



**N-TİPİ 6H-SiC TABANLI POLİMER ARAYÜZEYLİ SCHOTTKY
DİYOTLARININ ÜRETİLMESİ VE ELEKTRONİK
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Hayati ALTAN

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2020

Hayati ALTAN tarafından hazırlanan “N-TİPİ 6H-SiC TABANLI POLİMER ARAYÜZEYLİ SCHOTTKY DİYOTLARININ ÜRETİLMESİ VE ELEKTRONİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Metin ÖZER

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Tuncer HÖKELEK

Fizik Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Bora ALKAN

Fizik Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Tefik Raci SERTBAKAN

Fizik Ana Bilim Dalı, Ahi Evran Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 14/02/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Hayati ALTAN

14/02/2020

N-TİPİ 6H-SiC TABANLI POLİMER ARAYÜZEYLİ SCHOTTKY DİYOTLARININ ÜRETİLMESİ VE ELEKTRONİK PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Hayati ALTAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2020

ÖZET

Bu tezde, Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir), Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC /Ag (750 devir), Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) ve Au/P3HT:PCBM (2:1)/ 6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky bariyerli 4 diyot üretilerek, 300 K ile 375 K sıcaklık aralığında elektriksel karakteristikleri araştırıldı. Her bir diyot için akım-gerilim eğrilerinden, engel yükseklikleri (Φ_{bo}), idealite faktörleri (n) ve seri direnç (R_s) değerleri farklı metodlarla hesaplandı. İdealite faktörü ve seri direncin azalan sıcaklıkla arttığı, engel yüksekliğinin ise azaldığı gözlemlendi. Parametrelerdeki bu değişimin sebeplerinden biri olarak Schottky engelinin heterojenliği gösterildi. Engelin Gaussian dağılımı araştırılarak, engel yüksekliği (Φ_{bo}) ve standart sapma (σ_0) değerleri bulundu. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotunun 300 K ile 375 K aralığında ortalama engel yüksekliği ile standart sapma değerleri sırasıyla 1,52 eV ve -0,04 V olarak hesaplandı. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir), yapısı için 300 K ile 375 K aralığında ortalama engel yüksekliği ile standart sapma değerleri sırasıyla 1,61 eV ve -0,04 V olarak bulundu. Au/P3HT: PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotu için de yapılarak, 300-375 K sıcaklık aralığında ortalama engel yüksekliği ile standart sapma değerleri sırasıyla 1,55 eV ile -0,03 V olarak belirlendi. Aynı hesaplamalar Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotu için de yapılarak, (300-375) K sıcaklık aralığında ortalama engel yüksekliği ile standart sapma değerleri sırasıyla 1,62 eV ile -0,04 V olarak bulundu. Nümunelerin her biri için $\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma_0^2/2k^2T^2$ nin $1000/T$ 'ye göre grafikleri çizilerek her bölge için modifiye edilmiş etkin Richardson sabiti (A^{**}) ve ortalama engel yükseklikleri (Φ_{bo}) hesaplandı. Buna göre; Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotunun yapısı için (300-375) K sıcaklık aralığında hesaplanan ortalama engel yüksekliği ve Richardson sabiti sırasıyla 1,67 eV ve $2431,96 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$, Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir), diyotu için ise sırasıyla 1,53 eV, $84,39 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ değerleri bulundu. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky diyotu için de yine aynı bölgede yapılan hesaplamalar sonucunda; 1,74 eV, $39,11 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ değerleri bulundu. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky diyotu için ise aynı bölgede; 1,80 eV, $6288,34 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ değerleri hesaplandı. Akım iletimi, termiyonik emisyon (TE) modeli ve engel homojensizliğiyle beraber açıklandı.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : 6H-SiC, Schottky engeli, Richardson sabiti, Gaussian dağılımı, Engel homojensizliği
Sayfa Adedi : 120
Danışman : Prof. Dr. Metin ÖZER

PRODUCTION OF N-TYPE 6H-SiC BASED SCHOTTKY DIODES WITH POLYMER INTERFACE AND INVESTIGATION OF THE ELECTRONIC PARAMETERS

(Ph. D. Thesis)

Hayati ALTAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2020

ABSTRACT

In this thesis, Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 revs), Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 revs), Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 revs) and Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 revs) 4 Schottky barrier diodes were produced, and their electrical characteristics were investigated in the temperature range (300-375) K. For each diode, barrier heights (Φ_{b0}) and ideality factors (n) and series resistance (R_s) values were calculated by using different methods from the current-voltage curves. It was observed that the ideality factor and series resistance increased while the barrier height decreased as the temperature decreased. One of the reasons for such change in the parameters was the heterogeneity of the Schottky barrier. The barrier height (Φ_{b0}) and the standard deviation (σ_0) values were found by investigating the Gaussian distribution of the barrier. Mean barrier height and standard deviation values of the Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 revs) diode between (300-375) K were found to be 1.52 eV and - 0.04 V, respectively. Mean barrier height and standard deviation values of the Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 revs) diode in the temperature range (300 - 375) K were found to be 1.61 eV and -0.04 V, respectively. For the Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 revs) diode, the same procedure was followed, and the mean barrier height and standard deviation values at the temperature range of (300 – 375) K were calculated as 1.55 eV and - 0.03 V, respectively. The same calculations were made for the Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 revs) diode, and the mean barrier height and standard deviation values at the temperature range of (300-375) K were calculated as 1.62 eV and -0.04 V, respectively. For each sample, a plot of $\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma_0^2/2k^2T^2$ versus $1000/T$ was created, and the modified effective Richardson constant (A^{**}) and the mean barrier height (Φ_{b0}) were calculated for each region. Accordingly, the mean barrier height and the Richardson constant calculated at the temperature range of (300-375) K for the structure of the Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 revs) diode were calculated as 1.67 eV and 2431,96 $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$, respectively. The values calculated for the Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 revs) diode were 1.53 eV and 84,39 $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$, respectively. For the Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 revs) diode, the values were calculated in the same region and found as 1,74 eV and 39,11 $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$. The values were also calculated in the same region for the Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 revs) Schottky diode and found as 1.80 eV and 6288,34 $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$. The current transmission was explained by the thermionic emission (TE) model and barrier inhomogeneity.

Science Code : 20227

Key Words : 6H-SiC, Schottky barrier, Richardson constant, Gaussian distribution, Barrier inhomogeneity

Page Number : 120

Supervisor : Prof. Dr. Metin ÖZER

TEŞEKKÜR

Konu seçiminden başlayarak, çalışmamın her aşamasında bana daima yol gösterdiği, tecrübesini ve birikimini benimle paylaştığı için danışmanım, değerli hocam sayın Prof. Dr. Metin ÖZER'e şükranlarımı sunarım. Ayrıca bu tez çalışmam süresinde TİK jüri üyeliğimi yapan yardımlarını esirgemeyen sayın Prof.Dr. Tuncer HÖKELEK'e ve Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU'ya teşekkür etmeyi bir borç bilirim. Nümunelerin hazırlanmasında yardımcı olan sayın Prof. Dr. Özge Tüzün ÖZMEN'e ve Araştırma Görevlisi sayın Hüseyin Muzaffer ŞAĞBAN'a özellikle teşekkür ederim. Akım-gerilim (I-V) ve sığa-gerilim (C-V) ölçümlerinde destek veren sayın Prof. Dr. Selim ACAR'a ve karşılaştığım güçlükleri aşmamda fikirlerine başvurduğum sayın Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a teşekkür ederim. Yoğun çalışmam süresince her zaman bana destek olan eşim Nezahat hanıma ve sevgili kızım Sena'ya verdikleri desteklerden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KURAMLAR.....	7
2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Yapılar.....	7
2.2. Metal-Yarıiletken Yapılarda Akım-İletim Mekanizmaları	12
2.2.1. Termiyonik emisyon (TE).....	13
2.2.2. Termiyonik emisyon (TE) - difüzyon teorisi.....	14
2.2.3. Engel doğrultusunda tünelleme	15
2.2.4. Tüketim bölgesinde taşıyıcının oluşması (generation) ve yeniden birleşme (recombination)	18
2.2.5. T_0 etkili akım iletimi.....	19
2.3. Metal-Yarıiletken Kontakların Fiziği.....	20
2.3.1. İdeal metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kontak	21
2.3.2. MIS kontaklarda akım-iletim süreci	22
2.4. Schottky Engellerinde İdeal Durumdan Sapmalar	27
2.4.1. Engel yüksekliğinin besleme gerilimine bağımlılığı	27
2.4.2. Seri direnç etkisi.....	28
2.4.3. T_0 anormallliği	29

	Sayfa
2.4.4. Arayüzey durumları	30
2.5. Düz Bant Engel Yüksekliği ile Sıcaklık Bağımlılığı	32
2.6. İdealite Faktörü ile Engel Yüksekliğinin Sıcaklık Bağımlılığı	34
2.6.1. Heterojen engel yüksekliği.....	34
2.6.2. Gaussian engel dağılım $P(\Phi_B)$	34
2.7. Richardson Eğrileri Kullanılarak Aktivasyon Enerjisi ile Richardson Değişiminin Bulunması.....	36
2.8. Yarıiletken Seri Direnç Bulma Yöntemleri.....	37
2.8.1. Norde yöntemi.....	37
2.8.2. Cheung fonsiyonları yoluyla Schottky kontak parametrelerinin bulunması.....	39
2.8.3. Schottky kontaklarda kapasitans-gerilim ölçümleriyle kontak parametrelerinin bulunması.....	40
2.10. SiC'nin Elektronik Özellikleri	42
2.11. P3HT, PCBM ve F ₄ TCNQ Polimerlerinin Özellikleri.....	44
3. MATERYAL VE YÖNTEM	45
3.1 Kristal Temizleme.....	45
3.2. Omik ve Schottky Kontakın Oluşturulması	47
3.3. Ölçüm Düzenekleri	54
3.3.1. Akım-gerilim (I-V) düzeneği	54
3.3.2. Sığa-gerilim (C-V) düzeneği.....	55
4. DENEYSEL BULGULAR	57
4.1. Akım-Gerilim Özellikleri.....	57
4.2. Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri.....	99
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	107
KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	119

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. SiC'nin bazı elektriksel ve optik özellikleri	43
Çizelge 4.1. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklık aralığındaki I-V ölçümlerinden bulunan parametreler	78
Çizelge 4.2. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklık aralığında I-V ölçümlerinden bulunan parametreler	79
Çizelge 4.3. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklık aralığındaki I-V ölçümlerinden bulunan parametreler	79
Çizelge 4.4. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklık aralığındaki I-V ölçümlerinden bulunan parametreler	79
Çizelge 4.5. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun 200 kHz'de (300-375) K sıcaklık aralığında C ⁻² -V grafiğinden elde edilen parametreler.....	102
Çizelge 4.6. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) Schottky engel diyotun 200 kHz'de (300-375) K sıcaklık aralığında çizilen C ⁻² -V grafiğinden elde edilen parametreler.....	103
Çizelge 4.7. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun 200 kHz'de (300-375) K sıcaklığında çizilen C ⁻² -V grafiğinden elde edilen parametreler.	104
Çizelge 4.8. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun 200 kHz'de (300-375) K sıcaklık aralığında çizilen C ⁻² -V grafiğinden elde edilen parametreler.	105

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal/n-tipi yarıiletken diyotun ($\Phi_m > \Phi_s$) elektron enerji bant şeması. a) Birbirlerinden ayrıık nötr materyaller, b) Diyot oluşumundan sonraki sıcaklık denge durumu.....	8
Şekil 2.2. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu yapının elektron enerji bant şeması. (a) sıcaklık denge durumu, (b) doğru besleme, c) ters besleme.	10
Şekil 2.3. $\Phi_m < \Phi_s$ için metal/n-tipi yarıiletken omik yapının elektron enerji bant şeması. (a) birbirinden ayrıık nötr materyaller, (b) sıcaklık dengesindeki diyot, (c) yarıiletken eksi besleme, (d) yarıiletken artı besleme.....	11
Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru besleme altında temel akım-iletim mekanizmaları; (a) Gerilim engelin tepesini aşarak metalin içine elektron iletimi, (b) Elektronların engel içinden direkt kuantum-mekaniksel tünellemeleri, (c) Uzak-yük bölgesinde tekrar birleşme, (d) Metalden yarıiletkene hol enjeksiyonu	12
Şekil 2.5. Doğru beslemede termiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu bant şeması.	17
Şekil 2.6. Metal-p-tipi yarıiletken diyotlarda çok katlı tünelleme modeline bağlı bant şeması.	18
Şekil 2.7. Değişik akım- iletim mekanizmaları veren $nkT/q-kT/q$ grafiği.	20
Şekil 2.8. Metal-yalıtkan-yarıiletken kontak.	21
Şekil 2.9. $V=0$ halinde ideal bir MIS kontağın enerji-bant şeması. (a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken.....	22
Şekil 2.10. $V \neq 0$ halinde ideal MIS kontağın enerji-bant şeması: (a) toplanma, (b) tüketim ve (c) terslenim halleri.	24
Şekil 2.11. Metal-yalıtkan-n-tipi yarıiletken kontağın enerji bant şeması.....	26
Şekil 2.12. Metal-yalıtkan-p-tipi yarıiletken kontağın enerji bant şeması.....	26
Şekil 2.13. Seri direnç (R_s)’in akım-voltaj eğrisi üzerindeki etkisi.	29
Şekil 2.14. SiC’nin kristal yapısı	43
Şekil 2.15. P3HT, PCBM ve F4TCNQ polimerlerinin molekül diyagramları.....	44
Şekil 3.1. Au/P3HT:PCBM (1:1)/n-6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotunun diyagramı....	52
Şekil 3.2. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) diyotunun diyagramı.....	52

Şekil	Sayfa
Şekil 3.3. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotunun diyagramı.....	53
Şekil 3.4. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotunun diyagramı.....	53
Şekil 4.1. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375)K sıcaklık aralığındaki yarı-logaritmik akım gerilim grafiği	57
Şekil 4.2. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklık aralığındaki yarı-logaritmik akım gerilim grafiği	58
Şekil 4.3. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) kontağının (300-375) K sıcaklık aralığındaki yarı-logaritmik akım gerilim grafiği.....	59
Şekil 4.4. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklık aralığındaki yarı-logaritmik akım gerilim grafiği	60
Şekil 4.5. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için kontağın Φ_{b0} engel yüksekliği ve n idealite faktörünün sıcaklığa göre grafiği	62
Şekil 4.6. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için kontağın Φ_{b0} engel yüksekliği ve n idealite faktörünün sıcaklığa göre grafiği.....	63
Şekil 4.7. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için kontağın Φ_{b0} engel yüksekliği ve n idealite faktörünün sıcaklığa göre grafiği	63
Şekil 4.8. Au/P3HT: PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için kontağın Φ_{b0} engel yüksekliği ve n idealite faktörünün sıcaklığa göre grafiği	64
Şekil 4.9. Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $dV/d\ln(I) - I$ grafiği	66
Şekil 4.10. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K'deki $dV/d\ln I - I$ grafiği	67
Şekil 4.11. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K'deki $H(I) - I$ grafiği.....	67
Şekil 4.12. Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $H(I) - I$ grafiği.....	68
Şekil 4.13. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $dV/d\ln(I) - I$ grafiği	69
Şekil 4.14. Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin 300 K sıcaklığındaki $dV/d\ln(I) - I$ grafiği.....	69

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin 300 K sıcaklığında $H(I) - I$ grafiği.....	70
Şekil 4.16. Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $H(I) - I$ grafiği.....	70
Şekil 4.17. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $dVdln(I) - I$ grafiği	71
Şekil 4.18. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K sıcaklığındaki $dVdln(I) - I$ grafiği	71
Şekil 4.19. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K sıcaklığındaki $H(I) - I$ grafiği	72
Şekil 4.20. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasında $H(I) - I$ grafiği	72
Şekil 4.21. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $dVdln(I) - I$ grafiği	73
Şekil 4.22. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K sıcaklığındaki $dVdlnI - I$ grafiği.....	73
Şekil 4.23. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K sıcaklığındaki $H(I) - I$ grafiği.....	74
Şekil 4.24. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $H(I) - I$ grafiği	74
Şekil 4.25. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $F(V) - V$ grafiği	76
Şekil 4.26. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $F(V) - V$ grafiği	76
Şekil 4.27. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $F(V) - V$ grafiği	77
Şekil 4.28. Au/P3HT: PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $F(V) - V$ grafiği	77
Şekil 4.29. 300 K’de A (Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir)), B (Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir)), C (Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir)) ve D (Au/P3HT: PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir)) numunelerinin $F(V) - V$ grafiği.....	78
Şekil 4.30. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $\ln(I_0 / T^2) - 1000/T$ değişim grafiği.....	80

Şekil	Sayfa
Şekil 4.31. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için $\ln(I_0 / T^2)$ -1000/T değişim grafiği.....	81
Şekil 4.32. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $\ln(I_0 / T^2)$ -1000/T değişim grafiği.....	81
Şekil 4.33. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $\ln(I_0 / T^2)$ -1000/T değişim grafiği.....	82
Şekil 4.34. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin Φ_{b0} - n grafiği	83
Şekil 4.35. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için Φ_{b0} - n grafiği	83
Şekil 4.36. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{b0} - n grafiği.....	84
Şekil 4.37. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{b0} - n grafiği.....	84
Şekil 4.38. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{ap} - q/2kT grafiği	86
Şekil 4.39. Au/P3H:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için Φ_{ap} - q/2kT grafiği	87
Şekil 4.40. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{ap} - q/2kT grafiği	87
Şekil 4.41. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{ap} - q/2kT grafiği	88
Şekil 4.42. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(1/n_{ap} - 1)$ - q/2kT grafiği.....	88
Şekil 4.43. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için $(1/n_{ap} - 1)$ - q/2kT grafiği.....	89
Şekil 4.44. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(1/n_{ap} - 1)$ - q/2KT grafiği	90
Şekil 4.45. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(1/n_{ap} - 1)$ -q/2KT grafiği.....	90
Şekil 4.46. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(\ln(I_0/T^2)-q^2\sigma_0^2/2k^2T^2) - q/kT$ grafiği	92
Şekil 4.47. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için $(\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_0^2/2k^2T^2) - q/kT$ grafiği	92

Şekil	Sayfa
Şekil 4.48. Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_0^2 / 2k^2 T^2) - q/kT$ grafiği.....	93
Şekil 4.49. Au/P3HT:PCBM (2: 1)/ 6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_0^2 / 2k^2 T^2) - q/kT$ grafiği.....	94
Şekil 4.50. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı ($E_c - E_{ss}$) grafiği	95
Şekil 4.51. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı ($E_c - E_{ss}$) grafiği	96
Şekil 4.52. Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı ($E_c - E_{ss}$) grafiği.....	97
Şekil 4.53. Au/P3HT:PCBM (2: 1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı ($E_c - E_{ss}$) grafiği.....	98
Şekil 4.54. A (Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir)), B (Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir)), C (Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir)) ve D (Au/P3HT: PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir)) numunelerinin 300 K'de C^{-2} -V grafikleri	100
Şekil 4.55. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklık aralığındaki C^{-2} -V grafiği.	102
Şekil 4.56. 200 kHz frekans değerinde Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun (300-375) K sıcaklık aralığında Φ_B ve N_D 'ye karşı çizilen iki eksenli grafiği.	103
Şekil 4.57. 200 kHz frekans değerinde Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) Schottky engel diyotun (300- 375) K aralığında Φ_B ve N_D 'ye karşı çizilen iki eksenli grafiği.	104
Şekil 4.58. 200 kHz frekans değerinde Au/P3HT:PCBM:F ₄ TCNQ (1:1:%2)/6H- SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun (300- 375) K aralığında Φ_B ve N_D 'ye karşı çizilen iki eksenli grafiği.	105
Şekil 4.59. 200 kHz frekans değerinde Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun (300-375) K aralığında Φ_B ve N_D 'ye karşı çizilen iki eksenli grafiği.	106

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. UNAM’da n-6H-SiC yarıiletken pulun kesilerek numune oluşturulması için uygun boyutlarda küçültülmesinde kullanılan sistem.....	45
Resim 3.2. Dört parça numunenin kimyasal temizleme yapıldığı ortam.....	46
Resim 3.3. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan Nano Vak firmasının ürettiği NVB-300 TH model metal buharlaştırma sistemi.	48
Resim 3.4. P3HT maddesinin diklorürbenzen içinde çözündürülmesi ile hazırlanan çözelti.....	49
Resim 3.5. Schottky engelli diyotların hazırlanmasında kullanılan dönerli kaplama aygıtı.	50
Resim 3.6. Üretilen örnekler.....	51
Resim 3.7. Üretilen A numunesi: Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) kontak alınmış şekli.	51
Resim 3.8. Akım-gerilim ölçüm düzeneği.....	54
Resim 3.9. Sığa-gerilim ölçüm düzeneği.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A*	Richardson sabiti
A**	Etkin Richardson sabiti
h	Planck sabiti
H₂O	Su
H₂O₂	Hidrojen peroksit
H₂SO₄	Sülfirik asit
HF	Hidroflorik asit
Hz	Frekans birimi
I	Akım
I₀	Doyma akımı
J₀	Doyma akım yoğunluğu
J_F	İleri besleme akımı
J_{ms}	Metalden yarıiletken doğru akım yoğunluğu
J_{SD}	Difüzyon teorisi için doyma akım yoğunluğu
J_{sm}	Yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
K	Kelvin cinsinden sıcaklık
M	Mega
m*	Elektron etkin külesi
m₀	Serbest elektron kütlesi
n	İdealite faktörü
n(x)	Elektron yoğunluğu
N₂	Azot gazı
n-6H-SiC	n-tipi Silisyum Karbür
N_A	Alıcı yoğunluğu
NaOH	Sodyum hidroksit
N_c	İletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu

Simgeler	Açıklamalar
N_D	Verici yoğunluğu
n_i	saf (katkısız) taşıyıcı yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durumları yoğunluğu
N_v	Değerlik (valans) bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu
R_s	Seri direnç
T	Mutlak sıcaklık (Kelvin)
T_0	İdealite faktörünün sıcaklıkla değişim katsayısı
V_d	Eklemi oluşturan gerilim (difüzyon gerilimi)
V_F	İleri besleme gerilimi
V_n	İletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
V_p	Fermi seviyesi ile değerlik bandı arasındaki enerji farkı
V_R	Ters besleme gerilimi
V_y	Yalıtkan üzerine düşen gerilim
V_{yi}	Yarıiletken üzerine düşen gerilim
W_d	Tüketim bölgesi kalınlığı
Δ	Yalıtkan tabakanın kalınlığı
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Metalin dielektirik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik katsayısı
μ_n	Elektronların mobilitesi
ρ	Özdirenç
σ_s	Standart sapma
Φ_b	Engel yüksekliği
Φ_{b0}	Sıfır beslem engel yüksekliği
Φ_{bf}	Düz bant engel yüksekliği
Φ_{Bn}	n-tipi yarıiletken için engel yüksekliği
Φ_{Bp}	p-tipi yarıiletken için engel yüksekliği
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Simgeler**Açıklamalar** χ_s

Elektron yakınlığı

 Ω

Ohm

 Φ_{bo}

Ortalama engel yüksekliği

Kısaltmalar**Açıklamalar****AE**

Alan Emisyonu

DIW

Deiyonize su

IGFET

Yalıtılmış Kapılı Alan Etkili Transistör

MIS

Metal-Yalıtkan-Yarıiletken

MOSFET

Metal-Oksit Alan Etkili Transistör

MS

Metal-Yarıiletken

SBD

Schottky Bariyer Diyot

SiC

Silisyum Karbür

TAE

Termiyonik Alan Emisyonu

TE

Termiyonik Emisyon

TED

Termiyonik Emisyon-Difüzyon

1. GİRİŞ

Bir metal ile bir yarıiletken arasında doğrultucu kontak oluştuğunda Schottky diyot oluşur. Kontakın doğrultucu özellikleri bir p- n eklemine özellikleriyle aynıdır.

