinde meydana gelen bu kusurlar, MWCNT yapısında bir dereceye kadar düzensizliğe ve D bandının yoğunluğunun artmasına neden olur [105]. DMF, organik bazlı bir çözücüdür ve toz formunda olan MWCNT'leri çözmek için kullanılmıştır. Raman ölçümleri sonucunda D bandının yoğunluğunun G bandından daha yüksek olması, MWCNT'lerin DMF çözeltisinde daha ileri işlemlere maruz kalması ve buna bağlı olarak D bandının yoğunluğunun artması ile açıklanabilir.

4.2. Akım-Voltaj Karakteristiği

Schottky diyotlarının elektriksel performansı; doyma akımı, idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi bazı fiziksel parametreler ile tanımlanabilir. Bu fiziksel parametreler, araştırmacılara Schottky bariyeri üzerindeki akım iletim mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasının yanı sıra, teknolojik gelişmelere ulaşılmasında yardımcı oldukları için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, Schottky diyotları içeren herhangi bir elektronik devre için bu parametrelerin kesin bilgisi gereklidir. Bu parametrelerin akım-voltaj karakteristiklerinden elde edildiği birkaç yaygın yöntem kullanılmaktadır. Üretilen MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotunun sıcaklığa bağlı akım-voltaj ölçümlerinden elektron taşıma mekanizması veya oluşturulan bariyerlerin doğası hakkında ayrıntılı bilgi termiyonik emisyon (TE) modeli ile belirlenirken, diyotun elektriksel özellikleriyle ilgili önemli parametreler Cheung-Cheung yöntemi, Norde yöntemi ve Richardson eğrilerinin analizi ile bulunmuştur.

Bir metal ile yarıiletkenin kontak oluşturulması sonucu arayüzdeki temel elektron iletim mekanizmaları; termiyonik emisyon, bariyer boyunca tünelleme, uzay yükü ve nötr bölgede yeniden birleşme ve üretilme şeklinde gerçekleşebilir. Schottky diyotlarda belli sıcaklıklar için ölçülen gerilim aralıklarında akım iletim mekanizmalarından yalnızca biri baskın olabileceği gibi daha fazla mekanizmanın da etkisi görülebilir. Birçok yarıiletkenin yeterli

miktarda yüksek elektron mobilitesine sahip olması, tüketim katmanı içerisindeki sürüklenme veya difüzyon akımlarının ihmal edilerek termiyonik emisyon modelinin ana akım sınırlaması olarak kabul edilmesine olanak tanır [1].

Schottky bariyerindeki iletim mekanizması termiyonik emisyon ise, elektronlar yarıiletkenenden metale doğru akar. Bu nedenle, akım ve voltaj grafiği ileri beslem durumunda üstel olarak artar. Diğer taraftan, termiyonik emisyonun ters beslem durumunda metalden yarıiletkene bariyer yüksekliği değişmediğinden aygıt saturasyona (doyma akımı) uğrar. Termiyonik emisyon teorisine bağlı olarak ileri beslem durumundaki Schottky bariyer diyotundaki akımın denklemi aşağıda verilmiştir:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q(V-IR)}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{q(V-IR)}{kT}\right)\right]. \quad (4.1)$$

Eş. 4.1’de doyma akımı I_0 , elektron yükü q , uygulama voltajı V , diyotun direncine bağlı voltaj düşüşü IR , idealite faktörü n , Boltzman sabiti k , mutlak sıcaklık T ’dir. Doyma akımının ifadesi;

$$I_0 = AA^* \exp\left(\frac{-q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

ile elde edilir. LnI-V grafiğinin lineer bölgedeki dikey eksenini kesen noktadan I_0 değeri elde edilir (Şekil 4.3). Denklem içerisinde yer alan A terimi diyotun alanı, A^* Richardson sabiti ve Φ_{b0} bariyer yüksekliğidir. Richardson sabitinin n-6H-SiC yarıiletkeni için teorik değeri $146 \text{ Acm}^{-2}\text{k}^{-2}$ olarak alınır [2, 106]. Eş. 4.2’den çekilen bariyer yüksekliğinin ifadesi Eş. 4.3 içerisinde aşağıdaki hâliyle yazılır:

$$\Phi_{b0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right). \quad (4.3)$$

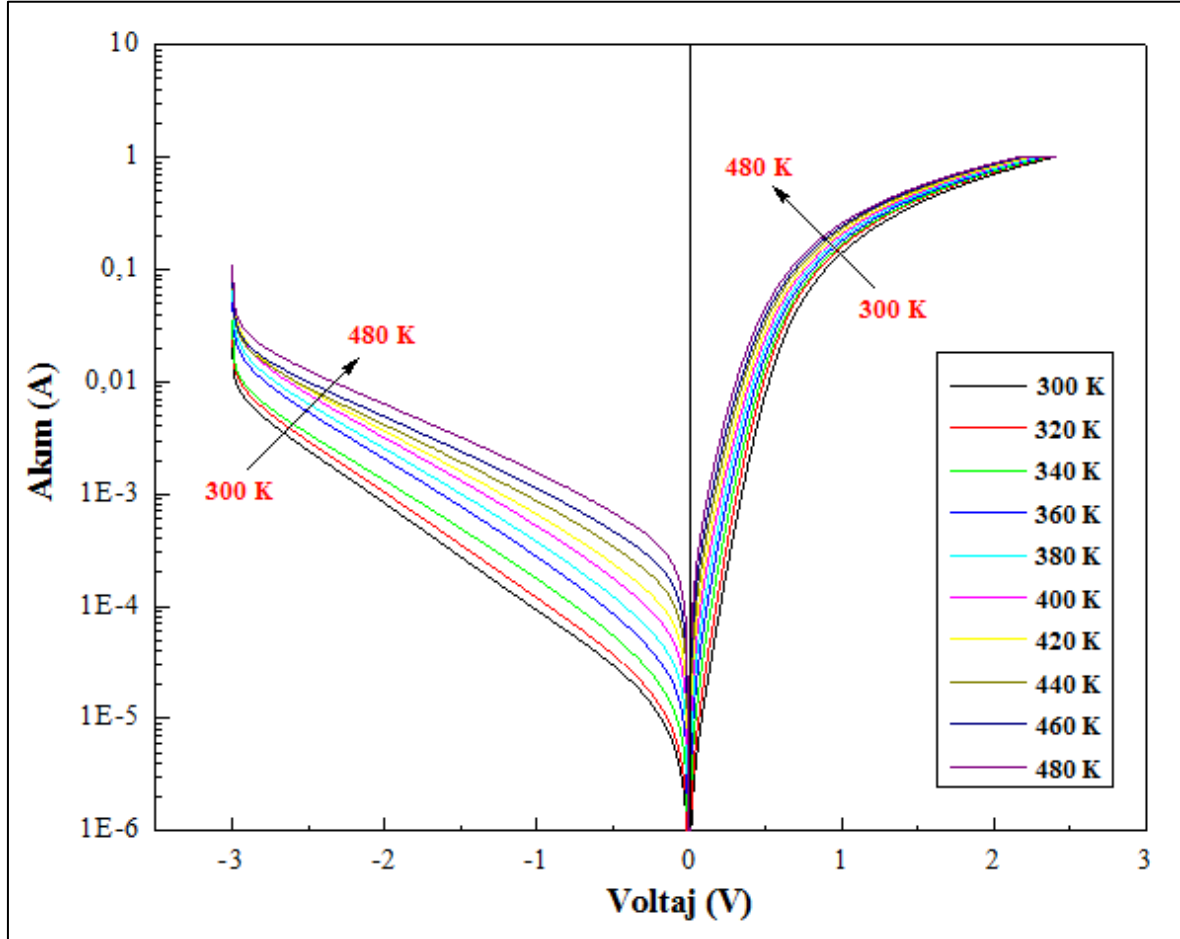
LnI-V grafiğinin lineer bölgesindeki ileri beslem eğrisinden idealite faktörü değeri bulunur ve n ifadesi Eş. 4.4 ile verilir:

$$n = \frac{q}{kT} \text{Ln}\left(\frac{d(V-IR)}{d(\ln I)}\right). \quad (4.4)$$

Grafiğin doğrusal olmadığı durumda, n değeri 1’den büyük olur ve diyotun akım iletim mekanizması için termiyonik emisyon teorisi tek başına geçerli olmamaktadır. Metal ve

yarıiletken arasındaki arayüzey tabakası veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımları bu duruma neden olabilir.

Üretimi yapılan Au/MWCNT/n-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300 ile 480 K sıcaklık değerleri arasındaki yarı-logaritmik akım-gerilim grafiği Şekil 4.3 içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300-480 K sıcaklıkları arasındaki ileri ve ters beslem durumları için yarı-logaritmik I-V grafiği

Şekilden 4.3'ten görülebileceği üzere, ileri beslemde 0,5 V'tan daha düşük voltaj değerlerinde akım uygulanan voltajla lineer olarak artarken, 0,5 V'tan daha yüksek değerlerde seri direncin önemli etkisinden dolayı akımın büyüme hızı azalır. Sıcaklığın artışına bağlı olarak doğruların eğiminin her bir sıcaklık değeri için katlanarak arttığı görülür. Bu davranış, termal olarak aktive edilmiş (uyarılmış) elektronların tüm sıcaklık aralığı boyunca toplam diyot akımına katkısını gösterir. Ters beslem durumunda ise negatif voltaj arttıkça akım büyümeye devam eder, ancak kaçak akımın büyüme hızı, uygulanan voltajla birlikte istikrarlı bir şekilde azalır. Bu özelliklere dayanarak, MWCNT/n-6H-SiC

Schottky bariyer diyotunun ileri ve ters beslem durumlarında akım iletimi sıcaklık değişiminden etkilenir.

