



**GRAFEN/GRAFİT ARAYÜZLÜ N-6H SİC TABANLI
SCHOTTKY BARRIER DİYOTLARIN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ercan ERDOĞDU

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

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.

Ercan ERDOĞDU

31/01/2024

GRAFEN/GRAFİT ARAYÜZLÜ N-6H SİC TABANLI SCHOTTKY BARRİER
DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Ercan ERDOĞDU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Au/n-6H SiC/Au yapısı ve ara yüzeyine grafit ve grafen katkılı durumları 300 K sıcaklıkta incelendi. Her üç numune için Raman, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) yapı analizleri yapıldı. Hem karanlıkta hem de ışık altında (100 mW/cm^2 , 300-1800 nm, AM 1,5G standartı) akım-voltaj (I-V) ölçümleri ve değişik frekanslarda karanlıkta kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri kullanılarak temel bazı elektriksel parametreleri hesaplandı. Yapılan çalışma sonucunda akım voltaj ölçümlerinden Au/n-6H SiC/Au yapısı için idealite faktörü karanlıkta 2,14, doyum akımı $2,86 \times 10^{-8}$ Amper, engel yüksekliği 0,75 eV olarak hesaplanmıştır. Grafit arayüzlü numune için aynı değerler sırasıyla 2,82, $7,99 \times 10^{-10}$ Amper ve 0,84 eV olarak, grafen ara yüzü numune için ise 5,8, $8,13 \times 10^{-6}$ Amper ve 0,60 eV olarak hesaplanmıştır. Elektriksel özelliklerini iyileştirme noktasında grafit'in olumlu etki yaptığı gözlemlenmiştir. Grafen ise beklenenin aksine doyma akımını ve idealite faktörünü arttırmış, engel yüksekliğini azaltmıştır. Bu durum raman spektrumunda görülen kirliliğe atfedilmiştir. Doğası gereği grafeni saf halde tutmanın grafitten daha zor olduğu bu nedenle saf grafen kullanımının maliyet açısından anlamlı olmadığı durumlarda grafitin daha iyi bir alternatif olacağı sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : Schottky bariyer diyot, grafen, grafit, n-6H-SiC
Sayfa Adedi : 91
Danışman : Prof. Dr. Mehmet Mahir BÜLBÜL

INVESTIGATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF GRAPHENE/GRAPHITE
BASED N-6H SiC SCHOTTKY BARRIER DIODES

(Ph. D. Thesis)

Ercan ERDOĞDU

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

The Au/n-6H SiC/Au structure and its graphite and graphene interface states were examined at 300 K temperature. Raman, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Distribution Spectroscopy (EDS) structure analyses were performed for all three samples. Some basic electrical parameters were calculated using current-voltage (I-V) measurements both in the dark and under light (100 mW/cm², 300-1800 nm, AM 1.5G standard) and capacitance-voltage (C-V) measurements in the dark at different frequencies. As a result of the study, from current voltage measurements, the ideality factor for the Au/n-6H SiC/Au structure was calculated as 2.14 in the dark, the saturation current as 2.86E-08 Amperes, and the barrier height as 0.75 eV. The same values were calculated as 2.82, 7.99E-10 Ampere and 0.84 eV for the sample with graphite interface, and 5.8, 8.13E-06 Ampere and 0.60 eV for the sample with graphene interface, respectively. It has been observed that graphite has a positive effect on improving its electrical properties. Contrary to expectations, graphene increased the saturation current and ideality factor and decreased the barrier height. This situation was attributed to the pollution seen in the Raman spectrum. It has been concluded that, by nature, keeping graphene in pure form is more difficult than graphite, so graphite would be a better alternative in cases where the use of pure graphene is not cost-effective.

Science Code : 20227

Key Words : Schottky barrier diode, graphene, graphite, n-6H-SiC

Page Number : 91

Supervisor : Prof. Dr. Mehmet Mahir BÜLBÜL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana her aşamada yardımcı olan ve yol gösteren Danışmanım Prof. Dr. Mehmet Mahir BÜLBÜL'e teşekkür ederim.

Her aşamada olduğu gibi özellikle I-V / C-V ölçümleri/hesaplamaları konusunda tecrübesinden faydalandığım Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a, Prof Dr. Abdullah YILDIZ'a, Prof Dr. Muharrem GÖKÇEN'e ve Dr. Öğretim Üyesi Kenan ÖZEL'e, SEM/EDS ve Raman ölçümlerinde yardımını esirgemeyen Öğretim Görevlisi Dr. Abdullah ATILGAN 'a teşekkür ederim.

Numunelerin fabrikasyonu için benzer bir doktora çalışmasını MWCNT'ler ile yapan Dr. Hüseyin EZGİN, Prof. Dr. Metin ÖZER ve diğer emeği geçenlere teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde emeğini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim anneme ve babama, tez çalışması boyunca beni daima teşvik eden ve desteğini her daim hissettiğim değerli eşime, çocuklarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	Sayfa iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİ	5
2.1. Yarıiletken Nedir?.....	6
2.2. Schottky-Mot Teorisi	8
2.2.1. Doğrultucu kontak.....	9
2.2.2. Omik kontak.....	12
2.3. Akım İletim Mekanizmaları.....	14
2.3.1. Termiyonik emisyon teorisi	14
2.3.2. Kuantum mekaniksel tünelleme.....	15
2.3.3. Tüketim bölgesi içerisinde elektronların vedeşiklerin birleşmesi/oluşması	16
2.3.4. Bant bükülmesi dışında taşıyıcıların birleşmesi.....	16
2.4. Cheung Fonksiyonları	17
2.5. Norde Fonksiyonları	18
2.6. Seri Direncin Etkisi.....	18
2.7. Ara Yüzey Durumları ve Engel Homojensizliği.....	19
2.8. Sıcaklığın İdealite Faktörü Üzerine Etkisi.....	21

	Sayfa
2.9. Dielektrikler	22
2.9.1. Dielektrik kutuplanma (Polarizasyon)	24
2.9.2. Dielektrik dayanıklılık	26
2.9.3. Dielektrik kayıp.....	27
2.9.4. Durulma (Relaksasyon).....	27
2.9.5. Kutuplanma mekanizmaları	28
2.10. Silisyum Karbür (SiC)	30
2.11. Grafen ve Grafit	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM	35
3.1. Yarı İletken Altaşın/Kristalin Kesilmesi.....	35
3.2. Temizlik Aşaması	38
3.3. Ara Yüzey Malzemeler	40
3.4. Doğrultucu ve Omik Kontakların Oluşturulması.....	41
4. DENEYSEL BULGULAR	43
4.1. Yapı Analizi	43
4.2. Akım-Voltaj (I-V) , Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri	51
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. SiC ve benzer yapıdaki malzemelere ait çeşitli fiziksel ve elektriksel özellikler.....	31
Çizelge 4.1. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafit katkılı hallerinin hesaplanan temel parametreleri	55
Çizelge 4.2. Au/n-6H SiC/Au yapısının karanlıkta akım voltaj ölçümleri	57
Çizelge 4.3. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen ara yüzü durumlarının 300 K sıcaklıkta C-V ölçümlerinden hesaplanan parametreleri	69
Çizelge 4.4. Au/n-6H SiC/Au yapısı için 800 khz frekansında kapasitans ölçümleri	71
Çizelge 4.5. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen ara yüzü durumlarının 300 K sıcaklıkta terslenim bölgesinde C-V ölçümlerinden hesaplanan parametreleri	74
Çizelge 5.1. Au/n-6H SiC/Au yapısının 300K sıcaklıkta karanlıkta I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri.....	77
Çizelge 5.2. Grafit ve grafit ara yüzü bazı yarı iletkenlerin I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri.....	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İletken, yarı iletken ve yalıtkan için bant diyagramı.....	7
Şekil 2.2. P-tipi ve n-tipi yarı iletkenler	8
Şekil 2.3. $\Phi_M > \Phi_S$ için metal - n tipi yarı iletken için enerji bant diyagramları	9
Şekil 2.4. Metal ve n-tipi yarıiletkenin (a) ileri beslem ve (b) geri beslem durumlarında şematik enerji bant diyagramları	12
Şekil 2.5. $\Phi_M < \Phi_S$ olduğu durumda n-tipi yarı iletken ve metal kontağın enerji bant diyagramı (a) öncesi, (b) sonrası, (c) ileri beslem ve (d) geri beslem	13
Şekil 2.6. Schottky yapılarıdaki akım iletim mekanizmaları	14
Şekil 2.7. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi.....	19
Şekil 2.8. (a)Bir Schottky diyot için gaussian dağılımının enerji-band diyagramı (b)Homojen olmayan potansiyel engel yüksekliğine sahip bir Schottky kontağın üç boyutlu görünümü	20
Şekil 2.9. Farklı akım iletim mekanizmaları için idealite faktörünün sıcaklıkla değişiminin teorik gösterimleri	21
Şekil 2.10. Paralel plakalı kondansatör yapısı.....	22
Şekil 2.11. Paralel plakalı bir kondansatördeki dielektrik kutuplanma.....	23
Şekil 2.12. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör	25
Şekil 2.13. Bir dielektrik malzemenin kutuplanma mekanizmaları	29
Şekil 2.14. SiC kristal yapısının yandan görünümü	30
Şekil 2.15. SiC kristal yapısının üstten görünümü	31
Şekil 2.16. Grafen tabanlı formlar	33
Şekil 2.17. Grafenin band yapısı (grafenin enerji dağılım ilişkisi)	33
Şekil 2.18. Grafenin şematik gösterimi	34
Şekil 3.1. Yarı iletken alt taşların <100> ve <111> yönelimleri.....	36
Şekil 3.2. Zor karşısında alt taşların yönelimlere göre kırılmasının gösterimi	36

Şekil	Sayfa
Şekil 3.3. Kesimi yapılmış <100> yönelimli bir yarıiletken alt taş	37
Şekil 3.4. Sıcak prob testinin şematik gösterimi	38
Şekil 3.5. Su seven ve su sevmeyen yüzeyler	39
Şekil 3.6. İnce film üretim teknikleri	41
Şekil 4.1. n-6H SiC yapısı ve grafen/grafit katkılı ara yüzlerinin EDS grafikleri	46
Şekil 4.2. Grafit ve tek tabaka grafenin Raman spektrumlarının karşılaştırılması	47
Şekil 4.3. Tabaka sayısına göre 2D bandındaki değişimler	48
Şekil 4.4. n-6H SiC yapısının raman spektrumu	49
Şekil 4.5. Grafen/n-6H SiC yapısının raman spektrumu	50
Şekil 4.6. Grafit/n-6H SiC yapısının raman spektrumu	50
Şekil 4.7. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin akım voltaj grafiği	53
Şekil 4.8. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin ln(I)-V grafiği	53
Şekil 4.9. Au/n-6H SiC/Au yapısının (karanlıkta) I-V grafiği	58
Şekil 4.10. Au/n-6H SiC/Au yapısının (karanlıkta) ln(I)-V grafiği	58
Şekil 4.11. Au/n-6H SiC/Au yapısının (karanlıkta) 0,1 - 0,6 Volt aralığında ln(I)-V grafiği	60
Şekil 4.12. Au/n-6H SiC/Au yapısının karanlıkta ve ışık altında ln(I)-V grafiği	61
Şekil 4.13. Au/Grafit/n-6H SiC/Au yapısının karanlıkta ve ışık altında ln(I)-V grafiği	62
Şekil 4.14. Au/Grafen/n-6H SiC/Au yapısının karanlıkta ve ışık altında ln(I)-V grafiği	62
Şekil 4.15. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin değişen frekanslarda C-V grafiği	64
Şekil 4.16. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin 800 kHz frekansında C-V grafiği	65
Şekil 4.17. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin 1/C ² -V grafiği	66

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. Arayüzüne grafen katkılanmış Au/n-6H SiC/Au yapısının 200 kHz frekansı için potansiyel enerji diyagramı	70
Şekil 4.19. Au/n-6H SiC/Au yapısının 800 kHz frekansında C-V grafiği.....	72
Şekil 4.20. Au/n-6H SiC/Au yapısının 800 kHz frekansında $1/C_2$ -V grafiği.....	72
Şekil 4.21. Au/n-6H SiC/Au yapısının 800 kHz frekansında tüketim bölgesinin $1/C_2$ -V grafiği	73
Şekil 4.22. Au/n-6H SiC/Au yapısının lineer olmayan bölgesi için voltaja bağlı idealite sabiti ve engel yüksekliği değişimi	74



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Temizlik için kullanılan bazı kimyasallar ve sonik temizleyici....	39
Resim 4.1. Hitachi Su5000 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopi	43
Resim 4.2. n-6H-SiC yarıiletkeninin ve üzerine kaplanmış grafit ve grafenlerin 1 μ m ve 10 μ m boyutlarındaki SEM görüntüsü	44
Resim 4.3. Numunelerdeki kontakların SEM ile ϕ ap ölçümü	45
Resim 4.4. I-V / C-V ölçümleri nedeni ile hasar gören kontakların SEM görüntüleri...	45
Resim 4.5. JASCO NRS4500 Konfokal Mikroskoplu Raman Spektrometresi	49
Resim 4.6. Keithley 2400 cihazı	52
Resim 4.7. Gamry İnterface 1000E ölçüm aleti.....	63

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
$\text{\AA}$	Angstrom veya Ångström
A	Diyot alanı
A^*	Richardson sabiti
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**

I_{SM}	Yarıiletken den metale geçen elektron akımı
k	Boltzmann sabiti
m_0	Durgun elektron kütlesi
mA	Miliamper
$mbar$	Milibar
mL	Mililitre
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	Geri 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
τ_0	Taşıyıcı ömrü
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
Ω	Ohm

Simgeler**Açıklamalar**

Φ	İş fonksiyonu
Φ_B	Bariyer yüksekliği
Φ_{b0}	Schottky bariyer yüksekliği
Φ_e	Etkin bariyer yüksekliği
Φ_M	Metalin iş fonksiyonu
Φ_S	Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Kısaltmalar**Açıklamalar**

C	Karbon
C-V	Kapasitans-voltaj
DI	Deiyonize su
FE	Alan emisyonu
GaAs	Galyum arsenit
H	Hidrojen
IC	Entegre devre
I-V	Akım-voltaj
MOY	Metal-oksit-yarıiletken
MPY	Metal-polimer-yarıiletken
MY	Metal-yarıiletken
MYY	Metal-yalıtkan-yarıiletken
SB	Schottky bariyeri
SBD	Schottky bariyer diyot
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silikon
SiC	Silikon karbür
TE	Termiyonik emisyon
TFE	Termiyonik alan emisyonu

1. GİRİŞ

20. yüzyılın başlarında teknoloji ve bilgisayarın başlangıcı sayılan yıllarda anahtarlama elemanı ve yükselteç olarak lambalar/vakum tüpleri kullanıyordu. İki elektrotlu lambalar diyotların, üç elektrotlu lambalar/vakum tüpleri ya da diğer bir ismi ile triyotlar ise transistörlerin temelini oluşturdu. Bir transistörün iletimde olmasını 1, yalıtımda olmasını 0 ile adlandırarak, ikili sayı sistemini kullanmak ve milyonlarca transistörü ve/veya/değil gibi mantık kapılarıyla bir araya getirmek bize bilişim çağının kapılarını açtı.

Vakum tüplerinin çok ısınması, boyutlarının büyük olması, verimsiz ve kısa ömürlü olması gibi birçok olumsuz yönü vardı. Yarı iletkenlere geçiş ile birlikte bu sorunlar geride kaldı. Günümüzde transistörler nanometre boyutlarında üretilebilmekte ve milyonlarca transistörden oluşan entegre devreler/yongalar kullanılmaktadır.

Bu açıdan metal ve yarı iletkenin sıkı kontak yapılması ile oluşturulan yapıların yarı iletken teknolojisinde önemli bir yeri vardır. Schottky kontak olarak adlandırılan metal – yarı iletken kontaklarda yaşanacak gelişme transistörlere ve dolayısı ile tümleşik devrelere/yongalara/çiplere rahatlıkla uygulanabilecektir. Tez konusu kapsamında yapılan çalışmalara transistör fabrikasyonu yapabilmek için p-Si alt taş üzerine kapı/gate olarak kullanılmak üzere SiO_2 büyütürük başlanılmış, HF ile desen oluşturma fosforik asit ile katkılama ve metalizasyon sonucu elde edilen numunenin ölçümlerinin (kapı/gate kalınlığının gereğinden fazla olması nedeniyle) transistör karakteristiği yerine diyot karakteristiği göstermesi ve tez kapsamında ayrılan sürenin sınırlı olması nedeniyle bu konuda yapılacak olan çalışma doktora sonrası çalışmalara ertelenerek tez kapsamında yapılacak çalışmalara metal/yarı iletken kontaklar ile devam edilmesine karar verilmiştir. Fabrikasyonu ile ilgili temel teorileri benzer olduğundan ve elektriksel karakterizasyonu benzer akım iletim mekanizmaları ile açıklandığından yukarıda belirtildiği üzere metal – yarı iletken kontaklarda yaşanacak gelişme transistörlere ve dolayısı ile tümleşik devrelere/yongalara/çiplere rahatlıkla uygulanabilecektir.

Metal ve yarı iletken kontaklarda seçilen malzemenin iş fonksiyonu ve ara yüzeyde kullanılacak dielektrik malzeme ara yüzeyde oluşacak potansiyel engeli ve elde edilecek numunenin doğrultucu mu yoksa omik mi olacağını belirler. Numunenin elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde bu üç faktör çok önemlidir. Dolayısı ile değişik yarıiletken,

metal ve ara yüzey malzemelerle birçok bilimsel çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir [1].

Grafen iki boyutlu bir malzeme olduğu için kararlı olarak elde edilemeyeceği düşünülse de 2004 yılında grafenin bulunması ile birlikte dikkatleri üzerine çekmeye başlamıştır. İki boyutlu grafen için karbonun diğer allotropları olan üç boyutlu grafit, sıfır boyutlu fulleren ve bir boyutlu karbon nanotüplerin yapı taşıdır diyebiliriz. Grafen de karbon atomları komşu atomlarla kovalent bağ oluştururlar. Yapısında güçlü σ bağları haricinde zayıf π bağlarının da bulunması yüksek elektrik iletkenliği göstermesine neden olmaktadır. Ayrıca elektrik alan özelliği göstermesinden dolayı hem p tipi hemde n tipi yarı iletken olarak kontrol edilebileceği dolayısıyla transistör olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Aynı zamanda silisyum tabanlı yani kırılğan alt taşlar yerine esnek yapıya sahip olması çoğu zaman teknolojik malzemelerde istenilen bir durumdur. Grafen'in çok katmanlı bir hali olan ve tabakları arasında zayıf van der waals çekim kuvveti bulunan grafit ise temiz yapısı dolayısı ile grafen ile birlikte tez çalışması kapsamında alternatif olarak ele alınmıştır.

Grafen ve grafit diğer malzemelere göre daha düşük iletim/açma gerilimine, daha yüksek akım yoğunluğuna, daha hızlı anahtarlama özelliğine sahiptir. Bu çalışmada grafit ve grafenin schottky kontaklar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bunun için metal yarıiletken kontak olarak Au/n-6H SiC/Au yapısı kullanılmış ve grafen ve grafitin bu yapının elektriksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Tez çalışmasının giriş bölümünde yapılan çalışmanın amacı açıklanmıştır. İkinci bölümde ise tez kapsamında yapılan çalışmalar ile ilgili teorik bilgiler verilmiştir. Schottky diyot diye tabir edilen metal – yarı iletken kontakların akım iletimi ile ilgili teorilere, potansiyel engel yüksekliğinin nelere bağlı olduğu, alttaş malzeme olarak kullanılan SiC ve ara yüzey malzeme olarak kullanılan grafen ve grafit ile ilgili bilgilere yer verilmiştir. Açık kaynaklarda konu ile yeterli bilgi olduğu için çok fazla ayrıntıya girilmemiş daha çok tez kapsamında kullanılan yöntemlere ve teorilere ağırlık verilmiştir.

Üçüncü bölümde metal – yarıiletken kontakların fabrikasyon süreci ile ilgili bilgilere yer verilmiştir. Alt taşın temizlik aşamasından başlayarak, alt taşın kesimi, n veya p tipi olduğunun tespiti, ara yüzey malzemelerin kaplanması, doğrultucu ve omik kontakların oluşturulması süreçleri açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde Au/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu ve ara yüzeyine grafen ve grafit katkılı halleri için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve Raman Spektroskopisi kullanılarak yapısal karakterizasyonu incelenmiş, akım-voltaj(I-V) ölçümleri hem karanlıkta hem de ışık altında (100 mW/cm^2 , 300-1800 nm, AM 1,5G standartı) ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri değişik frekanslarda ve karanlıkta alınarak temel parametreler hem referans numune hem de ara yüzeyine grafit ve grafen katkılı halleri için hesaplanmıştır. Böylece grafit ve grafenin referans numune üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Konuyla ilgili benzer çalışmalardan farklı olarak hesaplamaların yapılışı ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Tezin beşinci ve son bölümünde ise elde edilen sonuçlar konuyla ilgili benzer çalışmalar ile kıyaslanarak değerlendirme yapılmıştır.

Referans numune diye adlandırdığımız Au/n-6H SiC/Au yapısının elektriksel özellikleri üzerideki grafen ve grafit etkisinin araştırıldığı çalışmada benzer numuneler ile yapılan çalışmalarla paralel sonuçlar bulunmuş olmakla birlikte beklenen durumdan sapmaların olası nedenleri de değerlendirilmişti. Bir numunenin/yapının hangisinin daha iyi olduğu onun kullanılış amacına bağlıdır. Bu nedenle referans yapının ara yüzeyine katılanan (ara yüzeyinde kullanılan) grafen ve grafitin temel parametrelerine olan etkisi ihtiyaç duyulan malzemenin kullanılış amacına uygun olarak değerlendirilmelidir.



2. TEORİK BİLGİ

Metal – yarı iletken yapıların sıkı kontak haline getirilmesi ile elde edilen ve doğrultucu özellik gösteren yapılar ile ilgili olarak günümüze kadar teorik ve deneysel olarak pek çok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir [1]. Metal ile yarı iletken arasında ara yüzey tabakası olmadan ve oksit, polimer, yalıtkan, dielektrik gibi ara yüzey malzemeler kullanılarak elde edilen cihazlar arasındaki performans ve verim farkı araştırılmış, kullanılan ara yüzey malzemenin türünün, kalınlığının, fabrikasyon sürecinin numunelerin elektriksel, manyetik, optik vb. birçok özelliği üzerinde yaptığı etkiler araştırılmıştır. Kullanılan ara yüzey malzemelerinin yük geçişlerini düzenlediği ve fabrikasyonu yapılan numunenin parametrelerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde silisyum dioksit (SiO_2) ve kalay dioksitin (SnO_2) en çok kullanılan ara yüzey malzemeleri olduğu görülür [2-3].

Metal - yarı iletken yapılar ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde metal ve yarı iletken arasında gerçekleşen akım iletim mekanizması hakkında bilgi edinilmiş ise de sürecin tam olarak anlaşıldığını söylemek için henüz erkendir. Söz konusu yapıların tarihçesine kısaca bakacak olursak;

Metal - yarı iletken doğrultucu kontaklar ile ilgili bilinen ilk çalışma 1874 yılında kontağın direncinin yüzey koşullarına ve yüzey voltajının polaritesine bağlı olduğunu ifade eden Braun'a aittir [4].

1938'de Schottky, potansiyel engelin, kimyasal bir katman olmadan, yalnızca yarı iletkendeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklanabileceğini ileri sürdü [5]. Bundan dolayı bu bariyer yüksekliği schottky bariyeri olarak adlandırılır.

1938'de aynı yıl Mott kendi adıyla anılan yani Mott bariyeri olarak bilinen, metal - yarı iletken kontaklar için daha farklı bir teorik model tasarladı [6].

1942'de Bethe tarafından bu modeller geliştirilerek termiyonik emisyon modeli olarak bilinen haline getirildi [14]. Termiyonik emisyon olayı ilk kez 1853'te yani elektronun keşfinden önce E. Becquerel tarafından gözlemlenlenmiş, 19. yy sonlarında T. Edison konu hakkında çalışmalar yapmıştır [7, 13].

Metal - yarıiletken kontaklar düşük ileri belsem potansiyeli, yüksek anahtarlama hızı, p-n eklemlere göre ısıya daha dayanıklı olmaları gibi özelliklerinden dolayı güç elektroniğinde, sinyal işlemede ve optoelektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kontakların fabrikasyonu transistörlere oranla daha basit olduğu için schhotky diyotlar üzerinde yapılacak olumlu çalışmalar diğer yarıiletken cihazlara özellikle transistörlere kolaylıkla uygulanabilecektir.

2.1. Yarıiletken Nedir?

Metal-Yarıiletken kontakların akım iletimi ile ilgili temel teorilere geçmeden önce temel kavramlara kısaca değinelim.

Valans/Değerlik Bandı: Elektronlar atomlarda en düşük enerji seviyesinden başlayarak yörüngeleri doldurur. Bu enerji seviyeleri elektron kabukları olarak da adlandırılır. Bu kabuklar da orbitallerden meydana gelir ve Pualı Dışarlama İlkesine göre elektronlar bu kabuklara yerleşir. Fakat atomlar katılarda birbirine çok yakın mesafede konumlandığı için bu atomların sayısı kadar enerji durumu ortaya çıkar. Yani enerji seviyelerinde bir ayrışma ortaya çıkar. Bu durumu enerji bandı olarak adlandırabiliriz. En yüksek enerjiye sahip elektronların bulunduğu banda valans/değerlik bandı denir.

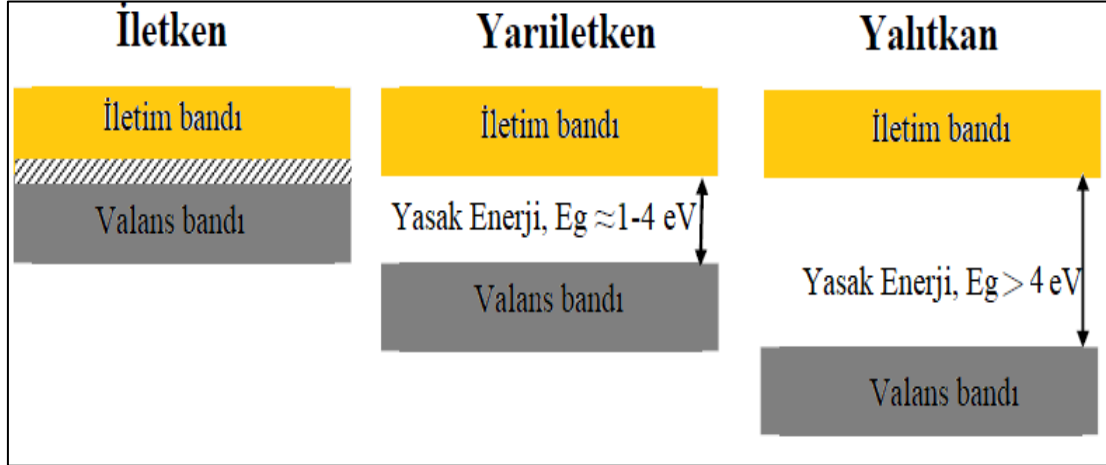
İletim Bandı: Valans bandından daha yüksek bir enerji seviyesinde bulunan ve elektronların serbestçe hareket edebildiği banda ise iletim bandı denir.

Yasak Enerji Aralığı: Değerlik bandında bulunan elektronlara enerji vererek iletim bandına çıkması sağlanabilir. Bunun gerçekleşebilmesi için iletim bandı ile valans/değerlik bandı arasındaki mesafenin daha doğrusu enerji seviyesinin çok yüksek olmaması gerekir. Bu enerji seviyesi yasak enerji aralığı olarak adlandırılır.

İletken, Yalıtkan, Yarı iletken: Yasak enerji aralığının 2 eV civarında olduğu maddelere yarı iletken, daha büyük olan maddelere ise yalıtkan maddeler denir. İletkenlerde ise değerlik/valans bandı ve iletim bandı iç içe geçmiştir veya çakışıktır. Şekil 2.1. de yalıtkan, yarı iletken ve iletkenler için enerji bant diyagramı görülmektedir [8].

Fermi Seviyesi: Elektronların bulunma ihtimalinin en yüksek olduğu elektrokimyasal potansiyel enerji seviyesi olarak tanımlayabileceğimiz fermi seviyesini metaller için daha

basit bir şekilde sıfır kelvin sıcaklığında elektronların doldurduğu en yüksek enerji seviyesi olarak tanımlayabiliriz. Bu enerji seviyesi yarı iletken ve yalıtkanlar için yasak enerji aralığına denk gelir.

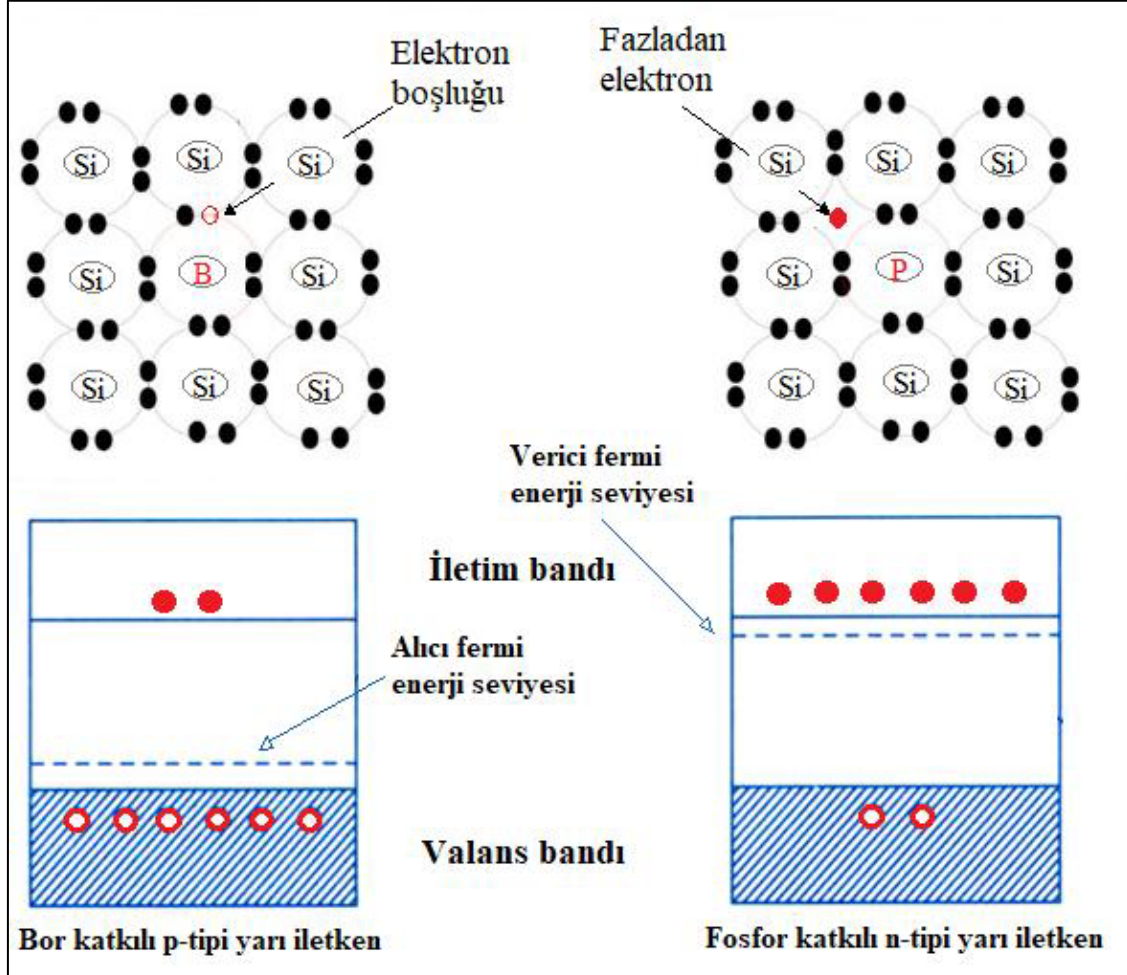


Şekil 2.1. İletken, yarı iletken ve yalıtkan için bant diyagramı

Saf / Katkılı Yarı iletkenler: Yarı iletkenlerde yasak enerji bandı yarı iletken - yarı iletken'e göre değişir ve 0.1 ile 4 eV arasında değerler alır. Temel yarı iletkenlerden Ge, Si ve GaAs oda sıcaklığında sırasıyla yaklaşık 0.66 eV, 1.12 eV ve 1.45 eV değerlerine sahiptir [9]. Silisyum ve germanyum gibi bazı elementler kendisi yarı iletken özellik gösterirler fakat bu elementlerin içine diğer elementlerden çok az miktarda farklı bir element katılarak yarı iletken malzemenin özellikleri değiştirilebilir. Örneğin silisyumun 4 değerlik elektronu varken, fosforun 5 değerlik elektronu vardır. Silisyum fosfor ile katkılanırsa fazla olan 1 elektron yapıya çok düşük bir enerji ile bağlanır ve kısmen serbest hale gelir. Bu tür katkılama ile elde edilen yarı iletkenlere n-tipi yarı iletken denir. Katkılama için kullanılan Fosfor (P), Antimon (Sb), Arsenik (As), Bismut (Bi) gibi son yörüngesinde 5 elektron bulunan atomlara verici/donör atomları denir. Son yörüngesinde 3 değerlik elektronu bulunan Bor (B), Galyum (Ga), İndiyum (In) ve Alüminyum (Al) gibi atomlar ile katkılama yapıldığı zaman ise yapıda bir elektron eksikliği yani deşik fazlalığı oluşacaktır ki bu tür yarı iletken yapılara p-tipi yarı iletken denir. Bu katkı atomlarına ise alıcı/acceptor atomları denir.

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi n-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları elektronlar, azınlık taşıyıcıları deşiklerdir. P-tipi yarı iletkenlerde ise çoğunluk taşıyıcıları deşikler/holler, azınlık taşıyıcıları elektronlardır [8].

İş Fonksiyonu: Bir elementin yüzeyinden elektron koparmak için gerekli olan en küçük enerji miktarına iş fonksiyonu denir. Daha doğru bir tanım yapacak olursak bir elektronu fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için yani serbest hale getirmek için verilmesi gereken enerji miktarıdır.



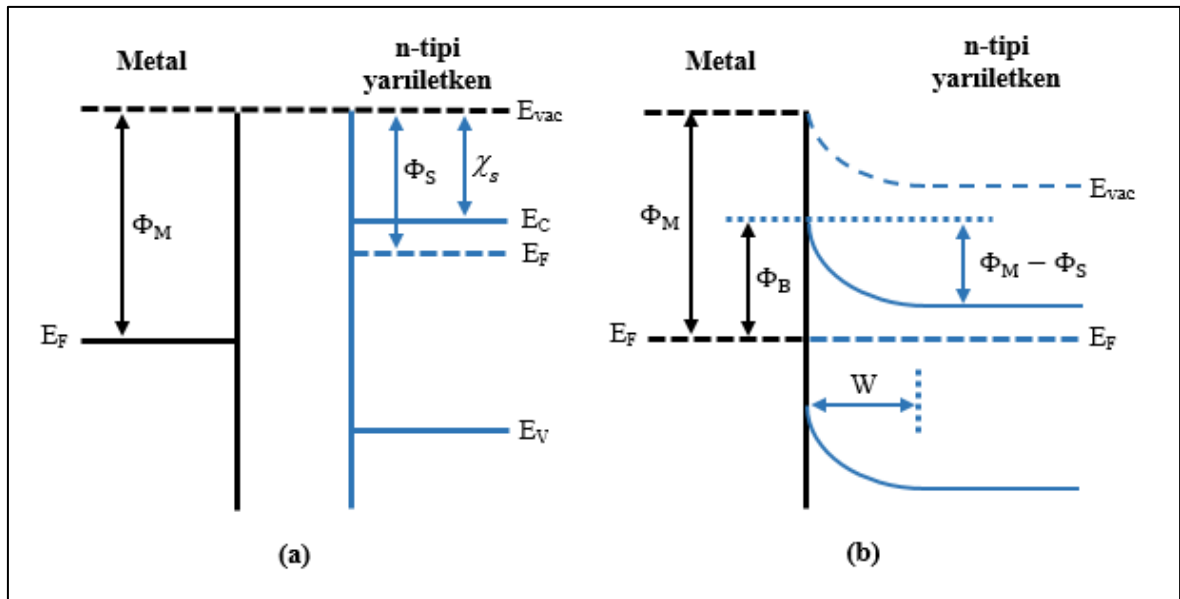
Şekil 2.2. P-tipi ve n-tipi yarı iletkenler

2.2. Schottky-Mot Teorisi

Metal ile yarı iletkenin kontak haline geldiği yapılar doğrultucu ve omik olmak üzere iki türlü davranış sergiler. Doğrultucu özellik gösteren yapılarda ileri belsem bölgesinde akım geçirirken ters belsem bölgesinde akım geçirmesi istenmez. Buna rağmen az miktarda bir akım geçişi olur ki buna doyma akımı denir. Ters belsem bölgesinde akım geçmemesi için bu bölgede yüksek dirençli bir bölgenin oluşması beklenir. Omik özellik gösteren metal yarı iletken yapılar ise uygulanan voltajın polaritesinden/yönünden bağımsız olarak lineer bir akım voltaj özelliği gösterir. Bir nevi düşük değerli direnç gibi davranır.