İlk yarıiletken aygıtlar On dokuzuncu yüzyılın sonlarında yapılan metal-yarıiletken nokta kontak diyotlarıydı. Metal-yarıiletken kontak diyotlarda doğrultma olayı 1874 yılında F.Braun tarafından keşfedildi ve 1938 yılında Schottky ve Mott tarafından açıklaması yapıldı. O zamanda kullanılan yarıiletken malzeme; doğal olarak oluşan kurşun sülfür kristal minerali olan galena (kükürtlü kurşun) idi [1].

Yarıiletken malzemeler 1940'lı yıllardan bu yana araştırılmakta ve bu araştırmalar sonucunda geliştirilen elektronik aygıtlar günlük hayatımızda, askeri ve uzay teknolojisinde kullanılmaktadır. Elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de yarıiletken malzemeler kullanılarak yapılırlar [2-3].

Metal – yarıiletken eklemlerde, metal ile yarıiletken ara yüzeyinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky ortaya atmıştır. Schottky engelli metal yarıiletken (MS) ve metal –yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar arasındaki fark ara yüzeydeki yalıtkan tabaka kalınlığıdır. Yalıtkan tabaka, metal ve yarıiletken tabakaları birbirinden ayırırlar. Yalıtkan tabakanın kalınlığı 100 Å altında ise MIS yapı üstünde ise MOS yapı oluşmaktadır [2-4,5].

MOSFET (Metal-Oxide Field Effect Transistor–Metal-Oksit alan etkili tranzistör) veya IGFET (Insulated-Gate Field Effect Transistor-yalıtılmış kapılı alan etkili tranzistör) olarak isimlendirilen MOS tranzistör en fazla kullanılan yarıiletken devre elemanı olup bütün devrelerin temelini oluşturur. MOSFET olmadan dijital haberleşme sistemi, video oyunları, bilgisayar endüstrisi, cep hesap makineleri ve dijital kol saatleri olamazdı. MOS tranzistörler analog-dijital dönüştürücüler, anahtarlı kapasitör devreleri ve filtrelerde yoğun olarak kullanılırlar.

SiC yarıiletkeni eşsiz elektronik özellikleri; geniş bant aralığı, büyük termal iletkenlik, büyük elektron sürüklenme hızı ve büyük dayanıklılık sebeplerinden dolayı UV sensörü yapımında, büyük frekans, büyük güç, büyük ve alçak sıcaklık ortamlarında çalışabilecek aygıtların yapımında kullanılmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle, uzay çalışmalarında

kullanılan cihazların ve güneş pillerinde önemli ölçüde kullanılmaktadır. Dolaylı bant yapısından ötürü optik özellikleri de ön plana çıktığından, bu malzeme ile ilgili fotovoltaiik çalışmalar da vardır. SiC yarıiletkeni birçok uygulamada yerini almıştır [6-7].

Son yıllarda, SiC yarıiletkeninden alttaş üzerine farklı malzemelerle (oksitler, polimerler, organik polimerler vs.) büyütme çalışmaları yapılmıştır ve yapılmaktadır [8,9].

Pek çok araştırmacı, metal/6H-SiC yarıiletken kontakların temel parametrelerini belirlemek için, sıcaklığa bağlı elektriksel özellikleriyle ilgili geniş çalışmalar yapılmaktadır. Benzema ve arkadaşları Ni/SiC-6H Schottky n-tipi diyotların (77-500) K aralığında engel homojensizliğini incelemiştir [10].

Sefaoğlu ve arkadaşları sıcaklığın ve tavlamanın akım-gerilim üzerindeki etkilerini Ni/n tipi 6H-SiC Schottky diyotlarda (100-500) K sıcaklık aralığında incelemiştir [11]. Gülen ve arkadaşları Au/PbS/n-6H-SiC yapıların elektriksel ve optiksel karakteristikleri incelemiştir [12]. Asubay ve arkadaşları Mo/6H-SiC n-tipi Schottky diyotun engel yüksekliğini oda sıcaklığında incelemiştir [13,14].

Polimerler, ilk kullanımlarından bu yana iyi elektriksel yalıtkan maddeler olarak bilinirler. Bu özelliklerinden ötürü elektriksel yalıtkanlığın gerektiği, kabloların kılıflanması gibi alanlarda önemli kullanım yerleri bulmuşlardır. Kolay işlenmeleri, esneklikleri, estetik görüntüleri, hafiflikleri ve kimyasal açıdan tepkimeye girmemeleri diğer bazı üstün özellikleridir.

Organik materyaller, elverişli özellikleri ve benzersiz uygulamaları nedeniyle bilimsel araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu malzemeler, bant boşluğu, dengeleme ve iletken bant enerjilerini ayrı ayrı ayarlamak için kimyasal olarak uyarlanabilirler [15].

Metaller ise; elektriksel iletkenliği yüksek, üstün mekaniksel özelliklere sahip bir diğer madde grubunu oluşturur. Ancak, metaller polimerlerden ağırdırlar, pahalıdırlar ve polimerler gibi kolayca şekillendirilemezler. Korozyon, metaller için önemli bir başka sorundur.

Metallerin elektriksel iletkenlik ve mekaniksel özelliklerini, polimerlerin özellikleriyle birleştirerek bir tek malzemede toplamak her zaman ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur.

Bu amaçla yapılan ilk yaklaşımlar, polimerlerin uygun iletken maddelerle karışımlarının hazırlanmasına yöneliktir. Denenen yollardan birisi, polimerlere metal tozları gibi parçacıkların ilave edilmesi ve iletkenliğin polimer örgüsüne katılan metal faz üzerinden sağlanması olmuştur. Polimer içerisinde uygun bir tuz çözüp iyonik iletkenlikten yararlanmak bir başka yöntemdir. Her iki yöntemde de polimer, iletkenliği sağlayan parçacıklar için bir bağlayıcı faz olarak işlev yapar ve kendisi elektrik iletimine katılmaz. Sözü edilen yöntemlerle polimerlere ancak belli düzeyde iletkenlik sağlanabilir.

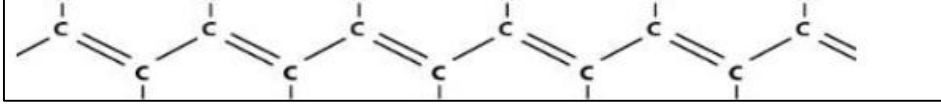
Yukarıda değinilen iki yaklaşımda da polimerin kendisi yalıtkanlık özelliğini korur ve sadece iletkenliği sağlayan diğer bileşen için taşıyıcı faz işlevi yapar. Bir polimerin kendisinin doğrudan elektriği elektronlar üzerinden iletebileceği, ilk kez, poliasetilen üzerine yapılan çalışmalarda görülmüştür.

Günümüzde polipirol, polianilin, politiyofen, polifuran, poli (N-vinil karbazol) gibi birçok polimerin iletken olduğu bilinmekte; bazılarının toz, süspansiyon, film veya levhalar halinde ticari üretimi vardır. Ana bileşeni polipirol olan lifler başka ticari ürünlere örneklerdir. İletken polimerler içerisinde polipirol ve polianilinin özel bir yeri vardır ve bu iki polimer organik metal olarak isimlendirilir.

İletken polimerlerin kullanılabilecekleri diğer alanlar arasında yarıiletken çipler, güneş ışığı paneli, düz TV ekranı, entegre devreler, hafif pil bileşenleri, sensörler, antistatik kaplama, antistatik ambalaj yapımı sayılabilir. Ancak iletken polimerlerin erimez ve çözünmez oluşları, istenilen amaca yönelik şekillendirilmelerini engeller ve kullanım yerlerini sınırlar.

İletken polimer kavramı, kendi örgüsü içerisindeki elektronlarla yeterli düzeyde elektriksel iletkenliği sağlayan polimerler için kullanılır.

Polimerlerin elektronik iletkenlik gösterebilmesi için, polimer örgüsünde, elektronların zincir boyunca taşınmasını sağlayan uygun yerlerin bulunması gerekir. Bu koşulu ana zincirinde *konjuge* çift bağlar bulunan polimerler sağlar.



Şekil 1.1. Konjuge çift bağ

Konjugasyon yüksek düzeyde iletkenlik için tek başına yeterli değildir. Konjuge çift bağlı polimerlerin iletkenliği katkılama işlemiyle artırılır. Katkılama işlemiyle polimer yapısına iletkenliği sağlayacak olan elektronlar alınarak veya elektronlar katılarak polimer örgüsünde artı yüklü boşluklar ya da elektron fazlalığı oluşturulur. Örneğin yapısında artı yük boşluğu bulunan konjuge bir zincir yapısında artı yüklü bir boşluğa başka bir yerden atlayan elektron, geldiği yerde de artı yüklü boşluk oluşturacaktır. Bu işlem ard arda zincir boyunca yinelenerek elektriği iletir [16].

Polimer-fulleren karışımları, organik fotovoltaiikler alanında uygulanabilirliklerinin gelecekteki kapsamını artıracaktır. Fulleren türevi [6,6]-fenil-C61-butirik asit metil ester (PCBM), bir elektron akseptörü (alıcısı) ve bir iletken polimer, poli (3-heksiltiyofen) (P3HT) elektron vericisi (donörü) olarak görev yapar [17, 27, 28]. P3HT ve PCBM düşük işleme maliyeti, geniş alanda kullanım, hafif kütle ve esnek alttaş gibi umut verici olasılıkları nedeniyle diğer organik bileşiklere göre üstünlüğe sahiptirler [18,19].

Son çalışmalar metal ve yarıiletkenler arasında uygun bir organik arayüzey tabakası biriktirerek yüksek kalitede Schottky bariyer diyot (SBD) elde etmenin mümkün olduğunu göstermiştir [15,20,21]. Homojen olmayan kalınlığa veya bileşime sahip olan arayüzey tabakası, arayüz boyunca homojen olmayan bir gerilim düşmesine neden olarak SBD'nin ideal davranışından sapmaya neden olur. Bu bağlamda, arayüzey kalitesi, cihaz performansını ve uzun vadeli kararlılığı belirleyen, yük taşıması ve çıkarılma işleminin kontrollü şekilde değiştirilmesi için temel öneme sahiptir. Konjuge polimerlerin yük taşıma özellikleri; safsızlıkların ve yapısal kusurların yoğunluğu gibi zincirlerin oluşumuna ve katı içindeki düzenine bağlıdır [22]. Çoğu organik polimer iç yük taşıyıcılara sahip olmadığından, p veya n tipi iletkenliği geliştirdiği gözlenen ilave yük taşıyıcıları sağlamak için metal katkılama, kullanılan yaygın bir yoldur. F₄TCNQ (2,3,5,6-Tetrafluoro-7,7,8,8-

tetrasyanoquinodimethane, genişletilmiş π -elektron sistemi sayesinde, elektron F₄TCNQ'yu kabul etme kabiliyeti büyük ve yaygın olarak kullanılan p-tipi katkı maddesidir [29]. Metal katkılar arasında, F₄-TCNQ yüksek elektron ilgisi ve en güçlü moleküler elektron alıcılardan biri olarak bilinir [23,24,29]. P3HT ile F₄-TCNQ katkılama, son zamanlarda güneş pillerinde [23,25] ve alan etkili transistör (FET) uygulamalarında kullanılmaktadır [26,30].

Bu çalışmada, dört farklı yapıda, polimer arayüzeyli Schottky engelli nünuneler üretildi. Diyot özelliği gösteren bu nünunelerin akım-gerilim ve kapasite-gerilim ölçümleri (300-375) K sıcaklık aralığında farklı 6 sıcaklıkta 15 K'lik adımlarla yapıldı. Elde edilen veriler kullanılarak I-V ve C-V grafikleri çizildi. Bu grafiklerden, ölçülen sıcaklık aralığındaki diyot parametreleri belirlendi. Parametreler, termiyonik emisyon (TE), Cheung-Cheung, Norde ve Gauss dağılımı metodları için ayrı ayrı hesaplandı. Araştırma bulguları farklı metotlarla bulunan parametrelerin birbiriyle uyumlu olduğunu gösterdi.

Bu tezin birinci bölümünde metal-yarıiletken kontakların gelişimi ve konu ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde bu yapılarla ilgili teorik bilgiler detaylı olarak anlatıldı. Üçüncü bölümde diyotların hazırlanması ve deneysel sistemler hakkında gerekli bilgiler verildi. Dördüncü bölümde ise farklı sıcaklıklarda yapılan I-V ve C-V ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak gerekli grafikler çizilip diyot parametreleri belirlendi. Son bölümde de elde edilen bu parametrelerin genel değerlendirilmesi yapıldı. Bu şekilde tez beş bölümden oluşmaktadır.

2. GENEL KURAMLAR

2.1. Metal-Yarıiletken (MS) Yapılar

Metal-yarıiletken diyotlar; bir metalin bir yarıiletkenle birleştirilmesiyle meydana gelir. Metal-yarıiletkenle birleştirildiğinde, sıcaklıkları eşit oluncaya kadar metalden-yarıiletkene, yarıiletkenden-metale yükler geçer. Metalden-yarıiletkene, yarıiletkenden metale elektron akışı; metalle yarıiletkenin Fermi enerjilerinin eşitlendiği zaman oluşan sıcaklık dengesine kadar sürer. Metalle, yarıiletken ara bölgesinde yük ayrımıyla yeni yük dağılımı oluşur. Bu dağılım sonucu gerilim engeli oluşur. Ara bölgenin yarıiletken kısmında meydana gelen ve devinimli yüklerin bulunmadığı büyük dirençli bir bölge oluşur. Metal, yarıiletken yapılarda metalle-yarıiletken ara bölgesinde gerilim engeli olduğunu ilk kez Schottky, ara bölgede oluşan gerilim engelini metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları farkından oluştuğunu ise Mott izah etmiştir. Schottky-Mott'a göre gerilim engeli; metalle yarıiletken iş fonksiyonlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır [3,31].

Engelin omik veya doğrultucu olması yarıiletkenin tipi ve yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarıyla ilgilidir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu, Φ_s ve metalin iş fonksiyonu ise Φ_m 'dir. Metal/n-tipi yarıiletken yapılarda $\Phi_m > \Phi_s$ ise engel doğrultucu, $\Phi_m < \Phi_s$ ise engel omik'dir. Metal/p-tipi yarıiletken yapılarda $\Phi_m > \Phi_s$ için engel omik, $\Phi_m < \Phi_s$ ise engel doğrultucudur. Şekil 2.1 $\Phi_m > \Phi_s$ 'deki n-tipi yarıiletkenle metal diyotun elektron enerjisi bant şeması görülmektedir. Metalin iş fonksiyonu, Φ_m , bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine yükseltmek için gereken enerjidir (Şekil 2.1). Yarıiletkenin iş fonksiyonu, Φ_s , ise yarıiletkenin vakum seviyesi ile Fermi seviyesi farkıdır ve Fermi seviyesi katkılamaya göre değişir bu yüzden değişken bir yapıdadır. Vakum seviyesi bir metalin dışındaki kinetik enerjinin sıfır olduğu bir elektronun enerji seviyesidir. Elektron yakınlığı, χ_s , iletkenlik bandının en üst sınırından bir elektronu vakum seviyesine yükseltmek için gerekli enerji miktarıdır ve yarıiletkenin katkılanmasına göre değişmez.

seviyesi farkına eşittir. Bu da metalin iş fonksiyonu, Φ_m , yarıiletkenin iş fonksiyonu, Φ_s , farkına eşittir. Bu, $qV_i = (\Phi_m - \Phi_s)$ olarak yazılır. Burada V_i kontakta oluşan gerilim ya da diyot gerilim farkıdır ve birimi voltuttur. qV_i yarıiletkenden metale geçecek elektron için gerekli olan enerji aynı zamanda engel yüksekliğidir. Metalde bulunan engel yarıiletkenden bulunan engelle aynı değildir ve

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

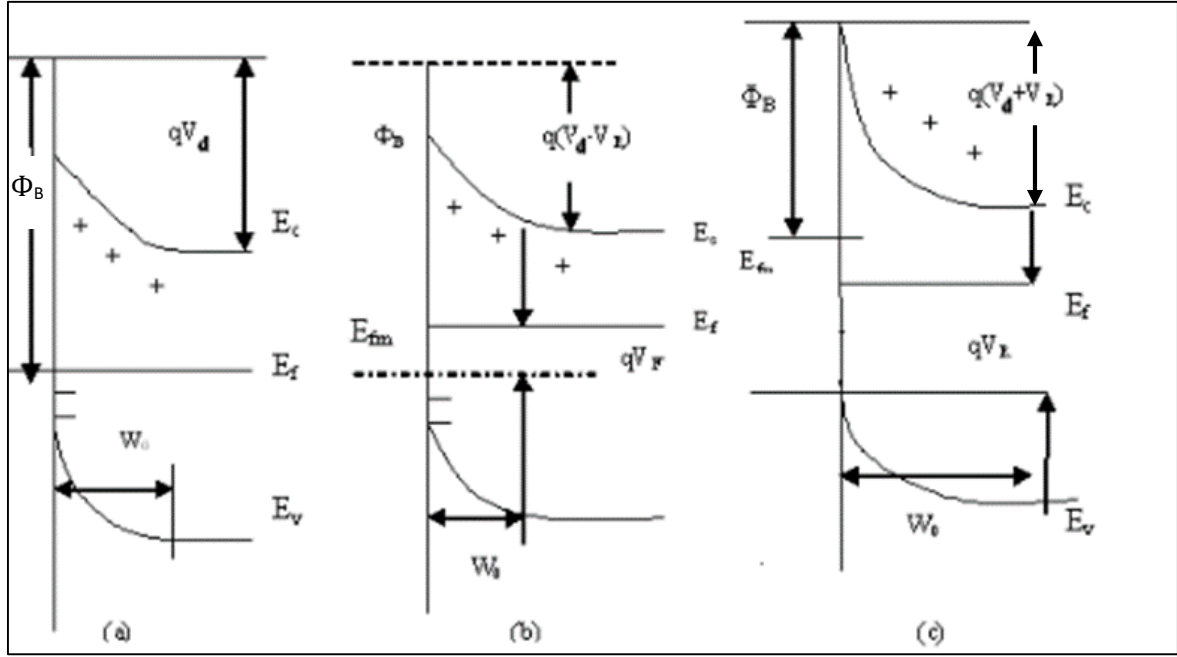
şeklinde ifade edilir.

$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n$ ve $\Phi_m = qV_i + \Phi_s$ olduğundan,

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

olarak bulunur. Buradan $\Phi_n = (E_c - E_f)$ bulunur, q elektronik yüküdür.

Eş. 2.1, birbirinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından bulunmuştur. Schottky yarıiletkeni düzgün şekilde katkılanmış kabul eder; bu durum ara bölgede, tüketim bölgesinde düzgün yük konsantrasyonu verir. Değişmez uzay yükü elektrik alan şiddeti, uzay yük tabakanın kenarından olan mesafeyle doğrusal artar ve meydana gelen parabolik engel “Schottky Engeli” diye bilinir. Mott’a göre, yarıiletkenin hiç yük olmayan ince tabakada elektrik alanın büyüklüğü değişmezdir ve gerilim, bölge boyunca doğrusal şekilde artış gösterir (Mott Engeli). Mott Engeli, yüksek katkı yapılan bir yarıiletken ve metal arasına az katkılanmış veya belirgin bir yarıiletken konulduğunda kullanılır [32].

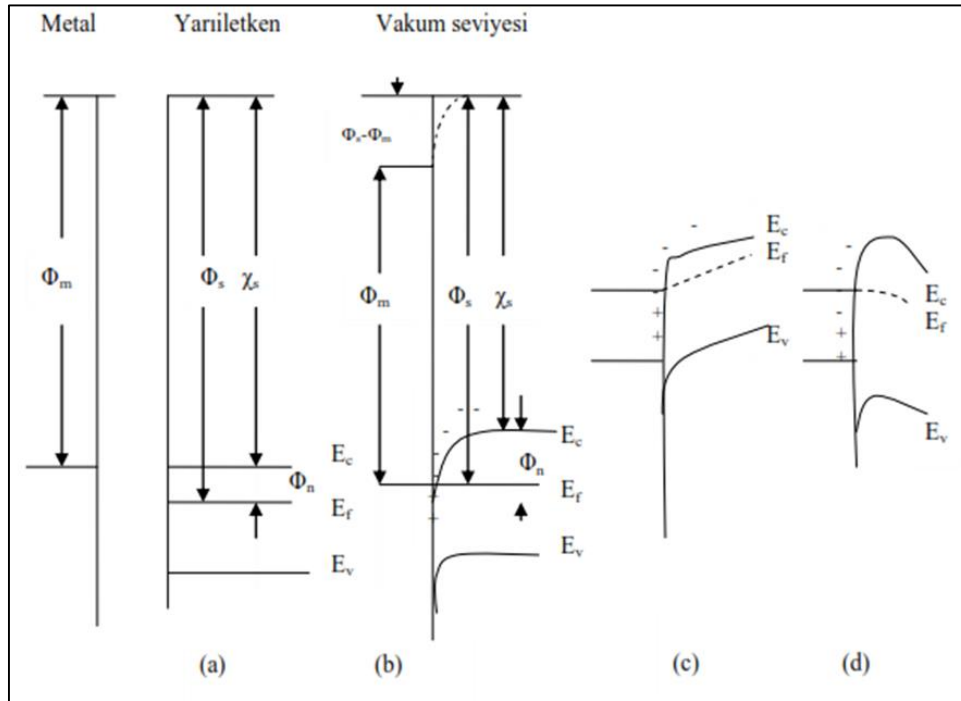


Şekil 2.2. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu yapının elektron enerji bant şeması. (a) sıcaklık denge durumu, (b) doğru besleme, c) ters besleme.