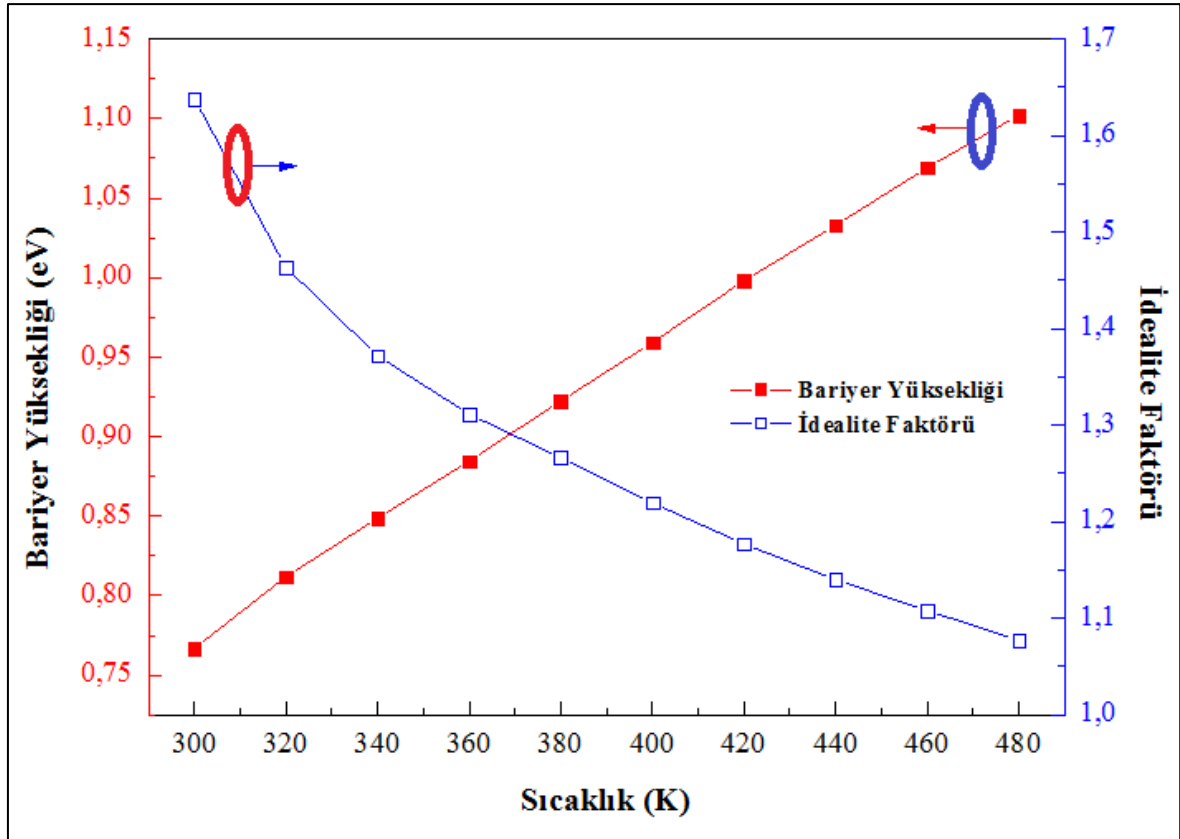
Termiyonik emisyon modeli çerçevesinde, $\ln I-V$ grafiğinin eğiminden n değeri, aynı grafiğin kesişiminden ise sıfır beslem durumundaki Φ_{b0} hesaplanır. Üretilen diyotun 300 ve 480 K sıcaklıklarındaki n değerleri sırasıyla 1,64 ve 1,07, Φ_{b0} değerleri sırasıyla 0,76 ve 1,10 eV olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Güzel ve arkadaşları, 80-400 K sıcaklıkları arasında Au/n-6H-SiC SBD'nin n ve Φ_b değerlerini hesaplamışlardır [107]. Yapılan çalışmada, n değerlerinin 6,4 ile 1,8 aralığında ve Φ_b değerlerinin ise 0,22 ile 0,78 eV aralığında olduğu rapor edilmiştir. Aynı çalışmada, 300-400 K sıcaklıkları arasındaki n değerleri 2,1 ile 1,8 arasında ve Φ_b değerleri 0,68 ile 0,78 eV arasında değişmektedir. Sefaoğlu ve arkadaşlarının 100-500 K sıcaklıkları arasında Ni/n-6H-SiC SBD üzerine yaptıkları çalışmada, n değerleri 1,70 ile 1,16 aralığında ve Φ_b değerleri 0,65 ile 1,27 eV aralığında olduğu belirlenmiştir [108]. 300-500 K sıcaklık aralığında n , 1,27 ile 1,16 arasında ve Φ_b , 1,05 ile 1,27 eV arasında değişmektedir. Kaya ve arkadaşlarının 100-500 K sıcaklıkları arasındaki Ni/n-6H-SiC SBD için yaptıkları çalışmada n değerlerinin 3,41 ile 1,64 aralığında olduğu ve Φ_b değerlerinin de 0,39 ile 0,90 eV aralığında olduğu bulunmuştur [109]. 300-400 K sıcaklıkları arasında n , 1,91 ile 1,64 aralığında ve Φ_b , 0,76 ile 0,90 eV aralığında değerler almaktadır.

Çizelge 4.1. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için TE modeli ile sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan I_0 , n ve Φ_{b0} değerleri

T (K)	I_0 (A)	n	Φ_{b0} (eV)
300	$1,34 \times 10^{-6}$	1,64	0,76
320	$1,91 \times 10^{-6}$	1,46	0,81
340	$3,47 \times 10^{-6}$	1,37	0,85
360	$6,08 \times 10^{-6}$	1,31	0,88
380	$9,59 \times 10^{-6}$	1,27	0,92
400	$1,50 \times 10^{-5}$	1,22	0,96
420	$2,13 \times 10^{-5}$	1,18	1,00
440	$3,25 \times 10^{-5}$	1,14	1,03
460	$4,66 \times 10^{-5}$	1,11	1,07
480	$7,02 \times 10^{-5}$	1,07	1,10

Literatürden elde edilen sonuçlar bu çalışmada üretilen MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotundan hesaplanan sonuçlarla karşılaştırıldığında, MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotundan hesaplanan idealite faktörünün Au/n-6H-SiC diyotlara göre daha düşük değerler

aldığı, Ni/n-6H-SiC diyotlara göre biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotundan hesaplanan bariyer yüksekliğinin Au/n-6H-SiC diyotlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, arayüzde MWCNT varlığının Au/n-6H-SiC kontaklar için bir blok katmanı rolü üstlendiğini göstermektedir. Bu bağlamda, arayüz malzeme diyotun ileri beslem akımının artmasına ve ters beslem akımının azalmasına katkı sağlayarak ileri ve ters beslem özelliklerini iyileştirir.



Şekil 4.4. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300-480 K sıcaklıkları arasında sıfır beslem durumunda sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve bariyer yükseklikleri

Şekil 4.4'te Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun sıfır beslem durumunda sıcaklığa bağlı n ve Φ_{b0} parametrelerinin değişim grafiği sunulmuştur. Grafikten açıkça görüleceği üzere, sıcaklık artışı ile n azalırken, Φ_{b0} artar. İdealite faktörünün artan sıcaklıkla azalması ya da azalan sıcaklıkla artması T_0 etkisi olarak bilinir. Yani n idealite faktörü sıcaklık ile ters orantılı bir ilişki sergilerken, Φ_{b0} bariyer yüksekliği sıcaklık ile doğru orantılı bir ilişki ortaya koymaktadır. Elde edilen bu sonuç, n ve Φ_{b0} parametrelerinin sıcaklık ile güçlü bir bağa sahip olduğunun göstergesidir. Metal ve yarıiletkenin arayüzeyi boyunca akım iletimi sıcaklık ile ilişkili olduğundan, akımın oluşumu Schottky bariyerini

aşan taşıyıcılar sayesinde gerçekleşir ve sıcaklığın artması ile daha fazla elektron Schottky bariyerini aşmak için yeterli enerjiye sahip olur. MWCNT/n-6H-SiC diyotunda idealite faktörünün daha yüksek değerler alması; arayüzeydeki MWCNT yapısının yüzey kusurlarının varlığı, Schottky bariyerinin homojensizliği ve bariyer yüksekliğinin beslem voltajına bağlılığı ile açıklanabilir [43]. Diğer taraftan, idealite faktörünün daha büyük değerler almasında rekombinasyon ve tünelleme akımlarının etkisi görülebilir [43,110].

4.3. Elektriksel Parametreler

Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun elektriksel özellikleriyle ilgili fiziksel parametreler Cheung-Cheung yöntemi, Norde yöntemi ve Richardson eğrilerinin analizi ile elde edilmiştir.

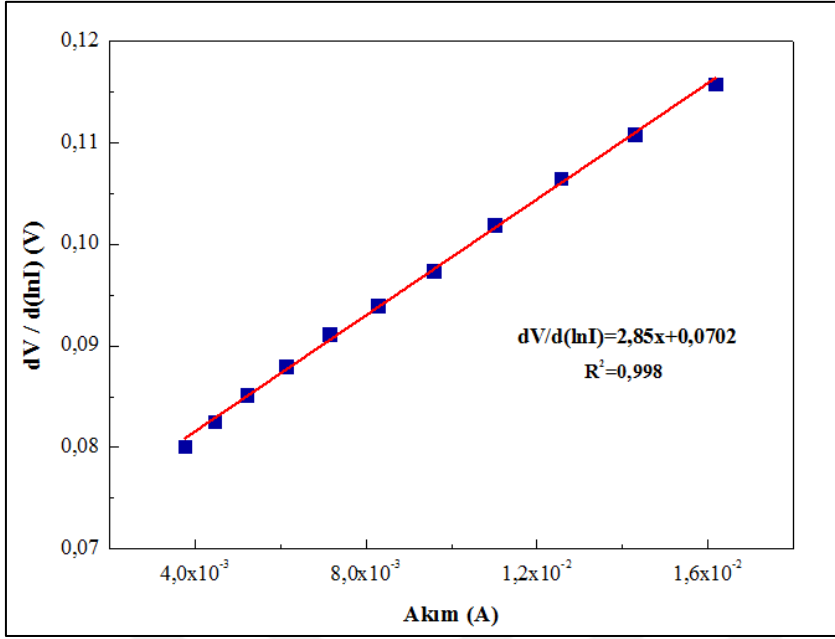
$\ln I$ - V grafiğinde ileri beslem akımının düşük voltaj bölgeleri genel olarak lineer bir davranış gösterir. Voltaj değeri artırıldığında, grafiğin lineer bölgesinde sapmalar meydana gelmektedir. Bu sapmalar, metal ile yarıiletken arasında kullanılan arayüzey malzeme ve arayüzey durumlarının neden olduğu dirençten kaynaklanır. Bu bağlamda, Schottky diyotların elektriksel özelliklerinin anlaşılmasını sağlayan önemli parametrelerden biri seri dirençtir (R_S). Cheung-Cheung yöntemi seri direncin belirlenmesine yönelik yöntemlerden biridir. Cheung-Cheung yönteminde R_S değerinin yanı sıra, n ve Φ_{b0} parametreleri de belirlenmektedir. R_S , Eş. 4.5 ve Eş. 4.6 ile tanımlanırsa [111];

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_S, \quad (4.5)$$

$$H(I) = IR_S + n\Phi_{b0}, \quad (4.6)$$

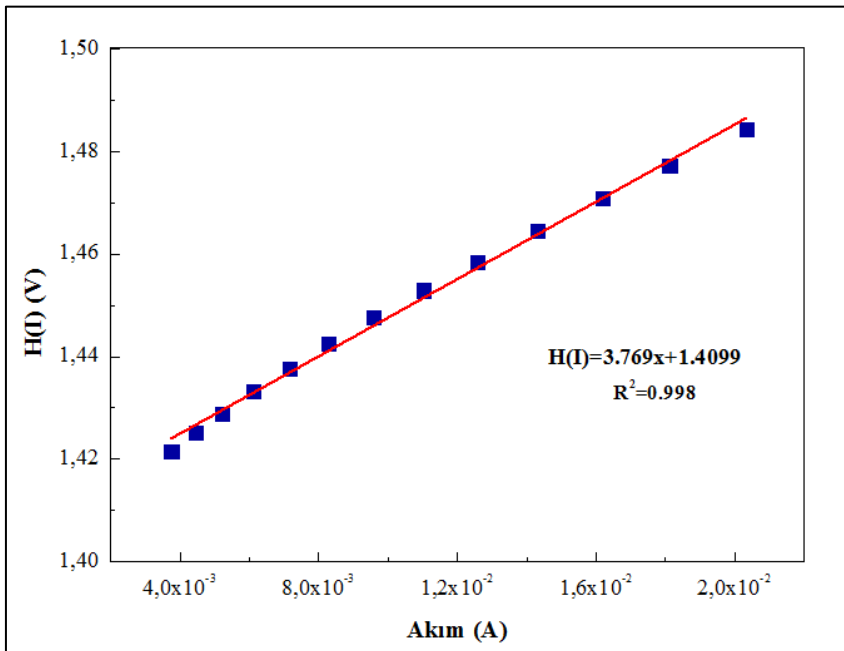
ifadeleri elde edilir.

$\frac{dV}{d(\ln I)}$ - I grafiği Şekil 4.5 içerisinde sunulmuştur. Bu grafiğin eğimi R_S değerini verirken, grafiğin y eksenini ile kesişiminden n değeri elde edilir.



Şekil 4.5. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun oda sıcaklığındaki dV/d(lnI)'ya karşı akım grafiği

Yine Şekil 4.6 ile sunulan H(I) - I grafiğinin eğiminden R_S değeri elde edilirken, grafiğin kesişiminden $n\Phi_{b0}$ değeri bulunur. Φ_{b0} değeri, grafiğin bu kesişim noktasından belirlenir. Ayrıca, Çizelge 4.2 içerisinde Cheung-Cheung yönteminden elde edilen elektriksel parametrelere yer verilmiştir.