Schottky-Mot Teorisi, yarı iletken - metal sıkı kontakların temas yüzeylerinde oluşan potansiyel engel yüksekliğini açıklamak için Walter Schottky ve Nevill Mott tarafından birbirinden bağımsız olarak geliştirildi [9,10].

Schottky-Mot Teorisine göre, metal ve yarı iletken arasında oluşan potansiyel bariyer, yarı iletken ve metalin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanır. Metal - n tipi yarı iletken arasındaki kontak oluşturmada önceki ve kontak oluşturduktan sonraki şematik enerji bant diyagramları Şekil 2.3'de gösterilmiştir [12]. Katkılı yarı iletkenlerde fermi seviyesi katkı miktarı ile değiştiği için iş fonksiyonu da değişiklik gösterebilmektedir. Dolayısı ile farklı kaynaklarda farklı iş fonksiyonu değerleri görmemiz mümkündür. Elektron ilgisini ise bir atomun elektron çekme eğiliminin bir ölçüsü olarak tanımlayabiliriz. Daha doğru bir tanım yapacak olursak vakum seviyesi ile iletkenlik bandının tabanı arasındaki enerji farkı olarak tanımlayabiliriz. Dolayısı ile her ikisini de eV(elektron volt) birimi ile tanımlayabilirsek de elektron ilgisi, iş fonksiyonu gibi katkı yoğunluğuna / konsantrasyonuna bağlı değildir [11].



Şekil 2.3. $\Phi_M > \Phi_S$ için metal - n tipi yarı iletken için enerji bant diyagramları

2.2.1. Doğrultucu kontak

Metal - n tipi yarı iletken kontaklarda metalin iş fonksiyonu yarı iletkenin iş fonksiyonundan büyük ise;

Şekil 2.3 (a)'da görülen yarı iletken ve iletken yapılar kontak haline getirildiği zaman yarı iletkenin iş fonksiyonu daha küçük olduğu için diğer bir deyişle yarı iletkenin fermi enerji seviyesi metalden daha yüksek bir enerji seviyesinde olduğu için her iki yapının da fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar yarı iletkenden metale yük (elektron) geçişi olur. Çünkü yarı iletkendeki elektronların enerjileri fermi seviyelerinin farklı olmasından dolayı metaldeki elektronların enerjilerinden daha yüksektir.

Yarı iletkendeki elektron azalması yarı iletkenin valans bandının, iletim bandının ve fermi seviyesinin enerjilerini değiştirecektir. Bunun bir sonucu olarak yarı iletken taraftaki bant yapısı değişecektir/azalacaktır. Metal tarafında ise zaten çok yüksek bir elektron yoğunluğu olduğu için bu yük geçişinin yapının bant seviyeleri üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeyde olacaktır. Yarı iletkenin metale temas ettiği yüzeyde yani bant bükülmesinin gerçekleştiği yüzeyde yarı iletken elektron kaybettiği için yüksek dirençli bir bölge oluşurken metal yüzeyde ise gene elektron geçişinden kaynaklı ince bir negatif yüklü tabaka oluşacaktır. Yarı iletken tarafında tüm bantlar paralel olarak eşit miktarda kaydığı / büküldüğü için yarı iletkenin yasak enerji aralığı ve elektron ilgisi değişmeyecektir. Bant bükülme miktarı; Φ_M metalin iş fonksiyonu, X_S yarı iletkenin elektron ilgisi ve V_i kontak potansiyeli (built-in gerilimi) olmak üzere;

$$\Phi_B = qV_i = \Phi_M - X_S \quad (2.1)$$

ile hesaplanır.

Şekil 2.3'de görüleceği üzere yarı iletkenden metale geçen elektronların karşılaşacağı potansiyel engel yüksekliği qV_i iken, metalden yarıiletkene geçen elektronların karşılaşacağı potansiyel engel ise, $\Phi_n = (E_C - E_F)$ olmak üzere;

$$\Phi_B = qV_i + \Phi_n \quad (2.2)$$

olur [11].

Tüketim/deplasyon bölgesinin genişliğini (W) olmak üzere bu bölgede serbest yükler bulunmayacak sadece yarı iletkenin tipine göre çoğunlu taşıyıcı statik yükler bulunacaktır.

Örneğimizde yarıiletken olarak n-tipi kullanıldığı için N_d donör yoğunluğu ve A eklem bölgesinin alanı olmak üzere tüketim bölgesindeki toplam yük miktarı;

$$Q=qN_dWA \quad (2.3)$$

ile ifade edilebilir.

Gauss yasası uygulanırsa;

$$\oint E \cdot dS = \frac{Q}{\epsilon} = \frac{qN_dWA}{\epsilon} \quad (2.3)$$

eşitliğinden,

$$E = \frac{qN_dWA}{\epsilon} \quad (2.3)$$

elde edilir.

Yüzey kontak potansiyeli(built-in gerilimi) V_b ise;

$$V_b = \int E(x)dx \quad (2.4)$$

eşitliğinde E yerine Eşitlik 2.3 konur ve W çekilirse;

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_o V_{bi}}{qN_d}} \quad (2.5)$$

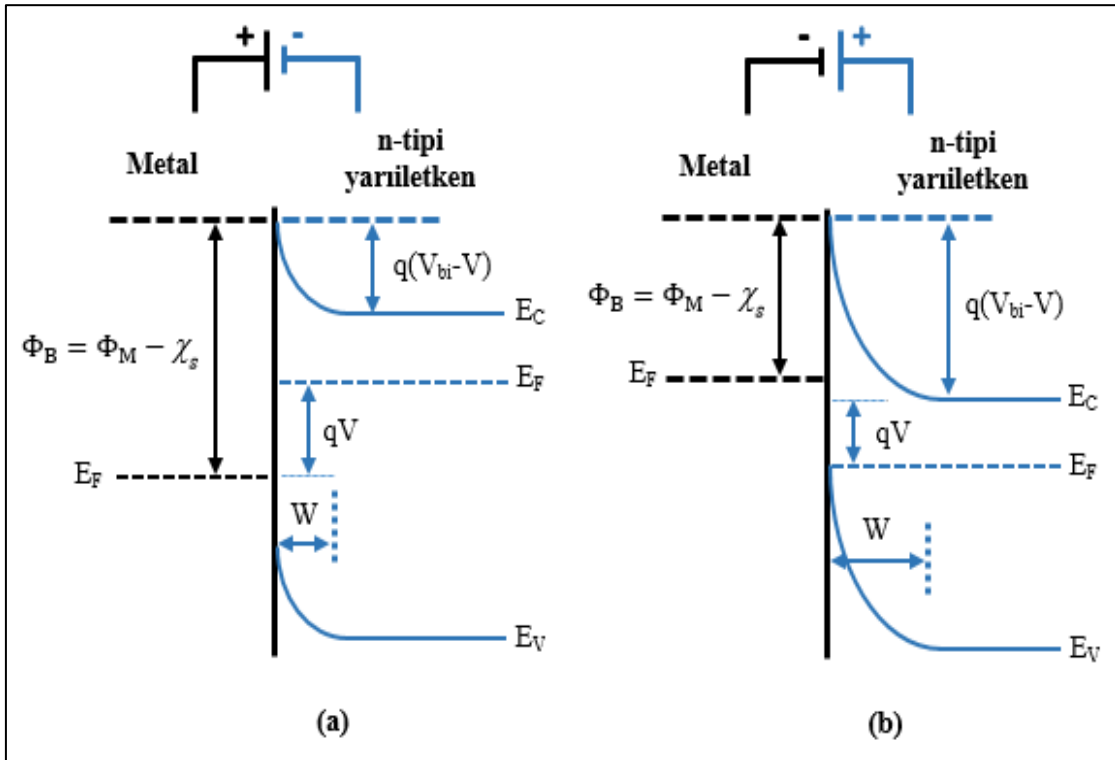
olarak elde edilir [11].

Metal – n tipi yarı iletken kontağın metal bölümüne pozitif, yarı iletken bölümüne negatif bir potansiyel uygularsak (düz belsem durumu) tüketim bölgesinin genişliği azalacak, bantlardaki bükülme miktarı azalacak, daha fazla elektron yarı iletkenenden metale geçecektir. Bu durum Şekil 2.4(a)’da gösterilmiştir [12].

Metal – n tipi yarı iletken kontağın metal bölümüne negatif, yarı iletken bölümüne pozitif bir potansiyel uygularsak (ters belsem durumu) tüketim bölgesinin genişliği artacak,

bantlardaki bükülme miktarı artacak, daha az elektron yarı iletken den metale geçecektir. Bu durum Şekil 2.4 (b)'de gösterilmiştir [12].

Her iki durumda da yani hem ters belsem hem de düz belsem durumunda da yarı iletken den metale geçecek elektron sayısını kontrol eden uygulanan gerilim değeridir. Metalden yarı iletkene geçen elektron sayısında ise engel yüksekliğinde bir değişiklik olmadığı için her hangi bir değişim olmayacaktır.



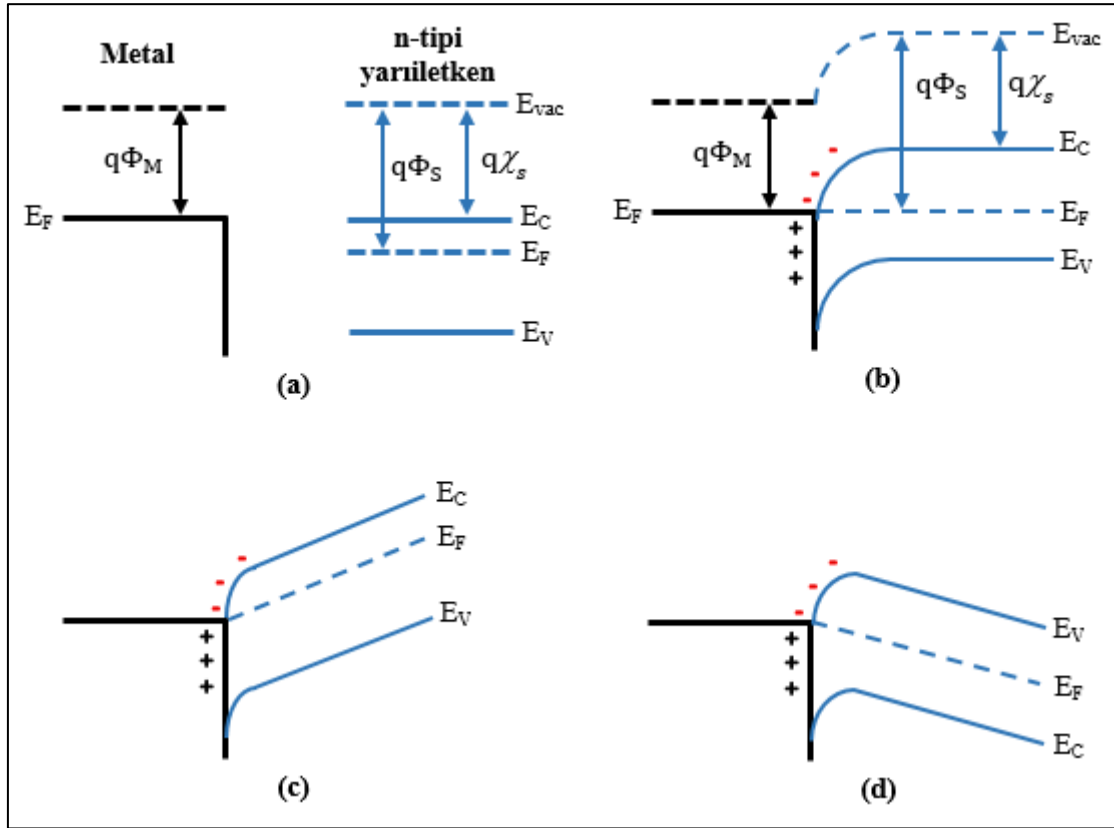
Şekil 2.4. Metal ve n-tipi yarıiletkenin (a) ileri beslem ve (b) geri beslem durumlarında şematik enerji bant diyagramları

2.2.2. Omik kontak

Metal - n tipi yarı iletken kontaklarda metalin iş fonksiyonu yarı iletkenin iş fonksiyonundan küçük olduğu dört farklı durum için enerji bant diyagramı Şekil 2.5'de gösterilmiştir [12].

Şekil 2.5 (a)'da temas kurulmadan önceki durum görülmektedir. Metal ve yarı iletken sıkı kontak haline getirildikten sonra ise Şekil 2.5 (b)'de görüldüğü gibi metalin fermi enerjisi yarı iletken den daha büyük olduğu için metalde bulunan nispeten yarı iletkene göre daha yüksek enerjili olan elektronlar fermi seviyeleri eşitlenene kadar metalden yarı iletkene

geçerler. Bu geçiş metal yüzeyinde elektron kaybına dolayısı ile pozitif bir yük oluşumuna, yarı iletken tarafında ise elektron fazlalığına neden olur. Herhangi bir tüketim bölgesi olmadığı için akımı sınırlayan sadece yarı iletken tarafta bulunan küçük bir bant bükülmesidir. Şekil 2.5 (c, d)' de görüleceği gibi ileri belsem durumunda da geri belsem durumunda da elektronlar uygulanacak küçük bir gerilimle her iki tarafa da rahatlıkla hareket edebileceklerdir.



Şekil 2.5. $\Phi_M < \Phi_S$ olduğu durumda n-tipi yarı iletken ve metal kontağın enerji bant diyagramı (a) öncesi, (b) sonrası, (c) ileri beslem ve (d) geri beslem

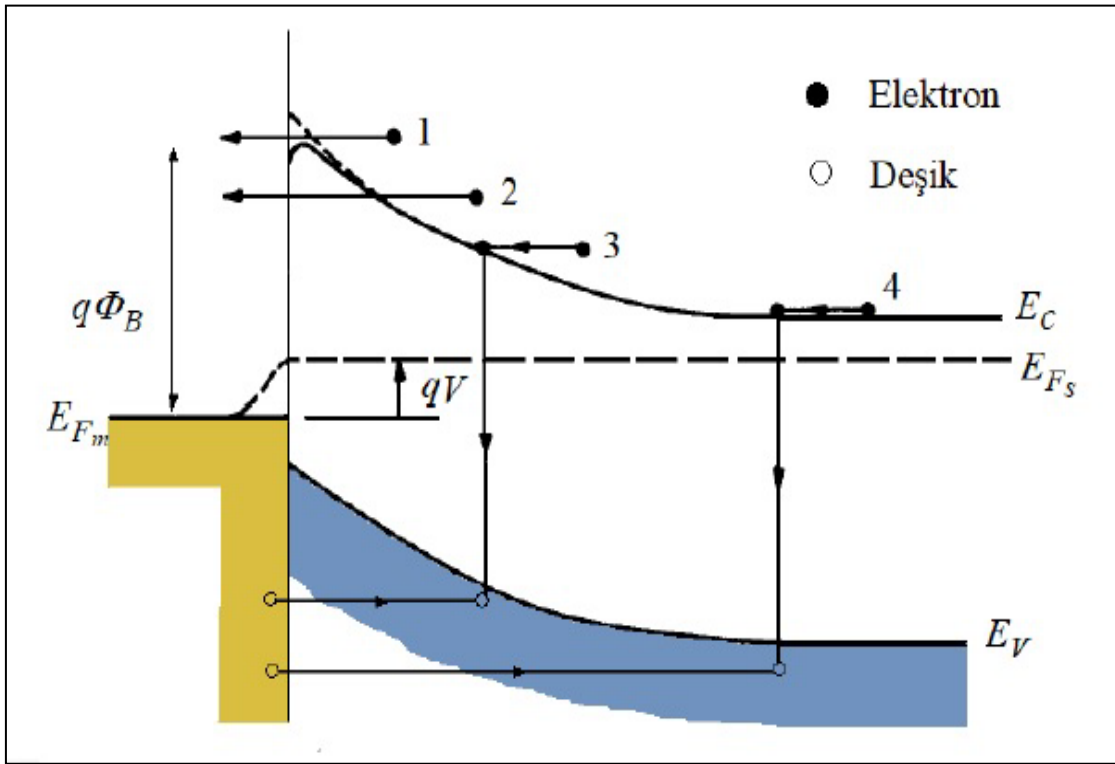
Özetleyecek olursak;

Metal – n tipi yarıiletkenler için; ϕ_s , yarıiletkenin iş fonksiyonu, ϕ_m metalin iş fonksiyonu olmak üzere, n-tipi yarıiletkende doğrultucu kontak oluşumu için $\phi_m > \phi_s$, omik kontak oluşumu için ise $\phi_s > \phi_m$ olması gerekmektedir [11].

Metal – p tipi yarıiletkenler için; ϕ_s , yarıiletkenin iş fonksiyonu, ϕ_m metalin iş fonksiyonu olmak üzere, p-tipi yarıiletkende omik kontak oluşumu için $\phi_m > \phi_s$, doğrultucu kontak oluşumu için ise $\phi_s > \phi_m$ olması gerekmektedir [11].

2.3. Akım İletim Mekanizmaları

Schottky diyot diye tabir edilen metal – yarı iletken kontaklarda yük hareketleri genelde termiyonik emisyon, kuantum mekaniksel tünelleme, tüketim bölgesi içerisinde elektron ve deşiklerin birleşmesi/oluşması ve yarıiletkenin bant bükülmesi olmayan bölgesinde taşıyıcıların birleşmesi diye tabir edebileceğimiz dört farklı şekilde oluşur. Akım iletiminin potansiyel engel üzerinden gerçekleştiğini varsayan termiyonik emisyon teorisi en temel/beklenen/olası durumdur diyebiliriz. Şekil 2.6’da tüm akım iletim mekanizmaları gösterilmiştir [17].



Şekil 2.6. Schottky yapılarıdaki akım iletim mekanizmaları

2.3.1. Termiyonik emisyon teorisi

Schottky-Mot Teorisi zaman içerisinde Bethe tarafından geliştirilerek, akım iletiminin engel yüksekliği üzerinden gerçekleştiğine dayanan Termiyonik Emisyon (TE) teorisi geliştirmiştir [14].

Termiyonik emisyon teorisine göre, bir metal ile yarı iletken kontaktaki akım iletiminin esas belirleyicisi çoğunluk taşıyıcılarıdır [15]. Metal ve yarı iletken kontak arasındaki potansiyel engel yüksekliği kT/q' den çok büyük olduğu termal denge durumunda difüzyon

ve sürüklenme akımlarının ihmal edilebileceği, birbirini dengeleyebileceği bu nedenle potansiyel engeli aşan elektronların yani kinetik enerjisi potansiyel engel yüksekliğinden büyük olan elektronların akım iletimi sağlayacağı üzerinde durulmuştur.

Termiyonik emisyon teorisine göre akım voltaj arasındaki ilişki;

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) \quad (2.6)$$

eşitliği ile verilir [16]. Burada I diyot akımı (Amper), V diyot uçlarına uygulanan gerilim (Volt), I_0 doyma akımı-ters polarmada doyma akımı (Amper), q elektronun yükü (Coulomb), T ortam sıcaklığı (Kelvin), k boltzman sabiti (Joule/Kelvin), n idealite faktörü (birimsiz) dür.

doyma akımı ise

$$I_0 = AA^*T^2 e^{\frac{-q\phi_{Bo}}{kT}} \quad (2.7)$$

eşitliği ile verilir [12]. Burada ϕ_{Bo} sıfır beslemedeki schottky engel yüksekliği (eV), A yarıiletkenin alanı, A^* richardson sabitidir.

Termiyonik Emisyon teorisinde richardson sabitinin ifadesi;

$$A^* = \frac{4\pi q m_e^* k^2}{h^2} \quad (2.8)$$

ile verilir.

2.3.2. Kuantum mekaniksel tünelleme

Engel içerisinde meydana gelen kuantum mekaniksel tünelleme olayı daha çok katkı miktarı yüksek olan yarı iletkenler ile metaller arasında yapılan kontaklarda meydana gelir [11]. n- tipi yarı iletkenlerde katkılama ile fermi enerjisi değişir ve katkı miktarı arttıkça fermi seviyesi iletkenlik bandının tabanına yaklaşır. Elektronlar engelin dar/ince olduğu bölümlerden diğer tarafa geçebileceklerdir. Alan emisyonu olarak da adlandırılan bu olay engelin daha ince olduğu daha yüksek bölümlerinde meydana geliyorsa buna termiyonik alan emisyonu adı verilir.

Her iki bölgede aslında elektronun kinetik enerjisi engeli aşmaya yetmemektedir. Engeli aşmaya yeterli bir kinetik enerjisi varsa bunu termiyonik emisyon teorisi içerisinde ele alırız. Fakat engeli aşmaya yetmese bile mevcut kinetik enerjisi ile engelin daha ince olduğu üst bölümlerinden geçiş yapabileceği termiyonik alan emisyonu ile ifade edilmiştir. Bunu kuantum mekaniğinde enerjisi potansiyel engeli aşmaya yetmeyen parçacığın tünelleme yapması olayına benzetebiliriz. Şekil 2.6'da 1 numaralı parçacığın termiyonik emisyon, 2 numaralı parçacığın kuantum mekaniksel tüneleme / alan emisyonu / termiyonik alan emisyonu yaptığı görülmektedir.

Tünelleme olayında akım;

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV_a}{E_0}} \right) \quad (2.9)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada E_0 engel genişliğine bağlı bir parametredir [16].

Tünelleme olayı hem ileri belsem, hem de geri belsem bölgelerinde görülebilir. Düşük sıcaklıklarda ve ileri beslem bölgesinde yani potansiyel engelin nispeten fermi enerjisine daha yakın olduğu alt bölümlerinde alan emisyonu gerçekleşirken, sıcaklığın artması ile birlikte enerji kazanan elektronlar bariyer yüksekliğinin daha ince olduğu potansiyel engelin üst bölümlerinde termiyonik alan emisyonu gerçekleşir.

2.3.3. Tüketim bölgesi içerisinde elektronların ve deşiklerin birleşmesi/oluşması

Tüketim bölgesi içerisinde elektron ve deşiklerin birleşmesi/oluşması olayı Şekil 2.6'da 3 numaralı parçacığın hareketi ile temsil edilmiştir. Denge durumunda oluşan elektron ve deşikler/holler birbirini nötürleyecekleri için doyma akım üzerinde bir etkileri olmayacaktır. Fakat ekleme bir dış gerilim uygulanırsa uygulanan gerilimin türüne göre tüketim bölgesinde bir akım oluşacaktır.

2.3.4. Bant bükülmesi dışında taşıyıcıların birleşmesi

Yarıiletkenin bant bükülmesi olmayan bölgesinde taşıyıcıların birleşmesi olayı Şekil 2.6'da 4 numaralı parçacığın hareketi ile temsil edilmiştir. Azınlık taşıyıcı enjeksiyonu olarak da adlandırılan olay metal yarı iletken kontağa düz gerilim uygulandığında çoğunluk taşıyıcıların difüze olarak yer değiştirmesi esasına dayanır. Metalden yarı iletkene, yarı iletkenden ise metale geçen çoğunluk taşıyıcıları eşit miktardadır.

Ayrıca Schottky difüzyon teorisi ile elektronların potansiyel engelden geçişlerini açıklamıştır [5]. Difüzyon olayında yoğunluğu yüksek olan taşıyıcılar düşük yoğunluktaki taşıyıcılara doğru yayılırlar. Metal – yarı iletken eklemlerde metal yüzeyinde yüksek yoğunlukta elektronlar vardır. Bu elektronlar yoğunluğun düşük olduğu yarı iletken yüzeyine doğru yayılırlar. Yani difüzyon ile metalden yarı iletken yüzeyine geçerler.

2.4. Cheung Fonksiyonları

Metal yarı iletken kontakların parametrelerini hesaplamak için kullanılan yöntemlerden biri Cheung yöntemidir [19]. Cheung fonksiyonları kısaca şu şekilde açıklanabilir.

Bir diyotun üzerindeki seri direncin etkisi genellikle bir diyot ve ona bağlı bir direnç ile modellenenir. Bu devre bir voltaj(V) kaynağına bağlanırsa diyot üzerine düşen gerilim (V_D), $V-IR$ şeklinde olacaktır.

Eşitlik 2.6 daki V ifadesi yerine ($V-IR$) yazılır her iki tarafının $\ln$ 'ini alınarak gerekli işlemler yapılırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + I R_s \quad (2.10)$$

olarak elde edilir.

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

$$H(I) = I R_s + n \phi_b \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.10 dan akım – voltaj karakteristiğinin logaritmik doğru beslem bölgesinde y eksenini kestiği noktadan idealite faktörü (n) ve grafiğin eğiminden de seri direnci (R_s) değerleri bulunur. $H(I)$ ve I grafiklerinin y eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği ve eğiminden R_s değerleri belirlenir [20].

2.5. Norde Fonksiyonları

Norde diyot üzerindeki voltajın $\frac{3kT}{q}$ dan büyük olduğu durumda seri direnç ve engel yüksekliğini değerlerini belirlemek için alternatif bir yöntem önermiştir. Norde fonksiyonları Eşitlik 2.12’de verilmiştir [21, 22].

$$F(V) = \frac{V}{Y} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.12)$$

Burada γ sayısı ideallik faktörü n ’den büyük olan ilk tam sayıdır.

Voltajın en küçük değeri V_{min} olmak üzere schottky diyotunun Φ_b değeri ve R_s seri direnç ifadeleri aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmiştir.

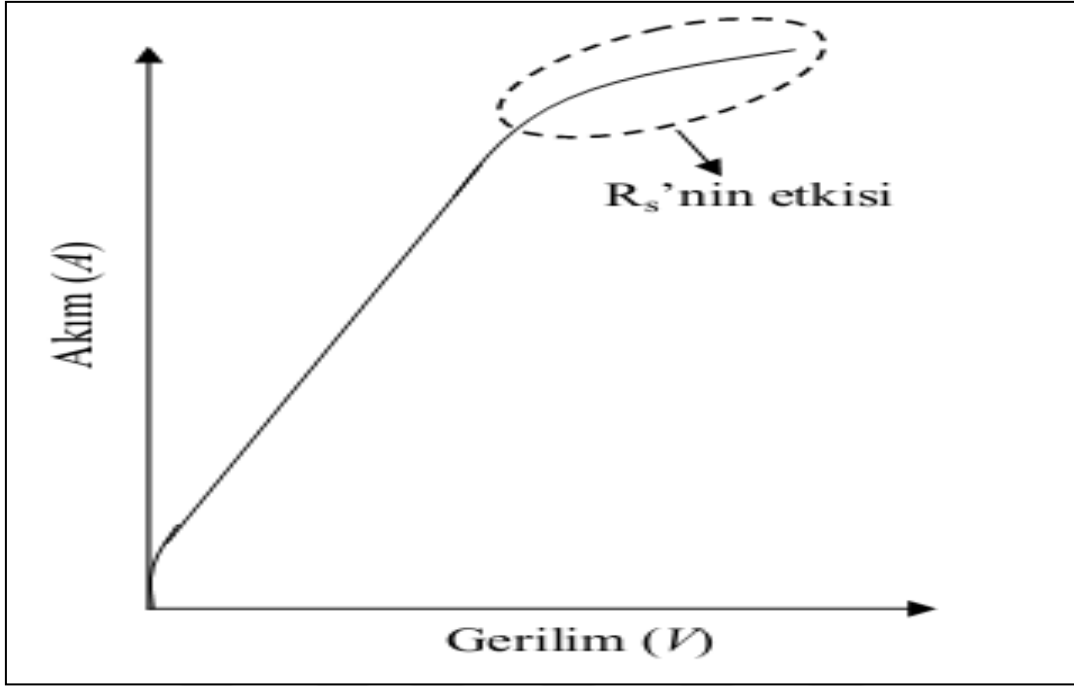
$$\phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{Y} - \frac{kT}{q} \quad (2.13)$$

$$R_s = \frac{(Y-n)kT}{qI_{min}} \quad (2.14)$$

2.6. Seri Direncin Etkisi

Metal - yarıiletken kontaklarda dikkate almamız gereken bir diğer etken seri direnç etkisidir. Seri direnç, yarıiletken tarafında oluşan tüketim bölgesi dışında kalan bölgenin akımı karşı gösterdiği dirençtir ve R_s ile gösterilir. Bu etki, gerilim değeri büyüdükçe baskın olmaya başlar ve akımının düşmesine neden olur. Şekil 2.7’da bu durum gösterilmektedir [23].

Serbest yük taşıyıcıların yoğunluğunun artması seri direnç etkisini azaltabilir [18]. Seri direnç etkisi arttıkça yapının verimi azalır. Bu nedenle ara yüzey durumları, yapılarda kullanılan malzeme seçimi ve diyotun büyüklüğü önemlidir. Düşük dirençli diyot malzemeleri kullanmak, ara yüzeyin temiz hale getirilmesi ve katkılanması, diyotun boyutunun küçültülmesi denenerek seri direncin etkisi azaltılabilir. Yapılan çalışmada grafit ve grafen kullanmanın serbest yük taşıyıcı sayısını arttıracığı bu nedenle seri direnç etkisini azaltacağı beklenmektedir.



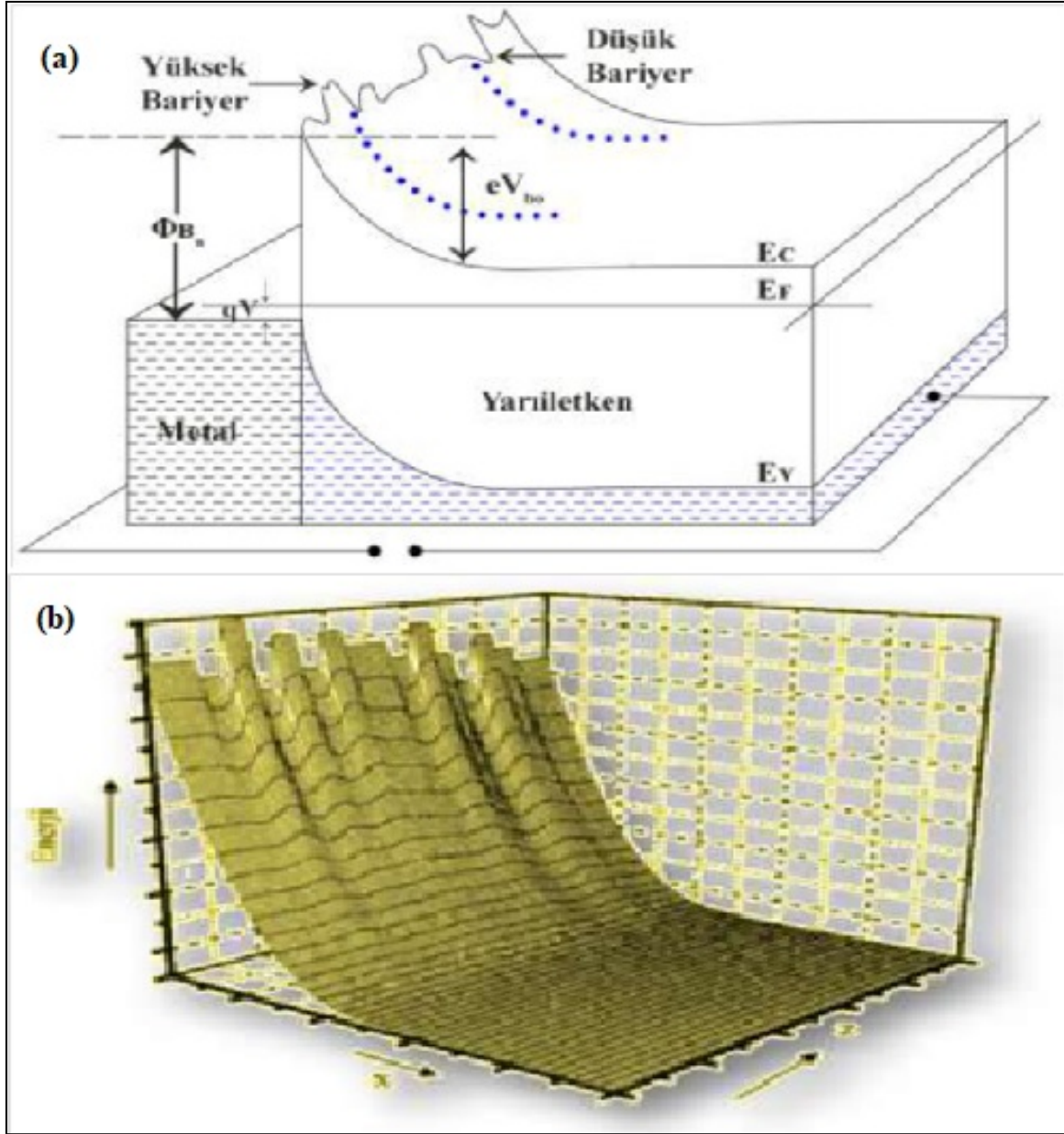
Şekil 2.7. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi

Metallerin az katkılı yarı iletkenlerle yapmış oldukları kontaklarda yüksek seri direnç etkisi görüldüğü için, uygulamada katkı miktarı yüksek alt taşlar üzerine ince filim oluşturmak sureti ile seri direncin etkisi en aza indirilir. Aynı zamanda alt taşın gövde direnci, omik kontak direnci ve katkılanmamış epitaksiyal tabakanın direnci seri direncin artmasında birer etken olmaktadır [24].

2.7. Ara Yüzey Durumları ve Engel Homojensizliği

Teorik açıklamalarda metal – yarı iletken arasındaki potansiyel engelin düz ve sabit bir değerde olduğu düşünülse de yapılan çalışmalar incelendiğinde akım – gerilim ölçümlerinden elde edilen idealite faktörü, bariyer yüksekliği gibi temel parametrelerde beklenmedik sonuçlarla karşılaşıldığından bu beklenmedik sonuçlar pürüzlü ara yüzey, atomik dislokasyonlar, kristal kusurları vb. gibi ara yüzey durumları ve engel homojensizliği ile açıklanmıştır.

Şekil 2.8(a)'da bir schottky diyot için gaussian dağılımının enerji-band diyagramı ve benzer bir gösterimle Şekil 2.8(b)'de homojen olmayan potansiyel engel yüksekliğine sahip bir schottky kontakın üç boyutlu görünümü gösterilmektedir [58, 59].



Şekil 2.8. (a) Bir Schottky diyot için gaussian dağılımının enerji-band diyagramı
(b) Homojen olmayan potansiyel engel yüksekliğine sahip bir Schottky kontağın üç boyutlu görünümü

Metal ile yarı iletken arasındaki temas bölgesi ara yüzey bölgesidir. Bu bölge yük geçişini düzenler ve cihazın elektriksel özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ara yüzeyde bulunan boşluklar ve kusurlar engelin homejen olmamasına neden olur. Engel homojensizliği yüksek dirençli bölgelere veya doyma akımına neden olabilir. Yüksek kaliteli malzeme kullanmak, ara yüzeyi kirleticilerden uzak tutmak, ara yüzey temas bölgesinin geometrisine ve bu bölgede kullanılacak ara yüzey malzemesinin homojen olmasına dikkat etmek engel homojensizliğini azaltabilir.