Sıcaklık dengesinde gerilim engelini geçen elektronların oranı, engeli zıt yönde geçen elektronların oranıyla denge sağlanır ve net akım meydana gelmez. Yarıiletken tüketim bölgesinde çok az devinimli taşıyıcı içerdiğinden, bölgenin direnci metalin ve yarıiletkenin nötr tarafının direnciyle karşılaştırıldığında çok yüksek olup uygulanan dış gerilimin tümü bu bölgeye düşer. Uygulanan gerilim, sıcaklık-denge bant şemasını değiştirir. Değişim, tüketim bölgesine düşen gerilimin değişimiyle ve bant bükülmesindeki değişiklik sebebiyle meydana gelir. Metal artı, yarıiletken eksi şeklinde uygulanan gerilim ($V=V_F$) tüketim bölgesinin genişliğini düşürür ve Şekil 2.2.(b)'deki gibi bölgedeki gerilim qV_i 'den $q(V_i - V_F)$ 'ye kadar azalır. Bu sırada yarıiletken elektronları çok düşük engelle karşılaşır. Böylece yarıiletkenden metale elektron akımı sıcaklık denge değerine göre artar. Metalden yarıiletkene elektron akımı sıcaklık denge değerine göre sabit kalır. Bu sebeble metalde herhangi bir gerilim azalması olmaz. Böylece, Φ_B uygulanan gerilimden etkilenmez. Sonuçta, yarıiletken tarafı eksi, metal artı olacak şekilde gerilim uygulandığında doğru beslemede yarıiletkenden metal yönüne doğru net bir akım vardır. Doğru besleme akımı, uygulanan V_F gerilimiyle üstel şekilde artar [33].

Ters besleme yapının enerji bant şeması Şekil 2.2.(c)'de verilmiştir. Yarıiletken artı, metal eksi olacak biçimde uygulanan bir gerilim ($V = -V_R$) tüketim bölgesinin genişliğini arttırır ve gerilimi qV_i 'den $q(V_i + V_R)$ 'ye çıkarır. Yarıiletkenden metale geçen eksi yük akımı ise

sıcaklık denge durumuna göre azalır. Metalden yarıiletken eksi yük akımı ise değişmez ve sıcaklık dengesine eşit kalmaya devam eder. Yarıiletken- metal arasındaki akım doğru beslemeyle karşılaştırıldığında daha da azdır. Bu şartlar altında söz edilen yapı bir yönde akım geçiren doğrultucu bir yapı oluşturur. $\Phi_m < \Phi_s$ olan n- tipi yarıiletkenle oluşturulan omik yapının enerji bant şeması Şekil 2.3’de verilmiştir. Şekil 2.3.(a)’da meteryaller ayırık durumdayken arkalarında artı yükler bırakarak, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandı yönünde geçerler ve sınırın yarıiletken tarafında eksi yük toplanmasına sebep olurlar. Sıcaklık dengesine ulaşıldığında yarıiletkenin Fermi düzeyi Şekil 2.3.(b)’de gösterildiği şekilde $(\Phi_s - \Phi_m)$ kadar artar. Yarıiletkende eksi yüklerin yığılmasıyla oluşan tabaka Debye uzaklığı kadar bir kalınlık dahilinde sınırlanır ve bunlara yüzey yükleri denir. Metaldeki eksi yüklerin yoğunluğu çok fazla olduğundan metal kısmındaki artı yükler de, metal yarıiletken ara bölgede yaklaşık $0,5 \text{ \AA}$ uzaklık içinde sınırlanmış yüzey yükleridir [34]. Yarıiletken içinde oluşan bir tüketim bölgesi olmadığı ve yarıiletkenden metale veya ters yönde eksi yüklerin akması için bir gerilim engeli mevcut değildir. Arayüzey yakınındaki bölgede eksi yük yoğunluğu artırılırsa, sistemin en yüksek direnç bölgesini yarıiletken bölgesinde oluşturduğu görülür.

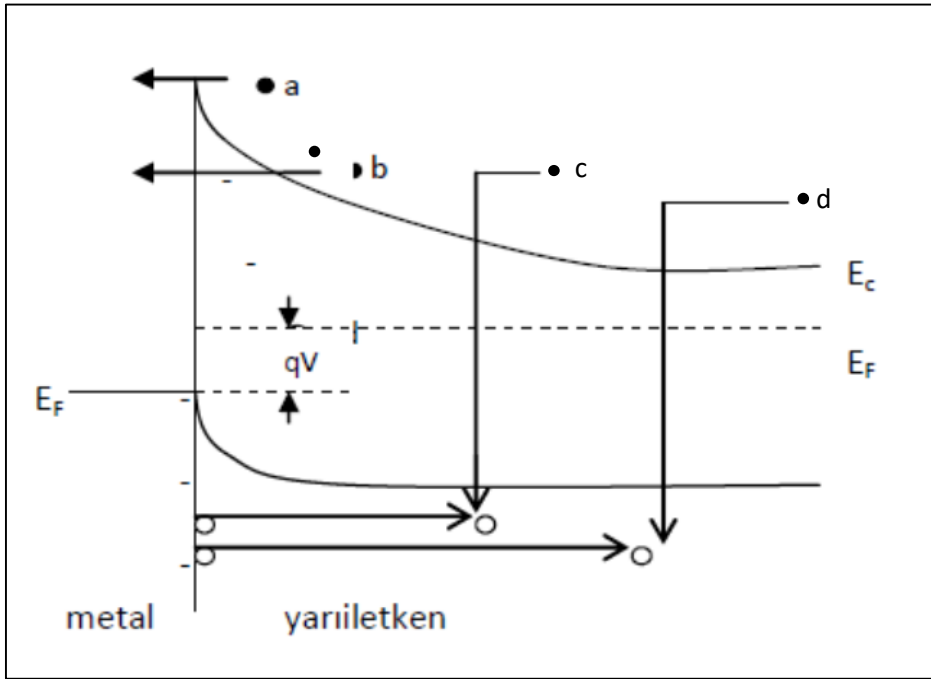


Şekil 2.3. $\Phi_m < \Phi_s$ için metal/n-tipi yarıiletken omik yapının elektron enerji bant şeması. (a) birbirinden ayırık nötr materyaller, (b) sıcaklık dengesindeki diyot, (c) yarıiletken eksi besleme, (d) yarıiletken artı besleme

Şekil 2.3.(c) ve Şekil 2.3.(d) düz ve ters beslemedeki yarıiletken bölgeleri göstermektedir. Akımı bölgenin direnci belirler ve uygulanan gerilimin yönünden bağımsızdır. Doğrultucu olmayan bu tür yapılara omik yapılar denir.

2.2. Metal-Yarıiletken Yapılarda Akım-İletim Mekanizmaları

MS ve MIS kontaklarda akım iletimi ekseriyette çoğunluk taşıyıcılarıyla gerçekleştirilir. Sıcaklık, seri direnç, arayüzey halleri ve metalle yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka sebebiyle akım iletim prosedürü MS ve MIS kontaklarda değişiklik gösterir. Bu kontaklarda geçerli olabilecek akım iletim prosedürü şu şekilde sıralanır [31]: Termiyonik-Emisyon (TE), Kuantum Mekaniksel Tünelleme, Difüzyon, Termiyonik Emisyon-Difüzyon, Üretilme-Yeniden Birleşme, T_0 etkili akım iletimi ve Azınlık Taşıyıcı Konsantrasyonu akım iletimi. Şekil 2.4’de metal/yarıiletkenin doğru besleme altında başlıca akım-iletim mekanizmaları verilmiştir.



Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru besleme altında temel akım-iletim mekanizmaları; (a) Gerilim engelini tepesini aşarak metalden yarıiletkene elektron iletimi, (b) Elektronların engel içinden direkt kuantum-mekaniksel tünellemeleri, (c) Uzay-yük bölgesinde tekrar birleşme, (d) Metalden yarıiletkene hol enjeksiyonu

2.2.1. Termiyonik emisyon (TE)

Schottky diyotlarda yeterli termal enerjiye sahip olan taşıyıcıların gerilim engeli (Φ_B) üzerinden metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçmeleri (TE) olarak tanımlanır. MS diyotlarda akımın çoğunluk taşıyıcılarınca iletildiği kabulü ile kurulduğu termiyonik emisyon varsayımları [35,36]: (a) gerilim engel yüksekliği kT/q enerjisinden oldukça büyüktür (b) Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları mevcut değildir, kısacası ortalama taşıyıcı tabakanın kalınlığı Schottky serbest yollarından daha küçüktür. (c) Görüntü kuvvetlerin etkisi gözardı edilmektedir ve akım engel yüksekliğine zayıf şekilde bağlıdır. Bu varsayımlar sonucunda yarıiletkenden metal tarafına akım konsantrasyonu, J_{sm} , gerilim engelini geçecek enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve elektronların hızıyla belirtilir;

$$j_{sm} = \int_{E_F + q\Phi_B}^{\infty} qv_x dn \quad (2.3)$$

eklemde $E_F + q\Phi_B$ metalden TE için gereken en düşük enerji, v_x ise iletim doğrultusundaki taşıyıcının hızıdır. dn küçük bir enerji aralığındaki elektron konsantrasyonudur. Bu ifadeden yola çıkarak metal/n-tipi yarıiletken diyotlardaki yarıiletkenden metale akan elektronların akım denklemi,

$$j_{sm} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-q(\Phi_B)}{kT} \right] \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.4)$$

şeklinde yazılır. Burada m^* taşıyıcının etkin kütlesi, k Boltzmann sabiti, h Planck sabitidir. Buradan;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp \left[\frac{-q\Phi_B}{kT} \right] \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.5)$$

ifadesi yazılabilir. Denklemden A^* , TE'nin Richardson sabitidir. Metalden yarıiletkene geçen elektronlar için engel yüksekliği sabit kaldığından akım uygulanan gerilimden etkilenmez. Bu akım dengede ($V=0$), yarıiletkenden metale akan akıma eşittir. Metalden yarıiletken yönünde geçen akım konsantrasyonu Eş. (2.5)'de $V=0$ değeri alınırsa,

$$J_{ms} = -A^*T^2 \exp\left[\frac{-q\Phi_B}{kT}\right] \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. Toplam akım konsantrasyonu Eş. (2.5) ve Eş. (2.6)'nın toplamı olup,

$$J_n = \left(A^*T^2 \exp\left[\frac{-q\Phi_B}{kT}\right]\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right) \quad (2.7)$$

şeklinde yazılır. Burada $A^*T^2 \exp(-q\Phi_B/kT)$ ifadesi, doyma akım konsantrasyonudur.

2.2.2. Termiyonik emisyon (TE) - difüzyon teorisi

TE ile difüzyon teorisini birleştiren Crowell ve Sze, termiyonik emisyon difüzyon teorisini oluşturdular [37]. Teori MS arayüzey kıyısında tanımlanan V_r tekrar birleşme hızı üzerine oluşturuldu. Metal ile yarıiletken gövdenin arasına uygulanan gerilim, metal yönünde bir elektron akımına sebep olur. Taşıyıcıların bazıları optik fonon geri saçılmalar bazıları da kuantum mekaniksel yansımalar yaptığından akım miktarı düşer [38]. Sze bunun sebebini tekrar birleşme hızındaki düşmeye bağlamıştır. Termiyonik emisyon difüzyon teorisine göre, elektronların MS arayüzeyinde optik fononlarla etkileşmeden gerilim engeli üzerinden geçme olasılığının ve ortalama iletim katsayısının göz önüne alınmasıyla A^* Richardson sabiti A^{**} haline dönüşür. En yaygın akım-gerilim ifadesi,

$$J = J_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right) \quad (2.8)$$

şeklinde yazılır. Denklemden T sıcaklığı, n kontak idealite faktörünü, R_s ve J_0 doyma akımı konsantrasyonu olup,

$$J_0 = -A^{**}T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT}\right] \quad (2.9)$$

şeklinde verilir. A^{**} , düzeltilmiş etkin Richardson sabitidir. β engel yüksekliğin sıcaklıkla değişim katsayısı olup,

$$A^{**} = A^* \exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \quad (2.10)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir oksit tabakası mevcutsa Richardson sabiti oksit tabakasından dolayı etkin değerini alır. A^{**} yerine yalıtkan oksit tabakası sebebiyle A_{etk} değerini alır:

$$A_{etk} = A^{**} \exp\left[\frac{-4\pi\delta}{h((2m^* \chi_s)^{1/2})}\right]^{1/2} \quad (2.11)$$

Denklemde δ , metalle yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakanın kalınlığı, $m^* = m_0$ etkin kütle, h Planck sabitini, χ_s yarıiletkenin elektron yakınlığıdır. Termiyonik emisyon teorisine göre ideal bir Schottky kontakta $n=1$ 'dir. İdeal kontakta sapmaları belirlemek için bir idealite faktörü, n tanımlandı. Buna bağlı akım konsantrasyonu ifadesi:

$$J = J_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.12)$$

şeklinde verildi. Burada n idealite faktörü 1'den uzaklaşınca engel yüksekliğinin gerilime bağımlılığı artmaktadır. İdealite faktörü yarıiletkenle dengedeki arayüzey halleri, (N_{ss}) ve metal- yarıiletken arasında olan yalıtkan oksit tabakanın kalınlığı (δ) cinsinden,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (2.13)$$

olarak verilir [39]. Yukarıdaki denklemde ikinci terimin artmasıyla ideallikten uzaklaşılır. İdealite faktörü, hem yalıtkan tabakanın kalınlığının artmasıyla hem de arayüzey hallerinin artmasıyla artmaktadır [40]. Engel alçalması ve A^{**} 'nin alana bağlı olması sebebiyle reel Schottky diyodlarda n idealite faktörü $1,2 > n > 1$ aralığında değerler alır.

2.2.3. Engel doğrultusunda tünelleme

Metal-yarıiletken Schottky yapılarda TE mekanizması yanı sıra, elektronlar kuantum mekanik tünellemeyle engeli geçebilirler. Çok aşırı katkılanmış dejenere ($N_d > 10^{18} \text{cm}^{-3}$)

yarıiletken halinde tünelleme doğru beslemeyle, az katkılı yarıiletkenlerde tünelleme işlemi ters beslemeyle oluşur [41]. Aşırı katkılanmış yarıiletken sebebiyle tüketim bölgesi incedir. Düşük sıcaklıklarda, Fermi seviyesine fazla yakın elektronlar yarıiletkenden metal yönünde tünelleme yaparlar. Bu yolla doğru besleme doğrultusundaki akım yarıiletkenin Fermi enerjisi civarındaki elektron tünellemeleriyle artar. Bu olaya alan emisyonu (AE) denir. Büyük sıcaklıklarda, elektronların büyük bir oranı Fermi seviyesinin üstüne doğru çıkar. İletkenlik bandından E_m kadar yüksekte olan elektronların daha yüksek enerjili olması ve bu seviyede daha küçük engelle karşılaşmaları tünelleme olasılığını yükseltir ve doğru besleme doğrultusundaki akımı yükseltir. Bu hal termiyonik alan emisyonu (TAE) olarak adlandırılır. Bu mekanizmalar Şekil 2.5’de verilmiştir.

Sıcaklık çok daha fazla arttırılırsa, elektronlar gerilim engel yüksekliğini aşacak derecede enerji kazanırlar ve bu sebeple tünelleme olmadan engel üzerinden karşı kıyıya kolaylıkla geçerler. Bu duruma, termiyonik emisyon (TE) denir. Termiyonik alan emisyonu (TAE) halinde çok az doğru besleme gerilimi varken, doğru besleme I-V karakteristiği,

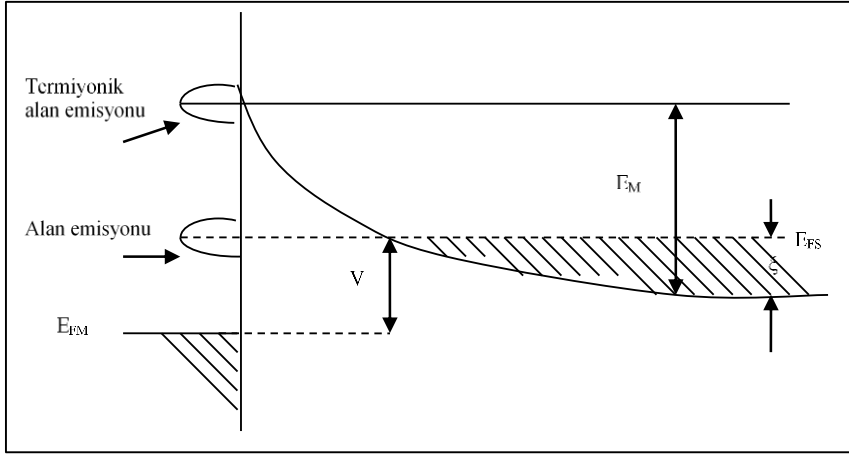
$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.14)$$

şeklinde yazılabilir.

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.15)$$

$$E_{00} = h / 4\pi \left(\frac{N^*}{m^* \epsilon_s}\right)^{1/2} \quad (2.16)$$

şeklindedir. Denklemden N^* , etkin taşıyıcı konsantrasyonu, m^* , etkin elektron kütlesi ve h , Planck sabitidir. I_0 , zayıf bir şekilde gerilime bağlı engel yüksekliğinin, yarıiletken değişkenlerinin ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. E_{00} enerjisi tünelleme sürecinde önemli bir değişken olup, E_{00}/kT , TE’nin ve tünellemenin önemli bir ölçüsüdür. Düşük sıcaklıklarda E_{00} , kT ’ye kıyasla büyük değer alır ve E_0 yaklaşık olarak E_{00} ’dır.



Şekil 2.5. Doğru beslemede termiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu bant şeması

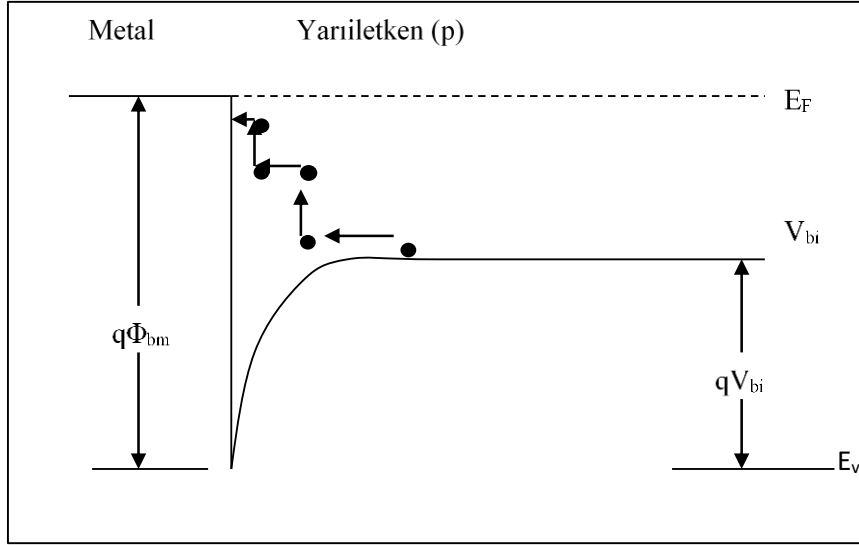
$\ln I-V$ eğrisi eğimi sabit ve T 'ye bağımlı olmaz. Bu hale alan emisyonu denir. Büyük sıcaklıklarda, ($E_{00} \ll kT$), $E_0 = kT$ değerini alır. $\ln I-V$ eğrisi eğimi q/kT olur ki, bu durum TE 'ye denk gelir. Orta sıcaklık değerlerinde eğim, q/nkT şeklinde yazılabilir. Burada,

$$n = E_{00}/kT \left[\coth \left(\frac{E_{00}}{kT} \right) \right] \quad (2.17)$$

olur. TAE'nin kontak akımına etkisi, E_{00} yaklaşık olarak kT 'ye eşit olduğu zaman ortaya çıkar. TAE'nin en büyük katkısı söz konusu iken E_m enerjisi,

$$E_m = qV_d \left[\cos \left(\frac{E_{00}}{kT} \right) \right]^2 \quad (2.18)$$

şeklindedir. Burada, V_d toplam bant bükülme gerilimine denk gelir. E_m ise tüketim bölgesi yanındaki iletkenlik bandının altından ölçülür. Çok az katkılı konsantrasyonlarda TAE gözönüne alınmayabilir. Çok katlı tünellemede eklemenin, tüketim bölgesi boyunca tuzakları olan metal-yarıiletken diyot olduğu anlaşılır. p-n eklemi, Schottky engelinde, heterokontaklarda ve son yıllarda yarıiletken bikristallerde gözlenen bu halde, tuzaklar doğrultusunda tünel tesiri TAE, AE ve TE ile karşılaştırılır şekilde etkin bir akım iletim mekanizması haline gelmiştir. Bu mekanizmalar Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Metal-p-tipi yarıiletken diyotlarda çok katlı tünelleme modeline bağlı bant şeması

2.2.4. Tüketim bölgesinde taşıyıcının oluşması (generation) ve yeniden birleşme (recombination)

Uzay-yük bölgesinde tekrar birleşme genelde yerel haller vasıtası ile çok etkin merkezler yoluyla olur. Bunlar p-n yapısına benzer biçimde Schockley ile Read ve Hall'a göre yasak bant aralığı merkezi yakınındaki enerji seviyelerinde olurlar [42]. Bu uzay-yük bölgesinde tekrar birleşme oranı;

$$U = \frac{(n_p - n_i^2)}{\tau_n(n + n_i)} + \tau_p(p + n_i) \quad (2.19)$$

biçimindedir. τ_n ve τ_p yarıiletkenindeki elektron ve hollerin yaşam süreleridir. Denklemden temel seviyeye karşılık gelen bant aralığının ortasında bir tuzak seviyenin olduğu varsayılmıştır.