Şekil 4.6. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun oda sıcaklığındaki H(I)'ya karşı akım grafiği

Çizelge 4.2. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için Cheung-Cheung yöntemiyle hesaplanan R_S , n ve Φ_{b0} değerleri

T (K)	R_S (Ω) $dV/d\ln(I)-I$	n $dV/d\ln(I)-I$	R_S (Ω) $H(I)-I$	Φ_{b0} (eV) $H(I)-I$
300	2,85	2,71	3,77	0,51
320	2,59	2,56	2,97	0,56
340	2,46	2,55	2,83	0,59
360	2,34	2,53	2,57	0,61
380	2,22	2,46	2,34	0,65
400	2,07	2,44	2,17	0,67
420	1,93	2,42	2,00	0,70
440	1,84	2,39	1,85	0,73
460	1,81	2,30	1,76	0,78
480	1,73	2,27	1,69	0,81

Seri direncin belirlenmesi için geliştirilmiş olan bir diğer metod Norde yöntemidir. Bu yöntem, aynı zamanda diyotun bariyer yüksekliğinin hesaplanması için kullanılan uygun bir yöntemdir. Yöntemin dezavantajı, grafik üzerindeki minimum noktanın belirlenmesinin zor olmasıdır. Norde fonksiyonu aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [112]:

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right). \quad (4.7)$$

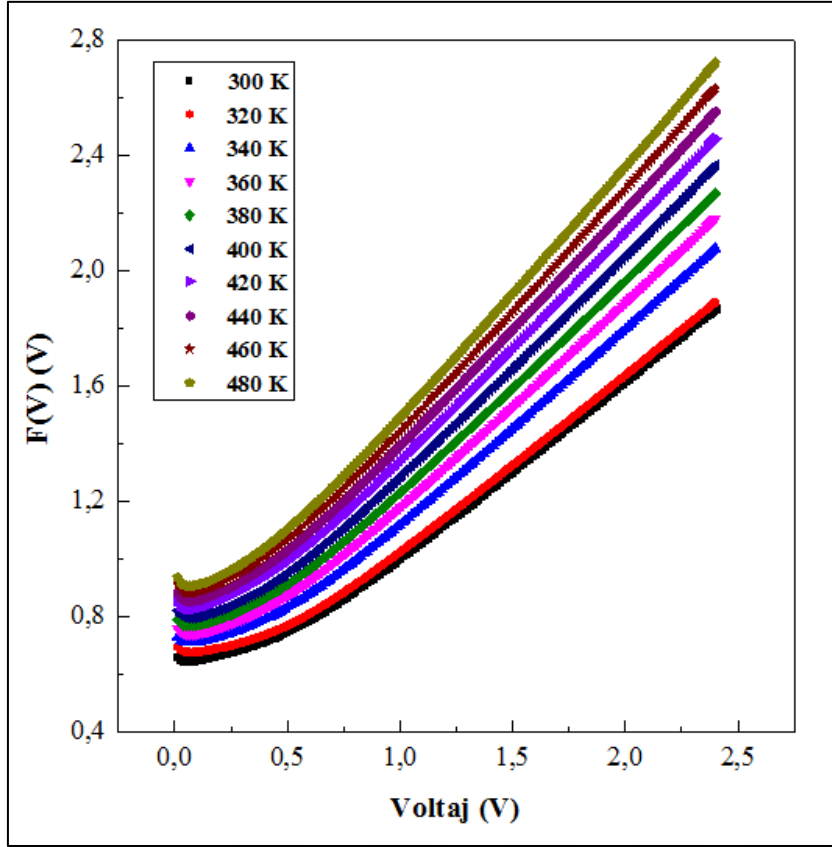
Fonksiyon içinde yer alan γ ifadesi idealite faktöründen büyük keyfi bir tam sayıdır, β ifadesi ise q/kT 'dir. Şekil 4.7'den açıkça görüleceği üzere, $F(V) - V$ grafiği minimum bir noktaya sahiptir. Bariyer yüksekliği aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\varphi_b = F_{min} + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{1}{\beta}. \quad (4.8)$$

Bu denklemde V_{min} , $F(V) - V$ grafiğinde F_{min} değerine karşılık gelen değerdir. R_S değerini veren eşitlik ise,

$$R_S = \frac{\beta(\gamma-n)}{I_{min}} \quad (4.9)$$

şeklinde yazılır.



Şekil 4.7. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300-480 K sıcaklıkları arasındaki $F(V)$ 'ye karşı voltaj eğrileri

Çizelge 4.3. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için Norde yöntemiyle hesaplanan R_S ve Φ_{b0} değerleri

T (K)	R_S (Ω) F(V)-V	Φ_{b0} (eV) F(V)-V
300	75,4	0,66
320	27,8	0,70
340	19,9	0,73
360	11,7	0,76
380	7,74	0,79
400	5,33	0,82
420	3,57	0,85
440	2,55	0,87
460	1,85	0,90
480	1,27	0,93

Norde yöntemine ilişkin deneysel sonuçlar Çizelge 4.3 içerisinde sunulmuştur. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'e göre, Cheung-Cheung ve Norde yöntemlerinden elde edilen seri direnç değerleri birbirleriyle karşılaştırıldığında, oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda bir miktar farklılıklar olduğu görülür. Norde yöntemiyle belirlenen seri direnç değerleri, Cheung-Cheung yöntemine göre, 300-420 K sıcaklıkları arasında daha yüksek değerler almaktadır.

Her iki yöntemin R_S değerleri 420-480 K sıcaklıkları aralığında birbirine daha yakındır. Hesaplanan sonuçlar arasındaki fark, iki yöntem arasındaki hesaplama farkından veya yaklaşımından kaynaklanmaktadır.

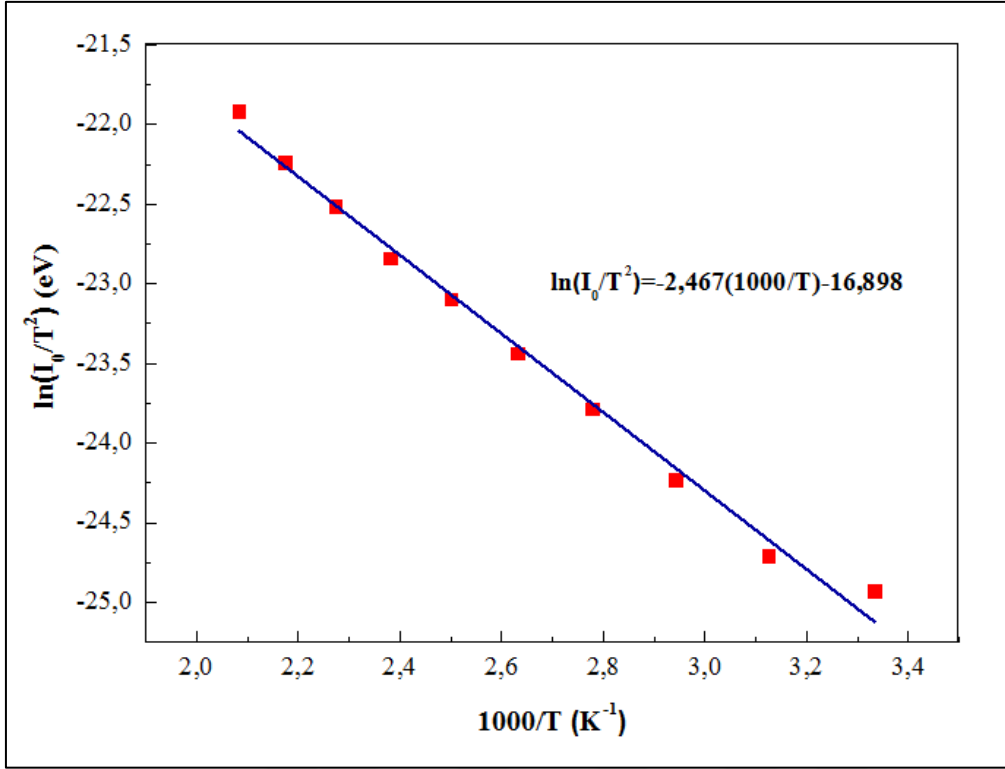
Her iki yöntemden elde edilen sonuçlara göre, artan sıcaklıkla seri direnç değerinin azaldığı görülmektedir. MWCNT/n-6H-SiC diyotunda daha düşük sıcaklıklarda R_S değerinin daha büyük değerler alması, arayüzeydeki serbest yük taşıyıcı konsantrasyonunun azalması ile ilişkilendirilebilir. Yük taşıyıcı konsantrasyonunun azalması, seri direnç değerini artırabilir [113]. Çünkü arayüzey tabakasında hareketliliği daha yüksek olan yük taşıyıcıları metale karşı daha serbest bir şekilde iletebilmektedir. MWCNT/n-6H-SiC diyotunun sıcaklığa bağlı R_S değerleri, literatürde daha önce raporlanan Au/n-SiC yapılarına kıyasla çok düşüktür [107,109]. Bu bağlamda, diyotun arayüzeyinde yer alan MWCNT'lerin seri direnci azaltmada etkili olduğu söylenebilir.

Bariyer yüksekliğinin elde edilmesinde yararlanılan alternatif yöntem Şekil 4.8 içerisinde sunulan Richardson grafiğidir. Bu grafiğin oluşturulması için yararlanılan eşitlik;

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\Phi_{b0}}{kT} \quad (4.10)$$

ifadesi ile verilir.

Denklemden elde edilen ve Şekil 4.8 ile verilen $\ln(I_0/T^2) - 1000/T$ grafiğinin lineer olması beklenir. Grafiğin eğimi 300 K sıcaklığındaki bariyer yüksekliğini verirken, bu değer aynı zamanda diyotun aktivasyon enerjisidir. Grafiğin eğim çizgisi ile kesişiminden ise Richardson sabiti (A^*) bulunur. MWCNT/n-6H-SiC diyotundan hesaplanan A^* ve Φ_{b0} sırasıyla $5,84 \times 10^{-6} \text{ Acm}^{-2}\text{k}^{-2}$ ve 0,21 eV'dir.

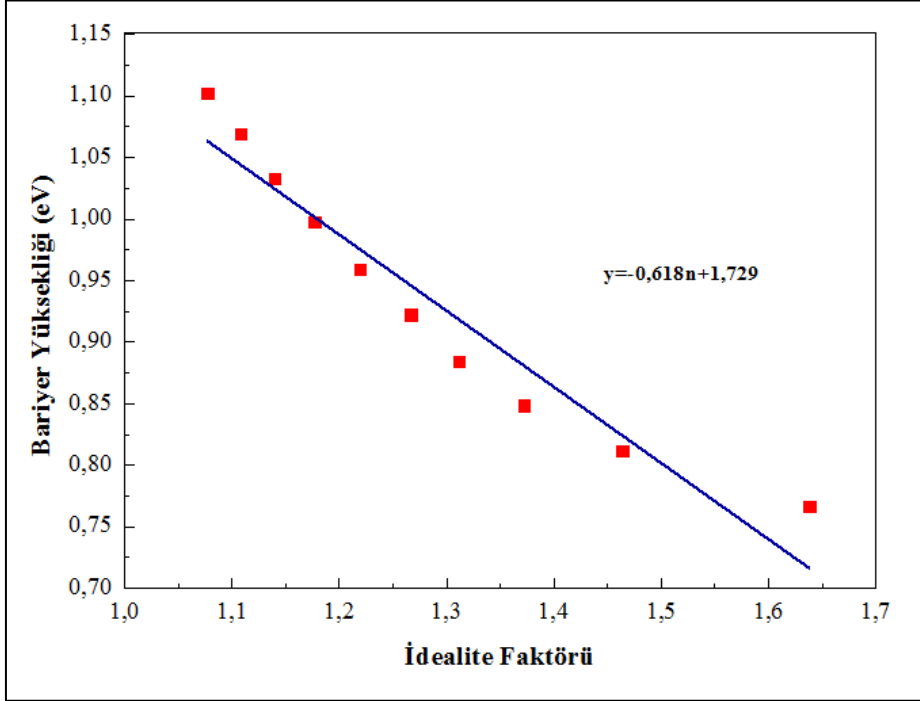


Şekil 4.8. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için belirlenen Richardson grafiği

I-V özelliklerinin sıcaklığa bağlılığından elde edilen A^* değerinin teorik sonuçlardan çok daha farklı değerlerde olması, diyot arayüzeyindeki bariyer yüksekliğinin uzamsal olarak homojensizliği ve bölgesel potansiyel dalgalanmaları ile ilişkilendirilebilir. Diyotun potansiyel dağılımında akım, alt engel yüksekliğinden akmayı tercih eder [2,114]. Akımın iletilmesi esnasında, diyotun farklı potansiyel bariyer yüksekliklerinden geçerken etkin kütlelerin farklı olabileceği bir durum ortaya çıkabilir. Bu nedenle, hesaplanan etkin kütledeki sapma nedeniyle A^* teorik değerden farklı olabilir [115]. Bu çalışmada üretilen MWCNT/n-6H-SiC diyotu için bulunan A^* değeri literatürde yapılan diğer çalışmalar ile uyum göstermektedir [116,117].