2.8. Sıcaklığın İdealite Faktörü Üzerine Etkisi

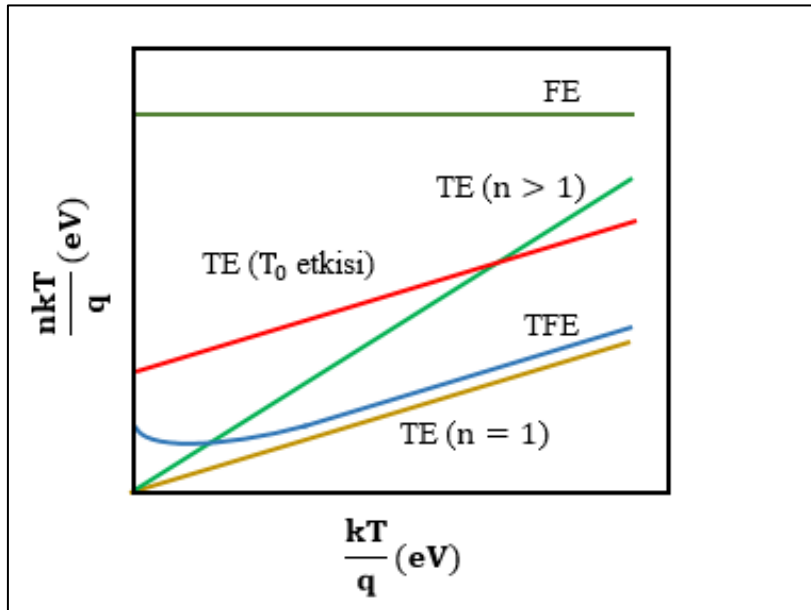
Schottky diyotlarda ideal durum için n idealite faktörü teorik olarak 1 kabul edilir. Fakat yapılan deneysel çalışmalarda akım voltaj ve kapasitans voltaj ölçümlerinden elde edilen veriler ile yapılan hesaplamalarda idealite faktörü genelde birden büyük çıkar. Birçok nedenle ideal durumdan sapmalar olması normaldir. Bariyer yüksekliğinin homejen olmaması ve termiyonik emisyon haricindeki diğer akım iletim mekanizmalarının varlığı idealite faktörünün sıcaklığa bağlı olmasına neden olur.

İdealite sabitinin sıcaklık ile değişimi,

$$n = \left(1 + \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.15)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlik 2.15’de 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 [56].

Termiyonik Emisyon (TE) ve Termiyonik Alan Emisyon (TFE) gibi farklı akım iletim mekanizmaları idealite faktörünün sıcaklıkla değişiminin teorik gösterimleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir [37].

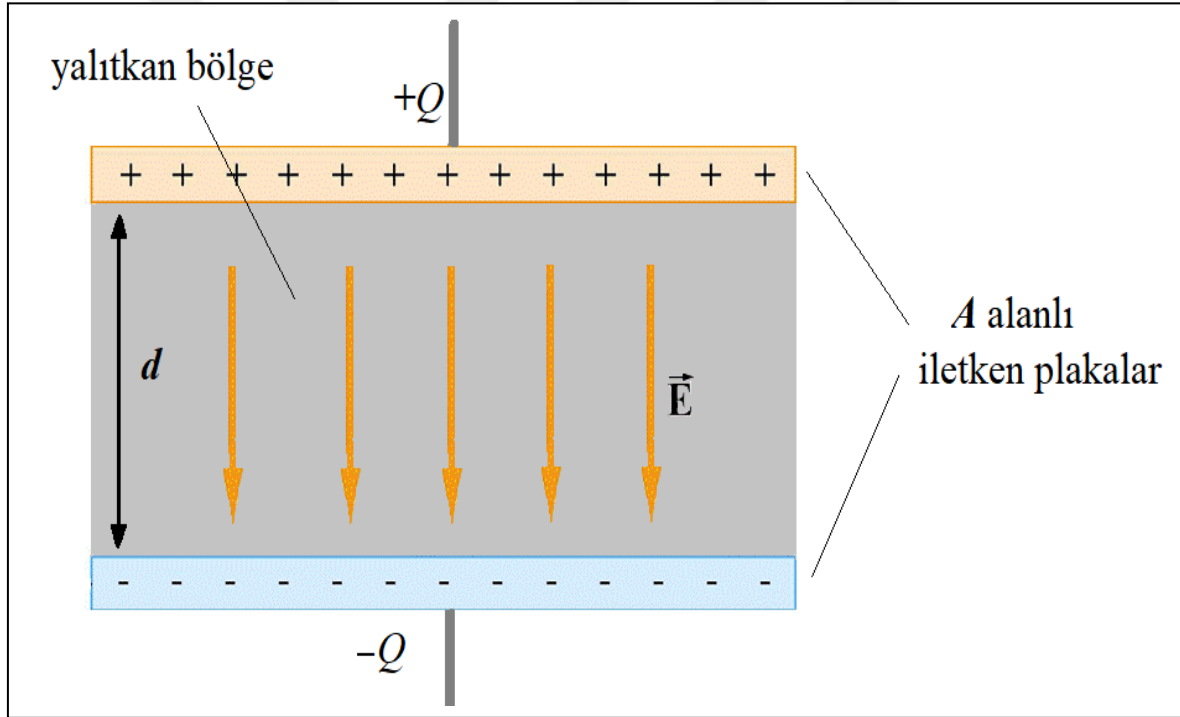


Şekil 2.9. Farklı akım iletim mekanizmaları için idealite faktörünün sıcaklıkla değişiminin teorik gösterimleri

2.9. Dielektrikler

Dielektrik kelime anlamı olarak içinden elektrik alan geçişine izin veren, fakat parçacık geçişine izin vermeyen malzeme olarak anılır[57]. Dielektrik kavramı genellikle yalıtkan kelimesi ile eş anlamlı olarak kullanılsa da elektrik alan uygulandığında polarize olan yalıtkan malzemelere dielektrik demek daha doğrudur.

Aralarında belirli bir mesafe bulunan zıt işaretli yük çiftine dipol denir. Doğadaki moleküllerin büyük çoğunluğunda yükler simetrik dağılmamıştır. Dolayısı ile daimi bir dipol momente sahiptirler. Bu tür moleküllere polar moleküller denir. Yüklerin simetrik olarak dağıldığı, dolayısı ile daimi bir dipol momente sahip olmayan moleküllere ise apolar moleküller denir.



Şekil 2.10. Paralel plakalı kondansatör yapısı

Şekil 2.10’da dielektriksiz paralel plakalı kondansatör görülmektedir [25]. Plakaları arasında dielektrik malzeme olmayan bir kondansatör için plakalar arasında oluşan potansiyel farkı V_0 , plakalar arası uzaklık d olarak tanımlanırsa elektrik alan şiddeti (E_0);

$$E_0 = \frac{V_0}{d} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilebilir.

A plakaların yüzey alanı olmak üzere, elektrik alan şiddetini (E_0) plakaların yüzey yük yoğunluğu (σ) cinsinden de yazabiliriz. Bunu gauss yasasını kullanarak kolaylıkla elde edebiliriz.

$$E_0 A = \frac{Q_{iç}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

ise A ları sadeleştirirsek

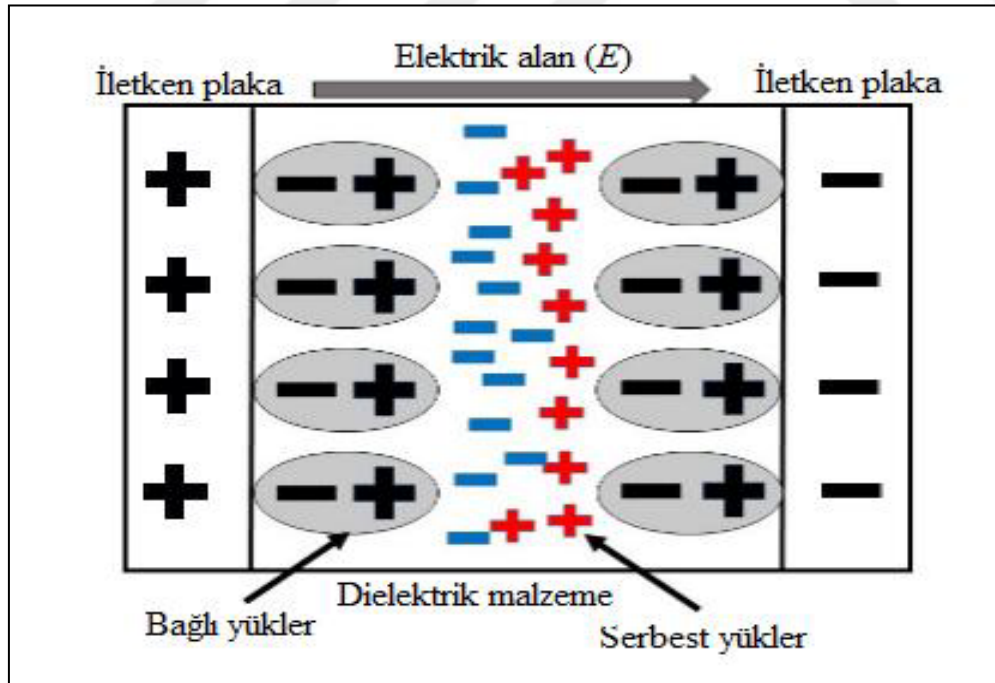
$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitidir ve değeri 8.854×10^{-12} F/m 'dir. Bu ifade yalıtkanlarda geçerlidir. İletkenlerde elektronların hareketinden dolayı mobilite vardır fakat yalıtkanlarda mobilite yoktur. İletkenlerin içinde elektrik alan sıfırdır.

Plakaları arasında dielektrik malzeme olmayan boş kondansatörün sığası ise

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\sigma A}{E_0 d} = \frac{E_0 \epsilon_0 A}{E_0 d} = \frac{E_0 \epsilon_0 A}{E_0 d} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.18)$$

olarak yazılır.



Şekil 2.11. Paralel plakalı bir kondansatördeki dielektrik kutuplanma

Son olarak plakalar arasındaki elektriksel yer değiştirme ise

$$\vec{D} = \sigma = \epsilon_0 * \vec{E} \quad (2.19)$$

ile ifade edilir.

Şekil 2.11’de dielektrikli paralel plakalı kondansatör görülmektedir [26]. Kondansatörün plakaları arasına bir dielektrik malzeme konulduğunda kondansatörün sığası birimsiz ϵ' çarpanı kadar artar. Plakalar arasındaki elektrik alan ve potansiyel farkı ise $\frac{1}{\epsilon'}$ çarpanı kadar azalır. Bu ϵ' çarpanına malzemenin dielektrik sabiti denir. Bu sabit her zaman boşluğun dielektrik sabiti olan $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m cinsinden ifade edilir.

$$C = \epsilon' * C_0 = \frac{\epsilon' * \epsilon_0 * A}{d} \quad (2.20)$$

Burada C plakaları arasında dielektrik malzeme olan kondansatörün sığası, C_0 ise plakaları arasında dielektrik malzeme olmayan kondansatörün sığasıdır.

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} \quad (2.21)$$

Burada E plakaları arasında dielektrik malzeme olan kondansatörün elektrik alan şiddeti, E_0 ise plakaları arasında dielektrik malzeme olmayan kondansatörün elektrik alan şiddetidir.

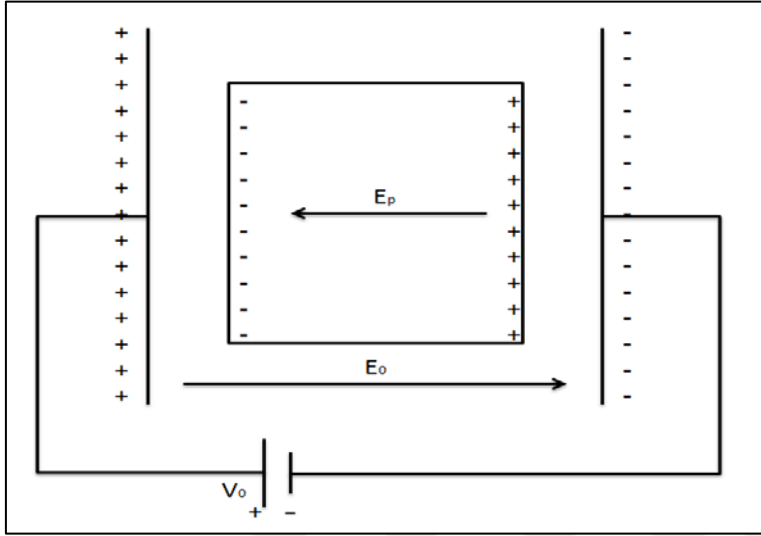
$$V = \frac{V_0}{\epsilon'} \quad (2.22)$$

Burada V plakaları arasında dielektrik malzeme olan kondansatörün potansiyel farkı, V_0 ise plakaları arasında dielektrik malzeme olmayan kondansatörün potansiyel farkıdır.

2.9.1. Dielektrik kutuplanma (Polarizasyon)

Kutuplanma en basit tanımıyla pozitif ve negatif yüklerin serbest hale gelmeden birbirinden az miktarda uzaklaşmasıdır. Bir dielektrik malzemeye elektrik alan uygulandığında (+) ve (-) yük merkezleri elektrik alan ile etkileşir ve kutuplanma meydana gelir. Dielektriklerde bu alan etkileşmesi malzemeye yük depolama özelliği kazandırır. Dielektrik sabiti ne kadar büyükse o kadar fazla yük depolanır. Genellikle malzemenin maliyetiyle de doğru orantılıdır.

Bir paralel plakalı kondansatörün levhalarının arasına dielektrik malzeme yerleştirildiğinde uygulanan elektrik alan dielektriği kutuplandırır. Bunun sonucu dielektriğin levhalara bakan yüzlerinde levhalar ile zıt işaretli kutuplanma yükleri oluşur. İndüklenme ile oluşan bu kutuplanma yüklerinden dolayı dış alana karşı ters yönde bir elektrik alan meydana gelir. Bu alan kutuplanmayı engelleyici olup, plakalar arasındaki net elektrik alanı azaltır.



Şekil 2.12. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör

E =Dielektriğin içindeki net elektrik alan

E_0 = Dış elektrik alan

E_p = Kutuplanmış dielektriğin içindeki yük ayrışmasını engelleyici elektrik alan

olmak üzere,

$$E = E_0 - E_p \quad (2.23)$$

Eşitlik 2.23. de $E = \frac{E_0}{\epsilon'}$, $E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$, $E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_0}$ eşitlikleri yerine yazılırsa basit bir kaç işlem sonucunda kutuplanma yük yoğunluğu;

$$\sigma_p = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon'}\right) \quad (2.24)$$

olarak bulunur.

Yukarıdaki eşitlikten üç sonuç çıkartabiliriz.

Sonuç 1: Plakalar arasında dielektrik malzeme varsa $\sigma > \sigma_p$ ve $E_0 > E_p$ dir.

Sonuç 2: Plakalar arasında dielektrik malzeme yoksa ($\epsilon' = 1$) $\sigma_p = 0$ ' dır.

Sonuç 3: Plakalar arasına dielektrik yerine iletken konulursa iletken üzerinde kutuplanan yük plakalar üzerindeki yüke eşit ve zıt yönlü (kondansatörün elektrik alanına zıt yönlü elektrik alan oluşturacak şekilde konumlandığından) olacağından iletken içerisindeki net elektrik alan sıfır olur. $E_0 = E_p$, $E=0$, $\sigma = \sigma_p$ ' dir.

Birim hacimdeki toplam dipol moment olarak tanımlanan kutuplanma vektörü P harfi ile gösterilir. Kutuplanma vektörü elektrik alan ile aynı yönlü ve büyüklük olarak elektrik alan şiddeti ile doğru orantılıdır.

$$\vec{P} = \chi * \epsilon_0 * \vec{E} \quad (2.25)$$

Burada χ "kapa" ($= \epsilon' - 1$) elektriksel doygunluk olarak adlandırılır.

Elektriksel yer değiştirme vektörü aşağıda gösterilen basit birkaç işlemden sonra

$$\vec{D} = \epsilon_0 * \vec{E} + \vec{P} \quad (2.26)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 * \vec{E} + \chi * \epsilon_0 * \vec{E} \quad (2.27)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 * \vec{E} * (1 + \chi) \quad (2.28)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 * \vec{E} * \epsilon' \quad (2.29)$$

şeklinde yazılır.

2.9.2. Dielektrik dayanıklılık

Bir dielektrik madde sadece dielektrik sabitine göre değil, aynı zamanda dielektrik dayanıklılığına yani yalıtkanlık özelliğini koruyabildiği maksimum elektrik alan şiddetine göre de sınıflandırılabilir.

Buna göre plakaları arasında dielektrik malzeme bulunan bir kondansatörün plakaları arasındaki potansiyel farkının veya buna bağlı olarak elektrik alan şiddetinin belirli bir değeri aşması halinde plakalar arasında bir kıvılcım patlaması meydana gelir ve dielektrik malzeme tahrip olur.

Bu olayın meydana gelmesini önleyen V_{maks} değerinin dielektrik malzemenin kalınlığına oranına dielektrik dayanıklılık denir ve R ile gösterilir.

$$R = E_{maks} = \frac{V_{maks}}{d} \quad (2.30)$$

2.9.3. Dielektrik kayıp

Plakaları arasında dielektrik malzeme bulunan bir kondansatörün plakaları arasına (dielektrik özelliğinin bozulacağı voltaj değerini geçmemek şartıyla) yüksek bir gerilim uygulanırsa dielektrik malzeme ısınır. Eğer alternatif gerilim uygulanırsa daha fazla ısınır ve açığa çıkan ısı frekans ile artar.

$$\vec{E} = E_0 * e^{i\omega t} = E_0 * \cos(\omega t) + i * E_0 * \sin(\omega t) \quad (2.31)$$

Dış elektrik alanın değişen yönüne göre yönelecek olan dielektriğin molekülleri birbirine sürter ve ısınır. Dielektrikte ısıya dönüşen bu enerji dielektrik kayıp olarak adlandırılır ve ϵ'' ile gösterilir. Sıcaklık arttıkça kayıp artar.

2.9.4. Durulma (Relaksasyon)

Elektrik alan içerisinde bulunan bir dipol sürtünmeli bir ortamda bulunuyorsa dönmesinde gecikme olur. Yani dipolün dönme frekansı gitgide alanın frekansının gerisinde kalır. Bu olaya durulma denir. Durulma zamanı T ile gösterilir ve madde içinde bulunan moleküllerin hareketliliğinin bir ölçüsüdür.

Dielektrik kutuplanma (P), alan ortadan kalktığında üstel olarak azalır. Durulma zamanı bu kutuplanmanın ($\frac{1}{e}$) değerine düşmesi için geçen zamandır. ($\tau = 1,6 * e^{-19}C$)

Kutuplanma gerçekleştiğinde durulma frekansına kadar dielektrik kayıp(ϵ'') frekansla doğru orantılıdır. Ancak dielektrik sabiti (ϵ') dipol yönelimi ile elektrik alan arasındaki faz gecikmesinden dolayı azalır.

Durulma frekansı üzerindeki f değerlerinde hem dielektrik sabiti (ϵ') hem de dielektrik kayıp (ϵ'') azalır.

Özetle 10^3Hz e kadar olan dielektrik kayıptaki ve bazı frekanslardaki piksel istisnaları saymazsak genel olarak dielektrik sabiti ve dielektrik kaybın, sıcaklıkla doğru orantılı, frekansla ters orantılı olarak değiştiğini söyleyebiliriz.

2.9.5. Kutuplanma mekanizmaları

α dipolün kutuplanabilirliği olmak üzere bir dielektrik malzemenin kutuplanabilirliği

$$\vec{P} = \alpha * \vec{E} \quad (2.32)$$

ile ifade edilir. Eğer N tane dipol moment varsa toplam kutuplanma

$$\vec{P} = \alpha * N * \vec{E} \quad (2.33)$$

şeklinde yazılabilir.

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \alpha_i \quad (2.34)$$

Burada görüleceği üzere dielektrik malzemelerde kutuplanmayı dört başlık altında ele alabiliriz. Elektronik kutuplanma(α_e), atomik(iyonik) kutuplanma (α_a), yönelimli(dipolar) kutuplanma (α_d), arayüzeyssel(interface) kutuplanma (α_i).

Genel olarak elektronik ve atomik(iyonik) kutuplanmada rezonans etkisi görülürken, yönelimli(dipolar) kutuplanmada durulma(relaksasyon) etkisi görülür. Şekil 2.13’de bir dielektrik malzemenin kutuplanma mekanizmaları görülmektedir [25].

Elektronik kutuplanma

Bir atom (+) ve (-) yüklerden oluştuğu için elektrik alan uygulanırsa dipol moment oluşacak şekilde atomun simetrisi bozulur. Kutuplanma meydana gelir. Morötesi ve görünür bölgede meydana gelir. Çünkü elektronları uyarmak için yüksek frekanslı sinyaller gerekir. Bu kutuplanma türü bütün atom ve iyonlarda meydana gelir.

Atomik (iyonik) kutuplanma

Elektrik alan içindeki iyonik bağlı bir malzemedeki bağlar gerilir. İyonlar zıt yönde hareket ederek bağın gerilmesine neden olurlar. Bunun sonucunda geçici kutuplanma oluşur. Bu kutuplanma kızılötesi ve buna yakın bölgelerde oluşur.

Yönelimli (dipolar) kutuplanma

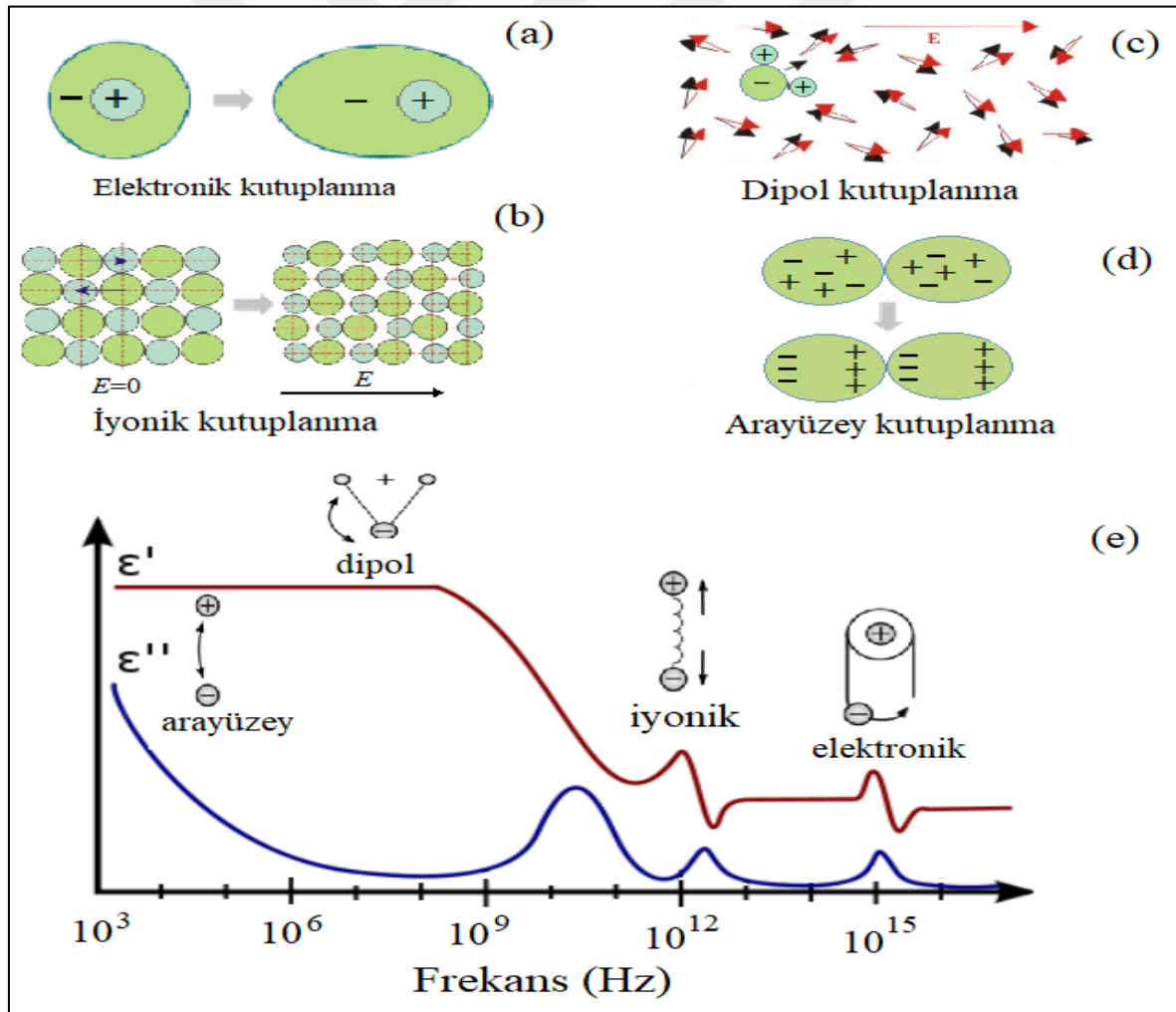
Bu kutuplanma dış elektrik alan yokken rastgele yönelmiş dipol momentlere sahip yani polar dielektriklerde görülür. Durulma frekansına neden olur. Mikrodalga bölgeye karşılık gelir. Polar moleküller elektrik alan içerisine konulursa elektrik alan dipol momente tork

uygulayarak rastgele yönelmeleri elektrik alan doğrultusuna yönelmeye zorlar ve kutuplanma meydana gelir. Yönelimli kutuplanma sıcaklığa bağlıdır.

Ara yüzeysel (interface) kutuplanma

İlk üç kutuplanma homojen maddelerde gözlemlenir. Yük bunlarda atom ve moleküle yerel olarak bağlıdır. Heterojen yani farklı sayıda yapıların bulunduğu maddelerde ise ara yüzey kutuplanması görünür.

Görelî olarak serbest hareket eden yük taşıyıcıları elektrik alanda kolaylıkla yer değiştirirler. Yükler malzemenin ara yüzeyinde tuzaklanır ve kutuplanma meydana gelir. Yük değişmesi elektrik alan şiddetini değiştirir. Dielektrik sabiti (ϵ') ve kapasitans (C) artar. Radyo frekans bölgesinde görülür.



Şekil 2.13. Bir dielektrik malzemenin kutuplanma mekanizmaları

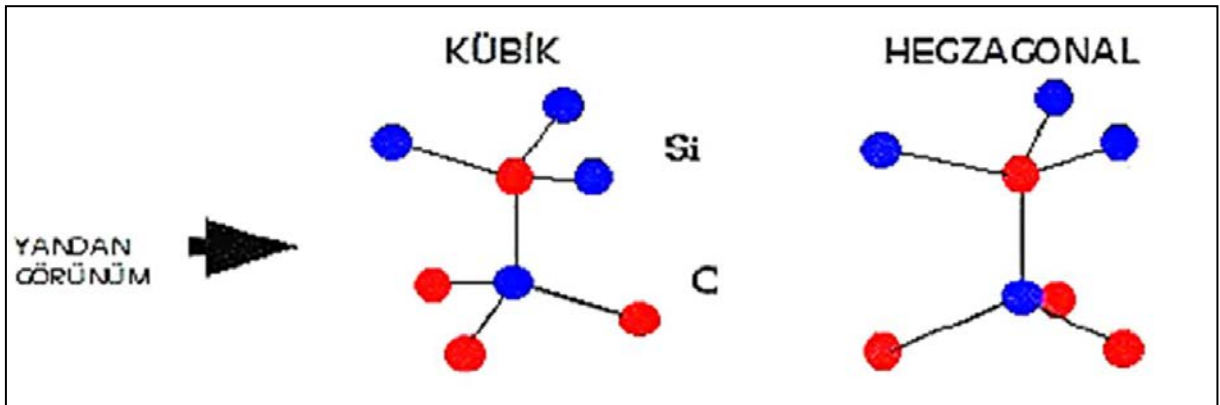
2.10. Silisyum Karbür (SiC)

“SiC” kısaltmasıyla gösterilen silisyum karbür, doğada nadir olarak bulunur. Bunun aksine silisyum ve karbon doğada çokça bulunmaktadır. Yüksek sertliğe sahip silisyum karbür genelde aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması, yüksek ısı iletkenliğine sahip olması, radyasyona ve kimyasallara karşı dayanıklı olması nükleer çalışmalarda, uzay çalışmalarında, detektör yapımında, güneş pillerinde, yenilenebilir enerji alanında vb. kullanılma potansiyeline sahiptir.

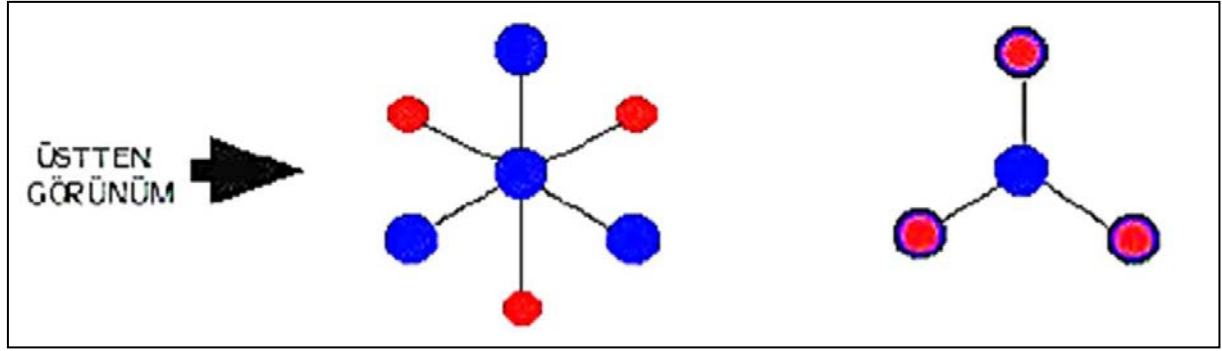
Şekil 2.14 ve Şekil 2.15’de görüldüğü gibi silisyum karbür kübik ve hegzagonal olmak üzere iki şekilde kristal yapıya sahiptir [27]. Kübik yapı 1400-1800 °C de, Hegzagonal kristal yapı ise 2000 °C de oluşmaktadır. Tez çalışması kapsamında referans numune olarak kullanılan 6H SiC yapısı Hegzagonal kristal yapı formundadır.

Silisyum karbürün birçok değişik formu olsa da en yaygın olanları kübik yapıda olan 3C-SiC formu ve hegzagonal yapıda olan 4H-SiC ve 6H-SiC formlarıdır[28].

SiC, her yönde aynı sertliğe, ısı iletkenliğine ve elektriksel direnç gibi özelliklere sahiptir. Bu tür malzemeler izotropik malzeme olarak adlandırılır. Dolayısı ile yapılan çalışmada grafen ve grafenin alt taş malzeme olarak kullanılan SiC üzerindeki etkisini araştırırken yönden bağımsız davranış göstermesi sonuçların daha öngörülebilir olarak açıklanması ve yorumlanmasını yardımcı olur.



Şekil 2.14. SiC kristal yapısının yandan görünümü



Şekil 2.15. SiC kristal yapısının üstten görünümü

Silisyum karbürün en yaygın olan üç formuna ait fiziksel ve elektriksel özellikler germanyum, silisyum ve germanyum arsenike ait özelliklerle birlikte karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.1. de verilmiştir [12].

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

	Ge	Si	GaAs	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC
Bant boşluğu (eV)	0,66	1,12	1,43	2,4	3	3,2
Kritik elektrik alan (MV/cm)	0,1	0,25	0,3	2,0	2,5	2,2
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
Taşıyıcı konsantrasyonu (cm^{-3})	10^{13}	10^{10}	10^6	10^1	10^{-6}	10^{-8}
Dielektrik sabiti (ϵ_r)	16	11,9	13,1	9,7	10	10
Termal iletkenlik (W/cmK)	1,6	1,5	0,46	$\geq 3,5$	$\geq 3,5$	$\geq 3,5$
Yoğunluk (cm^{-3})	5,3	2,3	5,3	3,2	3,2	3,2
Örgü	Kübik	Kübik	Kübik	Kübik	Hegzagonal	Hegzagonal
Örgü sabiti(Å)	5,65 -	5,43 -	5,65 -	4,36 -	3,08 15,12	3,08 10,08
Erime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	-	1 420	1 240	-	2 830	2 830
Doymuş elektronların sürüklenme hızı ($V_{\text{sat}} \times 10^7 \text{ cm/s}$)	0,5	1	1	2	2	2

2.11. Grafen ve Grafit

Andre Geim ve Konstantin Novoselov adında iki bilim insanı 2004 yılında grafitten tek bir tabakayı izola bant kullanarak ayırmayı başardılar ve 2010 yılında Nobel fizik ödülünü kazandılar. Grafeni grafitin tek katmanlı hali olarak tanımlayabiliriz. Grafit ve grafen karbonun allotropudur. Grafenin bu kadar büyük ilgi görmesinin nedeni elektrik ve ısı iletkenliği, esnekliği, şeffaf oluşu ve dayanıklılığı gibi özellikleri nedeniyle olsa da tam olarak uygulama alanı ve potansiyeli netleşmemiş ve üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Malzeme bilimi ve nanoteknoloji alanında özellikle elektronik, tıp, enerji ve savunma gibi alanlarda yüksek potansiyel barındırdığı düşünülmektedir.

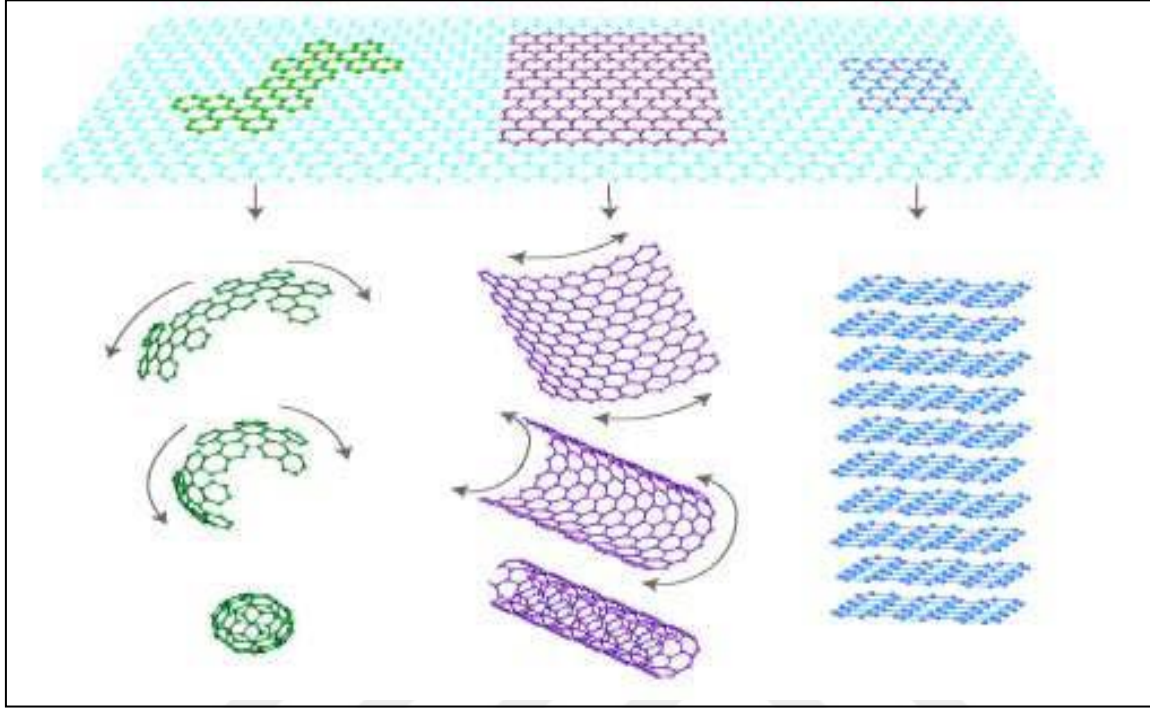
Grafit, grafen tabakalarından oluşur. Tabakalar arası $3,35 \text{ \AA}$, ve bir tabakadaki karbon atomları arası uzaklık $1,42 \text{ \AA}$ 'dur [64]. Her bir karbon atomu aynı düzlemde bulunan diğer üç karbon atomuna sp^2 hibritleşmesi yaparak σ bağları ile bağlanırlar ve hegzagonal halkalar oluştururlar. Grafen tabakaları zayıf van der Waals kuvveti ile bağlı olduğu için birbiri üzerinden kolayca kayarlar[64]. Çok yüksek sıcaklıklara da dayanabilen grafit bu nedenle yağlayıcı olarak kullanılabilir. Ayrıca iyi bir elektriksel iletkenlik gösterir. Kurşun kalem ucunda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Karbon atomları sp^1 , sp^2 , sp^3 olmak üzere üç farklı şekilde bağ yapabilirler. Karbon atomları birbirine güçlü bir bağ olan kovalent bağ ile bağlanırlar. Sıfır boyutlu fulleren, bir boyutlu karbon nanotüp ve 3 boyutlu grafit Şekil 2.16'da gösterilmiştir [30]. Karbonun çeşitli yapısal formlara sahip olmasının nedeni hibritleşme nedeni ile değişik değerlik bantlarının oluşmasından dolayıdır [29].