Tekrar birleşme akım konsantrasyonu bileşeni;

$$J_r = q \int_0^w U(x) dx \quad (2.20)$$

ile ifade edilir. Şayet n için $p \gg n_i$ ve $\tau_n = \tau_p = \tau_r$ indirgemeler yapılırsa, küçük doğrusal besleme halinde tekrar birleşme akım konsantrasyonu;

$$J_r = J_{r_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.21)$$

şeklinde yazılır [43]. Denklemdaki J_{r_0} , saf yarıiletken için tekrar birleşme akım konsantrasyonunu göstermektedir. $J_{r_0} = qn_i w / 2\tau_r$, n_i saf yarıiletken için elektron konsantrasyonu;

$$n_i = \left(\frac{N_c}{N_d}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.22)$$

değerine denktir. W_d tüketim bölgesi genişliği, τ_r taşıyıcı birleşme yaşam süresi dikkate alınarak; tüketim bölgesi genişliği,

$$W_d = \left(\frac{2\varepsilon_s}{qN_d}\right)^{\frac{1}{2}} \left[q\left(\Phi_b - V - \xi - \frac{kT}{q}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilir. Termiyonik emisyon ve yeniden birleşme süreçleri dikkate alınarak, toplam akım konsantrasyonu;

$$J = J_{te} + J_r = \left[J_{to} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) + J_{ro} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.24)$$

şeklinde bulunur. J_{te} termiyonik akım konsantrasyonudur. $J_{to} = J_o$ 'dur. Tekrar birleşmenin termiyonik akıma bölümü yaklaşık olarak;

$$\frac{J_r}{J_{te}} = q \left(\frac{N_c}{N_d}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{w}{(2A^{**}T^2\tau_r)} \exp\left[\frac{-q(E_g + V - 1\Phi_b)}{2kT}\right] \quad (2.25)$$

değerini verir. Yukarıdaki eşitliğe göre kısa yaşam süreli malzemelerde, yüksek engellerde tekrar birleşme çok önem kazanır. Hem küçük doğru besleme hem de düşük sıcaklık önem arz eder.

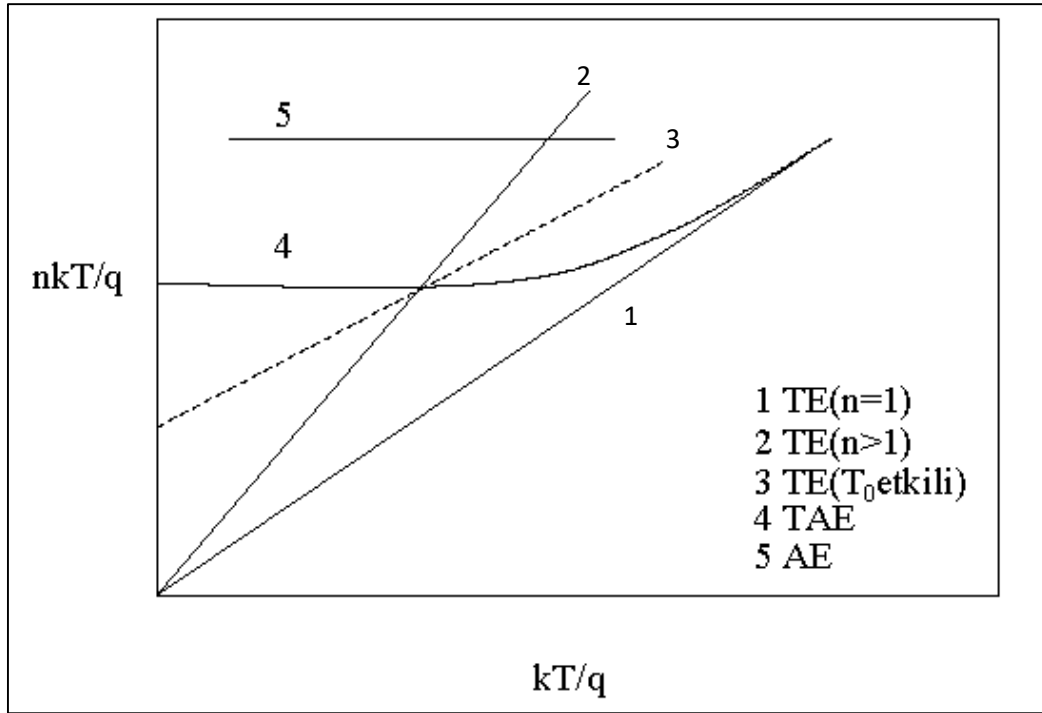
2.2.5. T_0 etkili akım iletimi

İdealite faktörünün >1 olması sanal kuvvet veya arayüzey gibi sebeplerden oluşuyorsa n sıcaklığa bağlı olmamalıdır. Ancak $n>1$ olması termiyonik alan yayımından ya da tüketim

bölgesi rekombinasyon akımlarından ortaya çıkıyorsa, idealite faktörü sıcaklığa bağlıdır. T_0 tesirli J-V özelliği,

$$J = A^{**} T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_B}{k(T + T_0)} \right] \left\{ \exp \left[\frac{qV}{k(T + T_0)} \right] - 1 \right\} \quad (2.26)$$

şeklinde yazılır [44]. Denklemden T_0 geniş bir sıcaklık aralığında sıcaklık ve gerilimden bağımsız olan sabit bir değişkendir. n 'in sıcaklığa bağımlılığı deneysel olarak $n = 1 + T_0/T$ ile verilir. Gerilimin fonksiyonu olarak farklı akım-iletim süreçleri Şekil 2.7'de verilmiştir. 1, 2, 3 eğrileri, TE teorisinin başat olduğu süreçleri gösterir. Bunlar $n = 1$, $n > 1$ ve T_0 tesirli hallerine denk gelir. 4 eğrisi TAE ve 5 eğrisi AE iletim süreçlerinin baskın olduğu halleri gösterir [45,46].



Şekil 2.7. Değişik akım-iletim mekanizmaları veren nkT/q - kT/q grafiği

2.3. Metal-Yarıiletken Kontakların Fiziği

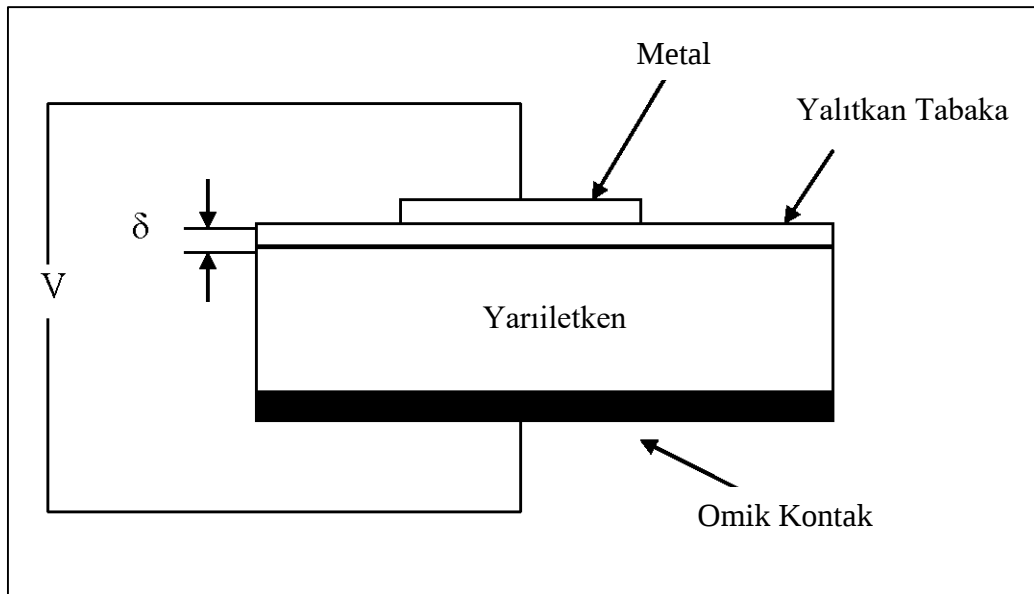
Metal-yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakası hem doğal yolla oluşabilir hem de deneysel yöntemlerle oluşturulabilir. Arayüzeyde oksit tabakası varsa metal-yarıiletken formu metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) formuna dönüşür [47,48]. MIS yapıların deney analizi yarıiletken yüzeyini anlamaya yarar. Ortadaki oksit tabaka metali yarıiletkendeki

ayırır. Bu yolla yarıiletkendeki arayüzey hallerinin durumu yarıiletkenin Fermi seviyesiyle belirlenir. Yani arayüzey halleri yarıiletkenle denge halindedir. Bir MIS kontakta metal/yalıtkan ile metal/yarıiletken arayüzeyi olmak kaydıyla iki arayüzey vardır.

2.3.1. İdeal metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kontak

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kontak Şekil 2.8’de verilmiştir. Burada δ yalıtkan tabaka kalınlığı, V ise metale uygulanan gerilimdir. Metal kısım omik diyota göre pozitif olduğunda doğru besleme, metal kısım omik diyota göre negatif olduğunda ise ters besleme olur.

İdeal MIS kontakların, $V=0$ halinde enerji bant şeması Şekil 2.9’da verilmiştir. İdeal bir MIS kontak aşağıdaki biçimde belirlenir.



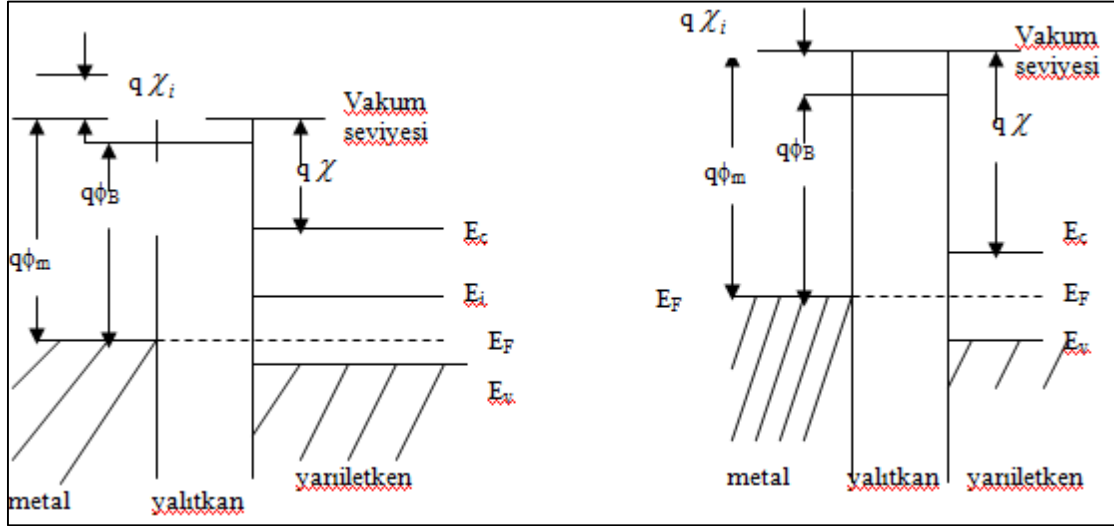
Şekil 2.8. Metal-yalıtkan-yarıiletken kontak

Sıfır besleme geriliminde, metal iş fonksiyonu, Φ_m ile yarıiletkenin iş fonksiyonu, Φ_s veya iş fonksiyonu farkı Φ_{ms} sıfırdır.

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} + \phi_B \right) = 0 \quad \text{n-tipi için} \quad (2.27)$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi_s + \frac{E_g}{2q} - \phi_B \right) = 0 \quad \text{p-tipi için} \quad (2.28)$$

denklemdede χ_s yarıiletkenin elektron yakınlığı, E_g yasak enerji aralığı, E_F ile saf Fermi seviyesi, E_i arasındaki enerji farkı, ϕ_B ise $E_F - E_i$ 'dir.



Şekil 2.9. $V=0$ halinde ideal bir MIS kontağın enerji-bant şeması. (a) p-tipi yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken

Doğru veya ters bir beslemede yarıiletkende ve yalıtkan yakınındaki metal yüzeyinde yükler mevcut olabilir, ancak bu yükler eşit ve zıt işaretlidirler. Doğru beslemedeyken yalıtkan içinden hiç akım geçmez ya da yalıtkanın direnci sonsuzdur.

İdeal bir MIS yapıya ters besleme uygulandığımızda, yarıiletken yüzeyinde temelde üç hal var olabilir. p-tipi yarıiletkenli MIS kontaklarda metale eksi gerilim ($V < 0$) uygulandığında (Şekil 2.10) valans bandının tepesi yukarı doğru bükülür ve Fermi seviyesine çıkar. Yarıiletkendeki Fermi seviyesi değişmez. Taşıyıcı konsantrasyonu üstel olarak enerji farkı ($E_F - E_V$)'ye bağlı olduğundan, bu bant bükülmesi yarıiletken yakınında çoğunluk taşıyıcı olan hollerin yığılmasına neden olur. Buna yığılma denir. p-tipi yarıiletkenli MIS kontaklarda küçük bir artı gerilim ($V > 0$) uygulandığında bantlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk taşıyıcıları tüketilir (Şekil 2.10 (b)). Burası tüketim bölgesidir. p-tipi yarıiletkenli MIS kontaklara büyük bir pozitif gerilim uygulandığında ise, bantlar aşağı doğru bükülür öyle ki saf seviye E_i , yüzeyde Fermi seviyesi E_F 'nin üstüne çıkar.

2.3.2. MIS kontaklarda akım-iletim süreci

İdeal MIS kontakta yalıtkan filmin iletkenliği sıfırdır. Ancak gerçek MIS kontaklarda, yerleşik elektronik haller yarıiletken-yalıtkan yüzeyinde bulunur ve bundan dolayı, kontak

ideal hallerden sapmalar gösterir. Bazı kontaklarda yalıtkan tabakanın üzerinden akım geçişi olur. Yeterli büyüklükte elektrik alan ile sıcaklığa sahipse yalıtkan tabaka iletken haline gelir. Metal-yarıiletken kontaklarda akım-gerilim ilişkisi,

$$J_F = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.29)$$

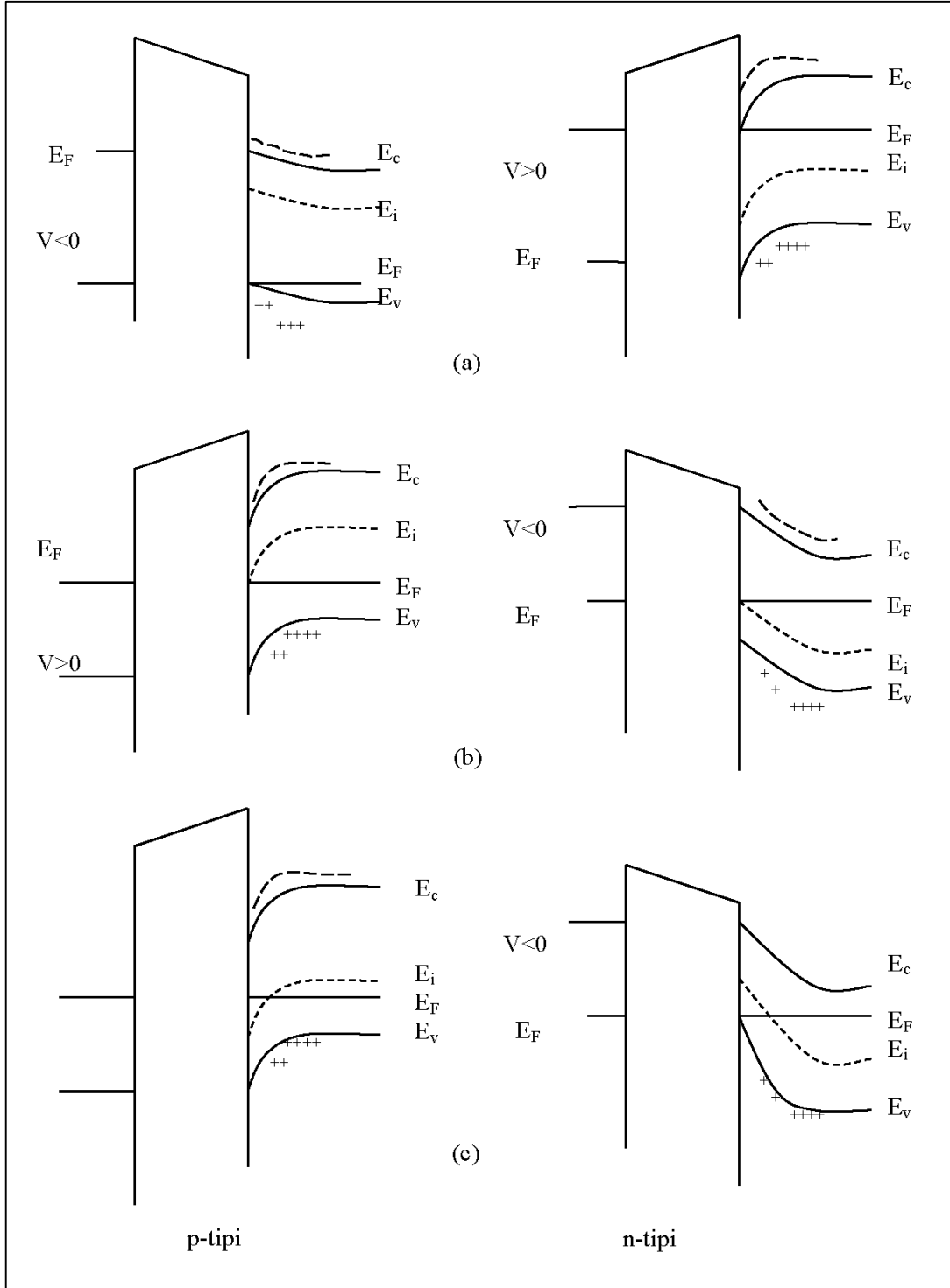
bağıntısıyla yazılır. Burada,

$$J_0 = A^{**}T^2 \exp\left[\frac{-q\Phi_B}{kT}\right] \quad (2.30)$$

ile verilen doyma akım yoğunluğudur. A^{**} , Schottky engel alçalması göz önüne alındığındaki Richardson sabiti, V_F doğru besleme gerilimidir. Eş. 2.30'daki Φ_B ise Φ_{Bn} veya Φ_{Bp} engel yüksekliğidir. Metal-yarıiletken kontaklarda akım-gerilim ilişkisini veren Eş. 2.29 ifadesindeki $\ln J_F$ - V_F grafiğinin eğimi q/kT dir. Şayet metalle yarıiletken arasında bir yalıtkan tabaka olduğunda doğru beslemede bu yapılarıdaki akım iletimi bu bağıntıdan biraz değişik olur. Bu halde $\ln J_F$ - V_F grafiğinin eğimi q/kT değerinden az olur. MIS Schottky engelli kontaklarda yalıtkan tabakanın etkisi Card ve Fonash tarafından incelenmiştir [47,97]. MIS kontaklarda uygulanan doğru besleme geriliminin bir kısmı yarıiletkenin tüketim tabakasına düşerken diğer kısmı da yalıtkan tabakanın üzerine düşer.

Bu halde yüzeydeki elektronların sayısı hollerden fazladır. Bu terslenim bölgesidir. Benzer sonuçlar n-tipi yarıiletken için de bulunabilir. İleri besleme gerilimi V_F ;

$$V_F = V_{yi} + V_y \quad (2.31)$$



Şekil 2.10. $V \neq 0$ halinde ideal MIS kontağın enerji-bant şeması: (a) toplanma, (b) tüketim ve (c) terslenim halleri

Metal-yalıtkan-n-tipi yarıiletken kontaklar için akım konsantrasyonu azınlık taşıyıcı tesirler göz ardı edilerek,

$$J_{Fn} = J_{sm}^{-e} - J_{ms}^{-e} \quad (2.32)$$

şeklinde yazılır. Burada J_{Fn} , doğru beslemdeki metalden yarıiletkene geçen akımın konsantrasyonudur. J_{sm}^{-e} , yarıiletkenden metale akan elektronların oluşturduğu akım konsantrasyonudur. J_{ms}^{-e} , metalden yarıiletkene akan elektronların oluşturduğu akım konsantrasyonudur. Şekil 2.11’de doğru besleme (V_F) durumunda metal-yalıtkan-n-tipi yarıiletken kontağın enerji bant şeması verilmiştir.

Doğru besleme V_F geriliminde metal-yalıtkan-p-tipi yarıiletkeni için akım konsantrasyonu ise,

$$J_{Fp} = J_{sm}^h - J_{ms}^h \quad (2.33)$$

şeklinde yazılır. Burada J_{ms}^h , metalden yarıiletkene, J_{sm}^h de yarıiletkenden metale akan deşiklerin (hole) oluşturduğu akım konsantrasyonlarıdır. Şekil 2.12’de doğru beslemede metal-yalıtkan-p-tipi yarıiletken kontağın enerji bant şeması verilmiştir.