MWCNT/n-6H-SiC diyotunda deneysel bariyer yüksekliğine karşı idealite faktörü grafiği Şekil 4.9 içerisinde verilmiştir. Etkin bariyer yüksekliği (Φ_e) ile bariyerin homojensizliğini gösteren idealite faktörü arasında doğrusal bir ilişki elde edilir. Homojen bariyer yükseklikleri, $n = 1$ değeri için bariyer yüksekliğinin eksenini kestiği noktadan belirlenir. Üretilen diyotun 300-480 K sıcaklıkları arasındaki etkin bariyer yüksekliği değeri 1,11 eV olarak bulunmuştur. Bulunan sonuç, mevcut akım iletim mekanizmasının TE modeline göre

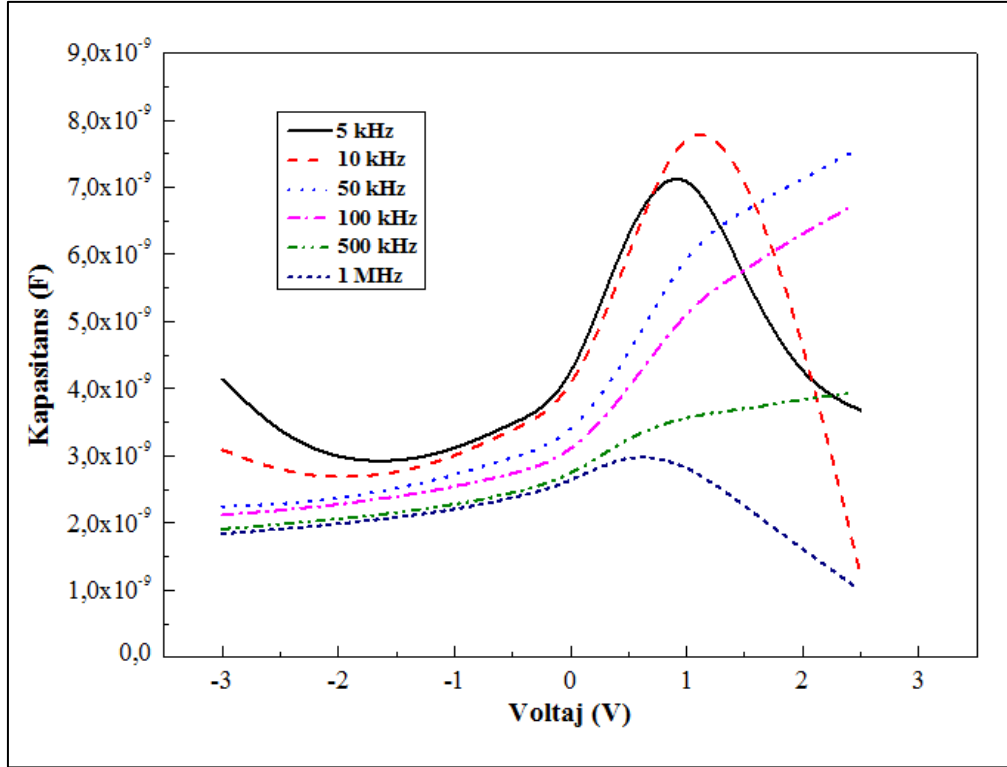
sapmaya uğradığını göstermektedir. Bu sapmanın nedeni, diyot arayüzündeki bariyer yüksekliklerinin homojensizliği ile ifade edilebilir.



Şekil 4.9. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için 300-480 K sıcaklıkları arasında sıfır beslem durumunda idealite faktörüne karşı bariyer yüksekliği

4.4. Kapasitans-Voltaj Karakteristiği

MWCNT/n-6H-SiC diyotunun 300 K sıcaklığındaki ileri ve ters beslem akımındaki kapasitans-voltaj özellikleri Şekil 4.10 ile gösterilmiştir. 5, 10, 50, 100, 500 ve 1000 kHz frekanslarında ölçümü yapılan diyotun kapasitansı frekansın azalması ile artar. Kapasitansın düşük frekanslarda artması, arayüz durumları ile ilişkilendirilebilir. Düşük frekanslarda arayüz durumları alternatif akım sinyalini takip eder. Böylece toplam kapasitansı daha da artıran tükenme kapasitansı ile arayüz durum kapasitansı doğrudan paralel olarak görünür [118]. Frekansın artması ile arayüz durumları alternatif akım sinyalini takip edemez ve arayüz durumları sabit değerler alır. Diyot kapasitansına katkı yapmayan arayüz durum yükleri, kapasitansın düşük değerler almasına neden olur [119].

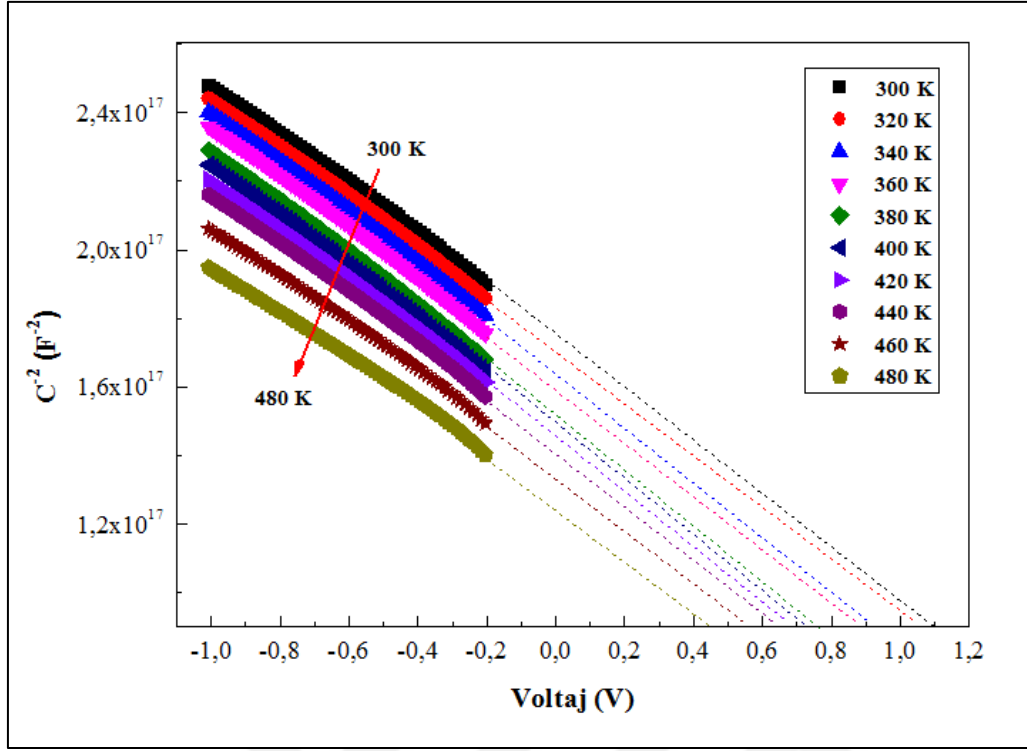


Şekil 4.10. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun 300 K sıcaklığında farklı frekanslar için ölçülen C-V özellikleri

Ters beslem akımının bir fonksiyonu olarak ölçülebilen kapasitansın 300-480 K sıcaklıkları arasında 1 MHz frekansta ölçülen C-V özellikleri Şekil 4.11 ile verilmiştir. Schottky diyotlarında tüketim tabakası kapasitansı aşağıdaki gibidir [43]:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_0 + V_R)}{q\epsilon_s A^2 N_d} \quad (4.11)$$

Bu denklemdeki A kontak alanıdır. ϵ_s , n-6H-SiC yarıiletken kristalinin geçirgenliğidir ve $\epsilon_s = 9,6 \epsilon_0$ 'dir (ϵ_0 , boş alanın geçirgenliğidir). N_d , verici ya da serbest taşıyıcı konsantrasyonudur. V_R , ters beslem gerilimi ve V_0 , kesme gerilimidir. C^{-2} -V eğrilerinin potansiyel eksenine uzatılmasıyla belirlenen V_0 kesme geriliminden faydalanılarak difüzyon potansiyeli (V_d) hesaplanır. Arayüzey durumları olmadığında kesme gerilimi V_0 ile difüzyon gerilimi V_d arasında $V_0 = V_d - kT/q$ ilişkisi vardır. 300 K sıcaklıkta sıfır beslem durumunda V_d ile N_d değerleri sırasıyla 1,13 V ve $2,13 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.11. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun ters beslem durumunda ve 300-480 K sıcaklıkları arasındaki C^2 -V eğrileri

Bariyer yüksekliği,

$$\Phi_{b0}(C - V) = V_0 + V_n \quad (4.12)$$

eşitliği ile bulunur.

Bu denklemdeki, V_n ifadesi N_d verici konsantrasyonu bilinerek hesaplanabilen Fermi seviyesi ve iletkenlik bandının minimumu arasındaki potansiyel farktır. V_n ifadesi aşağıdaki eşitlik ile elde edilir:

$$V_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right). \quad (4.13)$$

Bu eşitlikteki, N_c ifadesi iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur ve n-6H-SiC yarıiletkeni için 300 K sıcaklıktaki N_c değeri $8,98 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ tür [120,121]. MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotunun C-V ölçümleri kullanılarak elde edilen deneysel parametreleri Çizelge 4.4 içerisinde sunulmuştur.

Çizelge 4.4. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotunun ters beslem durumunda ve 300-480 K sıcaklıkları arasındaki C^{-2} -V eğrilerinden hesaplanan elektriksel parametreler

T (K)	V_0 (V)	V_d (eV)	V_n (eV)	N_d (cm ⁻³)	W_d (eV)	Φ_{b0} (eV) C-V	Φ_{b0} (eV) I-V
300	1,10	1,13	0,275	$2,13 \times 10^{15}$	$7,48 \times 10^{-5}$	1,38	0,76
320	1,07	1,10	0,296	$2,13 \times 10^{15}$	$7,39 \times 10^{-5}$	1,37	0,81
340	0,92	0,95	0,321	$1,86 \times 10^{15}$	$7,35 \times 10^{-5}$	1,24	0,85
360	0,88	0,91	0,343	$1,86 \times 10^{15}$	$7,20 \times 10^{-5}$	1,22	0,88
380	0,75	0,78	0,365	$1,86 \times 10^{15}$	$6,68 \times 10^{-5}$	1,12	0,92
400	0,72	0,74	0,386	$1,86 \times 10^{15}$	$6,55 \times 10^{-5}$	1,11	0,96
420	0,68	0,72	0,408	$1,86 \times 10^{15}$	$6,39 \times 10^{-5}$	1,09	1,00
440	0,63	0,67	0,431	$1,86 \times 10^{15}$	$6,16 \times 10^{-5}$	1,06	1,03
460	0,54	0,58	0,453	$1,86 \times 10^{15}$	$5,74 \times 10^{-5}$	0,99	1,07
480	0,42	0,46	0,470	$2,13 \times 10^{15}$	$4,89 \times 10^{-5}$	0,89	1,10

Çizelge 4.4'te I-V ölçümlerinden elde edilen Φ_{b0} değerleri sıcaklığa bağlı olarak artarken, C-V ölçümünden elde edilen Φ_{b0} değerleri sıcaklıkla azalmaktadır. I-V'den ölçülen değerler, daha düşük bariyer yüksekliğinden geçen akımlarla daha çok ilişkilidir. Bu nedenle ölçülen akım, bariyer yüksekliği düşük olan engellerden geçen akımdır. Başka bir deyişle, sıcaklık artışına bağlı olarak, yeterli termal enerjiye sahip daha fazla elektron, diyotun daha yüksek bariyer yüksekliklerini daha kolay aşmasını sağlayacaktır. Çünkü daha yüksek enerjili elektronların bariyeri geçme olasılığı daha yüksektir. I-V ölçümleri, arayüzdeki potansiyel dalgalanmalardan etkilenir. Bu nedenle, I-V ölçümünde arayüzden akan akım, arayüzdeki bariyer yüksekliğinin potansiyel dağılımına üstel olarak bağlıdır [119]. Diğer taraftan, kapasitans ölçümleri, uzay yükü bölgesindeki daha küçük bir uzunluk ölçeğindeki potansiyel dalgalanmalara karşı duyarsızdır.