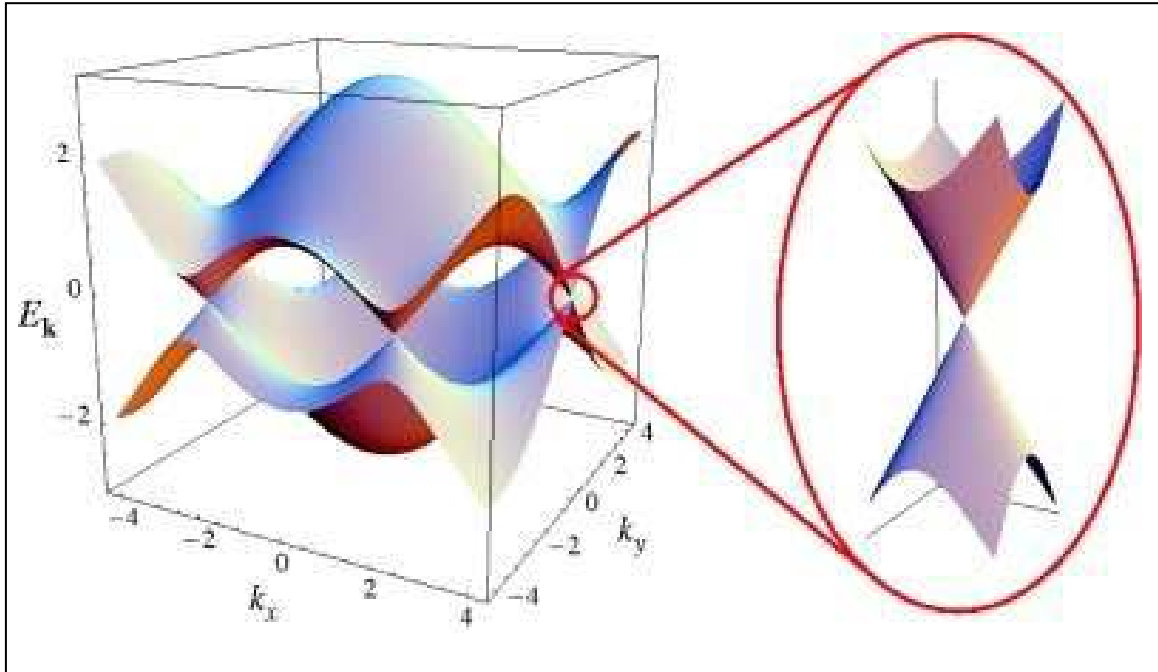
Grafende değerlik elektronları π elektronları olarak adlandırılır. Bu π elektronları grafenin elektiksel özelliklerini belirlemede etkindir. Grafen ve grafen bağlantılı malzemelerin elektronik yapısı için π bantları dolayısı ile sağlanan öngörü deney sonuçları ile uyum içerisinde [31-34].

Karbonun allotroplarının çoğunda katının özelliklerini valans/değerlik elektronları belirler. Burada π elektronları valence elektronlardır ve katı özelliklerini bu elektronlar belirler. Şekil 2.17'de alt ve üst enerji bantları yani valans/değerlik bandı ve iletim bandı görülmektedir [36]. Yapılan yakınlıştırmada bandın ucunda neredeyse birbirine dokunan

lineer bir daşınım bağıntısı gösterdiği görülmüştür[35]. Bu durum grafenin elektriksel iletkenliğinin diğer malzemelere oranla neden daha fazla olduğunu açıklamaktadır.



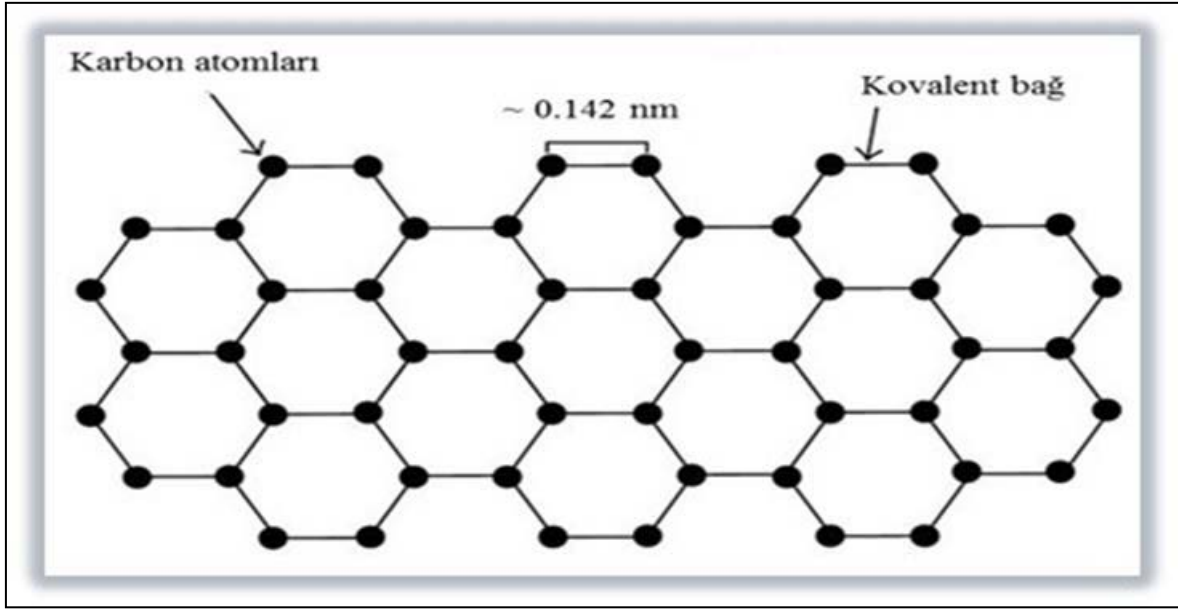
şekil 2.16. Grafen tabanlı formlar



şekil 2.17. Grafenin band yapısı (grafenin enerji daşınım ilişkisi)

Teoride grafen grafitin tek katmanlı hali olarak tanımlansa da pratikte grafenden, grafitte geçiş için yaklaşık 10 atom kalınlığındaki yüzeyler dikkate alınmaktadır [30].

Bir geçiş metali olan grafen normal şartlarda herhangi bir yarı iletken özellik göstermemesine rağmen, dışarıdan uygulanan bir elektrik alanın yönüne bağlı olarak p tipi ve n tipi özellik gösterebilmekte ayrıca iletkenliği de değişebilmektedir [60,61]. Şekil 2.18’de grafenin şematik gösterimi görülmektedir[65].



Şekil 2.18. Grafenin şematik gösterimi

Şekil 2.17’de görüldüğü gibi valans/değerlik bandı ve iletim bandı neredeyse temas halindedir.

Dirac denklemi ile grafenin enerji hesabı yapılabilmektedir. Geleneksel sistemler ise schrödinger denklemi ile açıklanıp parabolik bir spektrum sergiler. Grafende ise durum farklı olup bandın dip noktalarında konik bir yapı görünür. Ayrıca harici bir elektrik alanla taşıyıcı yoğunluğu değişebilmektedir. Oda sıcaklığında mobilitisi silisyumun mobilitisinden yaklaşık 15 kat daha fazladır. [41].

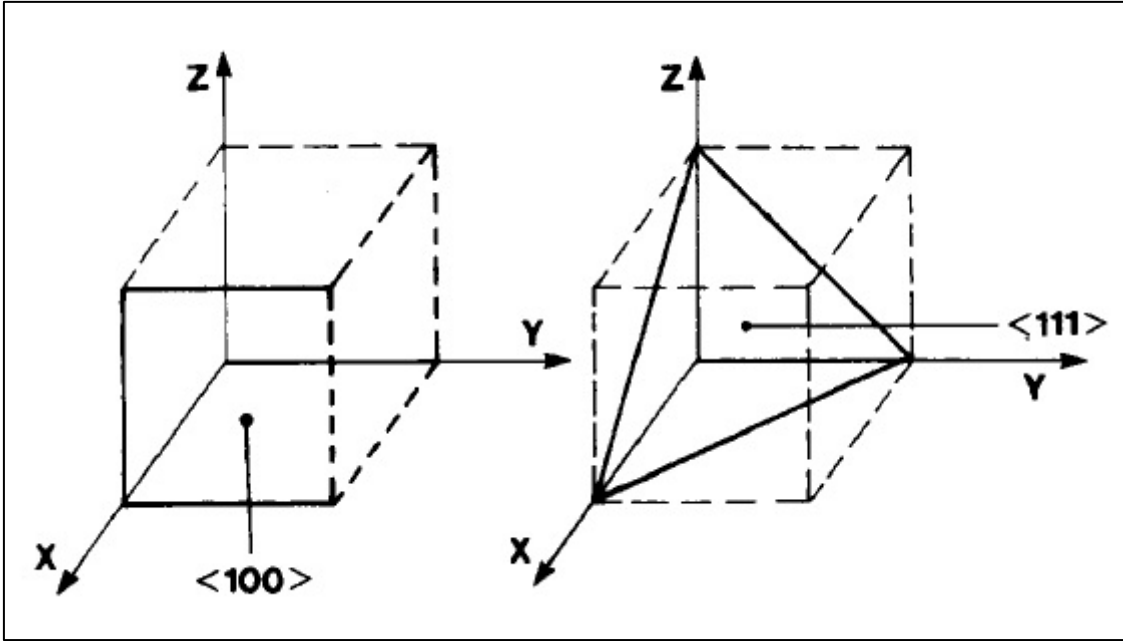
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Fabrikasyon süreci tarafımızdan yapılmamış olup, numuneler Ezgin vd. tarafından hazırlandı [37]. Fabrikasyon sürecinin ayrıntıları, yarı iletken kristalin kesilmesi, kimyasal temizleme, omik kontak oluşturma, ara yüzey malzemenin hazırlanması, yarı iletken yüzeyine kaplanması, schottky ve omik kontakların oluşturulması başlıklarıyla özetlenebilir. Aşağıda kısaca özetlenen işlem basamaklarının ayrıntıları konuyla ilgili yapılan çalışmadan takip edilebilir [12]. Söz konusu çalışmada çok duvarlı karbon nanotüp yerine grafen ve grafit kullanılarak Grafen/Grafit arayüzlü Au/n-6H SiC/Au tabanlı schottky barrier diyotlar ve ara yüzey malzeme kullanılmayarak Au/n-6H SiC/Au schottky barrier diyotu elde edilmiştir. Ölçüm ve hesaplamalar yapılırken kolaylık sağlaması açısından Au/n-6H SiC/Au yapısı referans numune, grafen ve grafit katkılı ara yüzey halleri için ise katkılanan ara yüzey malzeme isimleriyle anılacaktır. Söz konusu üç numunenin fabrikasyon işlemleri tarafımızdan yapılmadığı ve yukarıda belirtilen kaynaklarda işlem basamakları ayrıntılı olarak açıklandığı için aşağıda genel olarak metal-yarıiletken-metal (MYM) yapıların hazırlanması ve ara yüzey katkılama işlemlerinden kısaca bahsedilecektir.

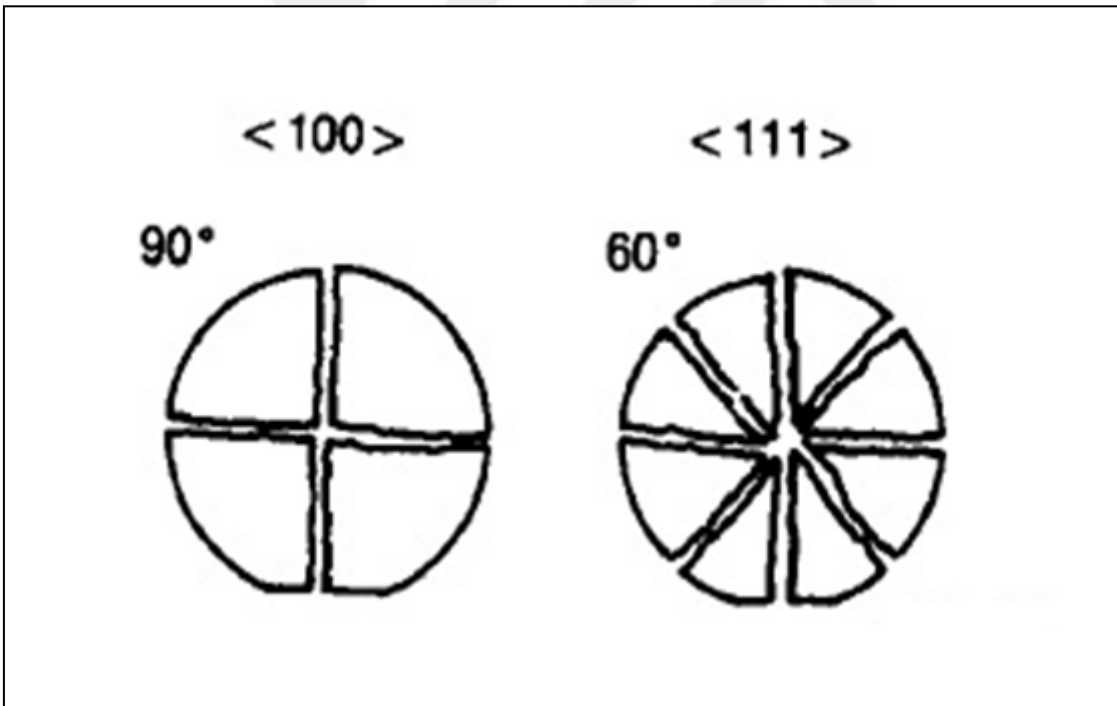
3.1. Yarı İletken Alttaşın/Kristalin Kesilmesi

Genellikle schotky yapılar ile ilgili yapılan çalışmalarda alt taş olarak kullanılacak yarı iletken kristal ticari firmalardan temin edilir. Satın alınan ürünün etiketinde kalınlığı, verici konsantrasyonu, yönelimi, n-tipi mi p-tipi mi olduğu gibi bilgiler yer alır. Satılan yarı iletken alttaşlar değişik çaplarda üretildiği ve çok kırılgan ve hassas bir malzeme olduğu için istenilen ebatlarda kesme işlemi yapılır. Kesme işleminde kristalin yönelimi önemlidir.

Kristal düzlemler miller indisi olarak adlandırılan üç sayı dizisiyle ifade edilir. İki basit kübik birim hücre için yarı iletken alt taşlardan en çok kullanılan yönelimlerden $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 111 \rangle$ yönelimleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. $\langle 100 \rangle$ düzlemi kare şeklinde, $\langle 111 \rangle$ düzlemi ise üçgen şeklindedir. Şekil 3.2’de görüleceği üzere alt taş üzerine herhangi bir kuvvet veya zorlama uygulandığı zaman $\langle 100 \rangle$ yönelimli alt taşlar dik açılı (90°) kırılmalarla bölünürken, $\langle 111 \rangle$ yönelimli alt taşlar üçgen parçalar ayrılır [38].



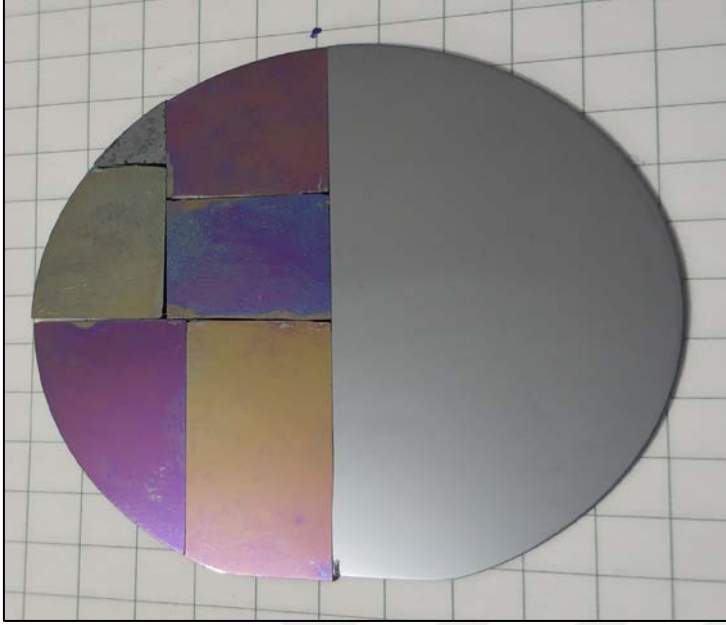
Şekil 3.1. Yarı iletken alt taşların <100> ve <111> yönelimleri



Şekil 3.2. Zor karşısında alt taşların yönelimlere göre kırılmasının gösterimi

Yarı iletken alttaşlar kesilirken kristal yönelimlerinden faydalanmak bize kolaylık sağlayacaktır. Alttaşlar yönelimlerine göre elmas kesici ile cetvel kullanılmak suretiyle çizilerek ve çizilen doğrultusu altına bir kürdan koyularak kürdanın ayırdığı her iki yüzeyine kürdan doğrultusunda yüzeye dik bir kuvvet uygulanarak kolaylıkla istenilen

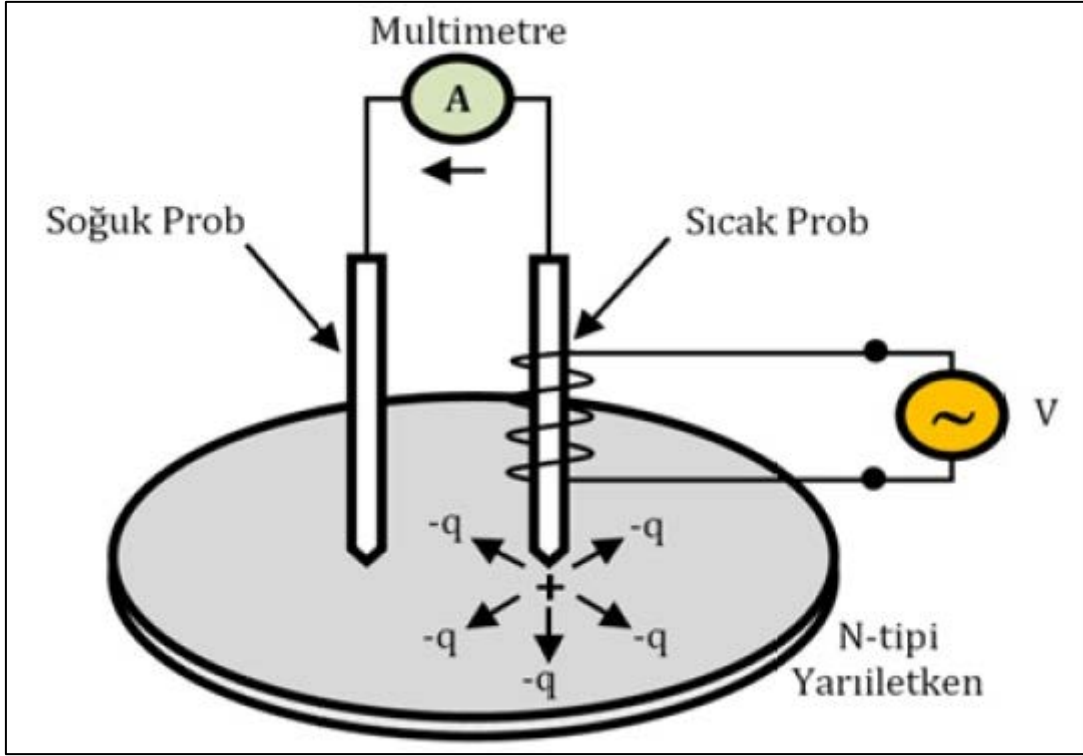
ebatlarda kesilebilir. Aşağıda kesimi yapılmış $\langle 100 \rangle$ yönelimli bir p tipi bir silisyum kristal görülmektedir.



Şekil 3.3. Kesimi yapılmış $\langle 100 \rangle$ yönelimli bir yarıiletken alt taş

Sıcak prob testi

Alt taşın p-tipi mi n-tipi mi olduğu her ne kadar alınan alt taşın etiketinde yazsa da sıcak prob testi denilen bir yöntemle kolaylıkla test edilebilir. Bunun için bir dijital voltmetre ve bir ısıtıcı yeterli olacaktır. Isıtıcı olarak basit bir havya kullanılabilir. Artı prob bir havya ile ısıtılır ve alt taş dokundurulur. Eksi (görelî soğuk) probda alttaşa dokunmaktadır. Numunede sıcaklık farkına bağlı olarak bir termoelektriksel gerilim oluşacaktır. Multimetrede ölçülen gerileme göre alt taşın tipi belirlenir. Yukarıda görülen p-tipi Si alt taş için probun + ucu havya vasıtasıyla 420 °C ye ısıtıldığında ölçü aleti -310 mV değerini gösterirken, - ucu havya vasıtasıyla 420 °C ye ısıtıldığında 5 mV potansiyel farkı görüldü. Burada potansiyel farkı havyaların alt taş üzerinde birbirine olan uzaklığına da bağlı olup bizim için alt taş tipi belirlemede önemli olan potansiyel farkının değeri değil, pozitif veya negatif olmasıdır. Konuyla ilgili anlatılan ölçüm yönteminin basit bir gösterimi Şekil 3.4’de gösterilmiştir [39-40].



Şekil 3.4. Sıcak prob testinin şematik gösterimi

3.2. Temizlik Aşaması

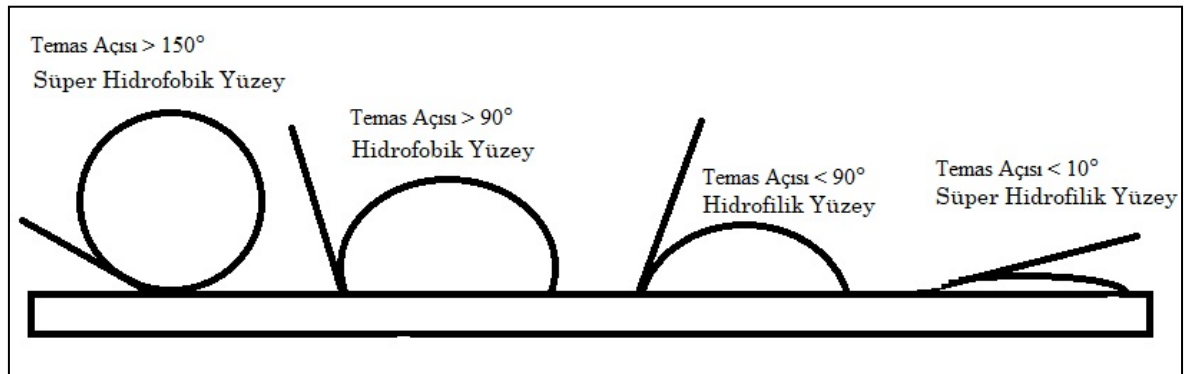
Yarıiletken alt taş, gerekli görülmesi halinde kaplanacak malzeme, maske ve süreçte kullanılacak tutucu gibi diğer malzemeler kimyasal temizleme işlemine alınır. Bu süreçte izopropil alkol (C_3H_8O), aseton (C_3H_6O) ve metanol (CH_3OH) gibi kimyasallar yaklaşık 5 er dakikalık sürelerle kullanılır ve her kullanımdan sonra deiyonize su (DI) ile durulanır ve saf azot (99,99%) gazıyla kurutulur. Yukarıda sayılan kimyasallar alttaş üzerinde oluşan oksit tabakasını çözmede yeterli değildir. Eğer oksit tabakadan tamamen kurtulmak isteniyorsa oksit tabakasını kaldırmak için $HF+H_2O$ (1:10) çözeltisi hazırlanarak 10-15 saniye süreyle çözelti içerisinde tutulması ve deiyonize su (DI) ile durulanması yeterlidir. Durulama sonrası kuru hava yerine azot gazı kullanılmasının sebebi yüzeyde tekrar bir oksit tabaka oluşmaması içindir. Bu süreçte tüm kimyasalları kullanmadan önce güvenlik bilgi formunu okumalı iş sağlığı ve güvenliği açısından her türlü önlemi almalıyız. Özellikle bazı kimyasalların tehlikelerinden haberdar olmak son derece önemlidir. Bazı kimyasallar oda sıcaklığında kaynayabilir, solunması veya vücuda teması ölümcül nedenlere sebebiyet verebilir, cam, çelik, porselen dahil bir çok malzemeyi rahatlıkla delebilir, bu nedenle muhafazası belirli malzemeler içinde ve belirli standartlara uyularak yapılmalıdır. Kimyasallarla çalışırken ne ile muhatap olunduğu tam olarak bilinmeli,

gerekli havalandırma işlemleri yapılmalı, iş sağlığı ve iş güvenliği konusunda tüm protokollere uyulmalıdır.



Resim 3.1. Temizlik için kullanılan bazı kimyasallar ve sonik temizleyici

Pratik bir uygulama olarak yüzeyin temiz olup olmadığı alt taş üzerindeki bir su damlasının şeklinden anlaşılabilir. Su damlası yarıiletken alt taş üzerinde dururken temas açısı (TA) 90° den büyükse tutunma kuvveti (kohezyon) yapışma (adezyon) kuvvetinden büyüktür ve bu yüzey su sevmeyen (hidrofobik) yüzey olarak adlandırılabilir ve bizim için alt taş olarak kullandığımız yüzeyin temiz olduğunun bir göstergesidir. Tam tersi durumda ise yani temas açısı (TA) 90° den küçükse tutunma kuvveti (kohezyon) yapışma (adezyon) kuvvetinden küçüktür ve bu yüzey su seven (hidrofilik) yüzey olarak adlandırılabilir ve bizim için alt taş olarak kullandığımız yüzeyin yeterince temiz olmadığına bir göstergesidir.



Şekil 3.5. Su seven ve su sevmeyen yüzeyler

3.3. Ara Yüzey Malzemeler

Metal - Yarı İletken – Metal kontaklarda genellikle ilk metal kaplama işlemi yani yarı iletken alt taşın cilalanmış/zımparalanmış parlak üst yüzeyine yapılan kontak doğrultucu kontak, pürüzlü alt yüzeyine yapılan kontak ise omik kontak. Pürüzlü yüzeye yapılan metal kaplamanın daha iyi omik özellik göstermesi için kaplama işlemi yapıldıktan sonra düşük frekanslarda gürültüden çok fazla etkilenmemesi için belli bir sıcaklıkta tavlınır. Örneğin: 200 °C de 10 dakika gibi.

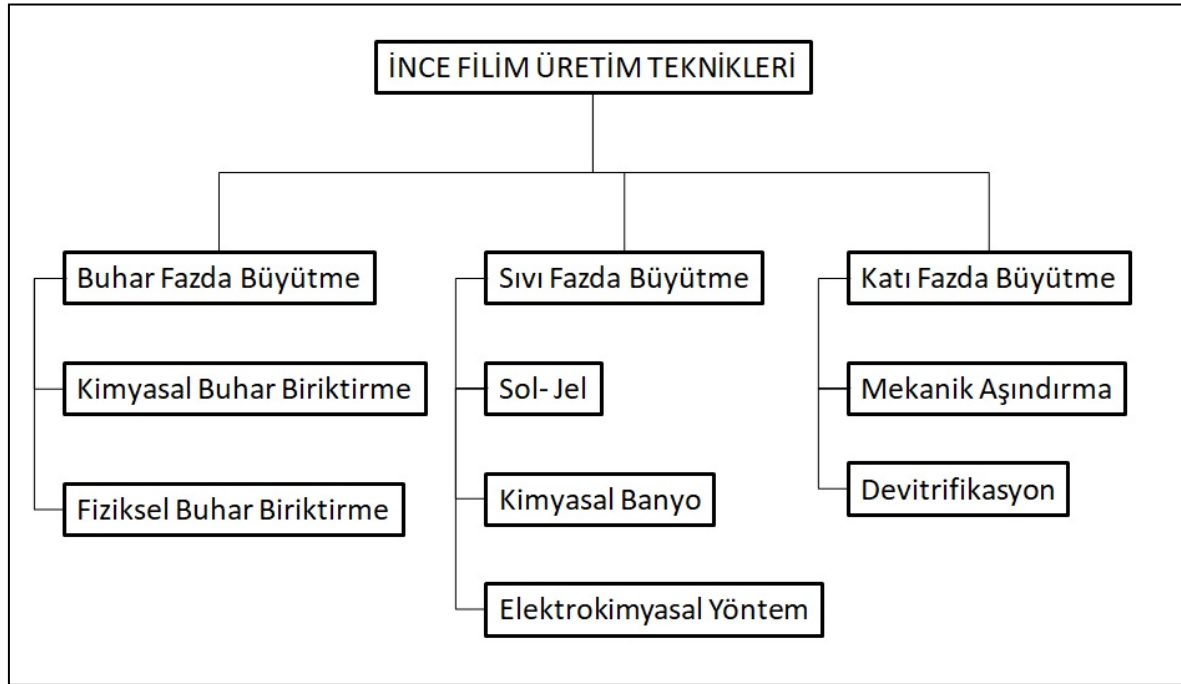
Metal - Yarı İletken – Metal kontaklarda üst yüzeydeki doğrultucu kontak ile yarı iletken alt taş arasına dielektrik, yalıtkan, oksit, polimer vb. malzemeler kullanılarak yük geçişini düzenleyecek ince filimler oluşturulur. Bu malzemelerin ya da sentezlenen diğer ara yüzey malzemelerin numune üzerindeki elektriksel, manyetik, optik vb. etkileri araştırılır.

İnce filim kaplama yöntemlerini buhar fazda büyütme, sıvı fazda büyütme, katı fazda büyütme olarak kabaca üç başlık altında ele alabiliriz. Eğer büyütme tanımını MBE (molecular beam epitaxy) yönteminde olduğu gibi atom düzeyinde tek tek ya da katman katman bir yığılma işlemi yerine kullanıyorsak, yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda genellikle ara yüz kaplama işleminin bir büyütme değil bir kaplama olarak gerçekleştirildiği görülür. Genellikle de kullanılan yöntem sıvı fazda sentezlenen ara yüzey malzemenin spin coater ya da daldır çıkar, damlat kurut vb. yöntemler kullanılarak malzeme yüzeyine kaplanmasından ibarettir.

Sıvı fazda büyütme tekniklerini sol-jel, kimyasal banyo ve elektrokimyasal yöntem olmak üzere 3 gruba ayırabildiğimiz gibi buhar fazında yapılan kaplama tekniklerini ise fiziksel buhar biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme olarak iki gruba ayırabiliriz [42]. Yüksek kalitede kaplama sağlayan fiziksel buhar biriktirme yöntemleri ise daha çok omik kontak oluşturmak veya delikli maske yardımıyla noktasal şekilde istenilen çapta doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılabilir. Şekil 3.6’de ince filim üretim teknikleri görülmektedir [42].

Alt taşın temizlik aşamasında yüzeyden kurtulmak istediğimiz oksit tabakası da aslında bir nevi ince filimdir. Bir alt taş üzerinde kullanma amacımıza bağlı olarak (su sevmeyen bir yüzey oluşturmak, dielektrik bir katman oluşturmak, pasifleştirmek, engel yüksekliği oluşturmak... vb.) SiO₂ tabakası büyütme işlemine oksidasyon denir. Çalışması kolay,

ekonomik ve silisyuma benzer bir ısı genleşme gösterdiği için çok kullanılan bir yöntemdir[43, 44].



Şekil 3.6. İnce film üretim teknikleri

3.4. Doğrultucu ve Omik Kontakların Oluşturulması

Temizlik aşamasından sonra genellikle önce omik kontaklar oluşturulur. Bunun için en çok kullanılan yöntemlerden biri termal buharlaştırma yöntemidir. Termal buharlaştırma sistemine konulan alttaş 10^{-6} mbar basınç seviyelerine kadar vakumlanır. Buharlaştırma sisteminin potalarına konulan yüksek saflıkta (% 99,99 mertebesinde) kaplama metali potalarda bulunan flamanlar yardımıyla buharlaştırılır ve alttaşın mat yüzeyine istenilen kalınlıkta kaplanır. Kaplama işleminden sonra metalinin yarı iletken alttaş ile tam olarak kaynaşmasını sağlamak için 400-500 °C sıcaklıkta 3-5 dakika tavlama işlemi yapılır. Daha sonra alttaşın üzerine istenilen ara yüzey tabakası kaplanır ve maske yardımıyla omik kontak oluştururken gerçekleştirilen süreç tekrarlanır. Maskede kullanılan deliklerin çapı ve sayısı diyotların çapını ve sayısını belirleyecektir. Omik kontak oluşturulurken yapılan tavlama işlemi doğrultucu/schottky kontak işlemi yapılırken yapılmaz.



4. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde referans numune diye adlandıracağımız Au/n-6H SiC/Au yapısı ve ara yüzeyine grafit ve grefen katkılı hallerinin yapısal karakterizasyonuna ve akım-voltaj, kapasitans-voltaj ölçümlerine ve bu ölçümlerden elde edilen temel parametrelere yer verilecektir.

4.1. Yapı Analizi

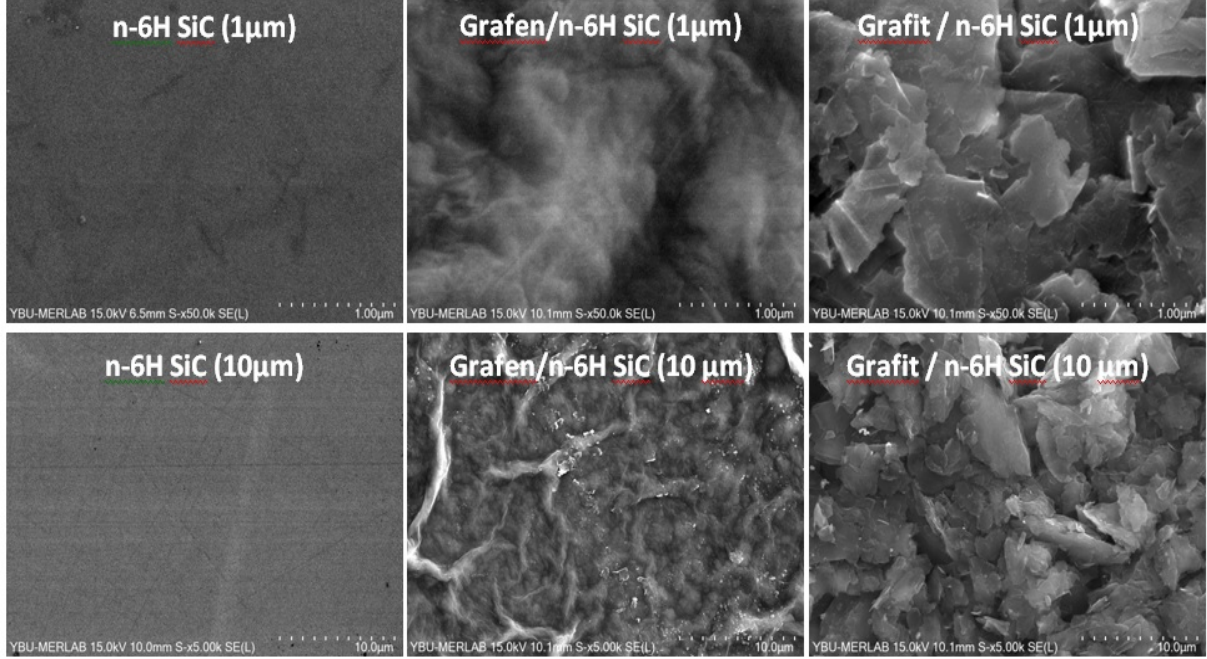
Her üç numune içinde yapısal karakterizasyon Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) ve Raman Spektroskopi cihazları kullanılarak elde edildi. Resim 4.1’de Hitachi Su 5000 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (Fe-Sem) görülmektedir.

Genel Özellikleri: 1,20 nm (30kV) - 3,00 nm (1 kV) Çözünürlük, 30x - 1.500.000x büyütme, 0.5 - 30 kV voltaj aralığı, topolojik ve morfolojik bilgi ve 3D görüntü için ikincil elektron detektörü, düşük basınçta ve iletken olmayan numunelerin görüntülenmesi için ultra değişken basınç detektörü, EDS Detektörü [78].



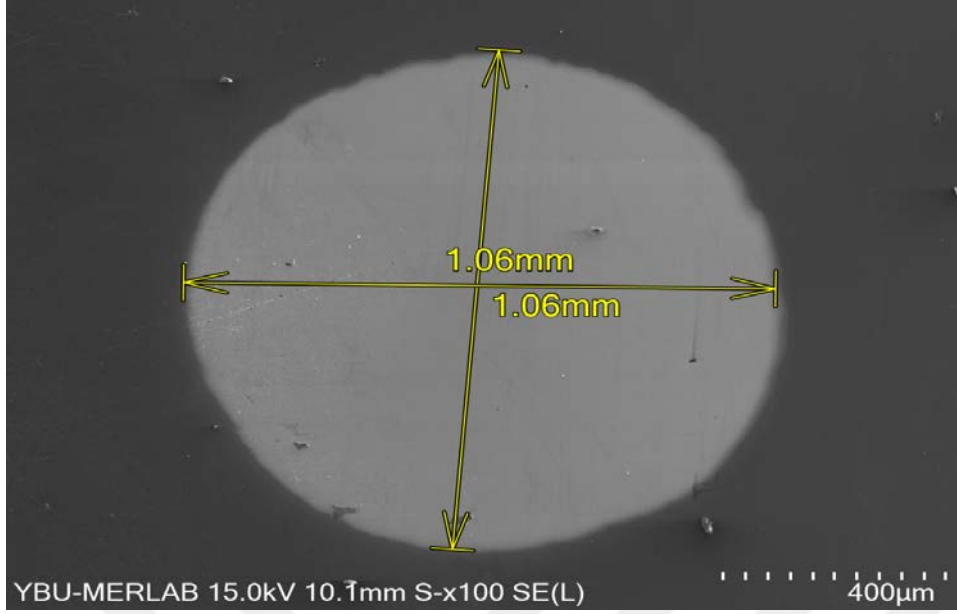
Resim 4.1. Hitachi Su5000 Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu

Resim 4.2’de referans numune ve grafit/grafen katkılı ara yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir.