Doğru besleme V_F geriliminde metal-yalıtkan-n-tipi yarıiletken için akım konsantrasyonu ifadesi,

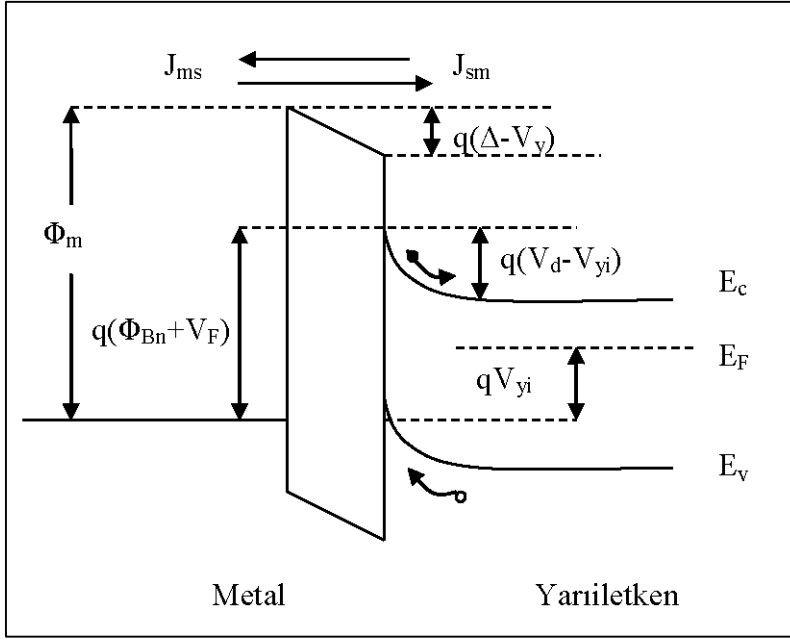
$$J_{Fn} = J_{sm}^{-e} - J_{ms}^{-e} = A^*T^2 \{ \exp[\beta(-\Phi_{Bn} + V_{yi})] - \exp[\beta(\Phi_{Bn} + V_y)] \} \quad (2.34)$$

olur. Denklemdaki $\beta = q/kT$ ’dir. Bu ifade $\exp(-\beta(\Phi_{Bp} + V_y))$ parantezine alındığında,

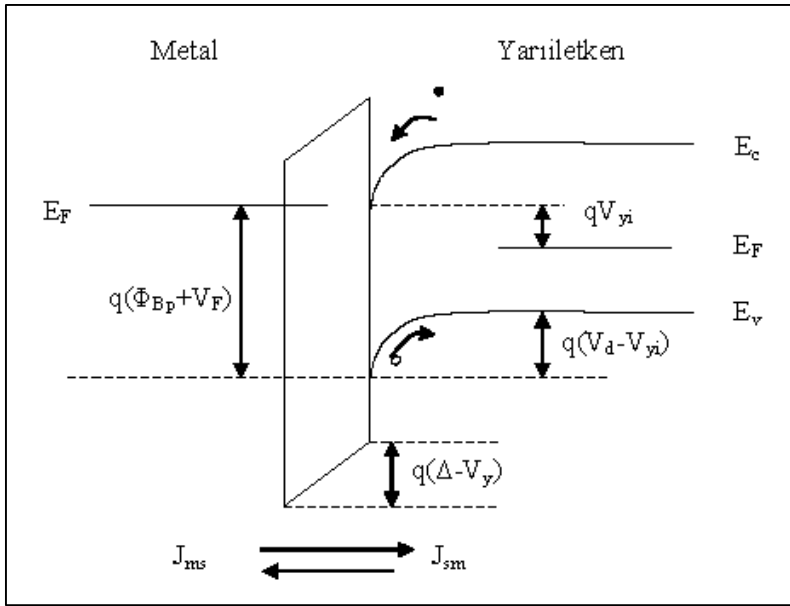
$$J_{Fn} = A^*T^2 \exp[\beta(\Phi_{Bn} + V_y)] \exp[\beta(V_F - 1)] \quad (2.35)$$

şekline dönüşür. Şayet metalle yarıiletken ortasında yalıtkan tabaka mevcut değilse ($V_y=0$) Eş. 2.35 ile Eş. 2.34 benzer olur. Eş. 2.34’de görüldüğü üzere yalıtkan tabakanın olması, J_F ’nin V_F ’ye bağımlılığını azaltır. Yalıtkan tabaka kalınlığı arttığında $\ln(I_F)$ ’nin V_F ’ye bağlı grafiğinin eğimi β ’dan küçük olur. Doğru beslemede metal-yalıtkan-n-tipi yarıiletken için akım konsantrasyonu ifadesi $V_F > 3kT/q$ için;

$$J_{Fn} = J_{Fp} = J_0 \exp\left(\frac{qV_F}{nkT}\right) \quad (2.36)$$



Şekil 2.11. Metal-yalıtkan-n-tipi yarıiletken kontağın enerji bant şeması



Şekil 2.12. Metal-yalıtkan-p-tipi yarıiletken kontağın enerji bant şeması

ifadesiyle verilir. Denklemden J_0 doyma akım konsantrasyonu olup,

$$J_0 = A^* T^2 \exp \left[\frac{-q\Phi_B}{kT} \right] \quad (2.37)$$

şeklinde ifade edilir. Φ_B , n ile p-tipi MIS yapının Schottky engel yüksekliği olup, sırayla Φ_{Bn} ve Φ_{Bp} 'ye karşılık gelir. $V_F > 3kT/q$ için Eş. 2.36 ve Eş. 2.37'nin eşit olması için

$V_F/n=V_F-V_y$ olduğu için, kontağın idealite faktörü $n=V_F/(V_F-V_y)$ olur. Bu denklemden görüldüğü üzere yalıtkan tabakanın kalınlığı ve V_F 'deki artma idealite faktörünü (n) arttırır. Böylece yalıtkan tabakanın kalınlığı ince olan numunelerde idealite faktörünün V_F ile değişimi düşer. Arayüzeydeki yalıtkan tabaka yeterli kalınlıktaysa (elektron geçiş katsayısı 1 değilse) ters doyma akımı, arayüzey olmadığı halde ters doyma akımıyla arayüzey yalıtkanın geçiş katsayısının çarpımına eşittir. Kısaca; J_0 (yalıtkan)- $T(\delta)J_0$ 'dır. Denklemden J_0 (yalıtkan), kalınlığı δ sahip bir arayüzey yalıtkan tabakanın varlığında ve $T(\delta)$ geçiş katsayısına sahipkenki halindeki ters doyma akımıdır. Doğru beslemede I-V karakteristikleri beslemenin çoğu üzerinde çizgiselse Eş. 2.37'de J_0 (yalıtkan) yazılarak denklemden etkin engel yüksekliği Φ_e bulunabilir.

$$T(\delta)J_0 = A^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_e}{kT}\right) \quad (2.38)$$

denklemden Φ_e çekilirse,

$$\Phi_e = \frac{kT}{q} \left[\ln\left(A^* \frac{T^2}{J_0}\right) \right] - \frac{kT}{q} [\ln T(\delta)] = \Phi_B - \frac{kT}{q} [\ln T(\delta)] \quad (2.39)$$

yazılır. Bu şekilde $T(\delta)$, 1'den küçük ise etkin engel yüksekliği (Φ_e) yalıtkan tabaka olmadığı hallerdeki Φ_B engel yüksekliğinden daha büyüktür.

2.4. Schottky Engellerinde İdeal Durumdan Sapmalar

2.4.1. Engel yüksekliğinin besleme gerilimine bağımlılığı

Termiyonik yayma teorisine bağlı akımın ifadesi Eş. 2.6'te verilmişti. Bu eşitlikteki I_0 ifadesinin hayali kuvvetin gözardı edildiği hal için;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.40)$$

eşitliğiyle yazılır. Pratikte, kontağın üretimi sırasında metal ile yarıiletken arasında ince arayüzey doğal oksit tabakanın oluşmaması imkânsızdır. Bu şekildeki yalıtkan tabaka Schottky kontağını metal-arayüzey tabaka-yarıiletken (MIS) yapısına çevirir ve doğal oksit tabakasının varlığı nedeniyle kontağın elektriksel özellikleri değişim gösterir. Böyle bir hal

için kontağa uygulanan gerilimin tümü tüketim bölgesine düşmediği göz önüne alındığında, ideal halden sapmalar söz konusu olacağı ve engel yüksekliğinin uygulanan besleme gerilimine bağlı olacağı söylenebilir. İdeal halden sapmaları ifade edebilmek amacıyla birimsiz sabit (n) idealite faktörü ifade edilmiştir. Bu faktör kontağın ideallığının ölçüsüdür. Bu faktörle kontak akımı;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.41)$$

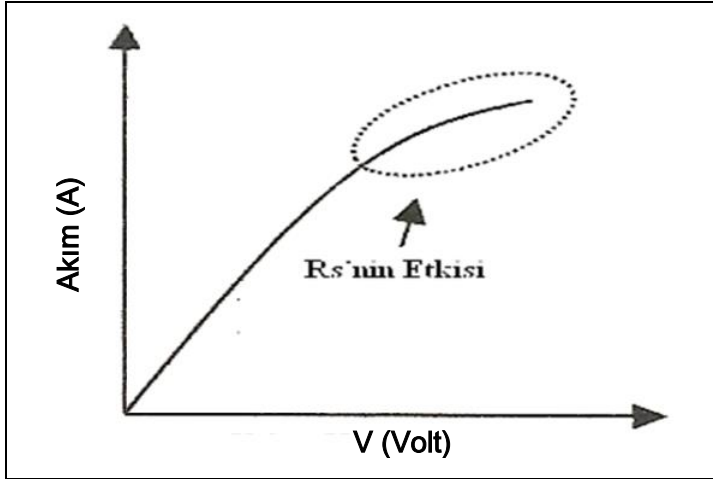
şeklinde yazılır. n birden büyüktür ve akım taşıma sürecinin ideal termiyonik emisyon teorisinden ne kadar saptığının ölçüsüdür. $3kT/q$ 'den büyük V değerlerinde, Eş. 2.41'deki 1 gözardı edilerek yeniden yazılırsa;

$$I = I_0 \left[\exp(eV/nkT) \right] \quad (2.42)$$

ifadesiyle daha basit biçimde yazılabilir.

2.4.2. Seri direnç etkisi

Metal-yarıiletken doğrultucu diyotlarda, yarıiletken kısmında meydana gelen tüketim bölgesinin dışındaki nötral bölge kontak akımına karşı tepki gösterir. Bu direnç gövde direnci olarak bilinir ve R_s ile gösterilir. Bu direnç büyük gerilim değerlerinde etkili olmaya başlar. Kontak akımının düşmesine sebep olduğundan gerilimin yüksek değerlerinde, akım-gerilim karakteristiğinin bükülmesine neden olur. Şekil 2.13 bir Schottky kontakta yüksek gerilim değerlerinde seri direncin etkisiyle oluşan kontak akımındaki azalmayı göstermektedir [50].



Şekil 2.13. Seri direnç (R_s)'in akım-voltaj eğrisi üzerindeki etkisi

Kontağın seri bir R_s dirence sahip durumu için Eş. 2.43 şeklinde yazılır.

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right) \right] \quad (2.43)$$

2.4.3. T_0 anormalliği

İdealite faktörünün sıcaklığa pekçok açıdan bağımlılığı deneysel yollarla gösterilmiştir. Çoğunlukla, numunenin sıcaklığı yükseldiğinde kontağın idealite faktörü azalır. Bazı metal-yarıiletken diyetlarda oluşturulan engel yüksekliği ile idealite faktörünün ölçülen sıcaklıklarla değişimi, T_0 anormalliği diye bilinir. Bu hal elementel ve bileşik yarıiletkenlerde Schottky engelinin tüm çeşitlerinde gözlenen bir olaydır. Bir Schottky kontak için akım eşitliği aşağıdaki şekildeyse, kontağın T_0 tesirini gösterdiği söylenebilir.

$$I_{toplam} = A^{**}AT^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_B}{k(T + T_0)} \right) \left[\exp \left(\frac{eV}{k(T + T_0)} \right) - 1 \right] \quad (2.44)$$

Burada T_0 sabittir. T_0 tesirinin varlığı genel olarak kT 'ye bağlı nkT 'nin grafiğiyle bulunur. Grafiğin eğimi 1 orijinden geçmeyen doğru sonucu vermelidir. Aynı anda x- eksenini $1/nT$ olacak şekilde Richardson eğrisi çizilirse, T_0 anormalliğinin olması hallerinin bir doğruyu sonuç vermelidir. T_0 etkisi arayüzey hallerinin üstel dağılıma atfedilebilmesi, bir arayüzey tabakanın varlığının işaretidir ve bu homojenize MS diyetlardaki T_0 'ın görülen değeriyle uyumsuzdur. T_0 değerinin aynı şekilde üretilen kontaklar arasında önemli farklılıklar göstermesi ve yüzey alanı büyük kontaklarda yerel değişebilen değerleri alması, T_0 'ın engel

oluşum sistemleriyle direkt alakalı olmadığına göstergesidir. Heterojen Schottky engeli kuramı, T_0 anormalliğinin güzel bir izahını yapmaktadır. Sıcaklık düştüğünde, heterojen bir Schottky kontak akımı iki çeşit eğilim göstermektedir ve bunların her ikisi de T_0 tesirine yöneliktir. Bunların birincisi, besleme gerilimindeki artmanın ölçülen idealite faktöründeki artmaya sebep olmasıdır. İkinci hali izahı amacıyla, rastgele dağılımla, alçak Schottky engeli bölgeleri olan bir Schottky kontağı gözönüne alıyoruz. Bu şekildeki bir kontak için sıcaklık indirildiğinde, kontak akımı, az sayıda olan alçak Schottky engeline ait bölgelerce kontrol edilir. Böyle bölgelerde etkin Schottky engeli daha düşük olmasına rağmen idealite faktörü daha büyüktür. T_0 'ın idealite faktörüyle bağımlılığı, katkılama miktarı ve Schottky engel dağılımıyla alakalıdır. Kontak akımı için aşağıdaki eşitlik verilir;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nk(T + T_0)} \right) - 1 \right] \quad (2.45)$$

İdeal durumda ($n=1$) T_0 sıfır değerini vermektedir. Kısaca T_0 sıfıra yaklaştıkça kontaklarda ideal hale yaklaşırlar. Eş. (2.37) kullanılarak çizilen akım-gerilim grafiğinin analitik yorumuyla $n=(1+T_0/T)$ olduğu ve denklemin $y=ax+b$ yapısından faydalanılarak T_0 değeri hesaplanabilir. Eş. (2.37), T_0 'ın sıcaklık olarak sıfırdan büyük bir değişmez olduğunu gösterir. Verilen herhangi bir sıcaklıktaki idealite faktörü, T_0 ile $n=(1+T_0/T)$ şeklinde değişme uğramaktadır. Buna ilave olarak, T_0 bir sabit olmasına rağmen sıcaklık değiştiği zaman T artık bir değişkendir.

2.4.4. Arayüzey durumları

Arayüzey halleri, kısa bir zaman aralığında yarıiletkenle yüklerin değişebildiği oksitlenmiş yarıiletken arayüzeyde yasak bant aralığındaki girilebilen enerji seviyeleridir. Bir arayüzey hali verici ya da alıcı şeklinde olabilir. Bir verici arayüzeyin tuzağı doluysa nötür ve bir elektron vermekle de artı yüklü hale gelir. Bir alıcı arayüzeyin tuzağı boş ise nötür ve bir elektron alarakta eksi yüklü hale gelir. Bir gerilim uygulandığında, arayüzeyin tuzak seviyeleri, Fermi seviyesinin değişmez kalmasına rağmen, valans ve iletkenlik bantlarıyla aşağı ve yukarı devinim yaparlar. Arayüzey tuzaklardaki yük değişimi, arayüzey tuzaklarının iletkenlik bandı ve valans bandıyla yük alış-verişi yapmasından ortaya çıkar. Bu yükün değişmesi MIS kapasitansına katkı yapar ve ideal MIS eğrisinin değişimine neden

olur. Arayüzey halleri genellikle arayüzeye oldukça yakındırlar. Arayüzey halleri uzay yük kapasitansın paralel kapasitans ve seri direnç tesirinde bulunurlar.

Sabit oksitlenmiş yükler sabit konumlara sahiptir. Bu yükler yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. Sabit oksitlenmiş yükler genellikle pozitifdir ve oksidasyon, tavlama durumları ile silisyumun yönelim biçimine bağlıdırlar. Elektrik ölçümlerinde sabit oksitlenmiş yük, yalıtkan- yarıiletken arayüzeyindeki tabaka durumunda yerleşik yükler biçiminde görülebilir. n-tipi ve p- tipi yarıiletkenlerin ideal C-V eğrisine bağlı, uygulama geriliminin eksi değerleri yönünde C-V eğrisi kaymasına artı sabit oksitlenmiş yükler, C-V eğrisinin ileri artı uygulama gerilimi yönünde kaymasına ise eksi sabit oksitlenmiş yükler neden olurlar. Büyük artı uygulama gerilimleri için devinimli iyonlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeye sürüklenirler. Büyük eksi uygulama gerilimleri için devinimli yükler metal-yalıtkan arayüzeye çekilirler ve C-V eğrisi değişmez.

Oksit yükünün bir başka türü hareketli iyonik yüküdür. Bu yüke çoğunlukla, sodyum veya potasyum gibi iyonize olmuş alkali metal atomları sebep olur. Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Böyle iyonlar nisbeten düşük sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Bununla beraber hareketli iyonik yük, metal-yalıtkan ve yarıiletken-yalıtkan arayüzeyi arasında ileri geri gidip gelebilir ve bunun neticesinde iyonik akım gözlenebilir. Hareketli iyonlar genellikle Na, K, Li, H, H₃, O iyonlarıdır. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları içermesi, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslara, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden yalıtkan içinde bulunabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alan altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

Kimyasal yapı bozukluklarından bu tuzaklar yalıtkan tabaka içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Bir yalıtkan tabakada elektron-deşik çiftleri meydana gelmişse (iyonlaştırıcı radyasyon ile) bu elektron ve deşiklerin bir kısmı sonradan oksitte tuzaklanabilir. Yapının üretiminde ortaya çıkan elektron ve deşik tuzakları daha sonradan tavlama ile kaldırılabilir. Oksitte tuzaklanmış yük, yalıtkan doğru dağıldığından genellikle yalıtkan- yarıiletken yüzeye yerleşmezler. İyonlaşmış tuzaklar kapasitans-gerilim eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru artırırken ölçülen

kapasitans değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklar meydana gelir. Kapasitans-gerilim eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı yalıtkan içindeki tuzakların miktarını verir.

2.5. Düz Bant Engel Yüksekliği ile Sıcaklık Bağımlılığı

Schottky engel yüksekliğiyle elektrik alanın bağımlılığı bilinen bir gerçektir. Schottky kontaklardaki bağımlılık, doğru beslem akım-gerilim ölçümleri sonucunda bulunan idealite faktörüyle, ölçülen engel yüksekliği arasında genel bir eşitlik elde etmek amacıyla kullanılabilir. Bu açıklama doğrusal bant şartları altında ifade edilen, elektrik alanından bağımsız ana engel yüksekliğine bağlıdır. Doğru besleme akım-gerilim eğrilerini incelemek amacıyla kullandığımız standart akım ifadesi aşağıdaki şekildedir.

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{b0}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{e(V - IR)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.46)$$

Φ_{b0} , R ve n değerleri ölçümler sonucunda akım-gerilim karakteristiklerinden hesaplanır. Ana ifadeyi bulmak amacıyla önce n=1 olan ideal kontakta, uygulanan gerilime bağımlı engel yüksekliği;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_B^{(V')}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV'}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemde $V' = V - IR$ dir.

$$\Phi_B^{(V')} \equiv \Phi_{b0} + (n - 1 / n) V' \quad (2.48)$$

Bu denklem $V \gg kT/q$ olduğu doğru besleme hallerinde geçerlidir. Eş. 2.48'e bağlı uygulanan gerilimin sıfır olduğu zamanda ($V=V'=0$) ölçülen engel yüksekliği miktarı Φ_{b0} 'ı, sıfır besleme engel yüksekliği diye isimlendirebiliriz.

Engel yüksekliğinin elektrik alanıyla ilişkisi değişik biçimlerde modellenmiştir. Bütün modeller temel bir özellik barındırmaktadır. Engel yüksekliğindeki azalma elektrik alanının değeri sıfır iken sıfır olur. Bunun nedeni, o noktadaki yüzey durumlarında herhangi bir

yükün olmamasıdır. Buna ilaveten yarıiletkenin enerji bantları doğrusal durumdadır, bu hal tünelleme ile hayali kuvvetin etkilerinin karakteristikleri etkilemesine engel olur. Elektrik alanının değeri sıfır iken engel yüksekliğinde azalma olmaması bulunacak denklem için kilit noktadır. Doğru bant gerilimi n tipindeki yarıiletkenlerde aşağıdaki şekilde verilir.

$$V_0 \equiv \Phi_{bf} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (2.49)$$

Denklemde, Φ_{bf} elektrik alan sıfır iken engel yüksekliği, N_C iletim bandındaki etkin durumların yoğunluğu, N_D ise yarıiletkendeki vericilerin yoğunluğudur. Şayet;

$$\Phi_{bf} = \Phi_{b0} + \left(\frac{n-1}{n} \right) V_0 \quad (2.50)$$

tanımlaması kullanılırsa, Denk (2.48) aşağıdaki biçimde yazılabilir;

$$\Phi_B^{(V')} \equiv \Phi_{bf} + (n-1/n) (V' - V_0) \quad (2.51)$$

Eş. (2.49) kullanılarak;

$$\Phi_{bf} = n\Phi_{b0} - (n-1) \frac{kT}{e} \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (2.52)$$

Eş. (2.52) bulunur. Sonuçta;

$$\Phi_{b0} = \frac{1}{n} \Phi_{bf} + \left(\frac{n-1}{n} \right) \frac{kT}{e} \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (2.53)$$

eşitliği elde edilir. Doğrusal bant engel yüksekliği sıcaklığa bağlıdır ve bağımlılığın ifadesi,

$$\Phi_{bf}(T) = \Phi_{bf}(T=0) + \alpha T \quad (2.54)$$

şeklindedir. Φ_{bf} ($T=0$) sıcaklığa bağlı olarak bulunan doğrusal bant engel yüksekliği değerlerini sıfıra ekstrapole ederek sıfır sıcaklık doğrusal bant engel yüksekliği bulunabilir, α sıcaklık bağımlılığı katsayısıdır.

2.6. İdealite Faktörü ile Engel Yüksekliğinin Sıcaklık Bağımlılığı

2.6.1. Heterojen engel yüksekliği

İdeal termiyonik emisyonlardan sapma, çoğu Schottky kontakta alçak sıcaklıklarda görülen durumdur. Alçak sıcaklıklarda idealite faktöründe büyük bir artış görülür. $\ln(I_0/T^2)$ nin $1/T$ 'ye bağlı olarak çizilen grafiğinin doğrusal olmadığı, ama $\ln(I_0/T^2)$ 'nin $1/nT$ 'ye bağlı olarak çizilen grafiğin doğrusal olduğu görülmektedir. Hayali-kuvvetin etkisinin, tüketim bölgesinde yeniden oluşma akımından ya da tünelleme etkisinden bu sapmanın izah edilemeyeceğini anlaşılmıştır [51]. Alçak sıcaklıklarda gözlenen bu anormalliklerin açıklanması amacıyla arayüzey halleri [52] arayüzey tabakalarının [53] ve engel heterojenlikleri şeklinde birçok metot önerilmiştir [54]. Anormalliklerin açıklanmasında en başarılı metodun engel heterojenliği metodu olduğu görülmektedir; heterojen engel metodunu göz önünde bulundurarak heterojen engel için akım-gerilim ilişkisini açıklayan ifade bulundu; Tung ile arkadaşlarının geliştirdikleri metotta deneysel olarak belirlenmesi gereken pek çok değişken vardır [55]. Werner ile arkadaşları tarafından daha da geliştirilen gerilim dağılım metodunda, idealite faktörünün analitik ifadesinin eldesiyle, engel heterojenliklerine bağlı modifiye edilen bir akım-gerilim ilişkisi ileri sürüldü [56]. Bu metodla Schottky engelinde düzgün tekli yapının olmadığı görüldü. Metodla, belli Φ_b engel yüksekliğiyle ilişkili, σ standart sapmasına sahip, ortalama değerli Gauss dağılımıyla belirtilmektedir [54]. Bazı bölgelerdeki Schottky engel yüksekliği ortalama engel yüksekliğinden $\Delta\Phi$ kadarlık bir sapmaya sahip olur.