C-V ölçümlerinden elde edilen bariyer yükseklikleri diyotun tüketim bölgesindeki yük dağılımları ile ilgilidir. Φ_{b0} , tüm diyot alanı üzerinde ölçülen kapasitans ile ilgilidir. Hem I-V hem de C-V ölçümlerinden elde edilen Φ_{b0} değerleri arasındaki farkın nedeni, aygıt üretiminde kullanılan arayüzey tabakasının homojensizliği, arayüzey tabakasının kalınlığındaki homojensizlik ve arayüzeydeki kusurlara bağlı olarak taşıyıcı yüklerin düzensiz dağılımları sonucu ortaya çıkabilir. MWCNT/n-6H-SiC SBD için C-V ölçümlerinden belirlenen Φ_{b0} değerleri, 300-480 K sıcaklıkları arasında sıcaklık arttıkça azalır. C-V ölçümlerinden elde edilen davranışın nedeni, artan sıcaklıkla n-6H-SiC yarıiletkenin yasak enerji bant aralığının azalması ve uzay yükü bölgesindeki taşıyıcı elektronların sayısı ile ilişkilendirilebilir [122,123].

4.5. Arayüzey Durum Yoğunluğu

Akım iletim mekanizmalarının dışında, Schottky diyotlarda yarıiletkenlerin elektriksel parametrelerine arayüz tabakanın kalınlığı ve arayüzey durum yoğunluğu etki etmektedir. Arayüzey durum konsantrasyonu hem idealite faktörünün hem de bariyer yüksekliğinin elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabakası kalınlaştığında akımın iletilme olasılığı da azalmaktadır. Bu bağlamda, etkin bariyer yüksekliği (Φ_e) diyota uygulanan gerilime bağlı olarak değişim gösterir. Etkin bariyer yüksekliği aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [124]:

$$\Phi_e = \Phi_{bo} + \beta V. \quad (4.14)$$

Bu eşitlikteki β , bariyer yüksekliğinin voltaj katsayısıdır ve yarıiletkenle dengede her iki arayüz durumunun etkisini içeren bir parametredir. $\beta = 1 - (1/n(V))$ olup Eş. (4.14)'te yerine yazılırsa, Φ_e 'nin ifadesi,

$$\Phi_e = \Phi_{bo} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right) V \quad (4.15)$$

eşitliği ile elde edilir. Uygulanan voltaja bağlı olarak değişen idealite ifadesi $n(V)$, Card ve Rhoderick tarafından tanımlanmıştır [43]:

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left(\frac{\varepsilon_s}{W_d} + qN_{ss}(V) \right). \quad (4.16)$$

Bu eşitlikten N_{ss} ifadesi çekilirse, aşağıda verilen Eş. 4.17 elde edilir:

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_d} \right]. \quad (4.17)$$

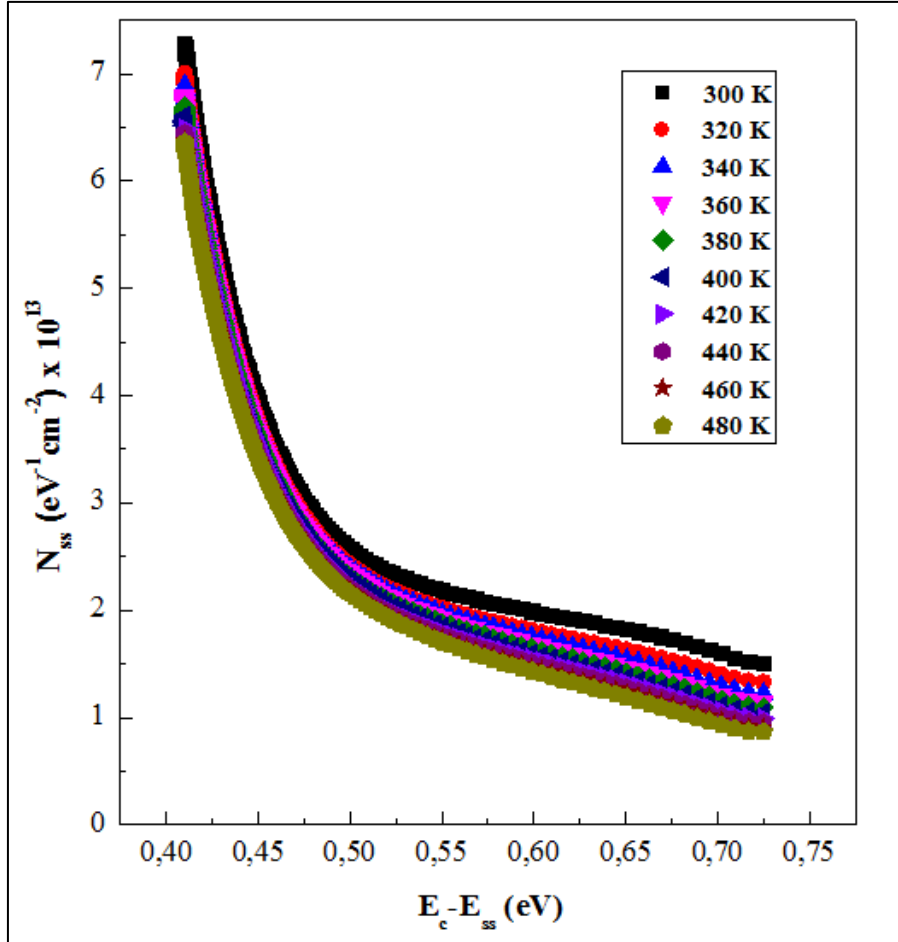
Eş. 4.17 içerisinde arayüzey durum yoğunluğu N_{ss} , arayüzeyin ve yarıiletkenin dielektrik sabitleri ε_i ve ε_s , arayüzey tabaka kalınlığı δ ve tüketim bölgesinin genişliği W_d 'dir. Ölçülen her sıcaklık için tüketim katmanının genişliği,

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_0 + V_R)}{qN_d}}. \quad (4.18)$$

n-tipi yarıiletken için arayüzey durumlarının enerjisi E_{ss} ve yarıiletken yüzeyinin iletkenlik bandı sınır enerjisi E_c 'dir. Yarıiletkenin yüzeyi ile iletkenlik bandının sınırı arasındaki fark aşağıda verilmiştir:

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V). \quad (4.19)$$

Eş. 4.15 ve Eş. 4.19 ile birlikte Eş. 4.16 yardımıyla üretilen diyotun arayüzey durum yoğunluğunun dağılımı hesaplanır. 300-480 K sıcaklık değeri aralığı için $E_c - E_{ss}$ 'ye karşı N_{ss} grafiği Şekil 4.12 içerisinde sunulmuştur.



Şekil 4.12. Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için 300-480 K sıcaklıkları arasında N_{ss} 'ye karşı $E_c - E_{ss}$ grafikleri

Arayüzey durum yoğunluğu 300 K'de $1,57 \times 10^{13}$ ile $7,18 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değişirken ve 480 K'de $9,26 \times 10^{12}$ ve $6,27 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ arasında değişim göstermektedir. Beklendiği üzere, bu değerler sıcaklık arttıkça N_{ss} değerlerinin azaldığını gösterir. N_{ss} değerlerinin artan sıcaklıkla azalması, metal ve yarıiletken arayüzeyindeki bariyer yüksekliğinin homojen olmaması nedeniyle idealite faktörünün sıcaklığın bir fonksiyonu olarak azaldığı anlamına gelir. Schottky diyotlarda arayüz katmanında kullanılan malzeme, seri direnç etkisi ve arayüzey durumları bariyer yüksekliği açısından önemlidir. N_{ss} değerlerinin sıcaklığın

etkisiyle azalması, sıcaklığın etkisiyle arayüzün yeniden düzenlenmesi ve yeniden yapılandırılmasıyla açıklanabilir [125].

4.6. MWCNT/n-6H-SiC Schottky Bariyer Diyot Yapısı Üzerine Değerlendirmeler

SiC ve CNT'ler arasında elektriksel iletkenliği yüksek kontakların oluşturulması ve bu kontak yapısının arayüz özelliklerinin incelenmesi elektronik cihazların çalışması ve performansı üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. SiC ve CNT'ler arasında yük transferinin mümkün olduğunu gösteren az sayıda çalışma olmasına rağmen, kullanılan yöntemler dışında farklı üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, MWCNT/SiC aygıtlarının elektronik özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. SiC ve metaller ile oluşturulan kontaklar doğrultucu davranış gösterirken, SiC ve metal arasındaki arayüz tabakası diyotun elektriksel özelliklerini etkiler. Arayüz katmanında kullanılan malzemeler bariyer yüksekliğini kontrol etmede ve seri direnci değiştirmede rol oynamaktadır. MWCNT'ler bu elektriksel özellikleri sağlamak için alternatif bir malzemedir. MWCNT/n-6H-SiC yapısı, belirgin bir şekilde doğrultucu bir davranış gösterir. MWCNT'lerden SiC'ye akımın uygulanan voltajla lineer olarak arttığı, küçük bir akımın ise SiC'den MWCNT'lere ters beslem ile gittiği görülmektedir. Bu, MWCNT/n-6H-SiC yapısında Schottky bariyeri oluştuğunun göstergesidir. Hem SiC hem de MWCNT'lerin iletkenlik özellikleri göz önüne alındığında, elektronların SiC'den MWCNT'lere ve MWCNT'lerden metale elektron transferinin arayüzde daha hızlı olması beklenir. Bununla birlikte, bariyer yükseklikleri literatürde rapor edilen Au/n-6H-SiC yapıları diğer çalışmalardan biraz daha yüksektir [107,109]. Bariyer yüksekliğinin büyük olması, SiC ve MWCNT'ler arasındaki atomik bağ oluşumundan kaynaklanıyor olabilir. MWCNT'deki karbon atomları, SiC yarıiletkenindeki Si ve C atomları ile kovalent bağlar oluşturur. Bu bağlar, MWCNT'ler ve SiC arasında elektron transferinin gerçekleşmesine izin verir. Ayrıca Norde ve Cheung-Cheung yöntemlerinden hesaplanan seri direnç değerlerinde MWCNT'lerin etkisinin olduğu görülmektedir (Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3). Seri direnç değerleri, daha önce raporlanan Au/n-SiC yapılarına kıyasla önemli ölçüde azalmaktadır [107,109]. Diğer taraftan, literatürde CNT/SiC yapısının oluşturulduğu ve Schottky bariyer oluşumunun gözlemlendiği az sayıda çalışma bulunmaktadır. Maruyama ve arkadaşları, PES kullanarak CNT/n-6H-SiC arayüzünde oluşturulan Schottky bariyerini ölçmüş ve oda sıcaklığında potansiyel bariyer yüksekliğini 1,38 eV olarak gözlemlenmiştir [12]. Yine Inaba ve arkadaşları, odaklanmış iyon ışını (Focused Ion Beam - FIB) tekniğini kullanarak

Ti/CNT/SiC yapısını üretmiş ve iletim alanını sınırlayarak kontak direncinden bariyer yüksekliklerinin 0,40-0,45 eV arasında olduğunu belirlemişlerdir [15]. Her iki çalışmada da CNT/SiC arayüzünde ikili bir bariyer yüksekliği oluşumu tespit edilmiş ve bu durum tartışılmıştır. Bu tez çalışmasında, diğer çalışmalardan farklı olarak tek bir bariyer yüksekliği oluşumu gözlemlenmiş ve oda sıcaklığında potansiyel bariyer yüksekliği 0,76 eV olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, potansiyel bariyer yükseklikleri arasındaki fark, kullanılan CNT'lerin tipine, CNT'leri arayüzde oluşturulma yöntemine ve CNT'ler ile SiC arasındaki atomik bağ yapısına bağlı olabileceği düşünülmektedir. Ancak bariyer yüksekliklerinin birçok metal/n-6H-SiC yapıya göre daha düşük olduğu görülmektedir [126,127]. Bu, farklı yöntemlerle üretilen CNT/SiC yapılarının farklı elektronik cihaz uygulamalarında kullanılmasına olanak tanımaktadır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, arayüz malzeme olarak MWCNT kullanılarak Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu üretilmiş ve üretilen diyotun 300-480 K sıcaklıkları arasındaki elektriksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışma, MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotlarına ilişkin yeni bilgiler sağlamak için önemli katkılar sağlamaktadır. Çalışmanın kapsamını; MWCNT arayüzlü Schottky bariyer diyotunun üretimi, I-V ve C-V ölçümleri, diyotun yapısal karakterizasyonu ve elektriksel parametrelerinin belirlenmesi aşamaları oluşturmaktadır.