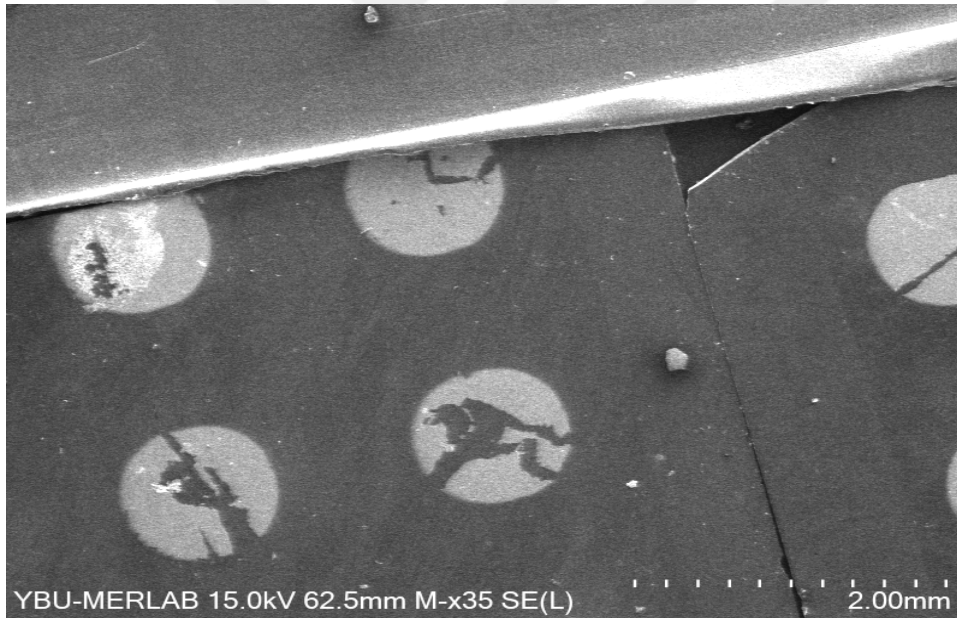


Resim 4.2. n-6H-SiC yarıiletkeninin ve üzerine kaplanmış grafit ve grafenlerin 1µm ve 10 µm boyutlarındaki SEM görüntüsü

Resim 4.2’de verilen görüntülere dikkat edilecek olursa referans numune düz bir yüzey şeklindedir. Bu beklenen bir durum olup çünkü yüzey üzerinde herhangi bir ara yüzey malzemesi bulunmamaktadır. Ara yüzeydeki grafeni gösteren resimler özellikle 1 µm boyutta olan görüntüde görüleceği üzere ince belli belirsiz bir görüntü varken grafit için söz konulu görüntülerin daha keskin ve katmanlı olduğu görülür. Grafen tek katmanlı bir yapı olduğu için grafenin flu, grafit ise birçok grafen katmanından meydana geldiği için keskin ve katmanlı görünmesi normaldir. Bu görüntüler grafen ve grafitin karakteristik görüntüleridir.

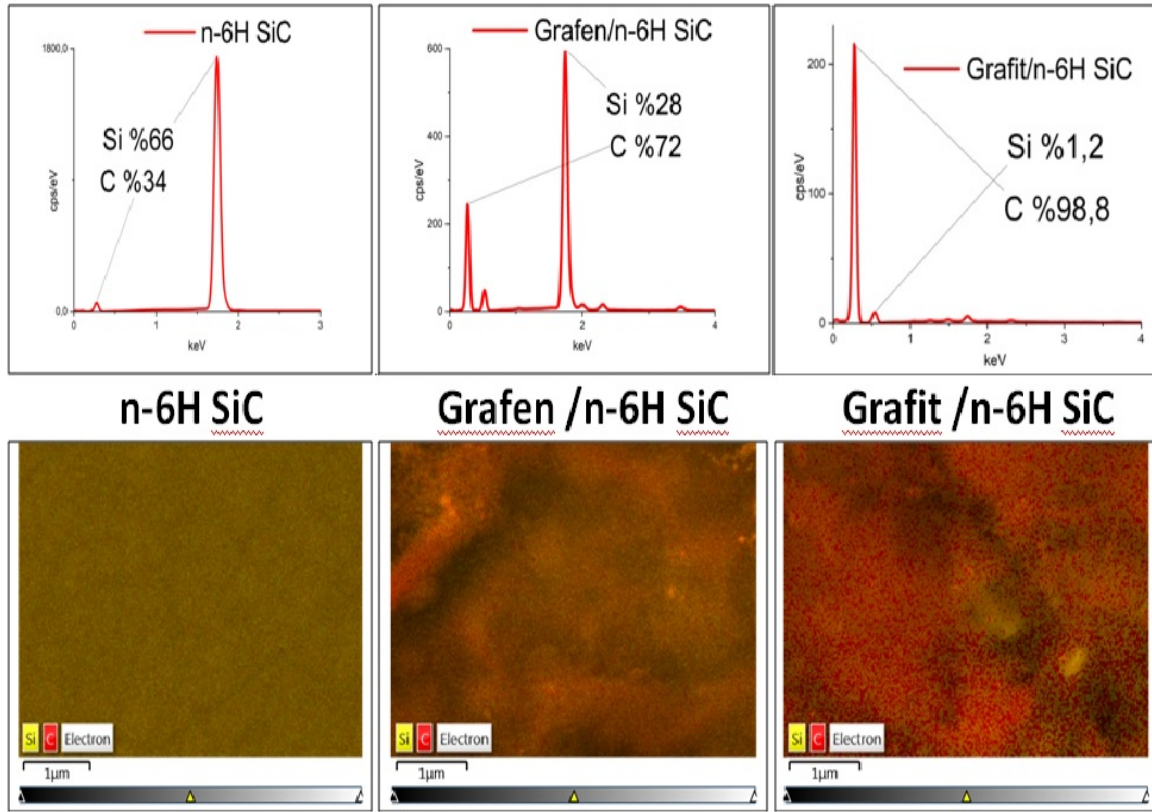


Resim 4.3. Numunelerdeki kontakların SEM ile çap ölçümü



Resim 4.4. I-V / C-V ölçümleri nedeni ile hasar gören kontakların SEM görüntüleri

SEM Analizine ek olarak EDS (Enerji Dağılım Spektroskopisi) analizi kullanılarak her üç numunenin kimyasal bileşimleri incelendi. Şekil 4.1. de numunelerin EDS spektrumları ve EDS görüntüleri görülmektedir. Numunelerdeki silisyum ve karbonun ağırlık yüzdeleri sırasıyla n-6H SiC yapısı için %66, %34, grafen/n-6H SiC yapısı için %28, %72 ve grafit/n-6H SiC için %1,2, %98,8 dir. Bu sıra ile ara yüzeydeki karbon miktarının arttığı için bu beklenen bir ölçümdür.



Şekil 4.1. n-6H SiC yapısı ve grafen/grafit katkılı ara yüzlerinin EDS grafikleri

Numuneler aynı zamanda Raman spektrumu ile de incelendi. Raman spektrumu EDS spektrumunun aksine daha çok nitel bir analiz yöntemidir. Bir nevi sınıflandırmadır diyebiliriz. Bilinmeyen numune ile ilgili olarak elde edilen spektrum bilinen mevcut spektrumlarla karşılaştırılarak bir sonuca varılır.

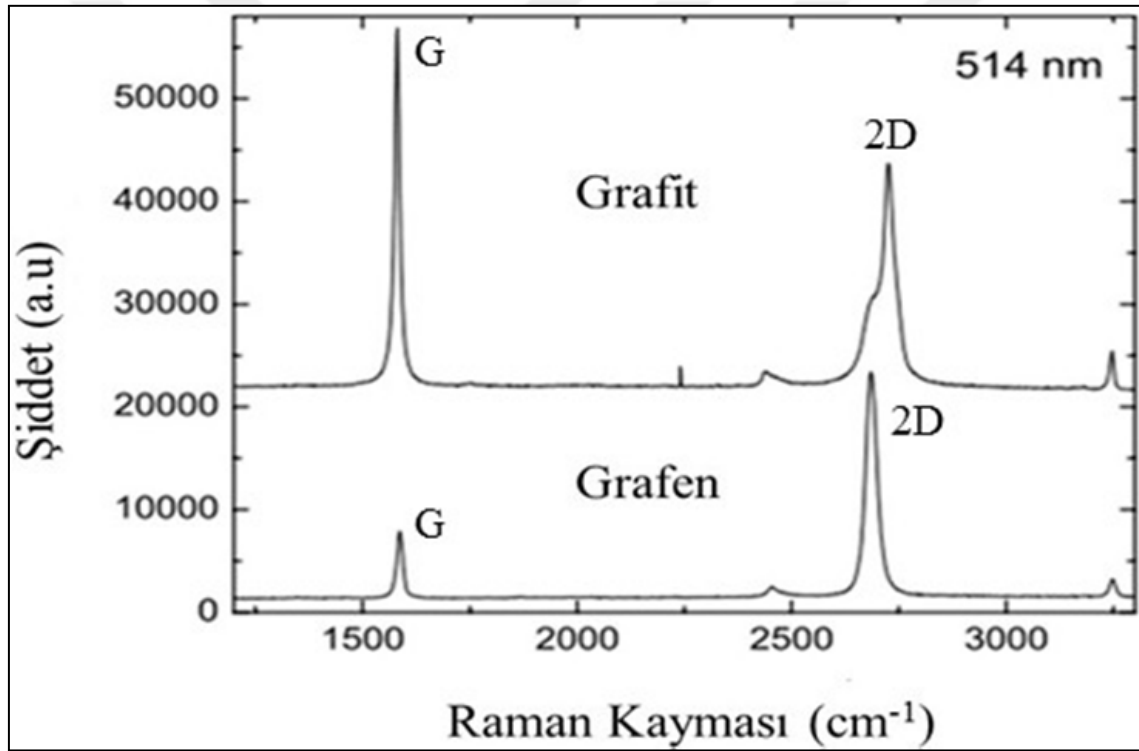
Işık geçirgen bir ortamdan geçerken ortamda bulunan moleküller dolayısı ile saçılır, saçılan ışık ile gelen ışık arasında dalga boyu farkı vardır. Dalga boyunda ki bu kaymaların ortamda bulunan moleküller hakkında bize bilgi verebilir. Bu buluşundan ve konu ile ilgili çalışmalarından dolayı 1931 yılında Hintli fizikçi Raman'a Nobel ödülü verilmiştir.

Gelen ışık molekül ile etkileşime girer, hem molekülün elektronları hem de bağları ile etkileşimi sonucu gelen ışığın dalga boyu yayılan ışığın dalga boyu arasında fark oluşur. Her molekülün kendine has bir yapısı ve titreşim / enerji durumu olduğu için bu dalga boyunda yaşanan bu kaymalar bize molekül hakkında bilgi verebilir. Raman analizi optiksel bir analiz yöntemi olduğu için numuneye zarar vermeyen bir yöntemdir.

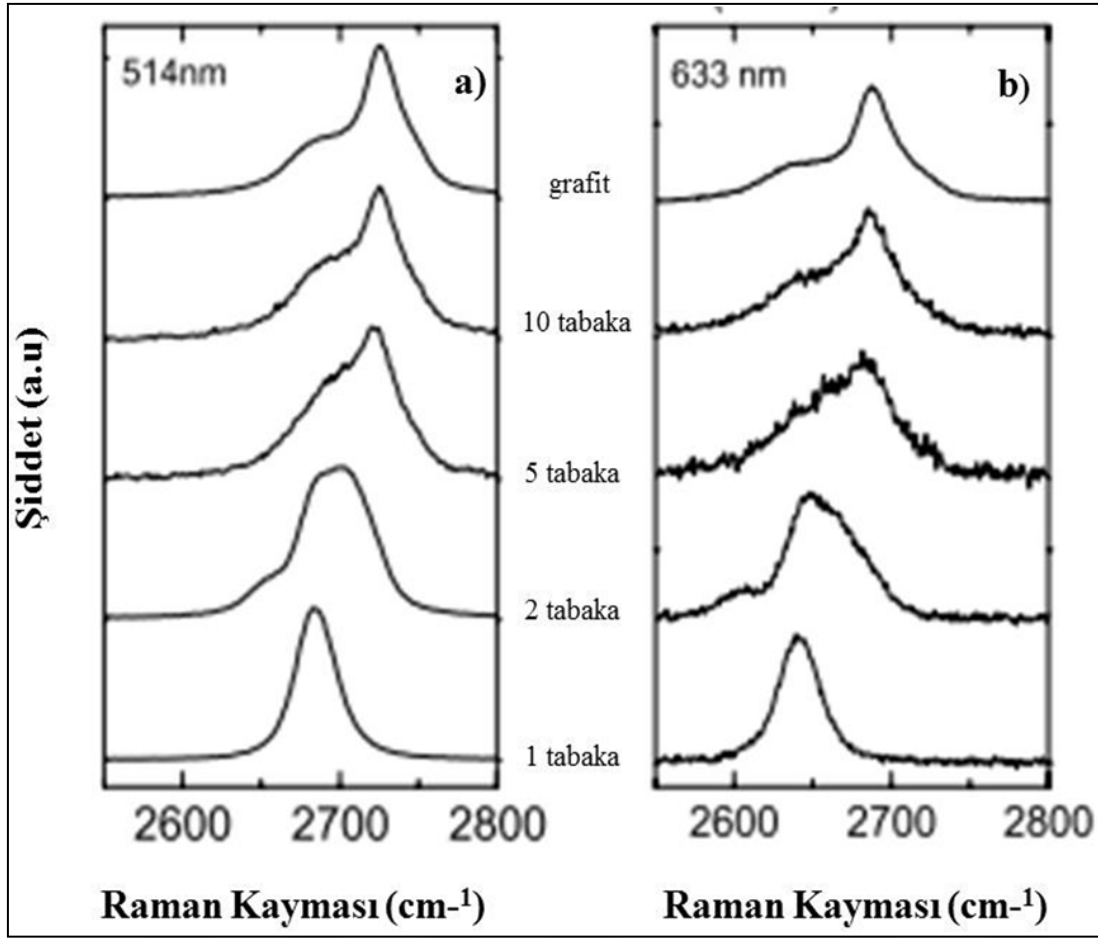
Karbon türevi malzemelerin raman incelemesinde genellikle $800 - 2000 \text{ cm}^{-1}$ bölgeye dikkat edilir. Grafen'de 3 belirgi pik vardır. Bunlardan birincisi 1580 cm^{-1} civarında

görülen G piki, ikincisi 1360 cm^{-1} civarında görülen ve genellikle kusurlardan kaynaklı D piki ve üçüncüsü 2700 cm^{-1} civarında görülen ve grafenin asıl karakteristik özelliğini veren 2D pikidir. Ayrıca grafenin tabaka sayısı G ve 2D piklerinin durumları ile orantılıdır. 2D piki G pikinden daha keskin ve daha büyük ise tek tabaka, G piki 2D pikinden daha büyük ve 2D piki daha geniş ise çift tabakaya atfedilmiştir [63].

Şekil 4.2’de grafen ve grafitte ait karakteristik pikler gösterilmiştir [62]. Tabaka sayısı arttıkça 2D bandının şiddeti azalacaktır. Tabaka sayısı artıkça 2D bandındaki değişimler Şekil 4.3’de gösterilmiştir[62].



Şekil 4.2. Grafit ve tek tabaka grafenin Raman spektrumlarının karşılaştırılması



Şekil 4.3. Tabaka sayısına göre 2D bandındaki değişimler

Şekil 4.3’de 2D pikinde meydana gelen kaymaların 514 nm ve 633 nm dalga boyunda farklı olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada numunelerin raman ölçümleri 532 nm lazer kullanılarak alınmıştır.

Resim 4.5’de numunelerin katı, sıvı veya toz halde incelenebildiği böylece maddelerin kimyasal bağları ve fonksiyonel grupları hakkında bilgi edinebildiğimiz Resjasco Nrs4500 Konfokal Mikroskoplu Raman Spektrometresi görülmektedir.

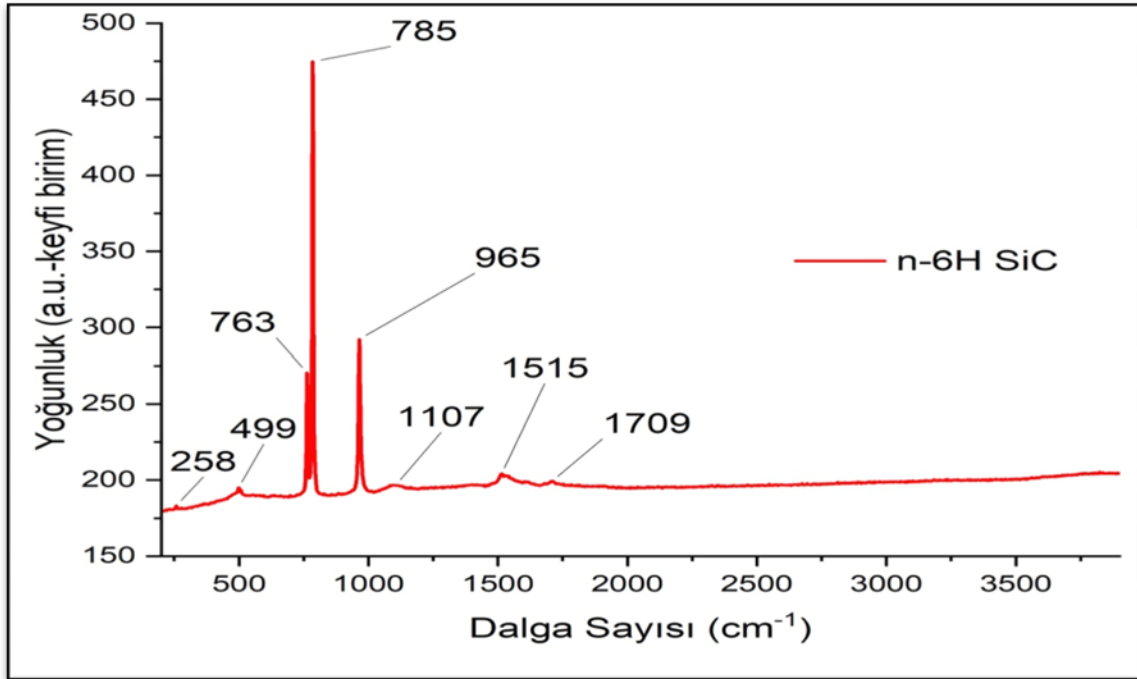
Resjasco Nrs4500 Konfokal Mikroskoplu Raman Spektrometresi Genel özellikleri:

100 - 8000 cm^{-1} dalga sayısı aralığı, 2 cm^{-1} azami çözünürlük, 532 nm, 785 nm lazer, görünür bölgeden NIR bölgeye kadar dedekte, azami -70°C çalışma sıcaklığı, 1650 x 200 piksel yoğunluğu, 16 x 16 μm piksel boyutu, mikroskop: 3 megapiksel görüntüleme, XY= 1 μm , Z= 1.5 μm çözünürlük, 5x, 20x, 50x, 100x objektif, Raman Spektrum, Haritalandırma, Derinlik Profil ve Dilimleme analizleri [78].



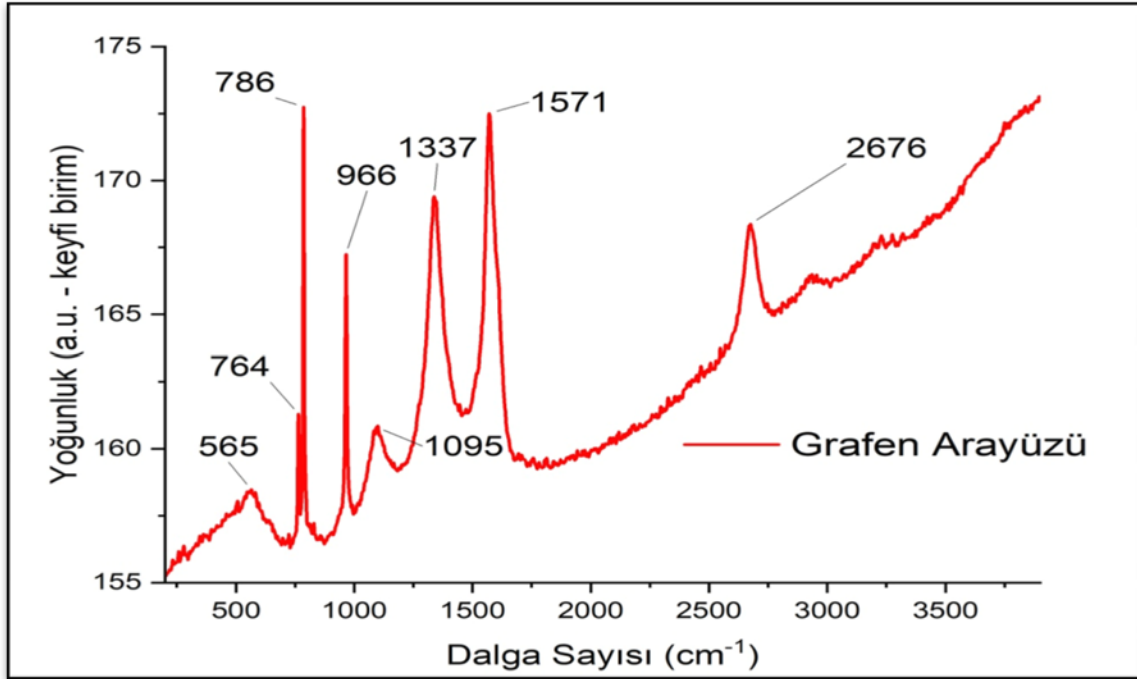
Resim 4.5. JASCO NRS4500 Konfokal Mikroskoplu Raman Spektrometresi

Şekil 4.4’de n-6H SiC yapısına ait Raman spektrumu görülmektedir. Bacherikov vd. nin yapmış olduğu çalışmaya benzer olarak spektrumda 258, 499, 763, 785 ve 965 cm^{-1} dalga sayılarında 6H-SiC için karakteristik pikler mevcuttur [45].

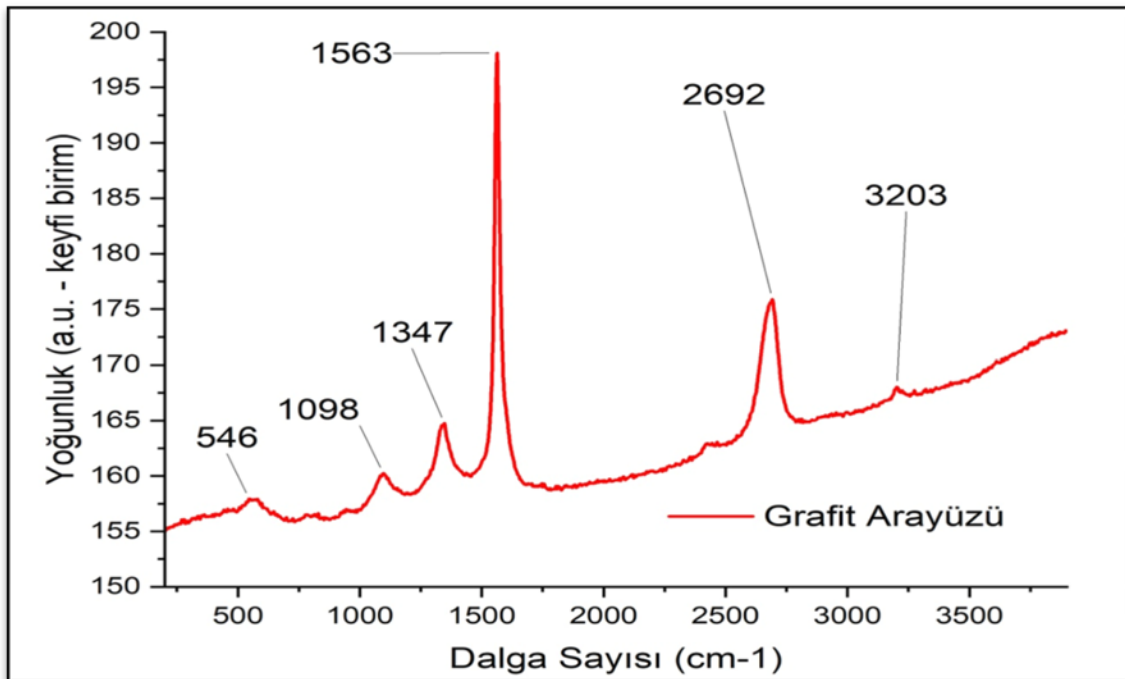


Şekil 4.4. n-6H SiC yapısının raman spektrumu

Şekil 4.5’de ara yüzeyine grafen katkılanmış n-6H SiC yapısına ait Raman spektrumu, Şekil 4.6’da ise ara yüzeyine grafit katkılanmış n-6H SiC yapısına ait Raman spektrumu görülmektedir.



Şekil 4.5. Grafen/n-6H SiC yapısının raman spektrumu



Şekil 4.6. Grafit/n-6H SiC yapısının raman spektrumu

1300(D-piki), 1580(G-piki) ve 2700 (2D-piki) cm^{-1} dalga sayılarında görülen piklerin mevcudiyeti sentezlenen karbon filmlerde grafen ve benzeri malzemelerin oluşumunu göstermektedir. G ve 2D piklerinin şiddetlerinin oranı ise grafenin tabaka sayısı ile orantılıdır [46].

Grafen ve grafitin Raman özellikleri arasındaki fark 2D bandında görülebilir. Keskin ve simetrik bir 2D bandının varlığı, grafeni tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır [47]. Ayrıca söz konusu banda grafit için iki tepe noktasının da takılabileceği ve G bandının yoğunluğunun grafenin kalınlığı arttıkça artacağı belirtilmiştir [48,49].

Şekil 4.5’de 1337 (D-piki)’nin görülmesi bu çalışma kapsamında kullanılan grafenin atomik kusurlarından kaynaklanıyor olabilir. Yapılan çalışmalarda bu pik kenar kusurları ve atomik düzensizlikler ile açıklanmaktadır [62,63]. Yapılan çalışmada grafitin grafenden daha iyi elektriksel özellik göstermesi grafen katmanlarındaki kirlilik ve arayüzey durumları ile açıklanmış olup, D pikinin varlığı da bu açıklamamızı destekler niteliktedir.

4.2. Akım-Voltaj (I-V) , Kapasitans-Voltaj (C-V) Ölçümleri

Termiyonik emisyon teorisine göre akım voltaj arasındaki ilişki

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) \quad (4.1)$$

eşitliği ile verilir [16]. Burada I diyot akımı (Amper), V diyot uçlarına uygulanan gerilim (Volt), I_0 doyma akımı-ters polarmada doyma akımı (Amper), q elektronun yükü (Coulomb), T ortam sıcaklığı (Kelvin), k boltzman sabiti (Joule/Kelvin), n idealite faktörü (birimsiz) dür.

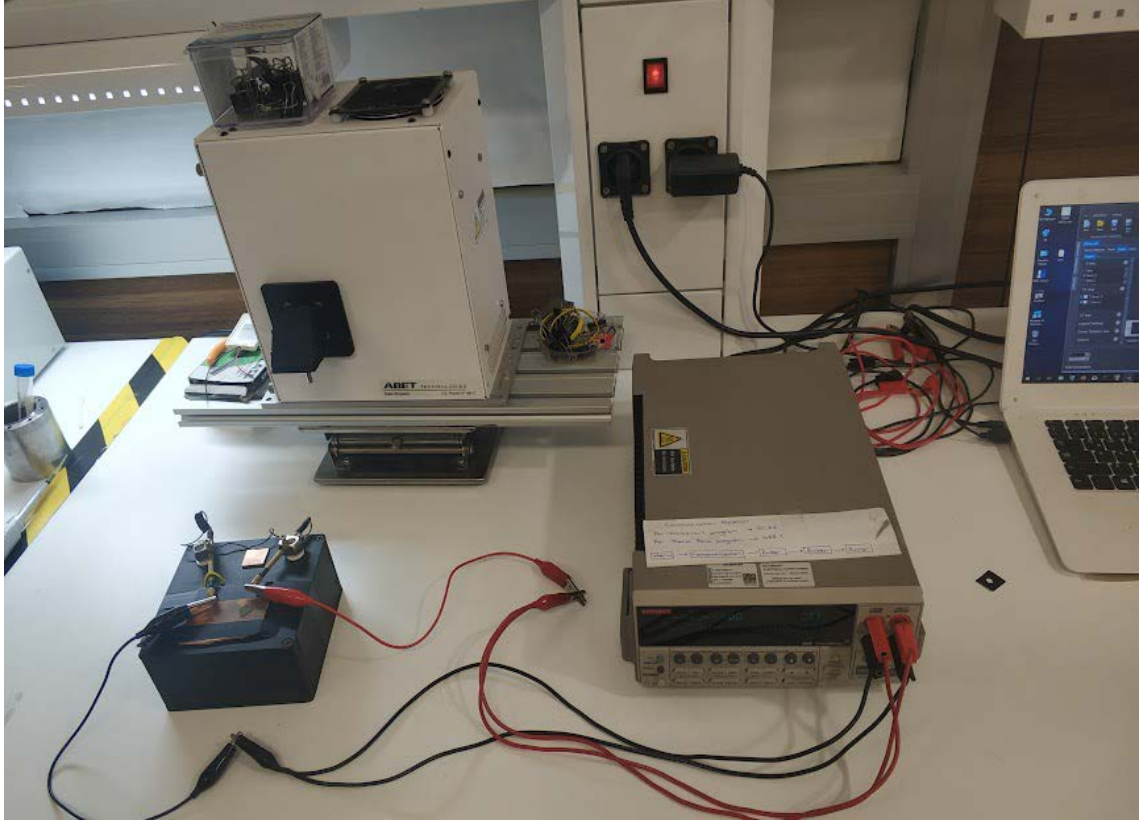
Doyma akımı ise

$$I_0 = AA^*T^2e^{\frac{-q\phi_{Bo}}{kT}} \quad (4.2)$$

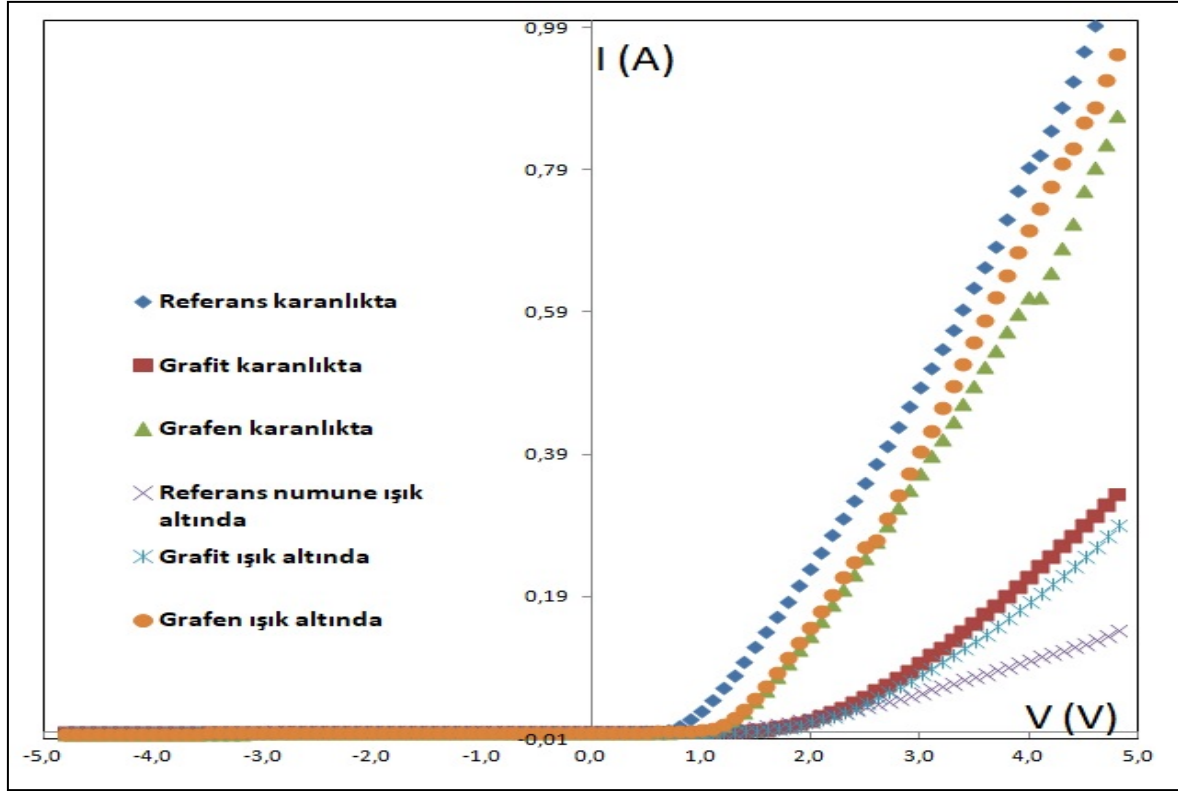
eşitliği ile verilir [16]. Burada ϕ_{Bo} sıfır beslemedeki schottky engel yüksekliği (eV), A yarıiletkenin alanı, A^* richardson sabitidir.

Au/n-6H SiC/Au referans(ref) numunesi ve ara yüzeyde grafen ve grafit katkılı hallerinin 300 K sıcaklıkta akım/voltaj ölçümleri Resim 4.6’da görülen Keithley 2400 cihazı

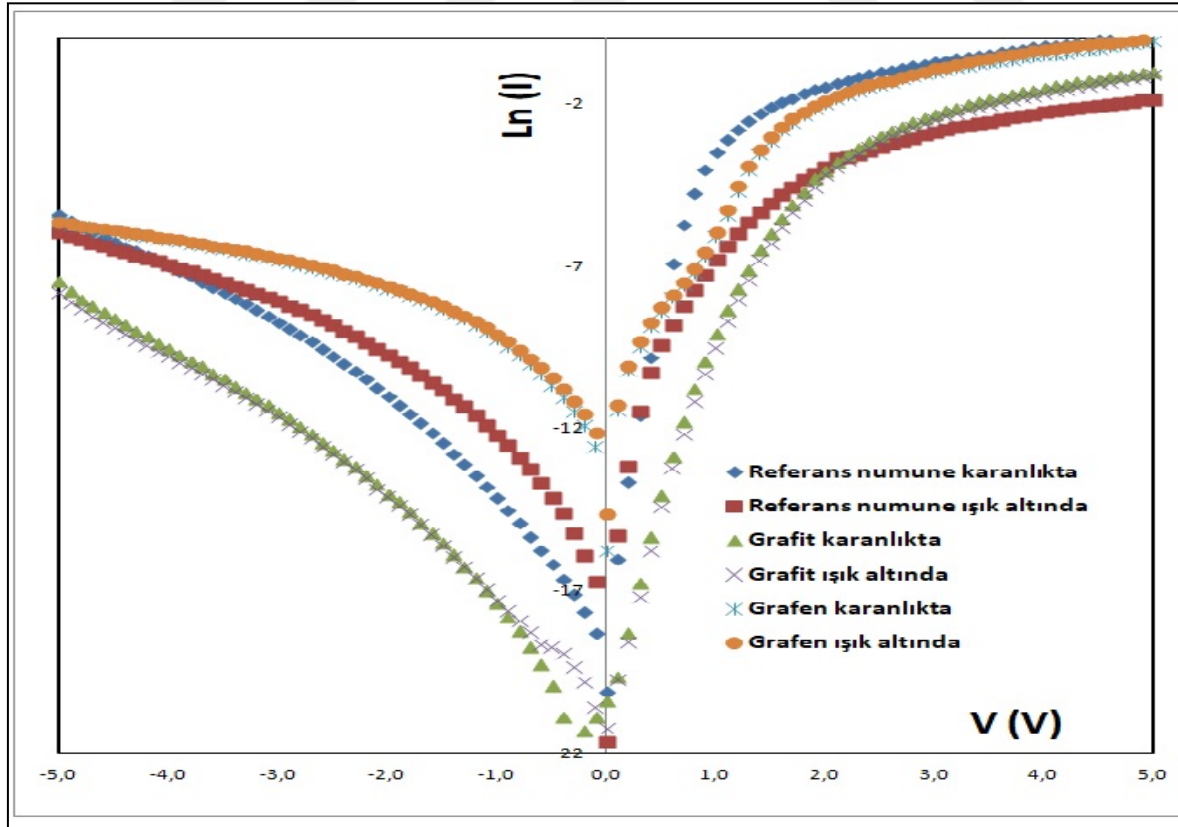
kullanılarak alındı. Söz konusu üç numunenin akım voltaj grafiği Şekil 4.7’de ve sonuçları daha anlamlı görebilmek için logaritmik gösterimi Şekil 4.8’da gösterilmiştir.