2.6.2. Gaussian engel dağılım $P(\Phi_B)$

Gerilim değişimi metodu, MS arayüzeyinin sürekli engel dağılımı olduğunu dikkate alır. Bu metodla katkı oranı büyük yarıiletkenlerde alan yük bölgesi genişliği oluşan bandın bükülmesi (V_d) ile Schottky engellerinin (Φ_B) değişimlerini inceler. Burada gözönüne alınan metot Schottky kontakların akım iletimi özelliklerini incelemek amacıyla tanımlanmıştır; metod sadece kapasitans ve akım ölçümleriyle hesaplanan engel yüksekliklerinin arasındaki farkı değil, aynı zamanda idealite faktörünün niçin $n>1$ olduğunun da açıklamasını içerir. Metot, ortalama V_d halinde standart sapma (σ_s) olan Gaussian dağılımının $P(V_d)$ ve metal-yarıiletkenin arayüzeyindeki bant bükülmesinin (V_d) uzay yükünün dağılımını,

$$P(V_d) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\bar{V}_d - V_d)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (2.55)$$

şeklinde ifade eder. Sonuçta bandın bükülmesi (V_d) ile Schottky engeli aşağıdaki şekilde olur:

$$\Phi_B = V_d + \xi + V \quad (2.56)$$

Ortalama Schottky engeli, Φ_B durumundaki bir engel dağılımlı arayüzey dahilindeki bölgeye bağımlı olarak;

$$P(\Phi) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\bar{\Phi}_B - \Phi_B)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (2.57)$$

dağılım fonksiyonu ile belirtildiğinde;

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(V_d) dV_d = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\Phi_B) d\Phi_B \quad (2.58)$$

ifadesi bulunur. Werner ile arkadaşları yaptıkları çalışmalarda ideal dışı MS kontaklarda sıfır besleme engel yüksekliğiyle idealite faktöründeki farklı çözümlemeleri gerçekleştirmişlerdir [56]. Metotla, engel yüksekliğinde Gaussian dağılımın varlığının kabulüyle idealite faktörüyle sıfır besleme engel yüksekliğinin n_{ap} ve Φ_{ap} şeklindeki ifadelerini, görünen engel yüksekliği ile görünen idealite faktörü olarak tanımladılar.

Görünen engel yüksekliği, n_{ap} , Φ_{ap} ve σ_s gözönüne alınarak;

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{B0}(T=0) - \frac{q\sigma_s^2}{2kT} \quad (2.59)$$

$$\left(\frac{1}{n_{ap}} - 1 \right) = \rho_2 - \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (2.60)$$

şeklindeki ifadesini bulmuşlardır. Ortalama Schottky engel yüksekliği $\Phi_B = \Phi_{B0} + \rho_2 V$ ile standart sapmanın değeri $\sigma_s = \sigma_{s0} + \rho_3 V$, Gaussian değişkenlerdir. Burada, ρ_2 ve ρ_3 sıcaklık

gerilim sabitleridir. Standart sapma değerinin; sıcaklık bağımlılığı genellikle küçüktür bu yüzden gözardı edilebilir. Sıfır besleme engel yüksekliğinin azalmasının engel yüksekliğindeki Gauss dağılımının varlığından kaynaklandığı ifade edilebilir.

2.7. Richardson Eğrileri Kullanılarak Aktivasyon Enerjisi ile Richardson Değişiminin Bulunması

Richardson sabitini doğru şekilde bulmak, engel yüksekliğinin hesaplanmasında epey önem kazanmaktadır.

Richardson eğrileri, Richardson sabitini bulmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Eş. 2.61'deki verilmiş I_0 doyma akımı ifadesinde eşitliğin her iki tarafını T^2 'ye bölüp logaritmasını alınırsak;

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\Phi_{b0}}{kT} \quad (2.61)$$

eşitliği bulunur. I_0 'ın değişik sıcaklıklardaki değerleri kullanılarak, aktivasyon enerjisi $(\ln(I_0/T^2)) - 1000/T$ grafiği çizilir. Bu grafiğin eğimini, 0 K'deki, 0 besleme engel yüksekliği Φ_{b0} 'i, diğer ifadeyle aktivasyon enerjisini verecektir. Grafiğin y eksenini kestiği noktadan etkin Richardson sabitini A^{**} bulabiliriz. Hackam ve arkadaşları ideal olmayan kontaklarda ileri besleme akımını;

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{n(T)kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{n(T)kT}\right) \quad (2.62)$$

şeklinde ifade etmişlerdir. Denklemden $n(T)$ sıcaklığa bağlı idealite faktörüdür. Denklemden idealite faktörünün sıcaklık bağımlılığını dikkate alınarak bazı eklemeler yapılmıştır. Değiştirilmiş denklemin Richardson eğrisinin, $\ln(I_0/T^2)$ 'nin sıcaklığa göre $1000/T$ 'ye bağlı grafiğini verecektir. Eğrinin n 'nin sıcaklık bağımlılığı kuvvetli olduğu hallerde, doğrusal olmadığını göstermiştir [55]. Bhuiyan tarafından Richardson eğrisine idealite faktörüne sıcaklık bağımlılığı içeren eklemeler yapılmıştır [49].

Doğrusal bant engel yüksekliğinin sıcaklığa Eş. 2.54 ifadesiyle bağlı olduğu Yıldız ve arkadaşları tarafından ifade edilmiştir [58]. Eş. 2.61'de, $\ln(I_0/T^2)$ 'nin sıcaklığa göre $1000/T$ 'ye bağlı olarak çizilen grafiğinin eğimi sıfır beslemede engel yüksekliği, Φ_{b0} 'i

verecektir. Grafiğin $1/nT=0$ 'da y eksenini kesim noktasından Richardson sabiti, A^* , hesaplanır. Herhangi bir sıcaklıktaki engel yüksekliğiye $\Phi_b(T)=\Phi_{b0}-\alpha T$ eşitliği yardımıyla bulunabilir. Gümüş ve arkadaşları doğrusal bant engel yüksekliğinin, sıcaklığa Eş. 2.54'deki şekilde bağıllığını göz önünde bulundurularak, modifiye edilmiş etkin Richardson sabiti eşitliğini;

$$A_{düzeltmiş}^* = A_{gözlenen}^* \exp \left[\frac{e}{k} \left(\frac{d\Phi_{bf}}{dT} \right) \right] = A_{gözlenen}^* \exp \left[\frac{e}{k} \alpha \right] \quad (2.63)$$

şeklinde ifade etmişlerdir [49,98].

2.8. Yarıiletken Seri Direnç Bulma Yöntemleri

2.8.1. Norde yöntemi

İdeal Schottky engelli kontağı için akım-gerilim özelliği Eş. 2.6'da verilmiştir. R_s seri direnci varlığı yapılan akım-gerilim ölçümleriyle yapının karakteristiklerinin belirlenmesinde pek çok problemin doğmasına neden olacaktır. Akım-gerilim eğrisinin doğrusal olduğu bölümler $kT/e \ll V \ll IR_s$ aralığıyla sınırlı olacaktır. Şayet R_s değeri büyükse bu aralık I_0 için doğru değer veremeyeceği kadar azalacaktır. V geriliminin küçüldüğü kısımda, yapının toplam akımının üzerinde yeniden birleştirme akımlarının katkısı önemli olacaktır. Akım-gerilim grafiğinin doğrusal kısmının $V=0$ noktası yönünde ekstrapolasyonu yoluyla bulunan I_0 doyma akımındaki güvenilirliği küçültecektir. Bu gibi durumlar için seri direnç ve engel yüksekliğini bulmanın bir metodu Norde tarafından ortaya atılmıştır [59]. $F(V)$ Norde fonksiyonu şu şekilde tanımlanmıştır:

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (2.64)$$

Eş. 2.64'de $I(V)$, akım-gerilim eğrisinden elde edilen değerlerdir. Yapının R_s 'yi içine alan akım ifadesi, Eş. 2.43 ile verilmiştir. $V > kT/q$ varsayımıyla, Eş. 2.43 ve Eş. 2.50 birleştirilerek,

$$F(V) = \Phi_b + IR_s - \frac{V}{2} \quad (2.65)$$

şeklinde ideal durumda $R_s = 0$ dır ve $F(V)$ düz eğri verir. Eğrinin eğimi $-1/2$ 'dir. Eğrinin $F(V)$ ekseninin kesim noktasından Φ_b bulunacaktır. Direnç olması durumundaysa; Eş. 2.65 olur. Yüksek gerilim değerlerinde Eş. 2.66, eğimi $+1/2$ olan bir doğru verecektir. Akımın küçük değerlerinde $F(V)$ ideal durumuna yaklaşacaktır. Akımın büyük değerlerinde $F_R(V)$ 'ye ulaşacaktır. İki dönüm noktası arasındaysa $F(V)$ ilgilendiğimiz minimum değeri alacaktır. Eş. 2.65'in gerilime bağlı türevi alındığında;

$$\frac{dF}{dV} = R_s \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (2.66)$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_D} \left[1 + R_s \left(\frac{dI}{dV_D} \right) \right]^{-1} \quad (2.67)$$

elde edilir. V_D kontak üzerindeki gerilimdir. Eş. 2.43'ün gerilime bağlı türevi alınır;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_D} \left[I_0 \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \right] \quad (2.68)$$

$$I_0 \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) = \frac{eI}{kT}$$

bulunur. Eş. 2.66 ve Eş. 2.68 kullanarak Eş. 2.69 aşağıdaki biçimde yazılır;

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\frac{eR_s I}{kT}}{1 + \frac{eR_s I}{kT}} - \frac{1}{2} \quad (2.69)$$

$F(V)$ 'nin minimumunun bulunması $dF/dV=0$ 'daki akım değeri olan $I_{F(V)\min}$ bulunmasını gerekli kılar. Eş. 2.69 sıfıra eşitlendiğinde;

$$I_{F(V)\min} = \frac{kT}{eR_s} \quad (2.70)$$

ifadesi bulunur. Akıma denk gelen $V_{F(V)\min}$ değeriye;

$$V_{F(V)\min} = \frac{kT}{e} + \ln \left(\frac{I_{F(V)\min}}{AA^* T^2} \right) \quad (2.71)$$

denklemleriyle verilir. $F(V)$ 'nin minimumu;

$$F(V_{F(V)\min}) = \frac{V_{F(V)\min}}{2} + \frac{kT}{e} \left(\frac{I_{F(V)\min}}{AA^*T^2} \right) \quad (2.72)$$

denklemleri ile verilir. Akım-Gerilim karakteristiğinden ölçülen değerlerden $F(V)$ 'nin minimum değeri olan $F(V_{F(V)\min})$ ile buna karşılık gelen $I_{F(V)\min}$ ve $V_{F(V)\min}$ 'in değerleri Eş. 2.70, Eş. 2.71 ve Eş. 2.72 ile birlikte kullanarak,

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_{\min}} \quad (2.73)$$

γ :İdealite faktöründen büyük ve grafikte minimum verecek bir değer.

$$\Phi_b = F(V_{F(V)\min}) + \frac{V_{F(V)\min}}{2} - \frac{kT}{e} \quad (2.74)$$

Eş. 2.73 ve Eş. 2.74 eşitlikleri yardımıyla seri direnç ve gerilim engel yüksekliğinin değerleri bulunur.

2.8.2. Cheung fonsiyonları yoluyla Schottky kontak parametrelerinin bulunması

Akım-gerilim eğrisinde, uygulanan yüksek gerilim değerlerinde, bükülmeye neden olan R_s seri direnci vardır. Engel yüksekliği Φ_{b0} , n ve R_s gibi yapı parametrelerini bulabilmek amacıyla ortaya atılan metodlardan birisi de Cheung tarafından oluşturulan Cheung fonksiyonlarıdır [60]. Cheung, Norde fonksiyonunda minimum noktanın tanımlanmasındaki zorluklar sebebiyle $F(V)$ 'nin minimum noktayı tanımlamadan akım-gerilim karakteristiklerinden oluşturulan $dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I şeklindeki iki fonksiyonla yapının ana parametrelerinin bulunabileceğini göstermiştir. Fonksiyonları bulmak için denklem 2.43'de I_0 ifadesi yerine yazılıp her iki tarafın doğal logaritması alınır. Oluşturulan denklemden V ifadesini çekilirse;

$$V = \frac{nkT}{e} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_{b0} + IR_s \quad (2.75)$$

denklemleri bulunur. Bu denklemde iki yanın $\ln I$ 'ya bağlı türevi alınır:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_S \quad (2.76)$$

eşitliği bulunur. Eş. 2.76, ilk Cheung fonksiyonunun ifadesidir. Eşitlikten görüleceği üzere $dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya bağlı grafiği lineerlik gösterecektir. Grafik çizildiğinde, eğimi R_S olacaktır. Grafiğin, $I=0$ 'da $dV/d(\ln I)$ ekseninin kesim noktasından (n) idealite faktörü bulunur. Diğer yapı parametrelerini bulabilmek amacıyla Eş. 2.75 aşağıdaki biçimde düzenlenir;

$$V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_{b0} + IR_S \quad (2.77)$$

Eş. 2.77'in iki tarafının $H(I)$ olarak belirlenen yeni bir denkleme eşitlenmesiyle aşağıdaki denklemler bulunur.

$$H(I) = V - \frac{nkT}{e} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.78)$$

$$H(I) = n\Phi_{b0} + IR_S \quad (2.79)$$

ikinci Cheung fonksiyonuyla da engel yüksekliğini hesaplamak amacıyla $H(I)$ 'nın I 'ya bağlı grafiği çizilirse lineer bir grafik elde edilir.

Çizilen grafiğinin eğimi ise R_S 'yi verir. Grafiğin $I=0$ 'da $H(I)$ ekseninin kesim noktasından $H(0)=n\Phi_{b0}$ bulunur. Birinci Cheung fonksiyonu kullanılarak bulunan n değerinin denklemde yerine konulmasıyla Φ_{b0} bulunur.

2.8.3. Schottky kontaklarda kapasitans-gerilim ölçümleriyle kontak parametrelerinin bulunması

Her sıcaklık değeri için, C^{-2} - V eğrilerinin doğrusal kısmı fit edilir. C^{-2} - V karakteristikleri 2.80 denkleminde bulunur[4].

$$C^{-2} = \left[\frac{2(V_0 + V_R)}{\epsilon_s q N_D A^2} \right] \quad (2.80)$$

Denklemden $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m boş uzayın dielektrik sabiti ve ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabitidir. N_D verici atomların konsantrasyonu, V_r ise ters besleme gerilimidir, V_0 , C^{-2} -V eğrilerinin gerilim eksenini kestiği noktadan bulunan kontak gerilimidir. Bu değerler kullanılarak V_D difüzyon gerilimi bulundu. V_0 ile V_D difüzyon gerilimi arasındaki bağıntı

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.81)$$

biçimindedir. Eş. 2.81 de kT/q terimi eV cinsinden termal enerjidir[2]. C^{-2} -V grafiğiyle bulunan doğruların eğimleriyle N_D verici yoğunlukları bulunur[4,2].

$$N_D = \frac{2}{q \epsilon_s A^2 N_D \tan \theta} \quad (2.82)$$

Ölçüm yapılan her sıcaklık için tüketim tabakasının genişliği (W_d),

$$W_d = \left(\frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 V_0}{q N_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.83)$$

eşitliğinden hesaplanır [33]. C^{-2} -V doğrularından bulunan $\Phi_b(C-V)$ engel yüksekliği; V_D difüzyon gerilimi; E_F Fermi Enerjisi ve $\Delta \Phi_B$ Schottky engel düşmesine bağlayan ifade

$$\Phi_B = V_D + E_F - \Delta \Phi_B \quad (2.84)$$

Şeklindedir[2,4]. $\Delta \Phi_B$ sanal kuvvet engel alçalmasıdır ve,

$$\Delta \Phi_B = \left[\frac{q E_m}{4 \pi \epsilon_s \epsilon_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.85)$$

şekilde yazılır [4,2]. E_m elektrik alan aşağıdaki şekilde yazılır[4,2].

$$E_m = \left(\frac{2 q N_A V_D}{\epsilon_s \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.86)$$

E_F enerjisi aşağıdaki denklemden bulunur[4]:

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad (2.87)$$

Burada, N_c n-6H-SiC için iletim banttaki etkin durum yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak

$$N_c \approx 1.73 \times 10^{15} \times T^{\frac{3}{2}} (\text{cm}^{-3}) \quad (2.88)$$

şeklinde bulunur[1].

Bunun sıcaklığa bağlı genel ifadesi şeklinde bulunur. T Kelvin olarak sıcaklıktır. Bunun sıcaklığa bağlı teorik ifadesi

$$N_c = 2 \left(\frac{(2m^*kT)^{3/2}}{h^3} \right) \quad (2.89)$$

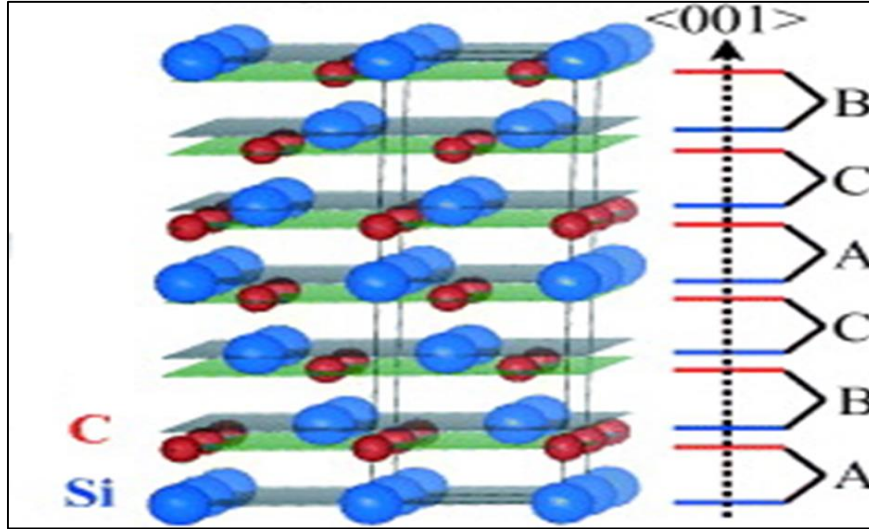
formunda verilir[1].

Hesaplamalarda kullanılan elektronun etkin kütlesi n tipi- 6H-SiC için $0,2m_0$ olarak alınır. V_d , N_D , E_F , $\Delta\Phi_B$, W_D ve $\Phi_B(C-V)$ parametreleri $1/C^2$ -V eğrilerinden bulunur.

2.10. SiC'nin Elektronik Özellikleri

SiC yarıiletkeni sahip olduğu; geniş bant aralığı, yüksek termal iletkenliği, yüksek elektron sürüklenme hızı ve zor şartlara dayanıklılığı sebeplerinden dolayı UV sensörü yapımında, yüksek frekans, yüksek güç gerektiren durumlarda, yüksek ve alçak sıcaklık ortamlarında çalışabilecek aygıtların yapımında kullanılmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle, SiC yarıiletkeni uzay çalışmalarında kullanılan cihazların yapımında ve güneş pillerinde önemli ölçüde kullanılmaktadır. Dolaylı bant yapısından ötürü optik özellikleri de ön plana çıktığından, bu malzeme ile ilgili fotovoltaiik çalışmalar da vardır. SiC yarıiletkeni birçok uygulamada yerini almıştır [6-7].

SiC ile ilgili genel özellikler Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Bu özellikleriyle SiC şimdiden geniş bir kullanım alanı bulmuştur. SiC'nin kristal yapısı Şekil 2.14'de verilmiştir. Bu kristal hegzagonal yapıdadır.