Schottky bariyer diyotunda alttaş malzeme olarak n-6H-SiC yarıiletken kristali seçildi. Bu yarıiletkenin seçilmesinde, fiziksel ve elektriksel açıdan önemli özelliklere sahip bir malzeme olması etkili olmuştur. Ayrıca n-6H-SiC yarıiletkeninin kurucu atomları ile MWCNT'nin karbon atomlarının arayüzde atomik bağlar oluşturabilme durumu da göz önünde bulunduruldu. Deneysel üretimin ilk aşamasında, kimyasal olarak temizlenen n-6H-SiC yarıiletkeninin mat yüzeyi termal buharlaştırma sisteminde Au metali kaplanarak omik kontak oluşturuldu. Daha sonra, toz hâlinde temin edilen MWCNT'ler önce DMF çözücü ile süspansiyon bir çözelti olarak hazırlandı ve n-6H-SiC yarıiletkeninin parlak yüzeyi damlat kurut yöntemiyle kaplandı. Yarıiletkenin MWCNT kaplanan yüzeyine yine termal buharlaştırma sisteminde Au metali ile Schottky (doğrultucu) kontaklar oluşturuldu.

Yarıiletken yüzeyine kaplanan MWCNT'lerin yapısal karakterizasyonu SEM ve Raman Spektroskopisi ile belirlendi. Yüze kaplanan MWCNT'lerin spagetti görünümüne benzeyen birbirlerine dolanmış tüpler hâlinde ve rastgele bir şekilde kristal yüzeyine kaplandığı gözlemlendi. MWCNT'lerin dış çapı 17-22 nm arasında değişim gösterirken, arayüz tabakanın enine kesitinden alınan kalınlığın ortalama 200 nm olduğu görüldü. Diğer taraftan, Raman Spektroskopisi'nde gözlemlenen tüm pik değerleri, literatürde MWCNT ile ilgili rapor edilen diğer çalışmalarla uyumludur. D bandındaki yoğunluğun G bandından fazla olması, malzeme yüzeyindeki kusurların oluşumu ile ilgili olmakla birlikte, yarıiletken tabakanın üzerine kaplanan MWCNT'lerin yapısal düzensizliğini göstermektedir.

Üretilen MWCNT/ n-6H-SiC Schottky bariyer diyotunun akım iletim mekanizmasını ve elektriksel parametrelerini belirleyebilmek için 300-480 K sıcaklıkları arasında 20 K'lik adımlarla 10 farklı sıcaklık değerinde akım voltaj ölçümleri yapıldı. Ayrıca, üretilen diyotun

300 K'de farklı frekanslarda ve 1 Mhz frekansta 300-480 K sıcaklıkları arasında 20 K'lik adımlarla kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri gerçekleştirildi. Schottky bariyerinin akım iletim mekanizmasının TE modeli olması durumunda, elektronlar yarıiletken metale doğru akarken, ileri beslem durumunda akım ve voltaja ait yarı logaritmik grafik üstel olarak artar (Şekil 4.3). TE modeli çerçevesinde, MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotunun 300-480 K sıcaklıkları aralığındaki idealite faktörü 1,64 ile 1,07 arasında ve bariyer yüksekliği 0,76 ile 1,10 eV arasında değerler almıştır. Sıcaklık değerleri arttıkça, idealite faktörü 1 değerine yaklaşarak artan sıcaklıkla azalırken, bariyer yüksekliği ise artma eğilimi göstermektedir. Bu değerler, idealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla güçlü bir ilişkisinin olduğunu ortaya koymaktadır. MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotunun yarı logaritmik I-V grafiğinden görüleceği üzere, sıcaklık artışına bağlı olarak doğruların eğimi katlanarak artmaktadır. İleri beslem durumunda 0,5 V'tan daha düşük voltajlarda akım uygulanan voltaja bağlı olarak doğrusal şekilde artarken, 0,5 V'tan daha büyük voltajlarda seri direnç etkisiyle azalmaktadır. Yine ters beslem durumunda voltajın negatif şekilde artması akım değerinin büyümesi ile sonuçlanır. Diyotun bu şekilde bir davranış sergilemesi, termal biçimde uyarılmış elektronların sıcaklık değerine bağlı olarak toplam diyot akımına katkısını ortaya çıkarır ve hem ileri hem de ters beslem durumlarında akım iletiminin sıcaklık değişiminden etkilendiğini gösterir. İdealite faktörünün ve bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla güçlü ilişkisi birkaç nedene bağlanabilir. Bunlar arasında yapılan en yaygın açıklama, termyonik alan emisyonu, tünelleme ve tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarının katkısı nedeniyle ideal TE teorisinden sapmasıdır. Sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin bir başka olası açıklaması, farklı bariyer yükseklikleri ile yanal olarak homojen olmayan bir Schottky kontağın oluşumunu varsayan bariyer homojensizliğine atfedilir.

Üretilen Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotundan elde edilen sıcaklığa bağlı idealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin TE modelinden hesaplanan değerlerinin literatürde ölçülen Au/n-6H-SiC Schottky diyotları ile karşılaştırıldığında, idealite faktörünün daha düşük değerler aldığı, bariyer yüksekliğinin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç, arayüzde yer alan MWCNT varlığının bir blok tabakası rolü üstlendiğini gösterir. Böyle bir bloklama özelliği MWCNT'lerin ileri beslem akımını arttırması ve ters beslem akımını azaltması şeklinde ileri ve ters beslem özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlar.

MWCNT/n-6H-SiC Schottky bariyer diyotunun elektriksel özellikleri Cheung-Cheung yöntemi, Norde yöntemi ve Richardson eğrilerinin analizi ile elde edildi. 300-480 K sıcaklıkları arasında Cheung-Cheung yönteminin ilk fonksiyonu için elde edilen seri direnç değerleri 2,85 Ω ve 1,73 Ω , idealite faktörleri 2,71 ve 2,27 aralığında hesaplandı. Cheung-Cheung yönteminin ikinci fonksiyonu için elde edilen seri direnç değerleri 3,77 Ω ve 1,69 Ω , bariyer yükseklikleri 0,51 eV ve 0,81 eV aralığında bulundu. 300-480 K sıcaklıkları arasında Norde yönteminden hesaplanan seri direnç değerleri 75,4 Ω ve 1,27 Ω , bariyer yükseklikleri 0,66 eV ve 0,93 eV aralığındadır. Cheung-Cheung ve Norde yöntemlerinden elde edilen seri direnç değerleri ohm mertebesinde olmasının yanı sıra, oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda bir miktar farklılık göstermektedir. 300-420 K sıcaklıkları arasında Norde yöntemiyle belirlenen seri direnç değerleri Cheung-Cheung yöntemine göre daha yüksek değerler alırken, 420-480 K sıcaklıkları arasında her iki yöntemden elde edilen seri direnç değerleri birbirine daha yakındır. Elde edilen sonuçlar arasındaki farklılıklar, her iki yöntemin hesaplama yaklaşımından kaynaklanır. Diğer taraftan, her iki yöntemde sıcaklık artışına bağlı olarak seri direnç değerleri azalırken, bariyer yükseklikleri artmaktadır. Bu sonuçlar, n-6H-SiC yarıiletkenindeki serbest taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklık artışına bağlı olarak artması ile ilişkilendirilebilir. Seri direnç değerinin ohm mertebesinde olmasında ve düşük değerler almasında MWCNT arayüz tabakasının büyük bir etkisi bulunmaktadır.

Richardson eğrilerinin analiz edilmesi sonucu 300 K sıcaklıkta elde edilen Richardson sabiti ve bariyer yüksekliği sırasıyla, $5,84 \times 10^{-6} \text{ Acm}^{-2}\text{k}^{-2}$ ve 0,21 eV'dir. Deneysel olarak hesaplanan Richardson sabiti, teorik olarak hesaplanan ($146 \text{ Acm}^{-2}\text{k}^{-2}$) değerinden oldukça küçüktür. Bu farklılığın nedeni; diyot arayüzeyindeki bariyer yüksekliğinin homojensizliği ve bölgesel potansiyel dalgalanmaları ile ilişkilendirilebilir.

MWCNT/n-6H-SiC diyotunun 300 K sıcaklığındaki ileri ve ters beslem akımlarında farklı frekanslardaki kapasitans-voltaj ölçümleri yapıldı. Diyot kapasitansının frekans azalmasına bağlı olarak arttığı görüldü. Düşük frekanslarda diyot kapasitansının artmasında arayüzey durumlarının etkisinin olduğu söylenebilir. Yine 1 MHz frekansta ters beslem akımının bir fonksiyonu olarak 300-480 K sıcaklıkları arasında kapasitans-voltaj ölçümleri gerçekleştirildi. Bu ölçümlerden elde edilen veriler ile kesme gerilimi, difüzyon potansiyeli, Fermi seviyesi, verici konsantrasyonu, tüketim tabakasının genişliği ve bariyer yükseklikleri hesaplandı. 300-480 K sıcaklıkları arasında C-V ölçümünden elde edilen bariyer yükseklikleri 1,38 eV ve 0,89 eV aralığında değişmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken

husus, C-V ölçümü ile hesaplanan bariyer yüksekliklerinin sıcaklık artışına bağlı olarak azalmasıdır. Buna karşılık, I-V ölçümünden hesaplanan bariyer yüksekliği değerleri sıcaklığın artmasıyla birlikte artar. I-V ölçümlerinde akım bariyer yükseklikleri düşük olan bölgeleri tercih eder. Böylece yeterli termal enerjiye sahip olan elektronlar bariyeri geçme olasılığı daha yüksektir. Diğer taraftan, C-V ölçümü ile hesaplanan bariyer yükseklikleri diyotun tüketim tabakasındaki yüklerin dağılımları ile ilgilidir. Bu bağlamda, I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen bariyer yükseklikleri arasındaki farklılığın nedeni; arayüz tabakasının ve bu tabakanın kalınlığının homojen olmaması, arayüzdeki kusurların varlığına bağlı olarak taşıyıcı yüklerin düzensiz dağılımları olabilir.