Resim 4.6. Keithley 2400 cihazı



Şekil 4.7. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin akım voltaj grafiği



Şekil 4.8. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin $\ln(I)$ -V grafiği

Referans numunenin karanlıkta ve ışık altında göstermiş olduğu karakteristik davranış ile katkılı hallerinin göstermiş olduğu davranışa dikkat edelim. Grafit ve grafen katkılamak numuneyi ışık altında ve karanlıkta daha kararlı/değişmez/stabil hale getirmiştir.

Numunelerin ölçülen akım-voltaj (I-V) değerleri kullanılarak her bir numune için doyma akımı (I_0), engel yüksekliği (ϕ_{Bo}), idealite faktörü (n) ve doğrultma oranı (DO) temel parametreleri hesaplanmıştır.

Bu parametreleri hesaplamak için eşitlik 1'in her iki tarafının ln'ini alınırsa;

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{qV}{nkT} \quad (4.3)$$

elde edilir. Bu eşitliğin V ye göre türevi alınırsa;

$$\frac{d \ln I}{dV} = \frac{q}{n \cdot k \cdot T} = \tan \Theta \quad (4.4)$$

elde edilir. Bu değer eşitlik 4.3. de yerine konulursa;

$$\ln I = \ln I_0 + \tan \Theta \cdot V \quad (4.5)$$

elde edilir. Bu eşitliğin ($Y = Y_0 + mX$) gibi bir doğru denkleminde benzediğine dikkat ediniz. $\ln I$ -V grafiğinin eğiminden $\tan \Theta$ hesaplanır. Eşitlik 4.5. den idealite faktörü şu şekilde elde edilebilir;

$$n = \frac{q}{k \cdot T \cdot \tan \Theta} \quad (4.6)$$

idealite faktörü elde edilir. 3 numaralı eşitlikte $V=0$ değeri için şekil 7 de doğrunun akım eksenini kestiği noktadan I_0 elde edilebilir.

$$I_0 = e^{(\ln I)} \quad (4.7)$$

Artık doyma akımı bilindiğine göre eşitlik 4.2.'den engel yüksekliği hesaplanabilir. Buradan ϕ_{Bo} çekilecek olursa;

$$\Phi_{Bo} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.8)$$

olarak hesaplanır.

Sabit gerilim altında düz beslem akımı I_d , ters beslem akımı I_t olmak üzere, doğrultma oranı (DO) düz ve ters beslem için aynı voltaj değerlerinde;

$$DO = \frac{I_d}{I_t} \quad (4.9)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

Yukarıda özetlenen matematiksel işlemler sonucu Au/n-6H SiC/Au yapısının ve Grafit/Grafen katlılı hallerinin 300 K sıcaklıkta karanlıkta ve ışık altındaki I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafen/grafit katlılı hallerinin hesaplanan temel parametreleri

YAPI	I_0 Doyma Akımı (Amper)	n İdealite Faktörü	Φ_{Bo} Engel yüksekliği (eV)	DO Doğrultma Oranı
Referans Numune (karanlıkta)	2,86E-08	2,14	0,75	240
Grafit (karanlıkta)	7,99E-10	2,82	0,84	642
Grafen (karanlıkta)	8,13E-06	5,80	0,60	266
Referans Numune (ışık altında)	1,26E-07	3,03	0,71	61
Grafit (ışık altında)	5,93E-10	2,87	0,85	822
Grafen (ışık altında)	9,47E-06	5,89	0,60	289

Grafit katlılı Au/n-6H SiC/Au yapısının diğer yapılara göre doyma akımının daha az olduğu, doğrultma oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ara yüzeye grafit katkılamanın bu açıdan elektriksel parametreler üzerinde olumlu etki yaptığı söylenebilir.

Bilimsel makaleler incelendiğinde akım voltaj ölçümlerinden yapılan hesaplamalarda genellikle I-V grafiklerinin verilip daha sonra hesaplanan parametrelere geçildiği görülmektedir. Benzer durum yüksek lisans ve doktora tezleri için de geçerlidir. Konuya çok hakim olmayan araştırmacılar için yukarıda Çizelge 4.1’de verilen parametrelerin adım adım nasıl hesaplandığı aşağıya çıkartılmıştır.

I-V Ölçümlerinden temel elektriksel parametrelerin hesaplanması

Öncelikle numuneyi ölçtüğümüz cihazdan elde ettiğimiz dosyadaki verileri bir excell dosyasına aktarmakla başlarız. Burada dikkat edilmesi gereken husus verilerin bozulmamasıdır. Özellikle nokta virgöl değişmesi, kaymaların olmaması gibi hususlar gözle birkaç kere kontrol edilmelidir. Referans numune diye adlandırdığımız Au/n-6H SiC/Au yapısının -5 V ve +5 V aralığında 0,1 Volt adımlarla aldığımız ölçüm sonuçları örnek olması açısından Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Verilerin fazla yer kaplamaması için -3V ve +3V arasındaki değerler çıkartılmıştır. Yapılacak hesaplamalarda tüm numunelerin aynı aralıkta ölçülmesine dikkat edilmelidir. Örneğin -5V ve +5V aralığında ölçüm yapılacaksa tüm numuneler tüm şartlar altında aynı voltaj aralığında ölçüm alınmalı ve excell tablosuna kontrollü bir şekilde aktarılmalıdır.

Kaç numunemiz varsa her biri için bu adımı her bir durum için tekrarlamalıyız. Örneğin yapılan çalışmada refrans numune hem karanlıkta hem ışık altında, grafen ara yüzü numune hem karanlıkta hem ışık altında, grafit ara yüzü numune hem karanlıkta hem ışık altında ölçülmüştür. Toplamda altı farklı akım voltaj ölçüm sonuçları bulunmaktadır. Yapılan çalışmada belirli bir radyasyon altında değişik sıcaklık değerlerinin numuneler üzerindeki etkisi araştırılıysaydı her biri içinde ayrı ayrı ölçüm dosyaları hazırlamak gerekecekti.

Daha sona Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi akım değerinin mutlak değer ifadesini alıp akım satırının yanına aynı sıraya yazılır. Bunun nedeni bir sonraki aşamada akım değerinin e tabanında logaritmasını alacak olmamızdır. Negatif bir sayının logaritmasını alamayız. Daha sonra mutlak değerini aldığımız akım ifadesinin tekrar e tabanında logaritmasını yani $\ln$ ’ini alıp yan sütuna veriler aynı satıra denk gelecek şekilde yazılır. Bunları excell deki formülleri kullanarak kolaylıkla yapabiliriz. Zaman alacak işlemler değildir.

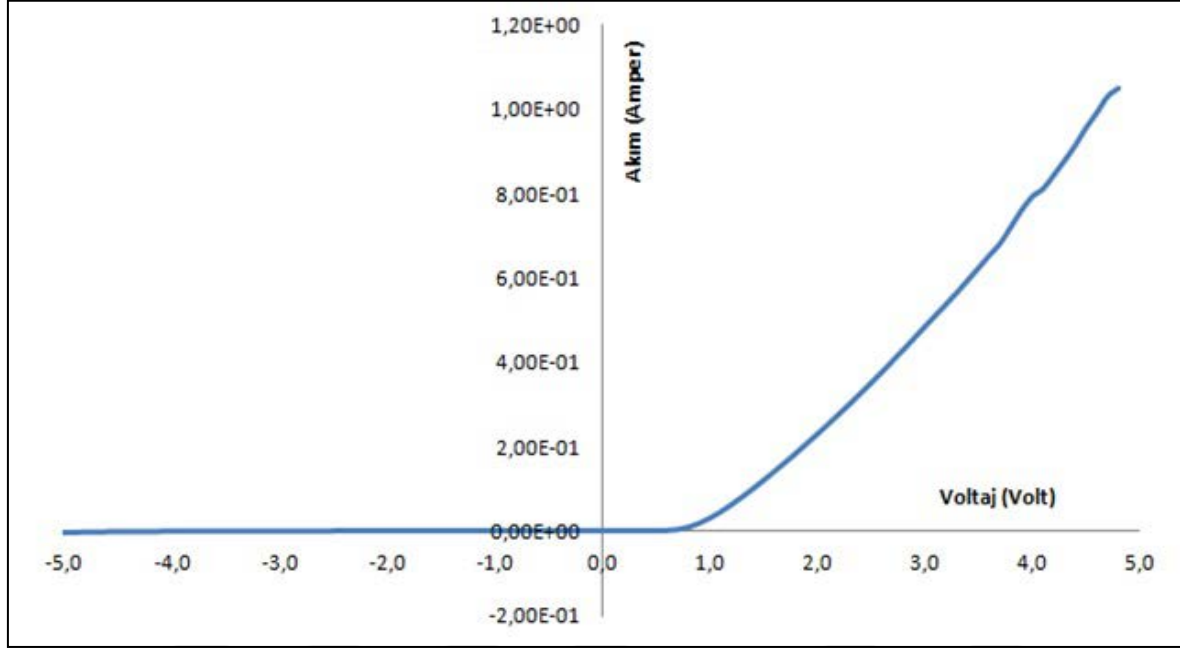
Çizelge 4.2’de tek tek anlatılan bu aşamalar neticesinde hazırlanan veriler görülmektedir. Akım değerlerindeki E ifadesi excell de sayıların bilimsel gösterimde ki 10 üzeri ifadesi manasındadır. Örneğin E-04’ün manası 0,0001 anlamındadır. Daha sonra bu verilerde bozulma olup olmadığını gözlemlemek için akım voltaj grafiğini çizdirmekte fayda vardır.

Çizelge 4.2. Au/n-6H SiC/Au yapısının karanlıkta akım voltaj ölçümleri

V (Volt)	I (Amper)	Mut Değer I	Ln Mut I	V (Volt)	I (Amper)	Mut Değer I	Ln Mut I
-3,0	-1,61E-04	1,61E-04	-8,73E+00	0,0	1,85E-09	1,85E-09	-2,01E+01
-2,9	-1,33E-04	1,33E-04	-8,93E+00	0,1	1,11E-07	1,11E-07	-1,60E+01
-2,8	-1,08E-04	1,08E-04	-9,13E+00	0,2	1,22E-06	1,22E-06	-1,36E+01
-2,7	-8,85E-05	8,85E-05	-9,33E+00	0,3	9,14E-06	9,14E-06	-1,16E+01
-2,6	-7,09E-05	7,09E-05	-9,55E+00	0,4	5,36E-05	5,36E-05	-9,83E+00
-2,5	-5,67E-05	5,67E-05	-9,78E+00	0,5	2,55E-04	2,55E-04	-8,28E+00
-2,4	-4,50E-05	4,50E-05	-1,00E+01	0,6	9,95E-04	9,95E-04	-6,91E+00
-2,3	-3,55E-05	3,55E-05	-1,02E+01	0,7	3,27E-03	3,27E-03	-5,72E+00
-2,2	-2,78E-05	2,78E-05	-1,05E+01	0,8	8,41E-03	8,41E-03	-4,78E+00
-2,1	-2,15E-05	2,15E-05	-1,07E+01	0,9	1,75E-02	1,75E-02	-4,05E+00
-2,0	-1,66E-05	1,66E-05	-1,10E+01	1,0	2,98E-02	2,98E-02	-3,51E+00
-1,9	-1,26E-05	1,26E-05	-1,13E+01	1,1	4,47E-02	4,47E-02	-3,11E+00
-1,8	-9,71E-06	9,71E-06	-1,15E+01	1,2	6,16E-02	6,16E-02	-2,79E+00
-1,7	-7,22E-06	7,22E-06	-1,18E+01	1,3	7,99E-02	7,99E-02	-2,53E+00
-1,6	-5,34E-06	5,34E-06	-1,21E+01	1,4	9,93E-02	9,93E-02	-2,31E+00
-1,5	-3,91E-06	3,91E-06	-1,25E+01	1,5	1,20E-01	1,20E-01	-2,12E+00
-1,4	-2,84E-06	2,84E-06	-1,28E+01	1,6	1,40E-01	1,40E-01	-1,96E+00
-1,3	-2,04E-06	2,04E-06	-1,31E+01	1,7	1,62E-01	1,62E-01	-1,82E+00
-1,2	-1,45E-06	1,45E-06	-1,34E+01	1,8	1,84E-01	1,84E-01	-1,69E+00
-1,1	-1,02E-06	1,02E-06	-1,38E+01	1,9	2,06E-01	2,06E-01	-1,58E+00
-1,0	-7,22E-07	7,22E-07	-1,41E+01	2,0	2,29E-01	2,29E-01	-1,47E+00
-0,9	-4,91E-07	4,91E-07	-1,45E+01	2,1	2,53E-01	2,53E-01	-1,38E+00
-0,8	-3,33E-07	3,33E-07	-1,49E+01	2,2	2,76E-01	2,76E-01	-1,29E+00
-0,7	-2,22E-07	2,22E-07	-1,53E+01	2,3	3,01E-01	3,01E-01	-1,20E+00
-0,6	-1,46E-07	1,46E-07	-1,57E+01	2,4	3,25E-01	3,25E-01	-1,12E+00
-0,5	-9,41E-08	9,41E-08	-1,62E+01	2,5	3,51E-01	3,51E-01	-1,05E+00
-0,4	-5,96E-08	5,96E-08	-1,66E+01	2,6	3,76E-01	3,76E-01	-9,77E-01
-0,3	-3,68E-08	3,68E-08	-1,71E+01	2,7	4,03E-01	4,03E-01	-9,09E-01
-0,2	-2,17E-08	2,17E-08	-1,76E+01	2,8	4,29E-01	4,29E-01	-8,46E-01
-0,1	-1,15E-08	1,15E-08	-1,83E+01	2,9	4,57E-01	4,57E-01	-7,84E-01
0,0	1,85E-09	1,85E-09	-2,01E+01	3,0	4,84E-01	4,84E-01	-7,25E-01

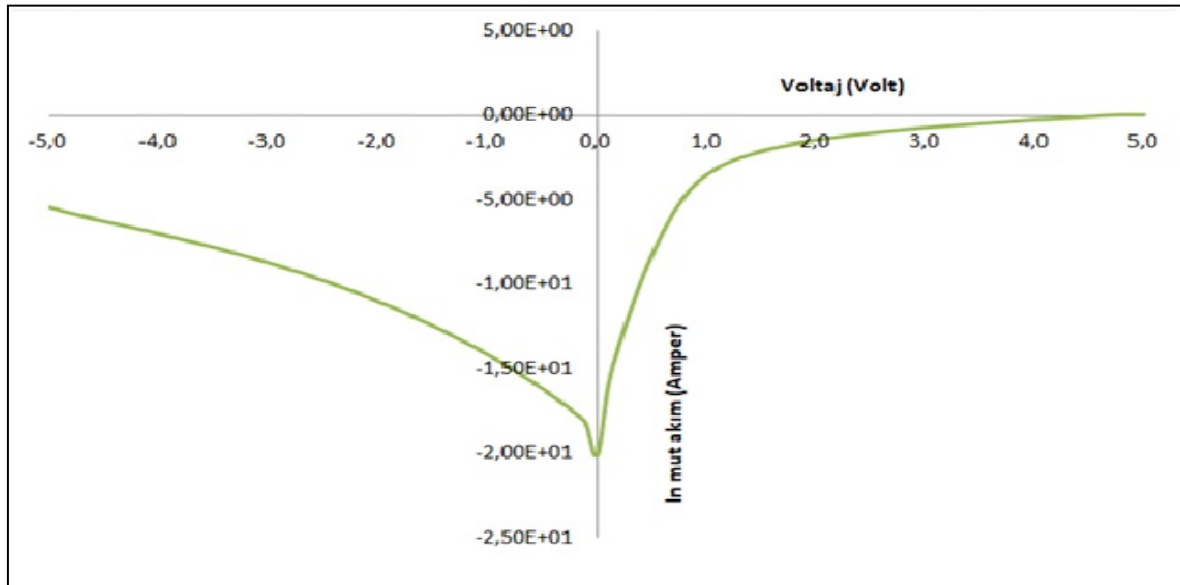
Çizelge 4.2’deki 1. ve 2. sütunu kullanarak I-V grafiğini çizebiliriz. Bunu da Excel deki grafik çizme bölümünü kullanarak kolaylıkla yapabiliriz. Şekil 4.9’da Çizelge 4.2’den elde edilen akım voltaj grafiği görülmektedir. Bu grafik karanlıkta Au/n-6H SiC/Au yapısının

-5 V ve +5 V aralığındaki değerleri için akım voltaj grafiğidir. Grafik incelendiğinde bunun tipik bir diyot grafiği olduğu dolayısıyla ölçüm sonuçlarında herhangi bir bozulma olmadığı anlaşılır. Bu grafik şekil 4.7. de karanlıkta referans numune için verilen grafiğin aynısıdır.



Şekil 4.9. Au/n-6H SiC/Au yapısının (karanlıkta) I-V grafiği

Daha sonra Çizelge 4.2. deki grafik 1. ve 4. sütun değerleri kullanılarak $\ln(I)$ -V grafiği çizilir. Bunu da Excel deki grafik çizme bölümünü kullanarak kolaylıkla yapabiliriz.



Şekil 4.10. Au/n-6H SiC/Au yapısının (karanlıkta) $\ln(I)$ -V grafiği

Bu grafik Şekil 4.8’de karanlıkta referans numune için verilen grafiğin aynısıdır. Daha sonra akım voltaj ölçümlerinde parametrelere etkiyen en önemli bölüme sıra gelir. Benzer bir zorluk kapasitans voltaj ölçümleri içinde geçerlidir ve ilerleyen bölümlerde bu konu tartışılacaktır. Sorun, ölçüm yapılacak voltaj değerinin belirlenmesidir. Belirleyeceğimiz voltaj aralığı numunenin hesaplanan parametre değerlerini az çok değiştirecektir. Dolayısı ile voltaj aralığını belirlerken pozitif bölgenin sıfır noktasına en yakın bölgesindeki lineer bölgenin tercih edilmesinde fayda vardır. Böylece seri direnç etkisinden uzaklaşılacaktır. Numune üzerinde birden fazla parametre etkili olabilir. Alt taşın etkisi, omik ve doğrultucu kontakların etkisi, kullanılmışsa ara yüzey malzemenin etkisi, hatta ölçüm esnasındaki değişkenler bile bu süreçte etkin olabilir. Ölçüm yapılan problemlerin iş fonksiyonu bile gerektiğinde dikkate alınmalıdır. $\ln(I)$ -V grafiğinde bazen birden fazla lineer bölge görüleceği gibi lineer bölgeden sapmalarda gözlemlenebilir. Bu durumda her bir lineer bölge ayrı ayrı hesaplanabileceği gibi ortalama bir değer de elde edilebilir. Bir elektronik devrede akım ile direncin ters orantılı olduğu düşünülürse genel olarak seri direnç etkisinden en uzak olan yani düz belsem bölgesindeki sıfır noktasına en yakın olan bölgenin numunenin akım voltaj karakteristiğini daha doğru yansıtacağı değerlendirilebilir.

Şekil 4.8’de $\ln(I)$ -V grafiğinde 0,1 ve 0,6 aralığı seri dirençten en uzak ve lineer bölgenin en kararlı olduğu durum olduğu için söz konusu numune için bu aralıkta hesaplama yapmanın uygun olacağı değerlendirilmiş ve Şekil 4.10 söz konusu voltaj aralığı için tekrar çizilmiştir. Şekil 4.11’de bu durum görülmektedir.

Çizilen grafiğe eğim çizgisi eklendiğinde doğru denklemi ve R^2 ifadeleri görülecektir. R^2 ifadesi lineerliğin bir ölçüsüdür ve 1 değerine ne kadar yakınsa o kadar lineer olduğunun yani sonuçların daha sağlıklı olacağının bir göstergesidir. Örneğimizde seçilen bölge için R^2 değeri 0,9898 çıkmıştır ki bu değer 1’ e çok yakın olduğu için kabul edilebilir değerdir.

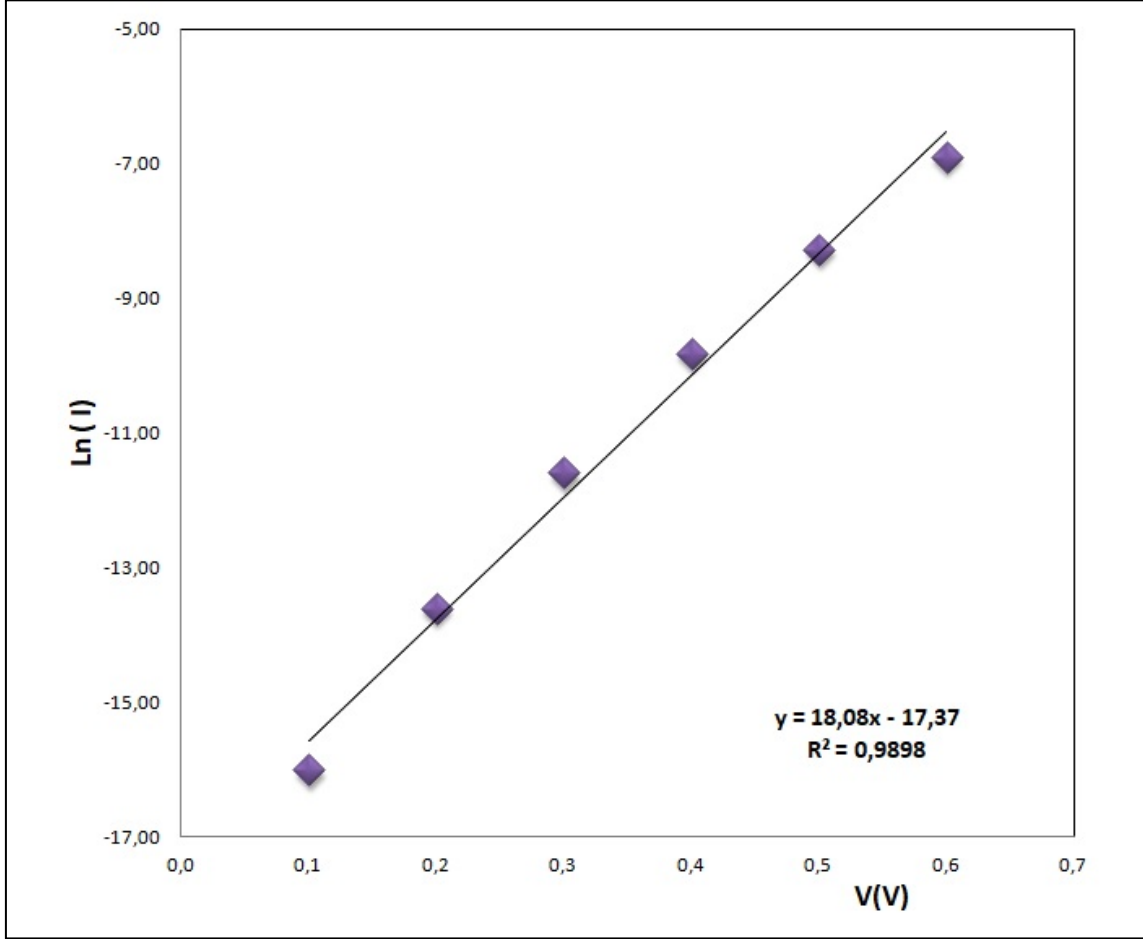
Doğru denklemi ise

$$y=18,08x-17,37 \quad (4.10)$$

olarak görülmektedir.

$$\ln I = \ln I_0 + \tan \Theta * V \quad (4.5)$$

Dikkat edilirse aslında bu Eşitlik 4.10. Eşitlik 4.5. in aynısıdır. X eksenini voltajı, Y eksenini akım değerinin ln değerine karşılık gelmektedir.



Şekil 4.11. Au/n-6H SiC/Au yapısının (karanlıkta) 0,1 - 0,6 Volt aralığında ln(I)-V grafiği

Eşitlik 4.10'da $x = 0$ için yani voltajın sıfır olduğu değer için doğrunun y eksenini kestiği nokta yani $\ln(I_0)$ değeri görülmektedir.

Konuya ölçümleri karanlıkta alınan referans numune için devam edecek olursak; Eşitlik 4.10 dan $x=0$ için y değeri yani $\ln(I_0) = -17,37$ Amper olarak hesaplanır.

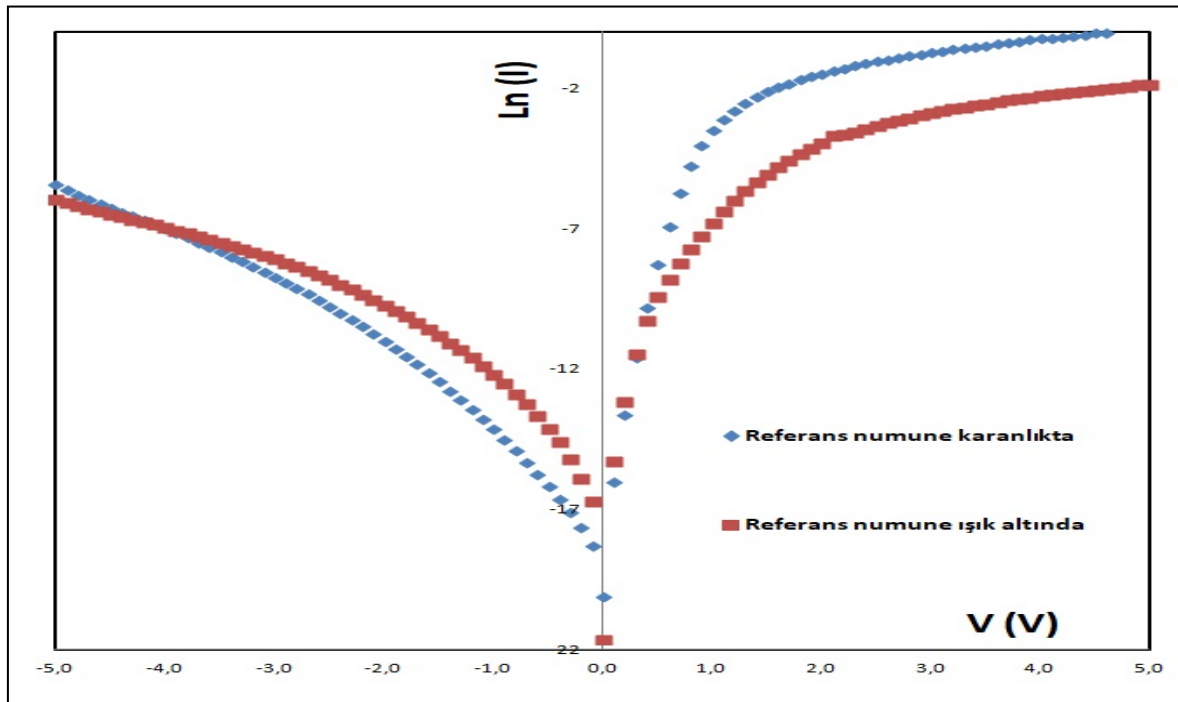
$I_0 = e^{-17,37} = 0,0000000286$ Amper = $2,86E-08$ Amper olarak hesaplanır. Çizelge 4.1'de ki doyma akımı bu şekilde hesaplanmıştır.

Doğru denklemindeki eğim ise yani Eşitlik 4.10'da ki 18,08 değeri ise Eşitlik 4.6' da ki $\tan\Theta$ yani eğim ifadesi yerine kullanılmaktadır. q - (elektronun yükü) ($1,60217733E-19$ coulomb), k - (boltzman sabiti) ($1,38065034E-23$ Joule/Kelvin) ve T - (Sıcaklık) (300

kelvin) değerleri bilindiği için bu değerler eşitlik 4.6. da yerine konursa n (idealite faktörü) kolaylıkla hesaplanabilir. Çizelge 4.1.'de ki idealite faktörü bu şekilde hesaplanmıştır.

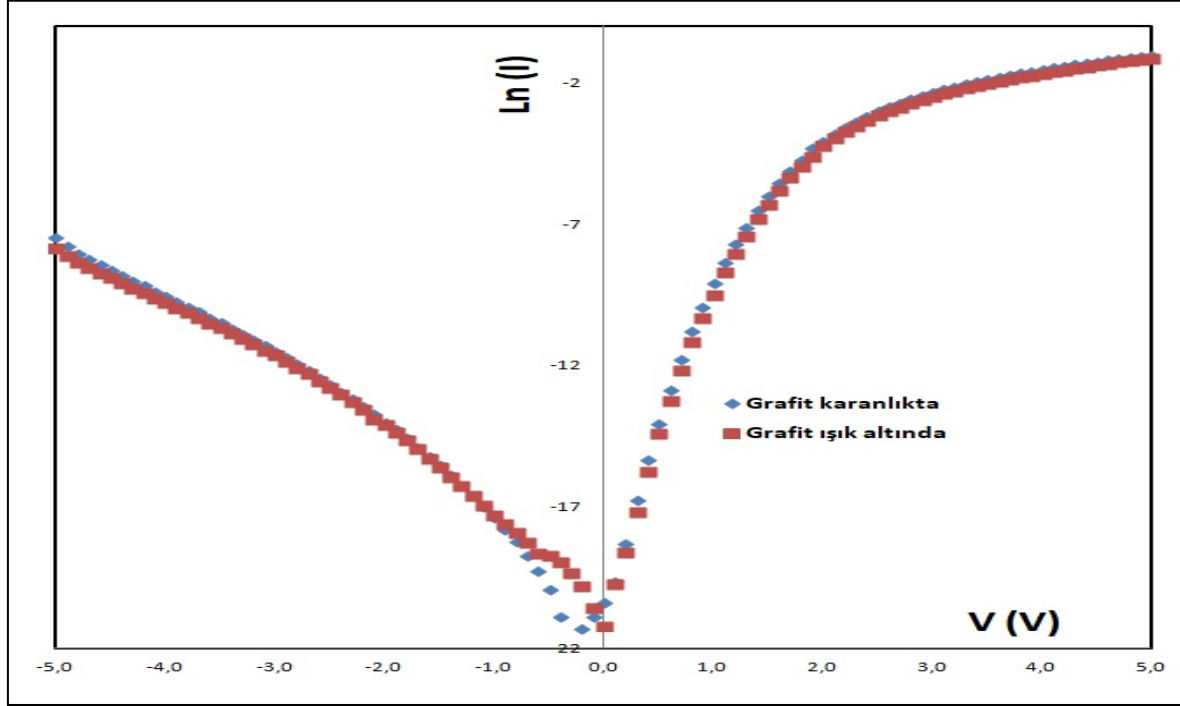
Doyma akımı hesaplandığı için engel yüksekliği Eşitlik 4.8 den, doğrultma oranı Eşitlik 4.9 dan kolaylıkla hesaplanabilir. Doğrultma oranının hesaplarken ters ve düz belsem bölgelerinin en uç değerindeki voltaj değerine karşılık gelen anlamlı akım değerlerinin referans alınması sağlıklı olacaktır. Burada daha anlamlı akım değeri derken doğrultmanın tamamlanması ve atlamaların olmaması amaçlanmıştır. Ölçüm başlangıç sonuç değerlerinde yani cihazlar bazen ilk ve son ölçüm değerlerinde atlamalar yapabilmektedir. Sadece verilere bakarak değil grafiğe bakarak bu hususa dikkat edilmesi salık verilmek istenilmiştir. Şekil 4.10'da yani logaritmik olarak verilen akım voltaj grafiğinde özellikle ters belsem bölgesindeki akım değeri daha hassas görülebilmektedir. Ayrıca eğer numuneler arasında bir kıyaslama yapılacaksa tüm numuneler için yukarıda belirtilen husus göz önünde bulundurularak ortak bir voltaj aralığı tespit edilmeye çalışılmalıdır. Böylece Çizelge 4.1'de ki tüm parametrelerin nasıl hesaplandığı ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

C-V ölçümlerinden hesaplanan temel elektriksel parametrelerin ayrıntılarına geçmeden önce her üç numune için Şekil 4.8'de verilen $\ln(I) - V$ grafiklerine daha yakından bakalım.

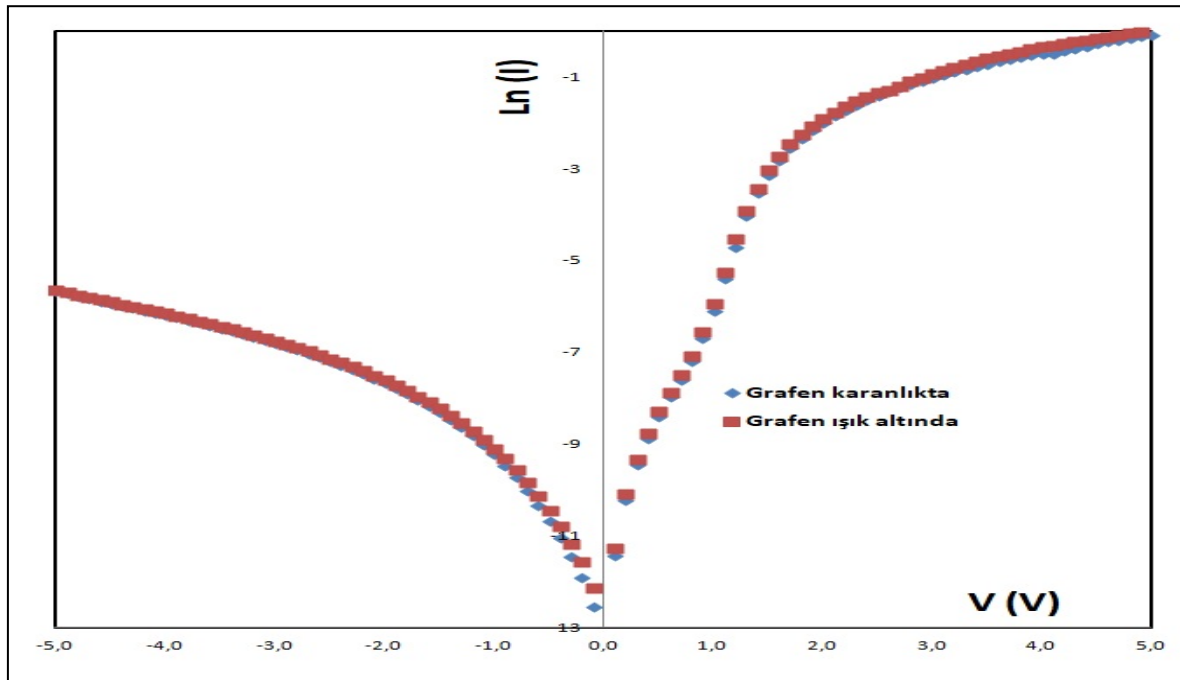


Şekil 4.12. Au/n-6H SiC/Au yapısının karanlıkta ve ışık altında $\ln(I) - V$ grafiği

Şekil 4.12’de referans numunenin karanlıkta ve ışık altında logaritmik akım voltaj grafiği görülmektedir. Söz konusu grafik Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de verilen diğer grafiklerle karşılaştırdığımızda ara yüzey malzemesi olarak grafen ve grafit kullanmanın yapıyı hem karanlıkta hem de ışık altında daha kararlı/benzer hale getirdiği sonucuna varabiliriz.