Şekil 2.14. SiC'nin kristal yapısı

Çizelge 2.1. SiC'nin bazı elektriksel ve optik özellikleri

Kristal Yapısı	6H-SiC	Wurtzite (Hegzagonal)
Simetri Grubu	6H-SiC	C_{6v}^4 -P6 ₃ mc
Debye Sıcaklığı	6H-SiC	1200K
Erime Notası	6H-SiC	3103±40K
Yoğunluğu	6H-SiC	3.21 g.cm ⁻³
Dielektrik sabiti(statik)	6H-SiC	$\epsilon_0 \approx 9.66$
Dielektrik sabiti(yüksek frekans)	6H-SiC	$\epsilon_0 \approx 6.52$
İnfrared kırılma indisi	6H-SiC	≈ 2.55
Optik fonon enerjisi	6H-SiC	104.2 meV
Elektron etkin kütlesi, m_e	6H-SiC	0.2 m_0
Elektron etkin kütlesi, m_t	6H-SiC	0.42 m_0
Hol etkin kütlesi, m_v	6H-SiC	$\approx 1.0 m_0$
Örgü sabiti	6H-SiC	$a = 3.0730 \text{ \AA}$ $b = 10.053 \text{ \AA}$
6H-SiC: Hegzagonal birim hücre (Wurtzite)		
Yasak enerji aralığı	6H-SiC	3.0 eV
İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu	6H-SiC	$8.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu	6H-SiC	$2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Yasak enerji aralığının sıcaklığa bağlılığı	6H-SiC	$E_g = E_g(0) - 6.5 \times 10^{-4} \times T^2 / (T+1200) \text{ (eV)}$
	6H-SiC	$N_c \approx 1.73 \times 10^{15} \times T^{3/2} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
	6H-SiC	$N_v \approx 4.8 \times 10^{15} \times T^{3/2} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
Kırılma (breakdown) elektrik alanı	6H-SiC	$(3/5) \times 10^6 \text{ V/cm}$
Elektronların mobilitesi	6H-SiC	$\leq 400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Hollerin mobilitesi	6H-SiC	$\leq 90 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Elektronların difüzyon katsayısı	6H-SiC	$\leq 90 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Hollerin difüzyon katsayısı	6H-SiC	$\leq 2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Elektronların termal hızı	6H-SiC	$1.5 \times 10^5 \text{ m/s}$
Hollerin termal hızı	6H-SiC	$1.2 \times 10^5 \text{ m/s}$
Öz ısı	6H-SiC	$0.69 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Termal iletkenliği	6H-SiC	$4.9 \text{ W cm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

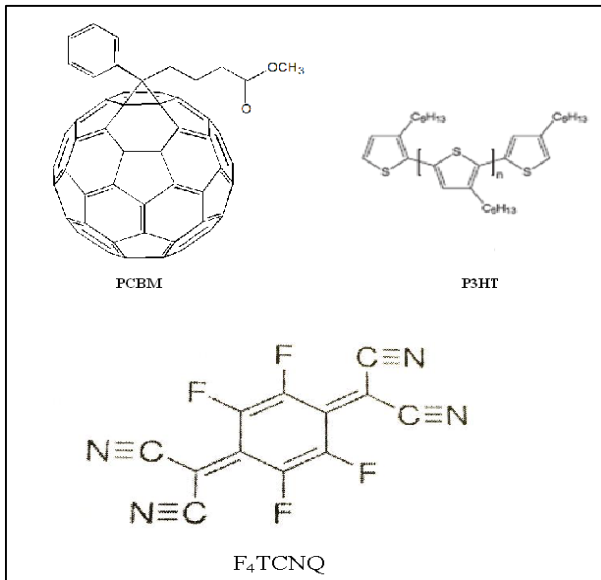
SiC ile ilgili genel özellikler Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

2.11. P3HT, PCBM ve F₄TCNQ Polimerlerinin Özellikleri

Polimer-fulleren karışımları, organik fotovoltailer alanında uygulanabilirliklerinin gelecekteki kapsamını sağlayacaktır. Fulleren türevi [6,6]-fenil-C₆₁-butirik asit metil ester (PCBM), bir elektron akseptörü (alıcısı) ve bir iletken polimer, poli (3-heksiltiyofen) (P3HT) olarak elektron vericisi (donörü) olarak görev yapar [17,27,28]. P3HT:PCBM düşük işleme maliyeti, geniş alanda kullanım, hafif kütle ve esnek alttaş gibi umut verici olasılıkları nedeniyle diğer organik bileşiklere göre üstünlüğe sahiptir [18,19].

Çoğu organik polimer iç yük taşıyıcılara sahip olmadığından, p veya n tipi iletkenliği geliştirdiği gözlenen ilave yük taşıyıcıları sağlamak için, metal katkılama, kullanılan yaygın bir yoldur. Metal katkılar arasında, F₄TCNQ yüksek elektron ilgisi ve en güçlü moleküler elektron vericilerden biri olarak bilinir [23,24,29]. P3HT ile F₄TCNQ katkılama son zamanlarda güneş pillerinde [23,25] ve alan etkili transistör uygulamalarında kullanılmaktadır [26,30].

F₄TCNQ (2,3,5,6-Tetrafloro-7,7,8,8-tetrasiyanonodimetan, genişletilmiş π -elektron sistemi sayesinde, elektron F₄TCNQ’yu kabul etme kabiliyeti büyük ve yaygın olarak kullanılan p-tipi katkı maddesidir [29].



Şekil 2.15. P3HT, PCBM ve F₄TCNQ polimerlerinin molekül diyagramları

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kristal Temizleme

Bu çalışmada, Schottky engelli diyotların üretilmesinde, alttaş malzeme olarak Cree Inc. firmasından temin edilen, $2,6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ donör yoğunluklu, 1 inç yarıçapında (0001) yönelimli $280 \mu\text{m}$, kalınlığında n-tipi 6H-SiC yarıiletken pul (wafer) kullanıldı. Yarıiletken materyal Bilkent UNAM'da (Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi) ortasından kesilerek iki eşit parçaya daha sonra da daha küçük boyutlarda parçalara ayrıldı. Araştırmada, bu puldan $7 \times 15 \text{ mm}^2$ boyutunda kesilmiş 4 adet n-tipi 6H-SiC kristali kullanıldı. Bu alttaşların kristal yüzeylerin üzerinde organik ve diğer ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri ortadan kaldırmak için yarıiletken kristal kimyasal olarak ultrasonik banyoda farklı aşamalardan geçirilerek temizlendi.



Resim 3.1. UNAM'da n-6H-SiC yarıiletken pulun kesilerek nümune oluşturulması için uygun boyutlarda küçültülmesinde kullanılan sistem



Resim 3.2. Dört parça nümunenin kimyasal temizleme yapıldığı ortam

Kullanılan deiyonize su (DIW) ($18,3 \text{ M}\Omega$), Innovation firmasından sağlanan Pure Water System marka cihazdan elde edildi.

Nümune ve deney esnasında kullanılacak araçların temizliği, kontakların iyi elektronik parametrelere sahip olmasında çok önemli olduğu için tüm kimyasal temizlemeler özenle gerçekleştirildi. Temizleme işleminde takip edilen yol aşağıdaki gibidir:

1. Temizlemede kullanılacak tüm beherler, tutucular DIW (de iyonize su $18,3 \text{ M}\Omega$) ile temizlenip, fırında kurutuldu.
2. Paslanmaz çelik plakaların lazerle delinmesi ile hazırlanan maske, nümune tutucu cımbız ve buharlaştırılacak saf (%99,995) metal (Ag) sırasıyla aşağıdaki temizleme işlemlerine tabi tutuldu:
 - a. Triklor Etilen içerisinde ultrasonik titreşimli banyoda 5 dakika süreyle yıkandı,
 - b. DIW içerisinde çalkalanarak durulandı,

- c. Aseton içerisinde ultrasonik titreşimli banyoda 5 dakika süreyle tutularak temizlendi,
 - d. DIW içerisinde çalkalanarak durulandı,
 - e. Metanol içerisinde ultrasonik titreşimli banyoda 5 dakika bekletilerek kimyasal temizleme yapıldı,
 - f. DIW içerisinde iyice çalkalanarak durulandı.
3. n-6H-SiC kristalin temizliği, yukarıda bahsedilen kimyasal temizlemeye benzer olarak yapıldı. Her bir nümune ayrı beherler içerisinde konularak;
- a. Sırasıyla, triklor etilen, aseton ve metanol içerisinde ultrasonik titreşimli banyoda 5'er dakika süreyle yıkandı,
 - b. Her bir yıkamadan sonra, bol miktardaki DIW içerisine daldırılarak çalkalama ile durulandı,
 - c. Durulama işlemi bittikten sonra, yüzeydeki doğal oksit tabakasını kaldırmak için, yarıiletken nümune $\text{HF}+\text{H}_2\text{O}$ (1:10) çözeltisi içerisinde 10 saniye kadar hafif hafif çalkalandı.
4. Kimyasal olarak temizlenen yarıiletken kristal, nümune tutucu, cımbız, maskeler ve saf metaller yüksek saflıktaki azot gazı (%99,99) ile kurutuldu.

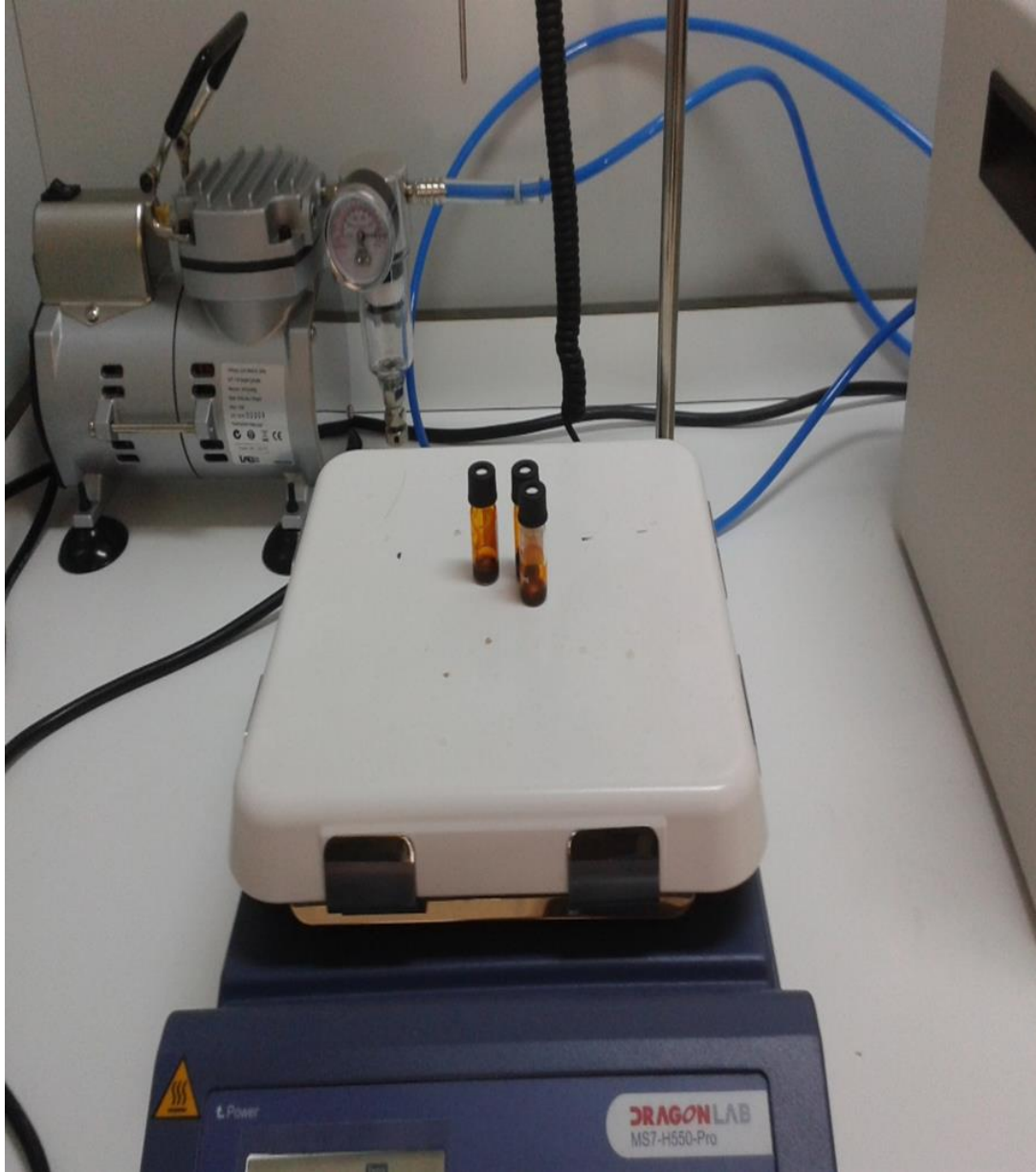
3.2. Omik ve Schottky Kontakın Oluşturulması

Nümunelerin oluşturulmasında Düzce Üniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezi'ndeki sistemler kullanıldı.



Resim 3.3. Nümunelerin hazırlanmasında kullanılan Nano Vak firmasının ürettiği NVB-300 TH model metal buharlaştırma sistemi

Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletkenin mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde, iç kısmının tamamı boş olan maske üzerine yerleştirildi ve vakum $\approx 6.10^{-6}$ mbar'a ulaştığında, flamanların biri üzerinden akım geçirilerek, %99,995'lik saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş Gümüş (Ag) metal parçacıkları buharlaştırıldı. Yarıiletkenin mat olan yüzeyine, ince film kalınlığını ölçme sistemi kullanılarak, 200 nm kalınlığında gümüş film kaplandı. Bu işlemden sonra, nümune aynı ortamda ve aynı basınç altında 450 °C sıcaklıkta 5 dakika tutularak gümüş filmin n-6H-SiC kristal içerisine çökmesi sağlandı. Oluşan kontağın omik olup olmadığı 4 nokta metodu ile akım-gerilim ölçümü yapılarak belirlendi.



Resim 3.4. P3HT maddesinin diklorürbenzen içinde çözündürülmesi ile hazırlanan çözelti

Schottky engelli diyotlar oluşturabilmek için aşağıdaki yol izlendi. Önce, farklı konsantrasyonlarda ve farklı polimerlerle, 3 farklı polimer çözeltisi hazırlandı: Bu polimer çözeltileri;

- 1) P3HT 25mg/1mL oranında klorobenzen içinde çözündürülerek hazırlandı.
- 2) PCBM 25mg/1mL klorobenzen içinde çözündürülerek hazırlandı.
- 3) F4TCNQ 0,02mg/1mL klorobenzen içinde çözündürülerek hazırlandı.

Her bir çözelti, manyetik karıştırıcı ile 2'şer saat karıştırılarak homojen bir yapının oluşması sağlandı. Sıvılar 30 dakika ultrasonik banyoda titreşimle karıştırıldıktan sonra aşağıdaki çözeltiler elde edildi:

1-150 μ L P3HT+150 μ L PCBM (1:1)

2-147 μ L P3HT+147 μ L PCBM+ 6 μ L F4-TCNQ (1:1:0,02)

3-300 μ L P3HT+150 μ L PCBM (2:1)



Resim 3.5. Schottky engelli diyotların hazırlanmasında kullanılan dönerli kaplama aygıtı

Hazırlanan polimer çözeltileri, küçük n tipi 6H-SiC altaşlar üzerine damlatıldı ve dönerek kaplama (spin coating) sistemine yerleştirildi. A, C, D kodlu numuneler 1500 ve B kodlu nümune ise 750 devirde üretildi. Burada devir sayısı polimer kalınlığını belirlemektedir.

Schottky engelli diyotların hazırlanması için; nümuneler, polimer kaplanan yüzey alta gelecek şekilde, 1,5 mm çaplı delikler açılmış olan paslanmaz çelik maske üzerine yerleştirildi. Flaman üzerine konulan kimyasal olarak temizlenmiş saf altın (Au) %99.95 metal parçası, yaklaşık 10^{-6} mbar vakumda buharlaştırılarak kristalin polimer kaplanan

yüzeyinde küçük dairecikler (1,5 mm çaplı) şeklinde, 200 nm kalınlığında altın kaplanması sağlandı. Böylece 4 farklı yapıda A, B, C, D numuneleri elde edilmiş oldu. 1 nolu çözeltiden farklı kalınlıkta A ve B numuneleri hazırlandı. 2 nolu çözeltiden C numunesi hazırlandı. 3 nolu çözeltiden ise D numunesi hazırlandı.



Resim 3.6. Üretilen örnekler



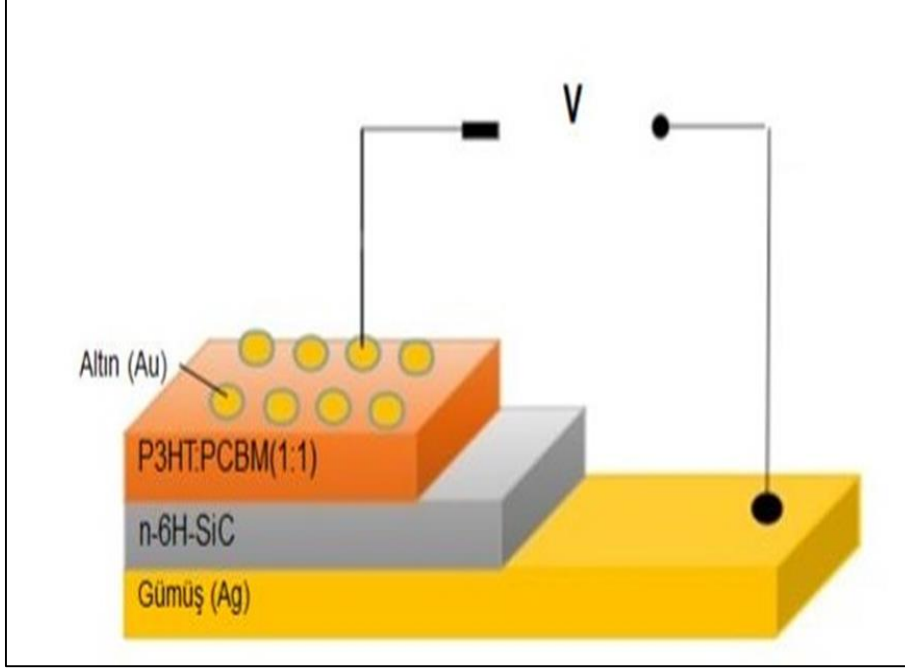
Resim 3.7. Üretilen A numunesi: Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) kontak alınmış şekli

A nümunesi: Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir),

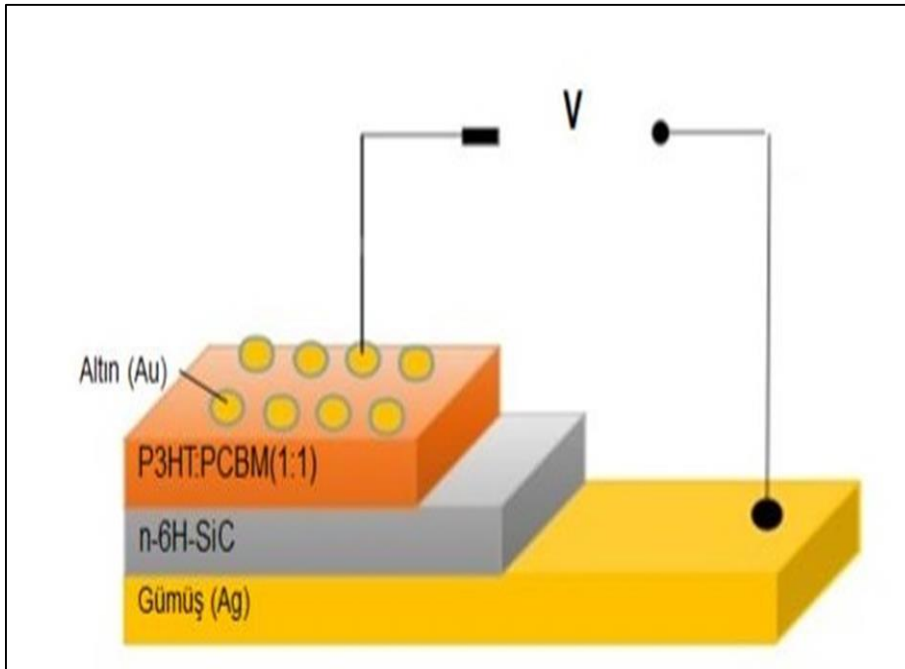
B nümunesi: Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag(750 devir),

C nümunesi: Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ(1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir),

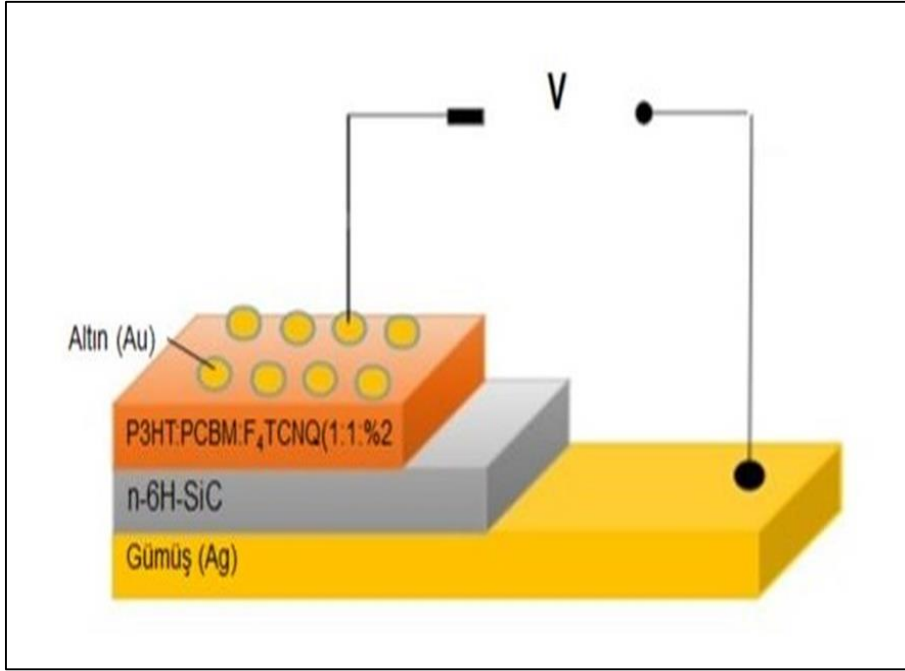
D nümunesi: Au/P3HT:PCBM(2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir).