Bu tezin temel amacı, n-6H-SiC yarıiletkeni üzerine MWCNT arayüzlü bir Schottky bariyer diyotunun üretilmesi ve elektriksel karakterizasyonunun belirlenmesidir. Çalışmanın kapsamını, aygıtın üretim aşamaları, yapısal özellikleri ve elektriksel karakterizasyonu oluşturmaktadır. Aygıtın karakterizasyonu ve analizi, oda sıcaklığının üzerinde geniş bir sıcaklık aralığında (300-480 K) alınan I-V ve C-V ölçümlerine dayanmaktadır. Bu bağlamda, yapılan çalışma MWCNT arayüzlü bir Schottky bariyer diyotunun üretilmesi ve temel elektriksel özelliklerinin belirlenmesi açısından öncü çalışmalardan biri olma özelliği taşımaktadır. Metal-yarıiletken kontaklarda farklı arayüz malzemeler kullanılarak üretilebilecek aygıtların akım iletim mekanizmalarının ve elektriksel parametrelerin belirlenmesi güncelliğini koruyan ve teknolojinin farklı alanlarına katkı sağlama potansiyeline sahip bir araştırma alanıdır. Farklı karbon nanotüp arayüzlü yapıların kullanılarak çeşitli yöntemler ile Schottky diyotların üretilmesi, karbon nanotüplerin esneklik özelliğinden faydalanılarak farklı kontak yapılarına sahip diyotların üretilmesi, yeni nesil entegre devrelerde karbon nanotüplerin kullanıldığı Schottky diyotların oluşturulması yapılan bu çalışmanın kapsamını daha ileri seviyelere taşıyacaktır.

KAYNAKLAR

1. Sze, S. M. and Lee M. K. (2007). *Physics of semiconductor devices* (3rd Edition). New York: John Wiley & Sons Inc., 175.
2. Altan, H., Özer, M. and Ezgin, H. (2020). Investigation of electrical parameters of Au/P3HT:PCBM/n-6H-SiC/Ag Schottky barrier diode with different current conduction models. *Superlattices and Microstructures*, 146, 106658.
3. Anzar, N., Hasan, R., Tyagi, M., Yadav, N. and Narang, J. (2020). Carbon nanotube - a review on synthesis, properties and plethora of applications in the field of biomedical science. *Sensors International*, 1, 100003.
4. Jung, S. H., Jeong, S. H., Kim, S. U., Hwang, S. K., Lee, P. S., Lee, K. H., Ko, J. H., Bae, E., Kang, D., Park, W., Oh, H., Kim, J. J., Kim, H. and Park, C. G. (2005). Vertically aligned carbon-nanotube arrays showing Schottky behavior at room temperature. *Small*, 1(5), 553-559.
5. Zhu, W. and Kaxiras, E. (2006). The nature of contact between Pd leads and semiconducting carbon nanotubes. *Nano Letters*, 6(7), 1415-1419.
6. Liang, C. W. and Roth, S. (2008). Electrical and optical transport of GaAs/carbon nanotube heterojunctions. *Nano Letters*, 8(7), 1809-1812.
7. Tzolov, M., Chang, B., Yin, A., Straus, D., Xu, J. M. and Brown, G. (2004). Electronic transport in a controllably grown carbon nanotube-silicon heterojunction array. *Physical Review Letters*, 92(7), 075505.
8. Kuo, T. F., Tzolov, M. B., Straus, D. A. and Xu, J. (2008). Electron transport characteristics of the carbon nanotubes/Si heterodimensional heterostructure. *Applied Physics Letters*, 92, 212107.
9. Banhart, F. (2009). Interactions between metals and carbon nanotubes: At the interface between old and new materials. *Nanoscale*, 1(2), 201-213.
10. Wang, M.S., Golberg, D. and Bando, Y. (2010). Interface dynamic behavior between a carbon nanotube and metal electrode. *Advanced Materials*, 22(1), 93-98.
11. Svensson J. and Campbell, E. E. B. (2011). Schottky barriers in carbon nanotube-metal contacts. *Journal of Applied Physics*, 110(11), 111101.
12. Maruyama, T., Sakakibara, S., Naritsuka, S., Norimatsu, W., Kusunoki, M., Yamane, H. and Kosugi, N. (2012). Band alignment of a carbon nanotube/n-type 6H-SiC heterojunction formed by surface decomposition of SiC using photoelectron spectroscopy. *Applied Physics Letters*, 101(9), 092106.
13. Chen, S.-Y. and Lue, J.-T. (2003). Temperature dependence of interface barrier height change as implicated by field emission studies of aligned-multiwall carbon nanotubes. *Physics Letters A*, 309(1-2), 114-120.

14. Uchino, T., Shimpo, F., Kawashima, T., Ayre, G. N., Smith, D. C., Groot, C. H. de and Ashburn, P. (2013). Electrical transport properties of isolated carbon nanotube/Si heterojunction Schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 103(19), 193111.
15. Inaba, M., Suzuki, K., Shibuya, M., Lee, C.-Y., Masuda, Y., Tomatsu, N., Norimatsu, W., Hiraiwa, A., Kusunoki, M. and Kawarada, H. (2015). Very low Schottky barrier height at carbon nanotube and silicon carbide interface. *Physics Letters A*, 106(12), 123501.
16. Cobas, E. D., Anlage, S. M. and Fuhrer M. S. (2011). Single carbon nanotube Schottky diode microwave rectifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59(10), 2726-2732.
17. Dehghani, S., Moravvej-Farshi, M. K. and Sheikhi, M. H. (2012). Temperature dependence of electrical resistance of individual carbon nanotubes and carbon nanotubes network. *Modern Physics Letters B*, 26(21), 1250136-(1-13).
18. Dwivedi, N., Dhand, C., Anderson, E. C., Kumar, R., Liao, B., Yeo, R. J., Khan, R., Carey, J. D., Saifullah, M. S. M., Kumar, S., Malik, H. K., Hashmi, S. A. R., Srivastava, A. K., Sankaranarayanan, S., Stangl, R. and Dutttagupta, S. (2020). Solution Processable High Performance Multiwall Carbon Nanotube-Si Heterojunctions. *Advanced Electronic Materials*, 6(11), 2000617.
19. Braun, F. (1874). Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle. *Annual Review of Physical Chemistry*, 153, 556-563.
20. Russer, P. (2009, September 29). *Ferdinand Braun-a pioneer in wireless technology and electronics*. Microwave Conference, Rome, Italy, 547-554.
21. Jenkins, T. (2005). A brief history of... semiconductors. *Physics Education*, 40(5), 430.
22. Bose, J. C. (1994/1998). Patent for detector for electrical disturbances. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 86(1), 230-234.
23. Pickard, G. W. (November 1906). Means for receiving intelligence communicated by electric waves. *US Patent No.* 836531.
24. Pierce G. W. (1907). Crystal rectifiers for electric currents and electric oscillations. Part I. Carborundum. *Physical Review (Series I)*, 25(1), 31-60.
25. Kurylo, F. (1965). *Ferdinand Braun Leben und Wirken des Erfinders der Braunschen Rohre Nobelpreis 1909*. München: Moos.
26. Grondahl, L. D. (1925, January 1). *U.S. Patent No.* 1640335.
27. Schottky, W., Stromer, R. and Waibel, F. (1931). *Hochfrequenztechnik*, 37, 162-165.
28. Schottky, W. (1938). Halbleitertheorie der sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 25, 843.
29. Wilson, A. H. (1931). The theory of electronic semiconductors. *Proceedings of the Royal Society*, 134(823), 277-287.

30. Mott, N. (1938). Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34(4), 568-572.
31. Bethe, H. A. (1942). *Theory of the boundary layer of crystal rectifiers: Radiation laboratory*. Boston: Massachusetts Institute of Technology.
32. Bardeen, J. (1947). Surface states and rectification at a metal semi-conductor contact. *Physical Review*, 71(10), 717.
33. Archer, R. and Atalla, M. (1963). Metals contacts on cleaved silicon surfaces. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 101(3), 697-708.
34. Mead, C. and Spitzer, W. (1964). Fermi level position at metal-semiconductor interfaces. *Physical Review*, 134(3A), A713-A716.
35. Crowell, C. and Sze, S. (1966). Current transport in metal-semiconductor barriers. *Solid-State Electronics*, 9(11-12), 1035-1048.
36. Cowley, A. and Sze, S. (1965). Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212-3220.
37. Heine, V. (1965). Theory of surface states. *Physical Review*, 138, A1689.
38. Louie, S. G. and Cohen, M. L. (1976). Electronic structure of a metal-semiconductor interface. *Physical Review B*, 13(6), 2461.
39. Spicer, W., Chye, P., Skeath, P., Su, C. Y. and Lindau, I. (1979). New and unified model for Schottky barrier and III-V insulator interface states formation. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 16(5), 1422-1433.
40. Tung, R. T. (1992). Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509-13523.
41. Durcan, C. A., Balsano, R. and LaBella, V. P. (2014). Nanoscale mapping of the W/Si (001) Schottky barrier. *Journal of Applied Physics*, 116(2), 023705.
42. Tung, R. T. (2000). Chemical bonding and Fermi level pinning at metal-semiconductor interfaces. *Physical Review Letters*, 84(26), 6078.
43. Rhoderick E. H. and Williams, R. H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press.
44. Sharma, B. (2013). *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. Springer Science & Business Media.
45. Sze, S. and Mattis, D. C. (2008). Physics of Semiconductor Devices. *Physics Today*, 23(6), 75.
46. Crowell, C. R. and Roberts, G. I. (1969). Surface state and interface effects on the capacitance-voltage relationship in Schottky barriers. *Journal of Applied Physics*, 40(9), 372.

47. Read, W. and Shockley, W. (1950). Dislocation models of crystal grain boundaries. *Physical Review*, 78(3), 275.
48. Chang C. Y. and Sze, S. M. (1970). Carrier transport across metal-semiconductor barriers. *Solid-State Electronics*, 13(6), 727-740.
49. Yu A. Y. C. and Snow, E. H. (1968). Surface effects on metal-silicon contacts. *Journal of Applied Physics*, 39(7), 3008-3016.
50. Henisch, H. K. (1957). *Rectifying semiconductor contacts*. Oxford: Clarendon Press.
51. Tung, R. (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. *Applied Physics Letters*, 58(24), 2821-2823.
52. Heine, V. (1965). Theory of surface states. *Physical Review*, 138, A1689.
53. Casey, Jr., H., Muth, J., Krishnankutty, S. and Zavada, J. (1996). Dominance of tunneling current and band filling in InGaN/AlGaN double heterostructure blue light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 68(20), 2867-2869.
54. Mönch, W. (1999). Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 17(4), 1867-1876.
55. Eimers, G. W. and Stevens, E. H. (1971). Composite model for schottky barrier height. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 18(12), 1185-1186.
56. Wolf, D. and Yip, S. (1992). *Materials interfaces: Atomic-level structure and properties*. Springer Science & Business Media.
57. Levine, J. D. (1971). Schottky-Barrier Anomalies and Interface States. *Journal of Applied Physics*, 42(10), 3991-3999.
58. Berzelius, J. J., (1824). Investigation about spath acid and the strange connections. *Annals of Physics*, 1, 169.
59. Cowles, A. H. and Cowles, E. H. (1885). Electric smelting furnance. *U.S. Patent No.* 319945.
60. Acheson, A. G. (1892). Production of artificial crystalline carbonaceous materials. *U.K. Patent No.* 17911.
61. Round, H. J. (1907). A note on carborundum. *Electrical World*, 19, 309.
62. Lely, J. A. (1955). Darstellung von einkristallen von silicium carbid und beherrschung von art und menge der eingebauten verunreinigungen. *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft e.V*, 32, 229.
63. Agarwal S. E. (2004). *Advances in silicon carbide processing and applications*. London: Artech House, Inc.