Şekil 4.13. Au/Grafit/n-6H SiC/Au yapısının karanlıkta ve ışık altında $\ln(I)$ -V grafiği

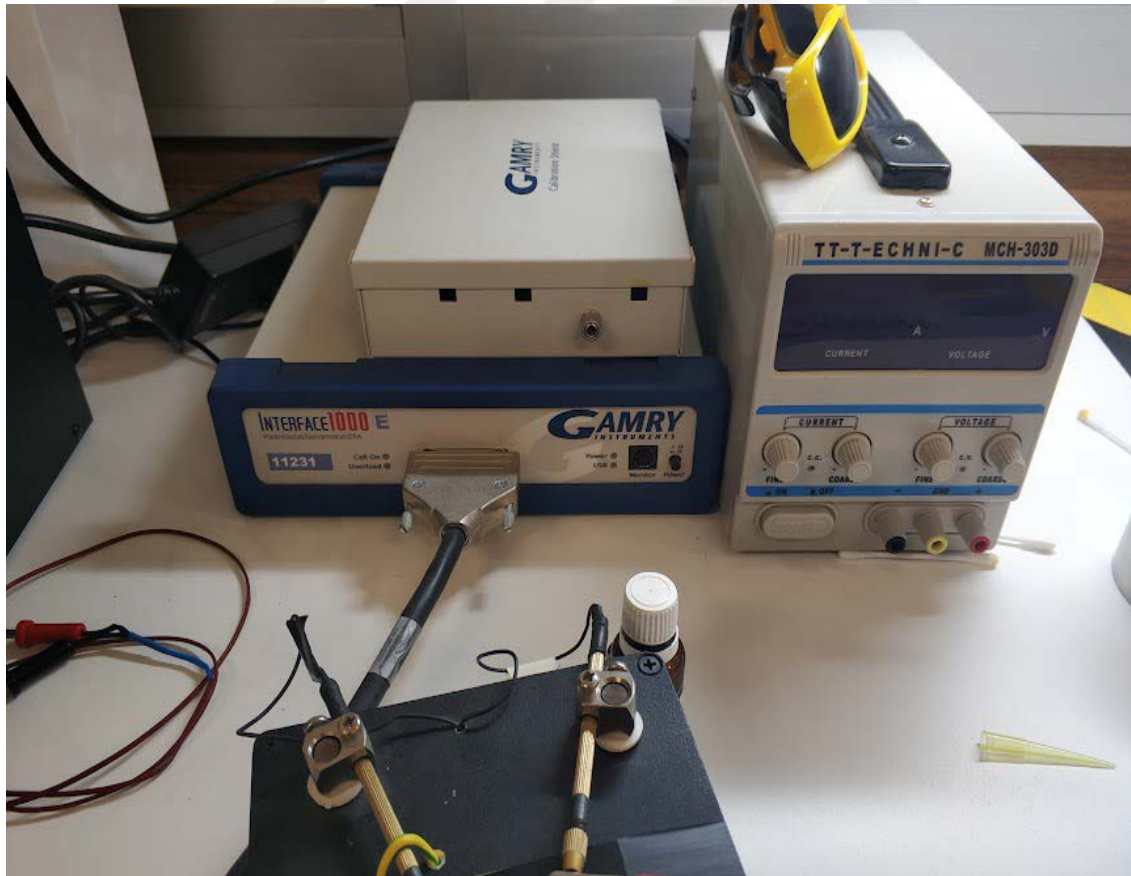


Şekil 4.14. Au/Grafen/n-6H SiC/Au yapısının karanlıkta ve ışık altında $\ln(I)$ -V grafiği

Ayrıca referans numune ve grafit ara yüzü durumu için y eksenini kestiği noktadaki değeri yani $\ln I_0$ değerinin grafit ara yüzü durumu için farklı olduğu yani doyma akımının arttığı görülmektedir. Beklenenin aksine gerçekleşen bu durumun grafit tabakalardaki safsızlık/kirlilik nedeniyle olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca grafit ara yüzü durumu için $\ln(I) - V$ grafiğinde iki farklı lineer bölgenin olduğu görülmektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi hesaplamalar pozitif bölgenin sıfır eksenine yakın olan bölgedeki lineer bölgede referans numune ile aynı voltaj aralığında (0,1 V – 0,6 V) yapılmıştır.

C–V ölçümlerinden hesaplanan parametreler

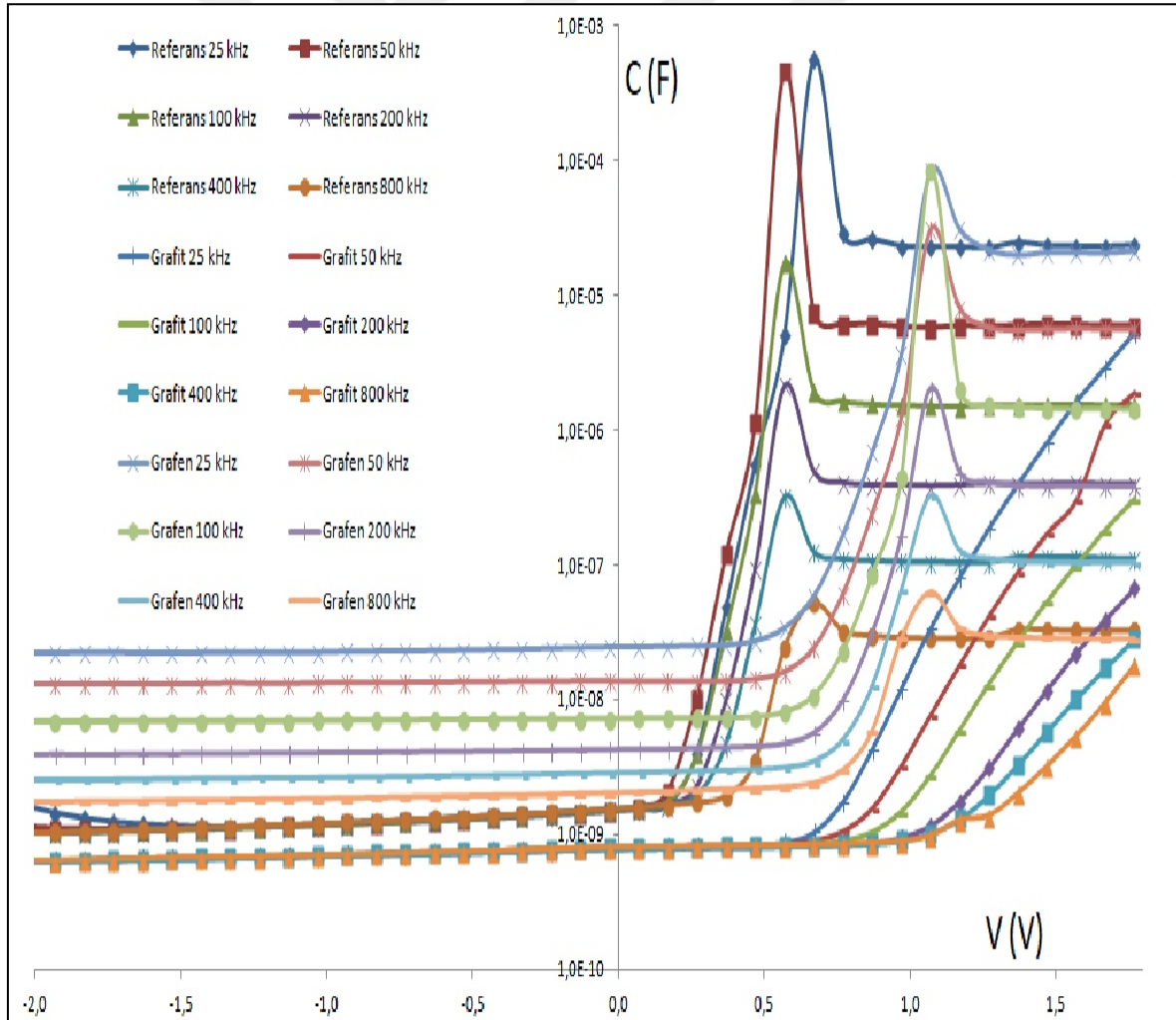
Söz konusu üç yapının $1/C_2 - V$ ölçümleri 300K sıcaklıkta, karanlık ortamda, 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz ve 800 kHz frekanslarında yapılmıştır. Resim 4.7’de ölçümlerin alındığı Gamry İnterface 1000E ölçüm aleti görülmektedir.



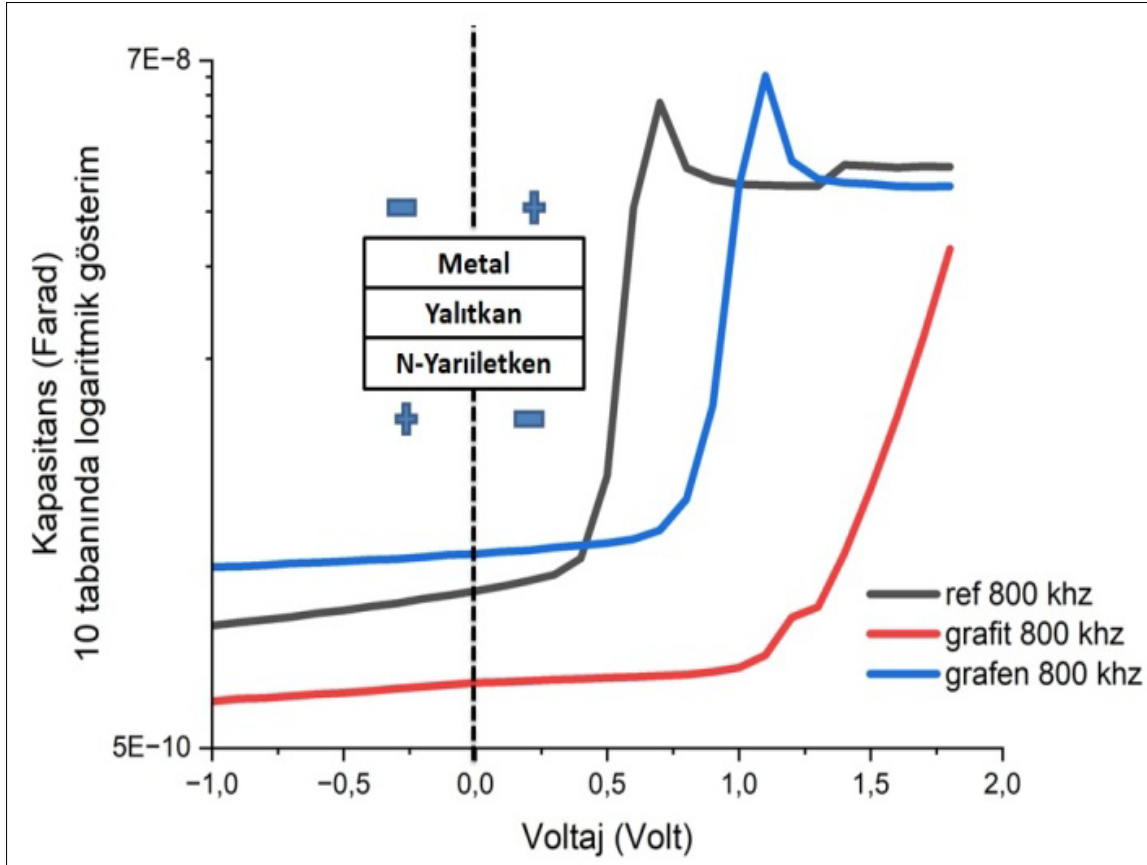
Resim 4.7. Gamry İnterface 1000E ölçüm aleti

Alınan ölçümlerden her bir voltaj değeri için kapasitans değerleri hesaplandı ve C-V grafikleri elde edildi. Ölçüm sonuçlarından her üç yapının da kapasitansının frekansın azalması ile arttığı görülmüştür. Kapasitansın düşük frekanslarda artması, ara yüzey durumları ile ilişkilendirilebilir. Düşük frekanslarda arayüz durumları alternatif akım sinyalinin takip edebilir [50].

Au/n-6H SiC/Au yapısını referans malzeme olarak adlandıracak olursak, referans malzemenin ve ara yüzeyine grafit ve grafen katkılı hallerinin 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 400 kHz ve 800 kHz frekansları için C-V grafiği Şekil 4.15’de, sonucu daha sade görebilmek için 800 kHz frekansı için C-V grafiği Şekil 4.16’de gösterilmiştir. 800 kHz frekansını seçme amacımız ara yüzey durumlarından kaynaklanan etkilenmeleri en aza indirilmeştir.



Şekil 4.15. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin değişen frekanslarda C-V grafiği



Şekil 4.16. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin 800 kHz frekansında C-V grafiği

C-V ölçümlerinden temel parametreler hesaplanırken seçilen potansiyel aralığı önemlidir. C-V ölçümlerinden bir bakıma DC uygulama gerilimi altında arayüzey faz kayması ölçülür. Bu yüzden kapasite ölçümü yarıiletkenin tüketim bölgesindeki yük dağılımları ile ilgilidir [11].

Tüketim(Depletion) bölgesi, yarıiletkenin metalle temas ettiği bölgedeki iletkenlik tabakasının yok olduğu bölgedir. Terslenim (İnversiyon) bölgesinde diyottan akım akmayacağı için kapasitans sadece gerilime bağlıdır. Dolayısı ile terslenim bölgesinin kapasitansı tüketim bölgesinin kapasitansı olarak düşünülebilir. Daha geniş bir voltaj aralığında hesaplamalar yapıldığı için daha çok bu bölge kullanılmaktadır.

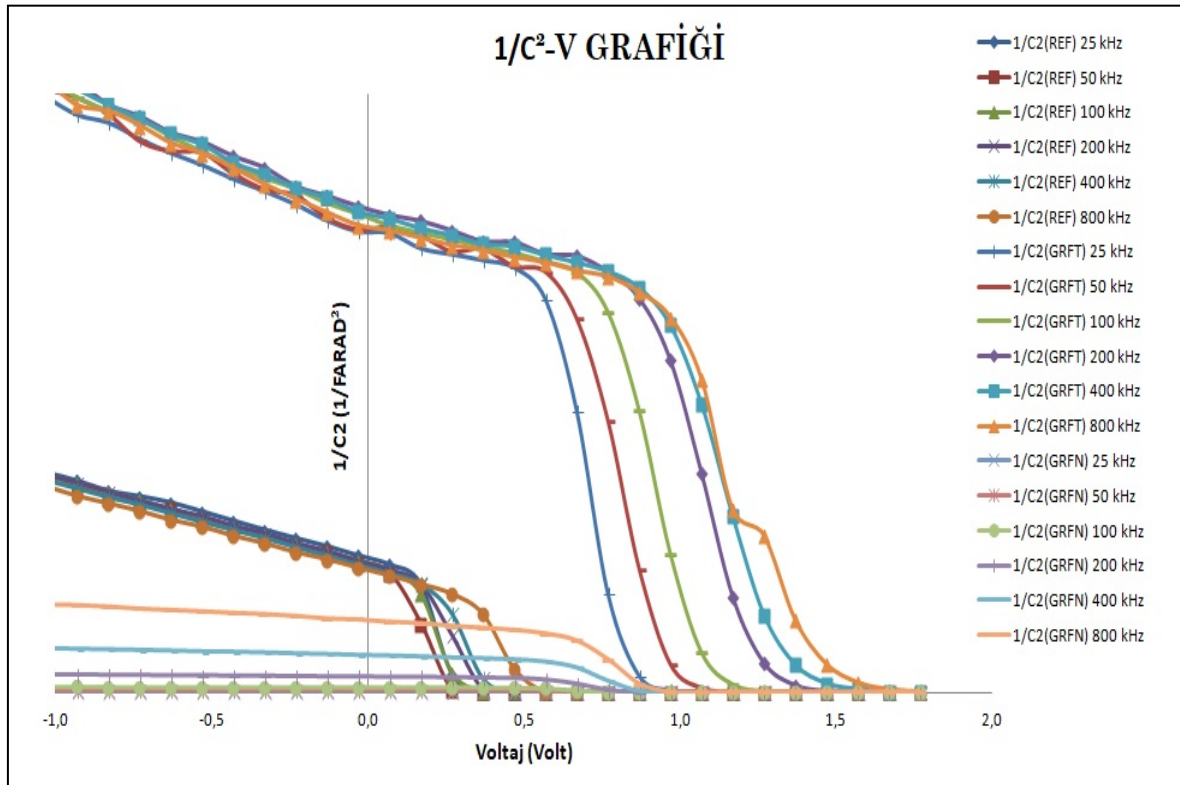
Konuyla ilgili olarak yapılan çalışmalara bakıldığında tüketim(depletion) bölgesinin bazen ters belsem, bazen düz belsem, bazen ise her iki bölgeyi de kapsayabildiği görülmüştür. Düz beslem bölgesinde yapılan hesaplamalar [52] olduğu gibi, tüketim (depletion) bölgesinin düz belsem bölgesinde olmasına rağmen hesaplamaların ters belsem bölgesinde

yapıldığı çalışmalarda mevcuttur. Şekil 4.15’de görülen C-V grafiğinde terslenim (İnversiyon) bölgesinin bulunduğu voltaj aralığında hesaplamalar yapılmıştır.

Metal, yalıtkan, yarıiletken yapısında kullanmış olduğumuz yarıiletken yapmış olduğumuz çalışmada olduğu gibi n tipi ise metale uyguladığımız voltaja göre terslenim (inversion) bölgesi Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’de görüldüğü gibi solda, biriktirme (accumulation) bölgesi sağda, yarıiletken p tipi ise bunun tam tersi olacaktır. Her iki durumda da tüketim(depletion) bölgesi ortadadır.

$1/C^2$ -V grafiğindeki lineer bölgenin eğim ve kesme noktasından aşağıda hesaplaması yapılan bazı temel parametreler hesaplandı.

Şekil 4.15’de verilen CV grafiğinin $1/C^2 - V$ grafiği Şekil 4.17.’de gösterilmiştir. Şekil 4.17’de grafikte gösterilen lineer bölgelerin eğim ve kesme noktasından yarıiletkenin kesme gerilimi (V_0 -Volt), difüzyon potansiyeli (V_d -volt), verici/serbest taşıyıcı konsantrasyonu (N_d -1/m3), doğrultucu kontağın engel/bariyer yüksekliği (ϕ_B -eV), fermi enerjisi (E_f -eV), Tüketim Tabakasının Genişliği (W_d -m) gibi parametreleri hesaplandı.



Şekil 4.17. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen katkılı hallerinin $1/C^2 - V$ grafiği

C kapasitans(farad), ϵ dielektrik sabiti (birimsiz), ϵ_0 dielektrik sabiti (farad/m), A yüzey alanı (m^2), d yüzeyler arası mesafe (m) olmak üzere $C=\epsilon\epsilon_0 \frac{A}{d}$ eşitliğinde A ve d sabit olduğu için kapasitanstaki değişimin dielektrik sabitinden kaynaklandığı açıktır. Arayüzeye yapılan katkılama dielektrik sabitini etkilemektedir.

A yüzey alanı, ϵ_s n-6H-SiC yarıiletken kristalinin geçirgenliği, N_d verici/serbest taşıyıcı konsantrasyonu, V_R geri beslem gerilimi, V_0 kesme gerilimi olmak üzere $1/C^2 - V$ eğrisinin potansiyel eksenini kestiği noktadan V_0 kesme gerilimi bulunur.

$$V_d = V_0 + \frac{k*T}{q} \quad (4.10)$$

eşitliliğinden faydalanılarak V_d (difüzyon potansiyeli) bulunur.

Schottky diyotlarında tüketim tabakası kapasitansı aşağıdaki gibidir [55].

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

Eşitlik 4.11 den faydalanılarak her iki tarafın potansiyele göre türevi alınacak olursa;

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 \left(\frac{\partial C^{-2}}{\partial V} \right)} \quad (4.12)$$

verici konsantrasyonu hesaplanabilir. Eşitlik 4.12’de parantez içerisindeki ifade $1/C^2 - V$ eğrisinin eğimidir. ($eğim = \frac{\partial C^{-2}}{\partial V}$)

Fermi seviyesi ve iletkenlik bandının minimumu arasındaki potansiyel farkı (Fermi Enerjisi);

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

Bariyer yüksekliği;

$$\Phi_{B_0}(C - V) = V_0 + V_n + \frac{kT}{q} \quad (4.14)$$

Tüketim tabakasının genişliği ise,

$$W_d = \sqrt{\frac{2e_s(V_0 + V_R)}{qN_d}} \quad (4.15)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir [37].

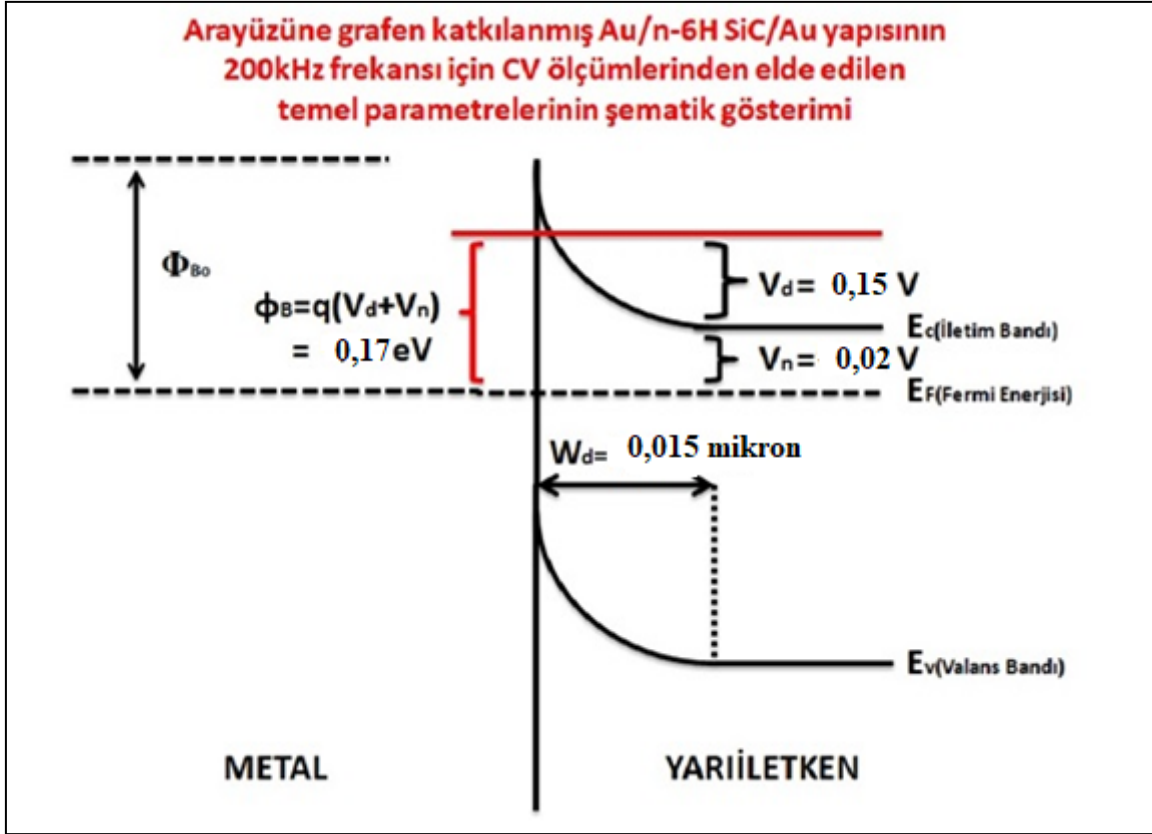
N_c ifadesi iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur. V_n ifadesinin q yükü ile çarpımından fermi enerji seviyesi bulunur.

Her üç yapının C-V ölçümleri kullanılarak hesaplanan temel parametreler Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Çizelgede Au/n-6H SiC/Au yapısı için referans, Grafen katkılı Au/n-6H SiC/Au yapısı için Grafen, Grafit katkılı Au/n-6H SiC/Au yapısı için grafit ifadesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.3. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen ara yüzü durumlarının 300 K sıcaklıkta C-V ölçümlerinden hesaplanan parametreleri

	Yapı	25 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz	800 kHz
V_0 (V)	Referans	1,76	1,55	1,70	1,62	1,62	1,62
	Grafen	6,55	16,21	17,06	9,57	6,56	5,16
	Grafit	3,74	3,78	3,76	3,81	3,75	3,69
V_d (V)	Referans	1,78	1,58	1,73	1,64	1,64	1,64
	Grafen	6,58	16,23	17,09	9,60	6,59	5,18
	Grafit	3,76	3,81	3,78	3,83	3,78	3,72
N_d (m^{-3})	Referans (Deneyisel)	9,17E+23	8,63E+23	9,17E+23	8,76E+23	8,76E+23	8,76E+23
	Referans (Teorik)	3,12E+27	3,12E+27	3,12E+27	3,12E+27	3,12E+27	3,12E+27
	Grafen (Deneyisel)	9,13E+26	7,11E+26	2,19E+26	4,23E+25	1,24E+25	5,02E+24
	Grafen (Teorik)	3,12E+27	3,12E+27	3,12E+27	3,12E+27	3,12E+27	3,12E+27
	Grafit (Deneyisel)	5,63E+23	5,59E+23	5,49E+23	5,47E+23	5,45E+23	5,47E+23
	Grafit (Teorik)	3,13E+27	3,13E+27	3,13E+27	3,13E+27	3,13E+27	3,13E+27
ϕ_B (eV)	Referans	1,90	1,70	1,84	1,76	1,76	1,76
	Referans Düzeltilmiş	0,14	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15
	Grafen	6,52	16,18	17,07	9,62	6,64	5,26
	Grafen Düzeltilmiş	1,88	3,66	1,20	0,17	0,10	0,11
	Grafit	3,89	3,94	3,91	3,97	3,91	3,85
	Grafit Düzeltilmiş	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
W_d (m)	Referans	4,51E-08	4,37E-08	4,44E-08	4,43E-08	4,43E-08	4,43E-08
	Grafen	2,76E-09	4,92E-09	9,10E-09	1,55E-08	2,37E-08	3,30E-08
	Grafit	8,39E-08	8,47E-08	8,52E-08	8,60E-08	8,54E-08	8,47E-08
E_f (eV)	Referans	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	Grafen	-0,06	-0,05	-0,02	0,02	0,05	0,07
	Grafit	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

CV ölçümlerden hesapladığımız değerleri daha anlamlı görebilmek için arayüzüne grafen katkılanmış Au/n-6H SiC/Au yapısının 200 kHz frekansı için potansiyel enerji diyagramı Şekil 4.18’da gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Arayüzüne grafen katkılanmış Au/n-6H SiC/Au yapısının 200 kHz frekansı için potansiyel enerji diyagramı

C-V Ölçümlerinden Temel Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

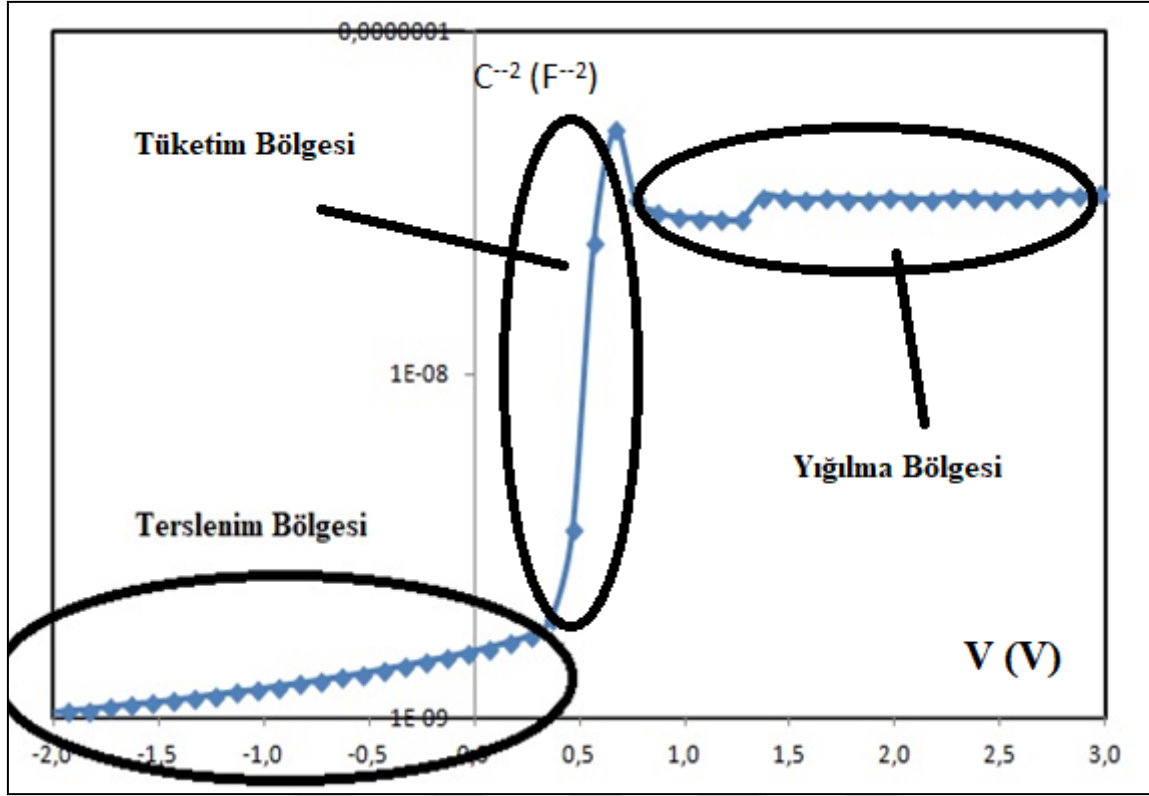
Akım voltaj ölçümlerinde olduğu gibi öncelikle numuneyi ölçtüğümüz cihazdan elde ettiğimiz dosyadaki verileri bir excell dosyasına aktarmakla başlarız. Burada dikkat edilmesi gereken husus verilerin bozulmamasıdır. Özellikle nokta virgül değişmesi, kaymaların olmaması gibi hususlar gözle birkaç kere kontrol edilmelidir. Ölçüm yapılan cihaz $1/C^2$ -V değerlerini verdiği için bu değerleri her bir frekans için excel tablosuna aktarmakla başlanır. Yapılan çalışmada frekans değişimi inceleneceği her bir frekans için elde edilen değerler excel sütunlarına işlendi. Yapılacak çalışmada bağımsız değişken ne ise benzer şekilde her bir durum için ölçümler alınır ve sonuçlar ayrı ayrı sütunlara işlenir. Referans numune (Au/n-6H SiC/Au) -2 V ve +3 V aralığında 0,1 Volt adımlarla aldığımız ölçüm sonuçları örnek olması açısından Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Au/n-6H SiC/Au yapısı için 800 kHz frekansında kapasitans ölçümleri

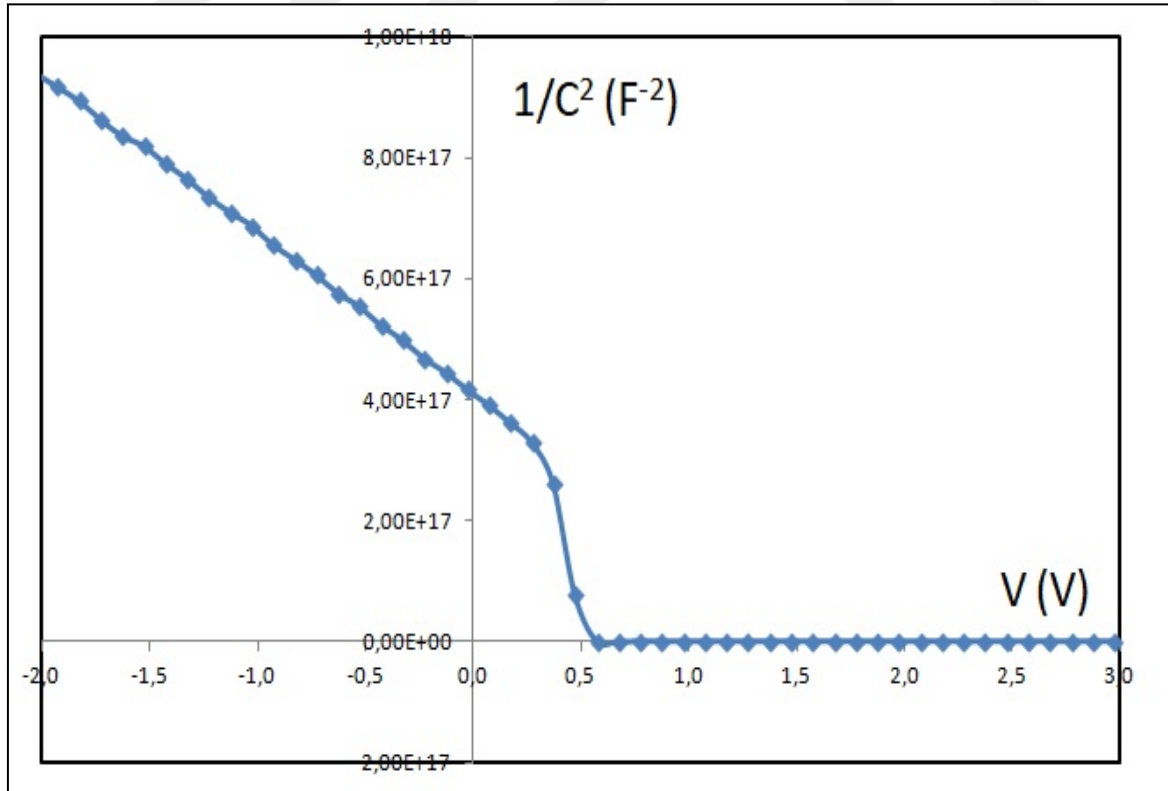
V (Volt)	1/C2 (F ⁻²)	C (Farad)	V (Volt)	1/C2 (F ⁻²)	C (Farad)	V (Volt)	1/C2 (F ⁻²)	C (Farad)
3,0	8,79E+14	3,373E-08	1,3	1,24E+15	2,843E-08	-0,4	5,24E+17	1,382E-09
2,9	9,06E+14	3,322E-08	1,2	1,24E+15	2,842E-08	-0,5	5,54E+17	1,343E-09
2,8	9,06E+14	3,323E-08	1,1	1,23E+15	2,855E-08	-0,6	5,77E+17	1,317E-09
2,7	9,27E+14	3,284E-08	1,0	1,21E+15	2,875E-08	-0,7	6,07E+17	1,284E-09
2,6	9,30E+14	3,280E-08	0,9	1,13E+15	2,980E-08	-0,8	6,32E+17	1,258E-09
2,5	9,41E+14	3,259E-08	0,8	9,59E+14	3,230E-08	-0,9	6,56E+17	1,235E-09
2,4	9,31E+14	3,277E-08	0,7	3,73E+14	5,176E-08	-1,0	6,88E+17	1,206E-09
2,3	9,23E+14	3,291E-08	0,6	1,69E+15	2,432E-08	-1,1	7,10E+17	1,187E-09
2,2	9,50E+14	3,244E-08	0,5	7,97E+16	3,543E-09	-1,2	7,35E+17	1,166E-09
2,1	9,40E+14	3,261E-08	0,4	2,62E+17	1,954E-09	-1,3	7,66E+17	1,143E-09
2,0	9,30E+14	3,279E-08	0,3	3,30E+17	1,741E-09	-1,4	7,91E+17	1,124E-09
1,9	9,51E+14	3,244E-08	0,2	3,62E+17	1,661E-09	-1,5	8,19E+17	1,105E-09
1,8	9,39E+14	3,263E-08	0,1	3,92E+17	1,598E-09	-1,6	8,36E+17	1,094E-09
1,7	9,34E+14	3,271E-08	0,0	4,17E+17	1,548E-09	-1,7	8,63E+17	1,076E-09
1,6	9,49E+14	3,246E-08	-0,1	4,46E+17	1,498E-09	-1,8	8,94E+17	1,058E-09
1,5	9,30E+14	3,280E-08	-0,2	4,69E+17	1,461E-09	-1,9	9,17E+17	1,044E-09
1,4	9,14E+14	3,308E-08	-0,3	4,99E+17	1,415E-09	-2,0	9,39E+17	1,032E-09

Kapasitans voltaj ölçümleri çizelgeye işlendikten sonra, $1/C_2$ değerleri de yan sütuna excell formülleri kullanmak suretiyle hesaplanır. Değerlerde herhangi bir bozulma olup olmadığını anlamak için kapasitans – voltaj eğrisini çizdirmek faydalı olacaktır. Burada ölçüm alınan probun yönünün önemli olduğu dikkate alınmalıdır. Şekil 4.16’da kapasitans voltaj grafiği görülmektedir. Bu grafiğe sadece referans numune için daha yakından bakalım. Şekil 4.19’de terslenim (İnversiyon) bölgesi, tüketim (depletion) bölgesi ve yığılma (accumulation) bölgesi görülmektedir. Şekilde görüleceği üzere tüketim bölgesi çok dar bir voltaj aralığında bulunmaktadır. Terslenim (İnversiyon) bölgesinde diyottan akım akmayacağı için kapasitans sadece gerilime bağlıdır. Bu nedenle kapasitans voltaj ölçümlerinde terslenim bölgesi kullanılmıştır.