64. Tairov, Y. M. and Tsvetkov, V. F. (1978). Investigation of Growth Processes of Ingots of Silicon Carbide Single Crystals. *Journal Crystal Growth*, 43(2), 209-212.
65. Matsunami, H., Nishino, S. and Ono, H. (1981). IVA-8 heteroepitaxial growth of cubic silicon carbide on foreign substrate. *IEEE Transaction Electron Devices*, 28(10), 1235-1236.
66. Kuroda, N. et al. (1987). *Extended Abstracts, 19th Conference on Solid State Devices and Mater*, Tokyo, Japan, 227.
67. Park, Y. S. (1998). *SiC materials and devices*. USA: Academic Press.
68. Kimoto, T. and Cooper, J. A. (2014). *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*. Singapore: John Wiley & Sons, Pte.
69. Harris, G. L. (1995). *Properties of silicon carbide*. London: INSPEC.
70. Somiya, S. and Inomata, Y. (2012). *Silicon carbide ceramics 1: Fundamental and solid reaction*. Essex: Elsevier Science Publishers.
71. Gupta, S. K., Shankar, B., Taube, W. R., Singh, J. and Akhtar, J. (2014). Capacitance-conductance spectroscopic investigation of interfacial oxide layer in Ni/4H-SiC (0001) Schottky diode. *Physica B*, 434(1), 44-50.
72. Marinova, T., Georgieva, A. K., Krastev, V., Kakanakov, R., Neshev, M., Kassamakova, L., Noblanc, O., Arnodo, C., Cassette, S. and Brylinski, C. (1997). Nickel based ohmic contacts on SiC. *Materials Science and Engineering B*, 46(1-3), 223-226.
73. Benamara, M., Anani, M., Akkal, B. and Benamara, Z. (2014). Ni/SiC-6H Schottky barrier diode interfacial states characterization related to temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 603, 197-201.
74. Collins, P.G., Bradley, K., Ishigami, M. and Zettl, A. (2000). Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes. *Science*, 287(5459), 1801-4.
75. Zhao, W.-S., Fu, K., Wang, D.-W., Li, M., Wang, G. and Yin, W.-Y. (2019). Mini-review: Modeling and performance analysis of nanocarbon interconnects. *Applied Science*, 9(11), 2174.
76. Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354(6348), 56-58.
77. Iijima, S. and Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 363(6430), 603-605.
78. Thess, A. et al. (1996). Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes. *Science*. 273(5274), 483-487.
79. Shen, C., Brozena, A. H. and Wang, Y. H. (2011). Double-walled carbon nanotubes: Challenges and opportunities. *Nanoscale*, 3(2), 503-518.

80. Popov, V. N. (2004). Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science & Engineering R*, 43(3), 61-102.
81. Samsonidze, G. G. et al. (2003). Phonon trigonal warping effect in graphite and carbon nanotubes. *Physical Review Letters*, 90(2), 027403.
82. Warner, J. H., Young, N. P., Kirkland, A. I. and Briggs, G. A. D. (2011). Resolving strain in carbon nanotubes at the atomic level. *Nature Materials*, 10(12), 958-962.
83. Chico, L., Crespi, V. H., Benedict, L. X., Louie, S. G. and Cohen ML. (1996). Pure carbon nanoscale devices: nanotube heterojunctions. *Physical Review Letters*, 76(6), 971-974.
84. Louie, S. G. (2001). Electronic properties, junctions, and defects of carbon nanotubes. *Topics in Applied Physics*, 80, 113-145.
85. Mintmire, J. W. and White, C. T. (1995). Electronic and structural properties of carbon nanotubes. *Carbon*, 33(7), 893-902.
86. Endo, M., Muramatsu, H., Hayashi, T., Kim, Y. A., Terrones, M., Dresselhaus, M. S. (2005). 'Buckypaper' from coaxial nanotubes. *Nature*, 433(7025), 476.
87. Galano, A. (2010). Carbon nanotubes: Promising agents against free radicals. *Nanoscale*, 2(3), 373-380 .
88. Liang, W. J., Bockrath, M., Bozovic, D., Hafner, J. H., Tinkham, M. and Park, H. (2001). Fabry-Perot interference in a nanotube electron waveguide. *Nature*, 411(6838), 665-669.
89. Tans, S. J. et al. (1997). Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires. *Nature*, 386(6624), 474-477.
90. Yao, Z., Kane, C. L. and Dekker, C. (2000). High-field electrical transport in single-wall carbon nanotubes. *Physical Review Letters*, 84(13), 2941-2944.
91. Poncharal, P., Berger, C., Yi, Y., Wang, Z. L. and de Heer W. A. (2002). Room temperature ballistic conduction in carbon nanotubes. *Journal of Physical Chemistry B*, 106(47), 12104-18.
92. Schonenberger, C., Bachtold, A., Strunk, C., Salvetat, J. P. and Forro, L. (1999). Interference and interaction in multi-wall carbon nanotubes. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 69(3), 283-295.
93. Dai, H. J., Wong, E. W. and Lieber, C. M. (1996). Probing electrical transport in nanomaterials: conductivity of individual carbon nanotubes. *Science*, 272(5261), 523-526.
94. Sun., C.-F., Meany, B. and Wang, Y.-H. (2014). *Characteristics and applications of carbon nanotubes with different numbers of walls*. Eds. Tanaka, K. and Iijima, S. Carbon Nanotubes and Graphene (2nd Edition), Elsevier.

95. Hu, N., Wang, Y., Chai, J., Gao, R., Yang, Z. And Kong, E.S.-W. and Zhang, Y. (2012). Gas sensor based on p-phenylenediamine reduced graphene oxide. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 163(1), 107-114.
96. Solleti, G., Jeevankumar, P., Jayarambabu, N., Sineetha, A., Sadasivinu, K. K., Bykkam, S. and Rao, K. V. (2020). Investigation of various $Mg(x)Fe(1-x)2O_4$ ($x = 0.1, 0.5$ and 0.9) nanostructures as a resistive and flexible LPG sensor. *Materials Science and Engineering B*, 225, 114515.
97. Li, T. and Ichimura, M. (2021). Fabrication of transparent $Mg(OH)_2$ thin films by drop-dry deposition. *Materials*, 14(4), 724.
98. Nguyen T.-D. and Do, T.-O. (2011). *Nanocrystals*. Ed. Masuda, Y. Croatia: InTech, 55-84.
99. Dong, Q., Yin, S., Guo, C., Li, S. H. H., Kumada, N., Takei, T., Yonesaki, Y., Kinomura, N. and Sato, T. (2012). Preparation of α - Fe_2O_3 particles with controlled shape and size via a facile hydrothermal route, *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 339, 012004.
100. Sveningsson, M., Morjan, R.-E., Nerushev, O. A., Sato, Y., Bäckström, J., Campbell, E. E. B. and Rohmund, F. (2001). Raman spectroscopy and field-emission properties of CVD-grown carbon-nanotube films. *Applied Physics A*, 73(4), 409-418.
101. Bansal, M., Srivastava, R., Lal, C., Kamalasanan, M. N. and Tanwar, L. S. (2010). Change in conformation of polymer PFO on addition of multiwall carbon nanotubes. *Nanoscale*, 2(7), 1171-1177.
102. Javed, H., Islam, M., Mahmood, N., Achour, A., Hameed, A. and Khatri, N. (2016). Catalytic growth of multi-walled carbon nanotubes using $NiFe_2O_4$ nanoparticles and incorporation into epoxy matrix for enhanced mechanical properties. *Journal of Polymer Engineering*, 36(1), 53-64.
103. Zhang, D., Shi, L., Fang, J., Li, X. and Dai, K. (2005). Preparation and modification of carbon nanotubes. *Materials Letters*, 59, 4044-4047.
104. Chen S.-Y. and Lue, J.-T. (2003). Temperature dependence of interface barrier height change as implicated by field emission studies of aligned-multiwall carbon nanotubes. *Physics Letters A*, 309(1-2), 114-120.
105. Osorio, A. G., Silveira, I. C. L., Bueno, V. L. and Bergmann, C. P. (2008). $H_2SO_4/HNO_3/HCl$ -Functionalization and its effect on dispersion of carbon nanotubes in aqueous media. *Applied Surface Science*, 255(5), 2485-2489.
106. Gülnahar, M. (2014). Temperature dependence of current-and capacitance-voltage characteristics of an Au/4H-SiC Schottky diode. *Superlattices and Microstructures*, 76, 394-412.
107. Güzel, T., Bilgili, A. K. and Özer, M. (2018). Investigation of inhomogeneous barrier height for Au/n-type 6H-SiC Schottky diodes in a wide temperature range. *Superlattices and Microstructures*, 124, 30-40.

108. Sefaoğlu, A., Duman, S., Doğan, S., Gürbulak, B., Tüzemen, S. and Türüt, A. (2008). The effects of the temperature and annealing on current-voltage characteristics of Ni/n-type 6H-SiC Schottky diode. *Microelectronic Engineering*, 85(3), 631-635.
109. Kaya, A., Sevgili, Ö., Altındal, S. and Öztürk, M.K. (2015). Current-conduction mechanism in Au/n-4H-SiC Schottky barrier diodes. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 15, 56-65.
110. Zhou, X., Langsdorf, B. L., Jones, F. E. and Lonergan, M. C. (1999). Electrochemical tuning of indium phosphide|poly(acetylene) interfaces. *Inorganica Chimica Acta*, 294(2), 207-213.
111. Cheung S. K. and Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
112. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053.
113. Chand S. and Kumar, J. (1996). Current transport in Pd₂Si/n-Si(100) Schottky barrier diodes at low temperatures. *Applied Physics A*, 63(2), 171-178.
114. Devi, L. V., Jyothi, I. and Reddy, R. V. (2011). Analysis of temperature-dependent Schottky barrier parameters of Cu–Au Schottky contacts to n-InP. *Canadian Journal of Physics*, 90(1), 73-81.
115. Horvath, Z. J. (1996). Comment on “Analysis of I-V measurements on CrSi₂/Si Schottky structures in a wide temperature range”. *Solid-State Electronics*, 39, 176-178.
116. Yue-Hu, W., Yi-Men, Z., Yu-Ming, Z., Qing-Wen, S. and Ren-Xu, J. (2011). Al/Ti/4H-SiC Schottky barrier diodes with inhomogeneous barrier heights. *Chinese Physics B*, 20(8), 087305.
117. Bilgili, A. K., Güzel, T. and Özer, M. (2019). Current-voltage characteristics of Ag/TiO₂/n-InP/Au Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Physics*, 125(3), 035704.
118. Kumar, A. A., Rao, L. D., Reddy, V. R. and Choi, C.-J. (2013). Analysis of electrical characteristics of Er/p-InP Schottky diode at high temperature range. *Current Applied Physics*, 13(6), 975-980.
119. Werner J. H. and Guttler, H. H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69(3), 1522-1533.
120. Aboelfotoh, M. O., Frojdh, C. and Petersson, C. S. (2003). Schottky-barrier behavior of metals on n- and p-type 6H-SiC. *Physical Review B*, 67(7), 075312.
121. Goldberg, Y., Levinshtein, M. E. and Romyantsev S. L. (2001). in *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, SiC, BN, SiC, SiGe*. Eds. Levinshtein, M. E., Romyantsev, S. L., Shur, M. S. New York: John Wiley & Sons, Inc., 93-148.
122. Aboelfotoh, M. O. (1990). Temperature dependence of the Schottky-barrier height of tungsten on n-type and p-type silicon. *Solid-State Electronics*, 34(1), 51-55.

123. Cola, A., Vasanelli, L. and Muret, P. (1995). A method for the determination of barrier heights from the capacitance-voltage characteristics of a Schottky junction containing bulk deep traps. *Solid-State Electronics*, 38(5), 989-995.
124. Singh, A., Reinhardt, K. C. and Anderson, W. A. (1990). Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions. *Journal of Applied Physics*, 68(7), 3475.
125. Akkal, B., Benemara, Z., Boudissa, A., Bouiadjra, N. B., Amrani, M., Bideux, L. and Gruzza, B. (1998). Modelization and characterization of Au/InSb/InP Schottky systems as a function of temperature. *Materials Science and Engineering B*, 55(3), 162-168.
126. Waldrop, J. R. and Grant, R. W. (1993). Schottky barrier height and interface chemistry of annealed metal contacts to alpha 6H-SiC: Crystal face dependence. *Applied Physics Letters*, 62(21), 2685-2687.
127. Itoh, A. and Matsunami, H. (1997). Analysis of Schottky barrier heights of metal/SiC contacts and its possible application to high-voltage rectifying devices. *Physica Status Solidi A*, 162(1) 389-408.





GAZİ GELECEKTİR..