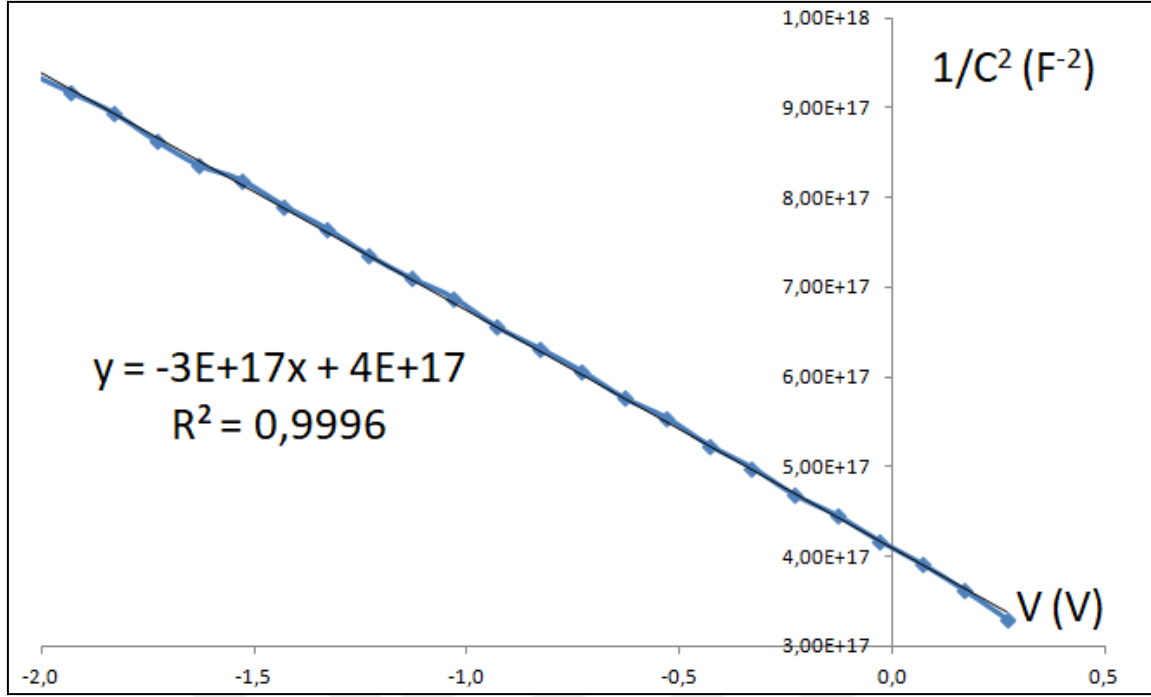
Şekil 4.20’deki $1/C_2 - V$ grafiği incelendiğinde terslenim ve tüketim bölgelerinin voltaj aralığına denk gelen iki farklı lineer bölge olduğu görülür. Voltaj aralığının seçimi hesaplanan temel parametreler için en önemli husustur.



Şekil 4.19. Au/n-6H SiC/Au yapısının 800 kHz frekansında C-V grafiği



Şekil 4.20. Au/n-6H SiC/Au yapısının 800 kHz frekansında $1/C^2 - V$ grafiği



Şekil 4.21. Au/n-6H SiC/Au yapısının 800 kHz frekansında tüketim bölgesinin $1/C^2 - V$ grafiği

Şekil 4.21’ de doğrunun potansiyel eksenine uzatılmasıyla, potansiyel eksenini kestiği noktadan kesme gerilimi (V_0) bulunur.

Eşitlik 4.10’da gösterildiği gibi kesme gerilimine $\frac{k*T}{q}$ değerinin eklenmesi ile difüzyon potansiyeli elde edilir. Serbest taşıyıcı yoğunluğunu bulmak için ise Eşitlik 4.12’de ki $\frac{\partial C^{-2}}{\partial V}$ ifadesi yerine Şekil 4.21’de verilen doğrunun eğimi kullanılır. Bariyer yüksekliği ise Eşitlik 4.14 ile hesaplanır. Hesaplanan bariyer yükseklikleri çok yüksek değerlerde çıktığı için düzeltme çarpanı ile çarpılmıştır.

Verici konsantrasyonun teorik değeri, q yük, μ mobilite ve ρ öz direnç olmak üzere,

$$N_d = \frac{1}{q\mu\rho} \quad (4.16)$$

eşitliği hesaplanabilir. n-6H-SiC için $\mu=400\text{cm}^2/\text{Volt*saniye}$, $\rho=5,00\text{E-6 ohm*cm}$ alınırsa, $N_d(\text{teorik})=3,12\text{E+21 cm}^{-3}$ olarak hesaplanır.

$$\text{Düzeltilme Çarpanı} = \frac{N_{deneysel}}{N_{teorik}} \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.17 den 800 kHz de referans numune için düzeltme çarpanı 0,0003 olarak hesaplanmıştır. Her bir numune ve frekans değerleri için Eşitlik 4.14 den bariyer yükseklikleri hesaplanırken V_0 kesme gerilimi düzeltme çarpanları ile çarpılarak kabul edilebilir düzeye indirgenmiştir.

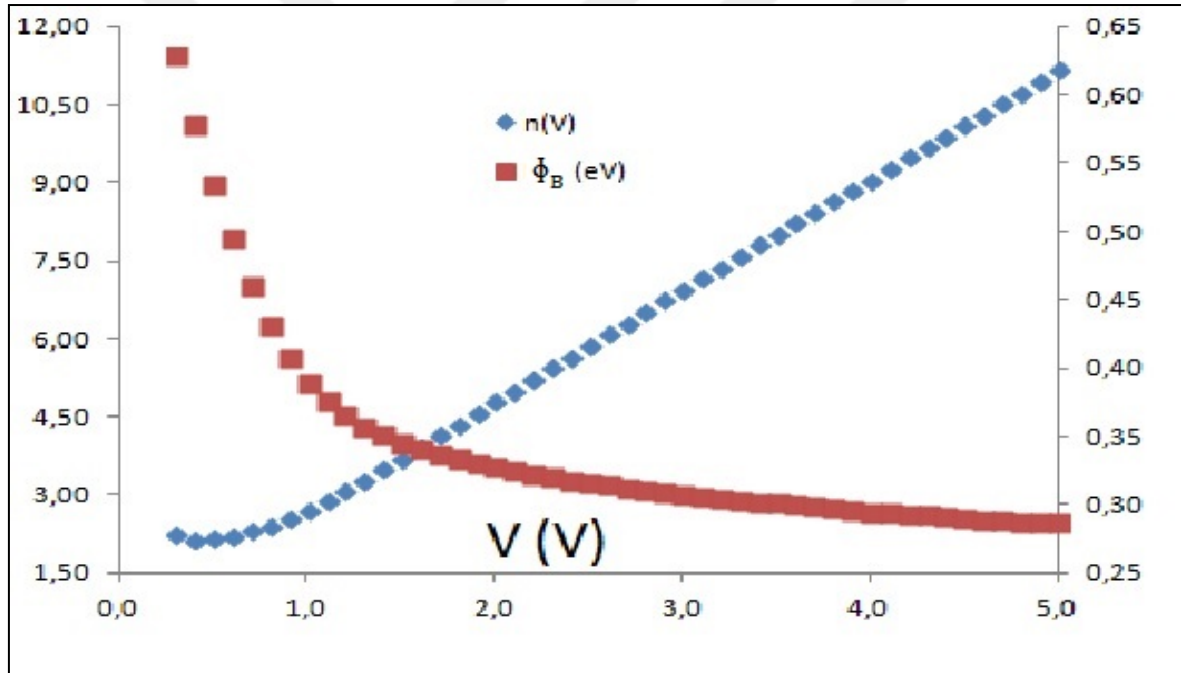
Konuyla ilgili olarak tüketim bölgesinin düz belsem bölgesinde yapılan çalışmalarda olduğu için dar bir voltaj aralığı olan tüketim bölgesindeki lineer bölge kullanılarak düzeltme faktörü kullanmadan temel parametreler fikir vermesi açısından hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5. Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafit/grafen ara yüzü durumlarının 300 K sıcaklıkta tüketim bölgesinde C-V ölçümlerinden hesaplanan parametreleri

	Yapı	25 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz	400 kHz	800 kHz
V_0 (V)	Referans	0,30	0,25	0,27	0,35	0,45	0,45
	Grafen	0,80	0,50	0,71	0,50	1,00	1,00
	Grafit	1,00	1,00	1,25	1,33	1,33	1,50
V_d (V)	Referans	0,33	0,28	0,29	0,38	0,48	0,48
	Grafen	0,83	0,53	0,74	0,53	1,03	1,03
	Grafit	1,03	1,03	1,28	1,36	1,36	1,53
N_d (cm^{-3})	Referans	7,94E+16	1,19E+17	7,94E+16	1,19E+17	1,19E+17	1,19E+17
	Grafen	4,77E+19	1,19E+19	3,40E+18	1,19E+18	5,96E+17	3,40E+17
	Grafit	5,96E+16	5,96E+16	5,96E+16	7,94E+16	7,94E+16	1,19E+17
Φ_B (eV)	Referans	0,51	0,45	0,47	0,55	0,65	0,65
	Grafen	0,84	0,58	0,82	0,64	1,16	1,17
	Grafit	1,22	1,22	1,47	1,54	1,54	1,70
W_d (cm)	Referans	6,33E-06	4,72E-06	5,97E-06	5,58E-06	6,33E-06	6,33E-06
	Grafen	4,22E-07	6,67E-07	1,49E-06	2,11E-06	4,22E-06	5,58E-06
	Grafit	1,33E-05	1,33E-05	1,49E-05	1,33E-05	1,33E-05	1,16E-05
E_f (eV)	Referans	0,18	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17
	Grafen	0,02	0,05	0,08	0,11	0,13	0,14
	Grafit	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17

Akım voltaj ve kapasitans voltaj ölçümlerinden elde edilen parametreleri toparlayacak olursak, akım voltaj ölçümleri için ileri belsem bölgesinde seri dirence uzak olan alan yani sıfır noktasına yakın bölüm kullanılmıştır. Seri direncin etkisi ile lineer bölgeden uzaklaşılacaktır. Şekil 4.22 de lineer olmayan bölgede idealite faktörünün ve engel yüksekliğinin sabit olmadığı voltaja bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

Kapasitans voltaj ölçümleri için ise terslenim bölgesindeki lineer bölge kullanılmış özellikle bariyer yüksekliğinin bazı frekanslarda çok büyük çıkması dolayısı ile düzeltme faktörü kullanılarak gerekli düzenleme yapılmıştır. Aynı zamanda tüketim bölgesine karşılık gelen diğer dar lineer bölge kullanılarakda aynı parametreler fikir vermesi açısından hesaplanmıştır.



Şekil 4.22. Au/n-6H SiC/Au yapısının lineer olmayan bölgesi için voltaja bağlı idealite sabiti ve engel yüksekliği değişimi



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Referans numune için 300 K'de I-V ölçümlerinden hesaplanan sonuçlar Çizelge 5.1'de görüleceği üzere daha önce yapılan çalışmalara yakındır [51,52]. Aradaki ihmal edilebilir fark fabrikasyon sürecinden, temizlik aşamasından ve ölçüm hassaslığından kaynaklanıyor olabilir. Ara yüzey durumları bariyer yüksekliğinin homojen olmamasına neden olmaktadır ve elektronlar düşük bariyer yüksekliğinin olduğu bölgeleri tercih ederler.

Çizelge 5.1. Au/n-6H SiC/Au yapısının 300K sıcaklıkta karanlıkta I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri

	I_o Doyma Akımı (Amper)	n İdealite Faktörü	Φ_{Bo} engel yüksekliği (ev)
Yaptığımız Çalışma	2,86E-08	2,14	0,75
Kaya vd. 2015	1,95E-08	1,91	0,76
Güzel vd. 2018	3,66E-07	2,1	0,68

Grafen ve benzeri yapıların değişik alt taşlar üzerindeki etkisi ile ilgili yapılan çalışmalara bakılacak olursa;

Halil Özerli ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmasında [66]; Ag/NiO-GO/p-Si/Al Schottky diyonu üretilmiş ve akım voltaj ölçümlerinden (I-V grafiğinden) bariyer yüksekliği karanlıkta $\Phi_b = 0.903$ eV, ılık şiddeti altında $\Phi_b = 0.887$ eV ve idealite faktörü karanlıkta $n=4.522$, ılık şiddeti altında $n=4.381$ olarak ifade edilmiştir. Yapılan çalışmada katkısız bir yapı ile karşılaştırma yapılmadığı için kesin olarak söylenemese bile bu değerler grafen katkılı yapı için karanlıkta ve ılık altında özellikle idealite faktörü açısından kararlı bir durum gözlemlendiğinin göstergesidir.

Ayrıca Halil Özerli ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 10 kHz ile 1 MHz frekans aralığında alınan kapasitans voltaj ölçümlerinden ılık altında Φ_c-v değerlerinin $\Phi_c-v=0,785$ eV- 1,658 eV ve karanlıkta $\Phi_c-v=0,601$ eV-1,473 eV arasında değiştiği, frekansın artmasıyla engel yüksekliğinin arttığı ifade edilmiştir. Frekansın artmasıyla engel yüksekliğinin artması benzer bir sonuçtur.

Kürşat Ekiz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [67]; Au/n-GaP diyonu ve arayüzüne karbon nanotüp katkılanmış hali 300 K ve 390 K sıcaklığı arasında karşılaştırılmış akım voltaj ölçümlerinden (I-V grafiğinden) idealite faktörünün 2,64 ve 1,21 arasında, engel yüksekliğinin ise 0,87 eV ve 1,07 eV arasında değiştiği ifade edilmiştir. Ara yüzeyine karbon nanotüp katkılanmış hali (Au/MWCNT/n-GaP) için ise 300 K ve 390 K sıcaklığı arasında idealite faktörünün 2,44 ve 1,20 arasında değiştiği, engel yüksekliğinin 0,86 eV ve 1,05 eV arasında değiştiği ifade edilmiştir. Ara yüzeye karbonun bir allotropu olan karbon nanotüp katkılanmak doyma akımı bir miktar arttırmış, idealite faktörünü azaltmış, bariyer yükseklikleri ise yakın değerlerde elde edilmiştir.

Dilara Şema Şirin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [68]; Au/4H n-SiC MY Schottky diyot için 300 K sıcaklıkta doyma akımının 5.08×10^{-9} A, bariyer yüksekliğinin 0.81 eV ve idealite faktörünün 1,1 olarak bulunduğu/hesaplandığı ifade edilmiştir. Bu değerler aynı sıcaklıkta, karanlıkta, Au/n-6H SiC/Au yapısı için hesapladığımız değerlere (2,86E-08 A doyma akım, 0,75 ev bariyer yüksekliği) yakındır.

Hüseyin EZGİN ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [12]; Au/MWCNT/n-6H-SiC/Au Schottky bariyer diyotu için 300 K sıcaklıkta akım voltaj ölçümlerinden (I-V grafiğinden) doyma akımının $1,34 \times 10^{-6}$ A, bariyer yüksekliğinin 0.76 eV ve idealite faktörünün 1,64 olarak bulunduğu/hesaplandığı ifade edilmiştir. Kapasitans voltaj ölçümlerinden ise 300 K sıcaklıkta 1 MHz frekansta engel yüksekliğinin 1,38ev olarak hesaplandığı ifade edilmiştir. Bu değer bizim aynı sıcaklıkta 800 kHz frekansında tüketim bölgesini kullanarak Au/ grafen /n-6H-SiC/Au (1,17 eV) ve Au/ grafen /n-6H-SiC/Au (1,70 ev) için hesapladığımız değer aralığındadır.

Tamer GÜZEL ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [69]; Au/6H-SiC/Au diyotu için 300K sıcaklıkta akım voltaj ölçümlerinden (I-V grafiğinden) doyma akımının 3,66E-07A, bariyer yüksekliğinin 0.682 eV ve idealite faktörünün 2,6 olarak bulunduğu/hesaplandığı ifade edilmiştir. Bu değerler aynı sıcaklıkta Au/n-6H SiC/Au hesapladığımız değerlere (2,86E-08 A doyma akımı, 2,14 idealite faktörü, 0,75 eV bariyer yüksekliği) yakındır.

Gizem KOCA ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [70]; Grafen-pvp/n-si schottky bariyer diyotun fabrikasyonu yapılmış ve 5 kHz ile 5000 kHz frekans aralığında elektronik

parametreleri hesaplanmıştır. 700 kHz frekansında engel yüksekliği 1,368 eV olarak hesaplanmıştır. Diğer frekans hesaplamaları sonucunda frekans arttıkça engel yüksekliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Au/grafen/n-6H SiC/Au yapısı için 800 kHz de tüketim bölgesinde yaptığımız hesaplamada engel yüksekliği 1,17 eV olarak hesaplanmış, benzer şekilde frekans arttıkça engel yüksekliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

Esra Evcin Baydilli ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [58]; Au/PVA/n-GaAs schottky bariyer diyotun fabrikasyonu yapılmış 300K sıcaklıkta akım voltaj ölçümlerinden (I-V grafiğinden) doyma akım $1,09E-04$ A, idealite faktörü 7,64 ve engel yüksekliği 0,46 eV olarak hesaplanmıştır.

Aynı zamanda Esra Evcin Baydilli ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada karşılaştırma yapılabilmesi adına güzel bir örnek olması açısından Au/%7 Gr-katkılı PVA/n-GaAs schottky bariyer diyotun fabrikasyonu yapılmış doyma akım $1,18E-07$ A, idealite faktörü 5,13 ve engel yüksekliği 0,637 eV olarak hesaplanmıştır. Bu değerler yaptığımız çalışmada grafen için elde ettiğimiz değerlere (doyma akım $8,13E-06$ A, idealite faktörü 5,8 ve engel yüksekliği 0,6 eV) yakındır.

Au/n-6H SiC/Au yapısının ve ara yüzeyine grafit ve grafen katkılı hallerinin C-V ölçümlerinden elde edilen bariyer yüksekliklerinin frekansa bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Çoğunlukla, hesaplanan bariyer yüksekliği değerleri frekans ile doğru orantılı olup, düzeltme çarpanı kullanılmadan C-V ölçümlerinden hesaplanan değerler I-V ölçümlerinden elde edilen değerden büyük olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmada referans numuneye grafen katkılamanın (grafen katkılı arayüzey kullanmanın) idealite faktörünü ve doyma akımını arttırdığı gözlenmiştir. Benzer bir çalışmada Au/n-Si referans yapısı için grafen katkılamanın idealite faktörünü 3,32 den 6,04'e çıkarttığı hesaplanmıştır [53]. Bu çalışmada Au/n-6H SiC referans yapısı ve arayüzeyine grafen katkılı durumu için idealite faktörünü sırasıyla 2,14 ve 5,80 olarak hesaplanmıştır.

Au/n-6H SiC referans yapısına grafit katkılamanın ise yapının elektriksel özelliklerini ciddi miktarda iyileştirdiği Çizelge 4.1 den görülmektedir. Benzer bir çalışmada Au/n-Si referans yapısı için grafit katkılamanın yüksek performans özelliklerine sahip arayüz

katmanı olarak başarıyla kullanılabileceğini belirtilmiştir [54]. Yapılan çalışma sonucunda Au/n-6H SiC/Au yarıiletken yapısının elektriksel özelliklerini iyileştirme noktasında grafit'in olumlu etki yaptığı gözlemlenmiştir. Grafen ise beklenenin aksine doyma akımını ve idealite faktörünü arttırmış, engel yüksekliğini azaltmıştır. Bu durum raman spektrumunda görülen kirliliğe atfedilmiştir. Doğası gereği grafeni saf halde tutmanın grafitten daha zor olduğu bu nedenle saf grafen kullanımının maliyet açısından anlamlı olmadığı durumlarda grafitin daha iyi bir alternatif olacağı sonucuna varılmıştır.

Numunelerin I-V ölçümlerinden grafit ve grafen katkılmanın yapıyı karanlık ve ışık altında daha kararlı/benzer/stabil hale getirdiği görülmektedir. Referans numuneye yapılan katkılama I-V ölçümlerinden görüleceği üzere tetikleme voltajını bir miktar arttırırsa da numuneleri doyma akımı ve doğrultma oranları üzerinden değerlendirildiğinde grafit katkılamanın hem ışık altında hem de karanlıkta doyma akımını azalttığı, doğrultma oranını arttırdığı görülmüştür.

Konuyla ilgili olarak yurt dışı kaynaklı yapılan çalışmalarda akım voltaj ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2'de görülmektedir.

Çizelge 5.2. Grafen ve grafit ara yüzü bazı yarı iletkenlerin I-V ölçümlerinden hesaplanan elektriksel parametreleri

Cihaz	Φ_{Bo} engel yüksekliği (ev)	n İdealite Sabiti (birimsiz)	Kaynak
Yaptığımız Çalışma Grafen/n-6H SiC	0,6	5,8 - 5,89	
Yaptığımız Çalışma Grafit/n-6H SiC	0,84 – 0,85	2,82 – 2,87	
Grafen/n-4H SiC	0,91	1,2 - 5	[71]
Grafen/n-4H SiC	0,36 – 0,85	bilgi yok	[72]
Grafit/ n-4H SiC	1,15	bilgi yok	[73]
Grafen/n-Si	0,41	4,8 – 7,69	[74]
Grafit/n-Si	0,40	1,25 – 2,0	[73]
Grafen/n-Si	0,71	3,7	[75]
Grafen/n-Si	0,62	1,08	[76]
Grafen/p-Si	0,44	29,67 – 33,5	[74]
Grafen/p-Si	0,652	4,88	[75]
Grafen/p-Si	0,74	1,31	[77]

Çeşitli alt taşlar üzerine grafen ve grafit ile yapılan metal yarı iletken kontakların bariyer yükseklikleri ve idealite faktörü Çizelge 5.2’de görülmektedir. Bu tabloyu aynı alt taşlar ve farklı alt taşlar için çok fazla uzatmak mümkündür. Fakat aynı alt taşlar ve benzer ara yüzeyler için bile sonuçların, numunelerin fabrikasyon sürecine, ölçüm tekniklerine ve ara yüzey numunenin değişkenlerine hatta hesaplama yöntemlerine bile bağlı olarak farklılıklar göstereceği açıktır. Fabrikasyon ve ölçüm standardının olmaması sonuçları doğrudan karşılaştırmayı çok anlamlı kılmamaktadır. Çizelge 5.2 hem fikir vermesi hem de bu durumu ortaya koyması açısından paylaşılmıştır.

Grafenin ve grafitin yapısının farklı olması nedeni ile diyot performansı üzerindeki etkisinin de farklı olması beklenen bir durumdur. Ara yüzey düzleşmesi ve ek doping nedeni ile grafenin yüksek frekans uygulamalarında daha iyi bir seçenek olacağı, ara yüzey direncinin azaltılması dolayısı ile yüksek akım ve gerilim uygulamalarında ise grafitin daha iyi bir seçenek olacağı düşünülmekle birlikte, fabrikasyonu yapılan cihazın üretim yöntemi ve test koşullarından etkilenebileceğini unutmamak gerekir.

Au/n-6H SiC/Au yapısının ve grafen / grafit katkılı (ara yüzölçümü) hallerinin aynı çalışma kapsamında karşılaştırılması bu açıdan önemlidir. Bunun nedeni tüm fabrikasyon sürecinde ve ölçüm aşamasında her üç numune için de yeknesaklığın benzer çalışmalara oranla daha fazla sağlanmış olmasından dolayıdır. Az veya çok hata payı ve gerçek değerlerden sapma her üç numune için de aynıdır. Örneğin yapılan çalışmada özellikle grafen için beklenen değerlerden sapma grafenin tek katmanlı yapısına atfedilmiş bu nedenle ara yüzey durumlarının daha fazla etkili olabileceği grafitin ise doğası gereği ara yüzey durumlarından daha az etkilenebileceği ile açıklanmıştır. Aslında bir numunenin/yapının hangisinin daha iyi olduğu onun kullanılış amacına bağlıdır. Örneğin ara yüzey durumlarından etkilenmeyecek şekilde saf grafen kullanımının maliyet açısından anlamlı olmadığı durumlarda grafit alternatif olarak kullanılabilir. Bu nedenle referans yapının ara yüzeyine katılanan (ara yüzeyde kullanılan) grafen ve grafitin temel parametrelerine olan etkisi ihtiyaç duyulan malzemenin kullanılış amacına uygun olarak değerlendirilmelidir.



KAYNAKLAR

1. Tan, S. O. (2018). Schottky yapılar üzerine inceleme ve analiz çalışması. *Journal of Polytechnic*, 21(4), 977-989
2. Kanbur, H., Altındal, S., Tataroğlu, A., (2005). The effect of interface states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes. *Applied Surface Science*, 252(5), 1732 – 1738.
3. Karadeniz, S., Tugluoglu, N., Serin, T., (2004). Substrate temperature dependence of series resistance in Al/SnO₂/p-Si (111) Schottky diodes prepared by spray deposition method. *Applied Surface Science*, 233(1-4), 5-13.
4. Braun, F. (1874). Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle. *Annual Review of Physical Chemistry*, 153, 556-563.
5. Schottky, W. (1938). Halbleitertheorie der sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 25, 843.
6. 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.
7. Becquerel, E. (1853). Rescherches Sur La Transmission De L'Electricite Au Travers Des Gaz A Des Temperatures Elevees, *Annales de Chimie et de Physique*, 39-48
8. Gökçen, M. (2008). *Au/SiO₂/n-GaAs (MOY) yapıların elektrik ve dielektrik karakteristiklerinin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-8.
9. Nevill M, (1938). The contact potential between a metal and a semiconductor, *Proceedings of the Royal Society of London A*, 165(921), 391-399.
10. Shockley, W. , (1949). The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junctions in transistors, *Bell System Technical Journal*, 28(3), 435-489.
11. Aydoğan, Ş. (2015). *Katıhal Elektroniği*. Ankara, NobelYayın.
12. Ezgin, H. (2022). *n-6H-SiC Yarıiletken tabanlı çok duvarlı karbon nanotüp arayüzlü schottky diyot üretimi ve karakteristiklerinin belirlenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 35-40.
13. Edison, T. A., (1884). *Method and apparatus for scanning and object and correcting image data using concurrently generated illumination data*, United States Patent 307031.
14. Bethe, H. A. (1942). *Theory of the boundary layer of crystal rectifiers: Radiation laboratory*. Massachusetts Institute of Technology, 42-12.
15. Neamen, D.A. (2012). *Semiconductor Physics and Devices*(4rd Edition). The McGraw-Hill Companies, 342-345.
16. Sze, S. M. and Lee M. K. (2007). *Physics of semiconductor devices* (3rd Edition). New York: John Wiley & Sons, Inc., 175.

17. Wiemneri, J. C., (1995). *Electrical characterization of 4H- and 6H-silicon carbide schottky diodes*. Yüksek Lisans Tezi, Department of the Air Force, Air University, Ohio, 31-38.
18. 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.
19. 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.
20. Uğurlu, H. A., (2022). Ti/ p-Si Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi için I – V Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(1), 158-167.
21. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053.
22. Bohlin, K. E. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-1224.
23. Güllü, Ö. (2008). *H₂ ön tavlama Au/n-GaAs diyotlarda elektriksel karakteristiklerin schottky metal kalınlığı ve sıcaklığa bağlı değişiminin incelenmesi*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
24. Gülnahar, M., (2008). *Al-Au/GaTe schottky yapıların sıcaklığa bağlı akım-gerilim ve kapasite-gerilim karakteristikleri*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
25. Badalı, Y., (2019). *Farklı x materyaller kullanılarak au/(bi₂o₃-x:pva)/4H sic yapıların hazırlanması, elektriksel ve dielektrik özelliklerin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
26. Bunget, I. and Popescu, M. (1984). *Physics of solid dielectrics*. Amsterdam, Elsevier.
27. Zawrah, M.F. & Shaw, L. (2003). Liquid-phase sintering of SiC in presence of CaO, *Ceramics International*, 30(5), 721-725.
28. Kimoto, T. and Cooper, J. A. (2014). *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*. Singapore: John Wiley & Sons, Pte.
29. Saito, R., Dresselhaus, G. and Dresselhaus M. S. (1998). *Physical properties of carbon nanotubes*. Imperial College Press, London.
30. Geim, A. K. and Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene, *Nature Mat.* 6, 183-190.
31. Wallace, P. R. (1947). The band theory of graphite. *Physical Review*, 71, 622.
32. Saito, R., Dresselhaus, G. and Dresselhaus M. S., (1998). *Physical properties of carbon nanotubes*. Imperial College Press, London.
33. McCann, E. (2012). Electronic properties of monolayer and bilayer graphene. *Graphene Nanoelectronics*, 237–275.

34. Raza, H. (2012). Metrology, Synthesis, Properties and Applications. *Graphene Nanoelectronics*, London, Springer Verlag.
35. Akay, D. (2016). *Grafen tabanlı nano yapılarda topolojik etkiler*. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
36. Ezgin H., Demir E., Acar S., Özer M., 2022. Investigation of temperature-dependent electrical parameters in a Schottky barrier diode with multi-walled carbon nanotube (MWCNT) interface. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 147, 2-3.
37. Neto, A. H. C., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S. and Geim, A. K., (2009). The electronic properties of graphene. *Rev. Mod. Phys.* 81, 109.
38. Zant, P.V., (2004). *Microchip Fabrication*. New York, The McGraw-Hill Companies.
39. Axelevitch A., Golan G. (2013). Hot-Probe Method For Evaluation Of Majority Charged Carriers Concentration In semiconductor Thin Films. *Electronics and Energetics*, 26, 187–195.
40. Dişlitaş S., Yanmaz H., Ömer G., Ahıska R. (2019). Termoelektrik yarıiletkenlerin P-N elektriksel iletkenlik tipinin belirlenmesine yönelik çok fonksiyonlu prob tasarımı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(2), 151-156
41. Kantar, B.B. (2015). *Grafen esaslı elektronik devre elemanlarının elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi*. Doktora Lisans Tezi, Erciyesi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
42. Sönmezoğlu S., Koç M., Akın S. (2012). İnce filim üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5):389-401
43. İnternet: SiO₂ Color Chart for thermally grown silicon dioxide. URL: http://www.htelabs.com/appnotes/sio2_color_chart_thermal_silicon_dioxide.htm, Son Erişim Tarihi: 24.01.2024.
44. İnternet: Thermal Oxidation of Silicon. URL: https://www.microchemicals.com/products/wafers/wafers_sinx_si3n4_sio2.html, Son Erişim Tarihi: 24.01.2024.
45. Bacherikov Y.Y., Goroneskul v.Y., Gudymenko O.Y., Kladko V.P., Kolomys O.F., Krishchenko I.M., Okhrimenko O.B., Strelchuk V.V., (2020). Influence of microwave radiation on relaxation processes in silicon carbide. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 23(2), 175-179.
46. Ayhan M.E., Gür B., (2020). Yüzeyi kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle grafen kaplanmış gümüş yüzeyin yansıtma ve ıslatabilme özelliklerinin incelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 141-148.
47. Bunch J.S., Zande A.M., Verbridge S.S., Frank I.W., Tanenbaum D.M., Parpia J.M., Craighead H.G., McEuen P.L., (2007). Electromechanical resonators from graphene sheets. *Science*, 315, 490-493.
48. Zhenhua N., Yingying W., Ting Y., Zexiang S.,(2008). Raman Spectroscopy and Imaging of Graphene. *Nano Res.* 1, 273-291

- 49 Wang Y.Y., Ni Z.H., Shen Z.X., Wang H.M., Wu Y.H., 2008. Interference enhancement of Raman signal of graphene. *Appl. Phys. Lett.*, 92, 043121.
- 50 Kumar A.A., Rao L.D., Reddy V.R., Choi C.J., 2013. Analysis of electrical characteristics of Er/p-InP Schottky diode at high temperature range. *Current Applied Physics*, 13(6), 975-980.
- 51 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.
- 52 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.
- 52 Sönmezoğlu S., Akın S. 2011. Kapasitans-Voltaj (C-V) Yöntemiyle Sb Katkılı TiO₂ / n-Si MIS Yapının Seri Direnç Parametresinin Hesaplanması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 011101 (1-8)
- 53 Tataroğlu A., Altındal Ş. and Kalandaragh Y.A., 2021. Electrical characterization of Au/n-Si (MS) diode with and without graphene-polyvinylpyrrolidone (Gr-PVP) interface layer. *J Mater Sci: Mater Electron*, 32, 3451–3459.
- 54 Demirezen S., Altındal Ş., Kalandaragh Y.A., Akbaş A.M., 2022. A comparison of Au/n-Si Schottky diodes (SDs) with/without a nanographite (NG) interfacial layer by considering interlayer, surface states (N_{ss}) and series resistance (R_s) effects. *Physica Scripta*, 97 (5).
- 55 Rhoderick E. H. and Williams, R. H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press.
- 56 Torğut G., Gürler N., 2021. Grafen Katkılı Nişasta Filmlerinin Dielektrik Özelliklerinin Geniş Frekans Aralığında İncelenmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 1393-1401.
- 57 Kao, K. C., (2004). *Dielectric phenomena in solids with emphasis on physical concepts of electronic processes*, California, Elsevier Academic Press. 92101-4495.
- 58 Baydilli, E. E., (2020). *Saf ve grafen katkılı pva arayüzey tabakalı metal-yarıiletken diyotların akım-iletim mekanizmalarının sıcaklığa bağlı incelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- 59 Tecimer, H., (2014). *Au/(Zn-katkılı) Polivinil Alkol/n-GaAs Yapıların Hazırlanması ve Akım-İletim Mekanizmalarının Geniş Bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- 60 Novoselov, K.S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T.J., Khotkevich, V.V., Morozov, S.V., Geim, A.K., (2005). Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 (30): 10451-10453.
- 61 Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V., Firsov, A.A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306 (5696): 666-669.

62. Ferrari, A.C., Meyer, J.C., Scardaci, V., Casiraghi, C., Lazzeri, M., Mauri, F., Piscanec, S., Jiang, D., Novoselov, K.S., Roth, S., Geim, A.K., (2006). Raman spectrum of graphene and graphene layers. *Physical Review Letters*, 97 (18): 187401-4.
63. Graf, D., Molitor, F., Ensslin, K., Stampfer, C., Jungen, A., Hierold, C., Wirtz, L., (2007). Spatially resolved raman spectroscopy of single- and few-layer graphene. *Nano Letters*, 7 (2): 238-242.
64. Ölmez, H., Yılmaz, V.T. (2004). *Anorganik Kimya Temel Kavramlar*, Bursa, Marmara Kitap Merkezi, 516.
65. Roberts, M.W., Clemons, C.B., Wilber, J.P., Young, G.W., Buldum, A., Quinn, D.D. (2010). Continuum Plate Theory and Atomistic Modeling to Find the Flexural Rigidity of a Graphene Sheet Interacting with a Substrate. *Journal of Nanotechnology*, 2010: 868492-8.
66. Özerli, H. (2017). *Yüksek performanslı metal-yarıiletken schottky diyotların elde edilmesi için yeni nesil nano yapılı grafen esaslı kompozit malzemelerin üretilmesi*. Doktora Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
67. Ekiz, K. (2021). *Karbon nanotüp arayüzeyli n-gap schottky diyot üretilmesi ve akım iletim mekanizmasından parametrelerinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
68. Şirin, D. S. (2021). *Au/4h n-sic schottky diyotların sıcaklığa bağlı akım iletim mekanizmasının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hitit üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çorum.
69. Güzel, T. (2015). *6h-sic tabanlı schottky diyotların hazırlanması ve geniş sıcaklık aralığında elektriksel parametrelerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
70. Koca, G. (2022). *Geniş frekans aralığında dikey grafen-pvp/n-si schottky bariyer diyotun üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
71. Tongay S., Lemaitre M., Miao X., Gila B., Appleton B.R., Hebard A.F., (2012). Rectification at Graphene-Semiconductor Interfaces: Zero-Gap Semiconductor-Based Diodes, *Phys. Rev. X*, 2 011002
72. Sonde S., Giannazzo F., Raineri V., Yakimova R., Huntzinger J.R., Tiberj A., Camassel J., (2009). Electrical properties of the graphene/4H-SiC (0001) interface probed by scanning current spectroscopy, *Phys. Rev. B* 80 241406
73. Tongay S., Schumann T., Hebard A.F., (2009). Graphite based Schottky diodes formed on Si, GaAs, 4 H-SiC substrate, *Appl. Phys. Lett.* 95222103
74. Chen C.C., Aykol M., Chang C.C., Levi A. F. J., Cronin S. B., (2011). Graphene-Silicon Schottky Diodes, *Nano Lett.* 11 1863-1867

- 75 Zhang T., Nix M.B., Yoo B.Y., Deshusses M.A., Myung N. V., (2006). Electrochemically functionalized single-walled carbon nanotube gas sensor, *Electroanalysis*, 18, 1153-1158
- 76 Sinha D., Lee J. U., (2014). Ideal Graphene/Silicon Schottky junction diodes, *Nano Lett.* 14 4660-4664
- 77 Singh A. K., Uddin M. A., Tolson J. T., Maire-Afeli H., Sbrockey N., Tompa G.S., Spencer M.G., Vogt T., Sudarshan T. S., Koley G., (2013). Electrically tunable molecular doping of graphene, *Appl. Phys. Lett.* 102 043101
- 78 İnternet: Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkez Araştırma Labratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi. URL: <https://aybu.edu.tr/merlab/tr/sayfa/2839>, Son Erişim Tarihi: 24.01.2024.





Gazili olmak ayrıcalıktır