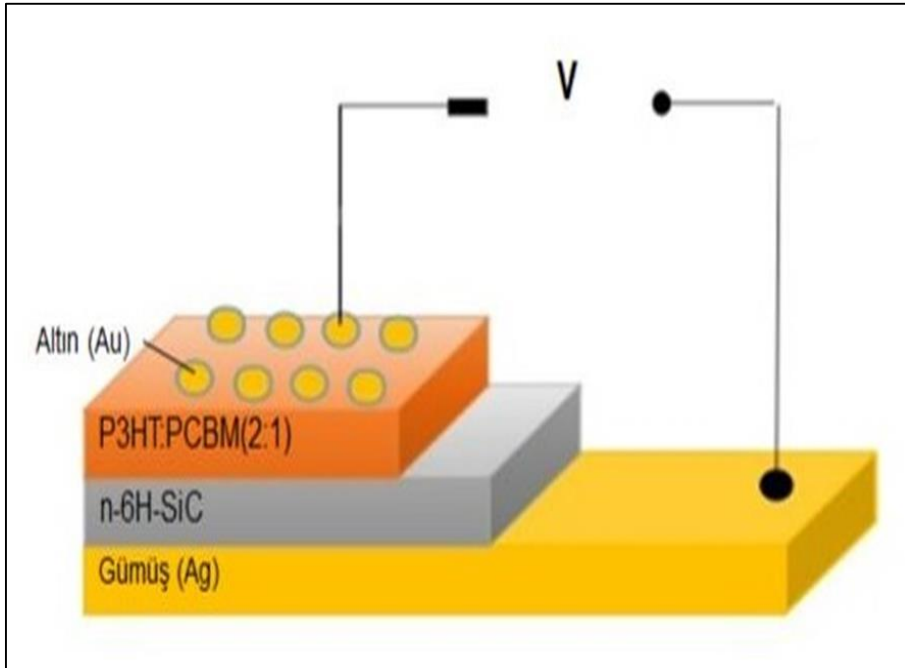
Şekil 3.1. Au/P3HT:PCBM (1:1)/n-6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotunun diyagramı



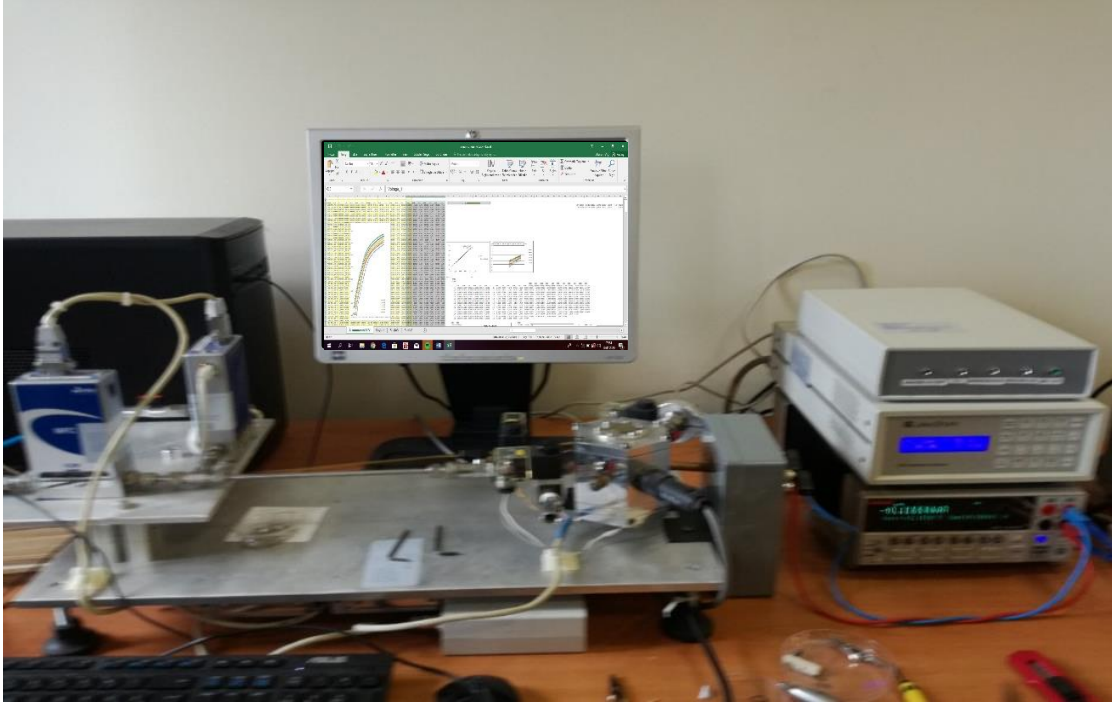
Şekil 3.2. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) diyotunun diyagramı



Şekil 3.3. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotunun diyagramı



Şekil 3.4. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyotunun diyagramı



Resim 3.8. Akım-gerilim ölçüm düzeneği

3.3. Ölçüm Düzenekleri

3.3.1. Akım-gerilim (I-V) düzeneği

Fiziksel parametrelerin hesaplanması için, Gazi Üniversitesi Gaz Sensörleri Laboratuvarı'nda akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapıldı. Ölçümler Hewlett Packard bilgisayarına takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Au/Polimer/n-6H-SiC/Ag yapısının I-V karakteristikleri (300-375) K sıcaklıkları arasında, özel yapım kriyostat içerisinde, Keithley 2400 Sourcemeter kullanılarak ölçüldü. Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinin düzeneği Resim 3.8'de verilmiştir. Ölçmeler sonucu nünunelerin, akım-gerilim değerlerinin -3V ile +3V gerilimleri arasında en iyi diyot karakteristiği gösterdiği bulundu ve akım-gerilim hesaplamaları bu aralıkta alındı.



Resim 3.9. Sığa-gerilim ölçüm düzeneği

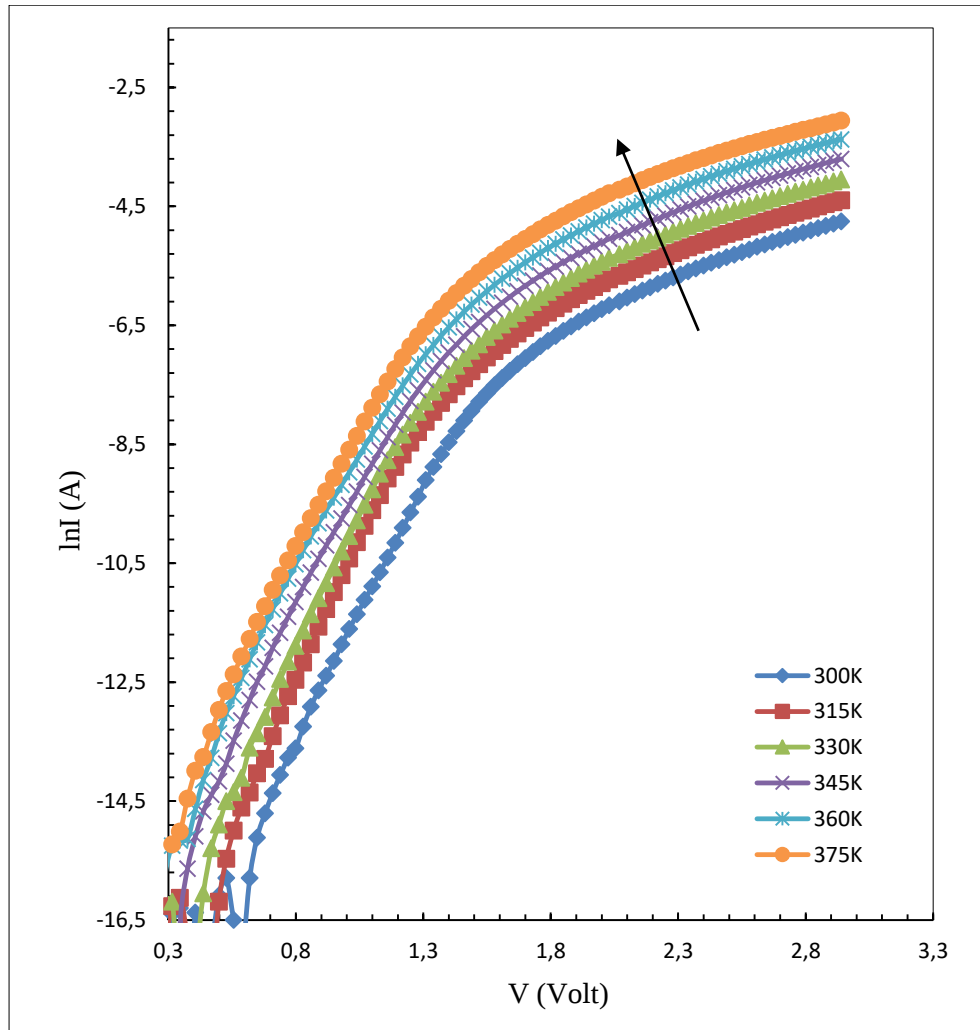
3.3.2. Sığa-gerilim (C-V) düzeneği

Sığa-Gerilim ölçümleri Gazi Üniversitesi Gaz Sensörleri Laboratuvarı'nda Keysight Empedans Analizörü ile yapıldı. C-V ölçümleri -3V ile +3V gerilim aralığında ve farklı sıcaklıklarda (300-375) K yapıldı. Bu ölçümlerden C^{-2} -V grafiği çizilerek difüzyon potansiyeli (V_d), verici konsantrasyonu (N_d), tüketim tabakası genişliği (W_D), Fermi enerjisi (E_F) ve engel yüksekliği (Φ_{b0}) parametreleri hesaplandı. Keysight empedans analizörü, 5 Hz'den 3 GHz'e kadar olan aralıkta ölçüm yapabilmekte ve m Ω 'dan M Ω 'a kadar dirençler için iyi bir doğruluk göstermektedir.

4. DENEYSEL BULGULAR

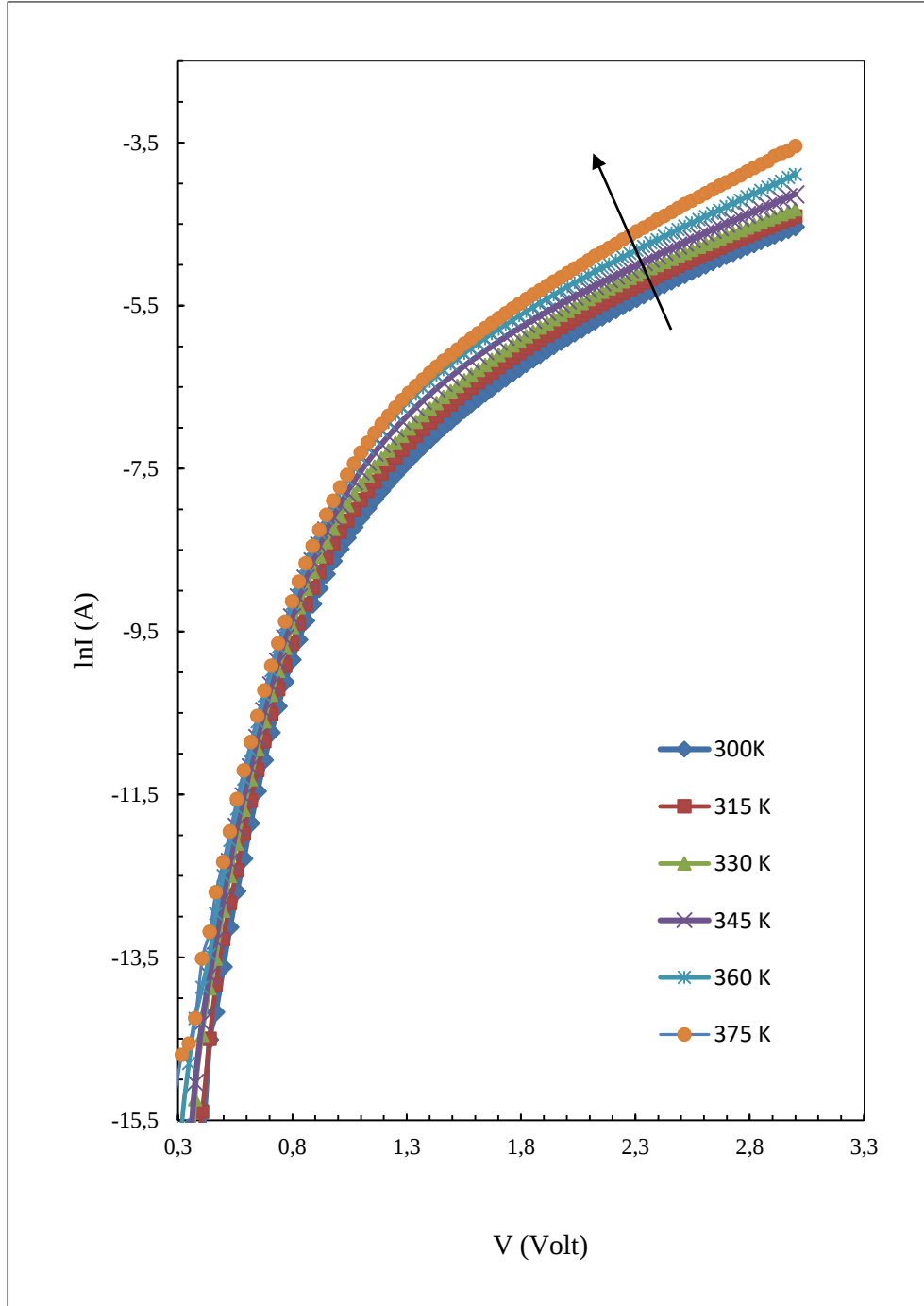
4.1. Akım-Gerilim Özellikleri

Bu çalışmada, üretilen dört farklı yapıdaki Schottky diyotlarının akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak $\ln I$ - V eğrileri çizildi. Her bir diyotun elektriksel özellikleri (300-375) K sıcaklık aralığında, farklı sıcaklıklarda ve -3V ile +3V gerilim aralığında incelendi. Sıcaklığa bağlı $\ln I$ - V grafiklerinden; farklı metodlar kullanarak, idealite faktörü n , engel yüksekliği Φ_{b0} , seri direnç R_s gibi temel elektriksel parametreler bulundu. Farklı sıcaklıklar için elde edilen verilerle çizilen $\ln I$ - V grafikleri 4 farklı numune için Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bu bölümde, her bir diyotun parametreleri bulunarak çizelgeler halinde verildi.



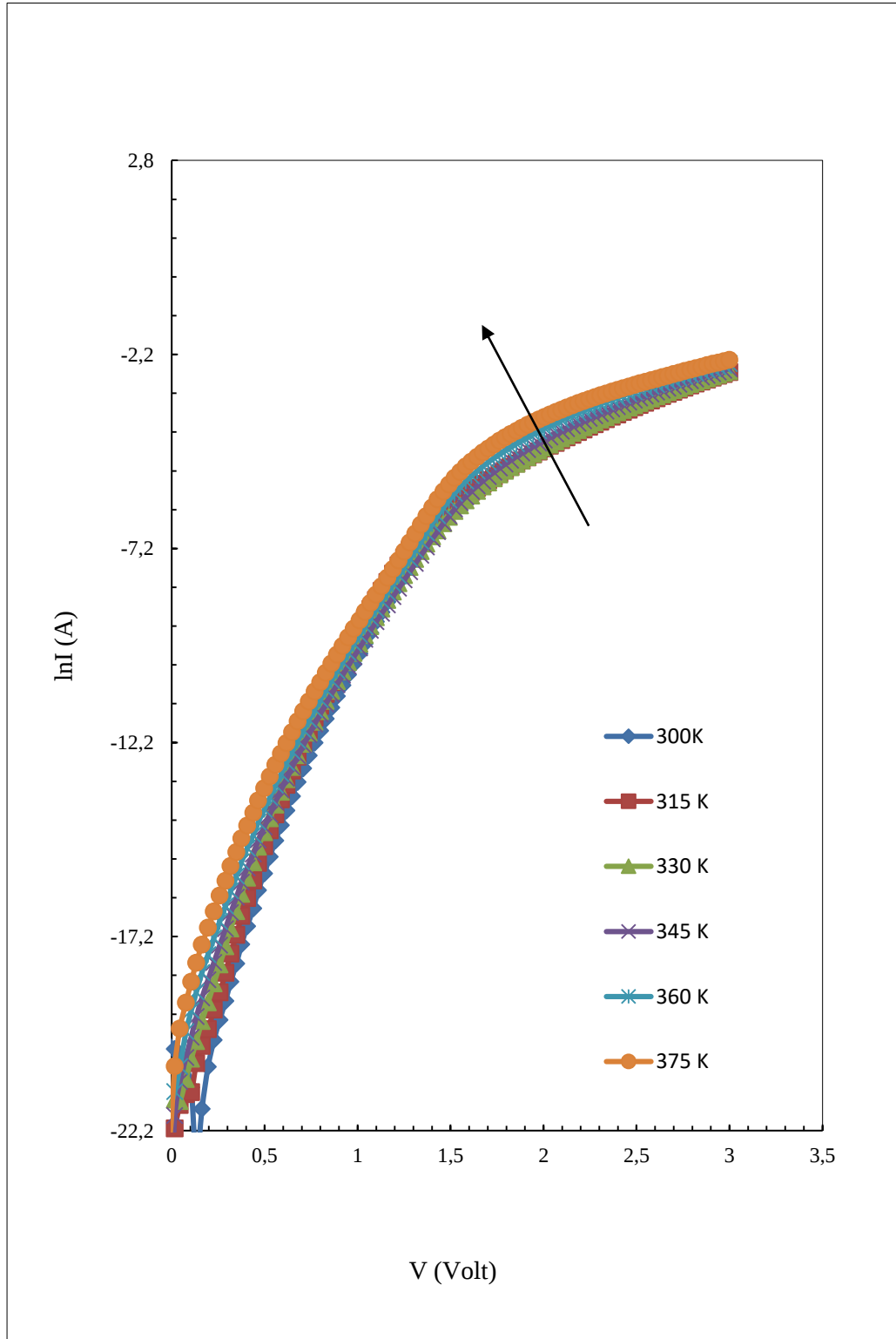
Şekil 4.1. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklık aralığındaki yarı-logaritmik akım gerilim grafiği

Metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey tabakası, diyotun $\ln I$ - V özelliğine ait elektronik parametrelerini etkiler. Bu kontaklarda; a) Yarıiletkeni aşarak metale geçen elektron emisyonu, b) Engel boyunca kuantum mekaniksel tünelleme, c) Uzay yük bölgesinde yeniden birleşme, d) Nötral bölgede hol katkılanması gibi akım-iletim mekanizmaları etkili olur [4].



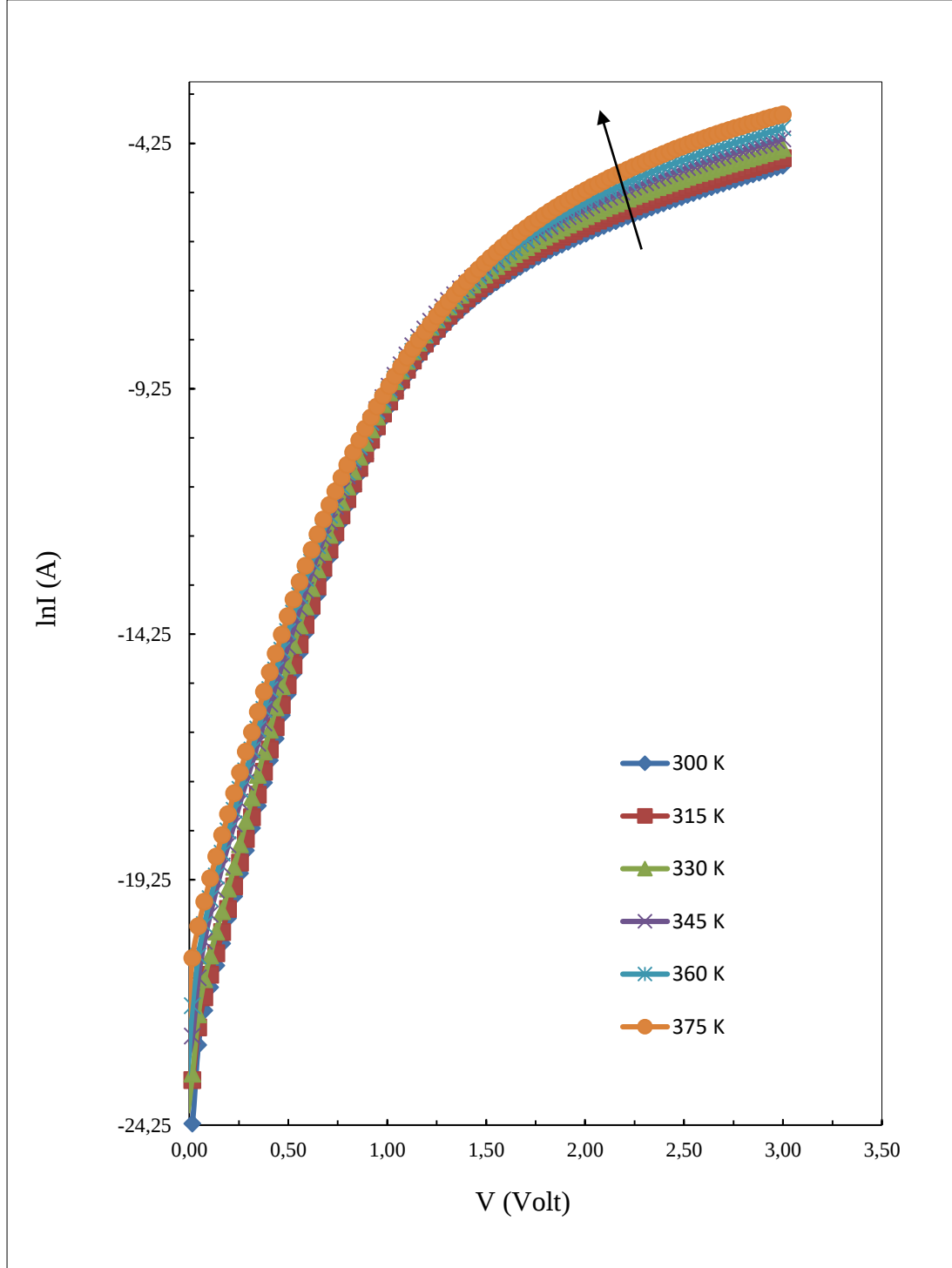
Şekil 4.2. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklık aralığındaki yarı-logaritmik akım gerilim grafiği

Diyotlardaki akım iletimi için, genel olarak belirli sıcaklık ve belirli gerilim aralıklarında yukarıda bahsedilen akım-iletim mekanizmalarından yalnız biri etkin olabilir veya aynı zamanda birden çok akım-iletim mekanizması etkin olabilir.



Şekil 4.3. Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1:2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) kontaklarının (300-375) K sıcaklık aralığındaki yarı-logaritmik akım gerilim grafiği

Bu sebeple, diyotların akım-iletim özelliklerinin izahı çok zor olabilmektedir. Yüzeyin temizliği, oksit tabakasının varlığı, metal-yarıiletken engel yüksekliği, sıcaklık, gerilim, yarıiletkenin safsızlığı gibi birden fazla değişken; akım-iletim mekanizmasını etkileyen etkenler olabilir [61,62].



Şekil 4.4. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklık aralığındaki yarı-logaritmik akım gerilim grafiği

Termiyonik emisyon (TE) modeline göre, metal-yarıiletken arasındaki akıma ait denklem (2.41 eşitliği);

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

şeklinde ve burada I_0 doyma akımı (2.40 eşitliği);

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

denklemleriyle verilir. Burada; A diyot yüzey alanını, Φ_{b0} sıfır beslem engel yüksekliğini, A^* Richardson sabitini, k Boltzmann sabitini ve T mutlak sıcaklığı ifade etmektedir.

Hesaplamalarda n-6H-SiC için Richardson sabiti, $A^*=146 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ alındı [63]. I_0 değeri, $\ln I$ -V grafiğın doğrusal kısmın sıfır gerilime uzatılmasıyla akım eksenini kestiği noktadan bulundu ($V=0$). Denklem 2.40'dan aşağıdaki engel yüksekliği ifadesi Φ_{b0} türetildi:

$$\Phi_{b0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.1)$$

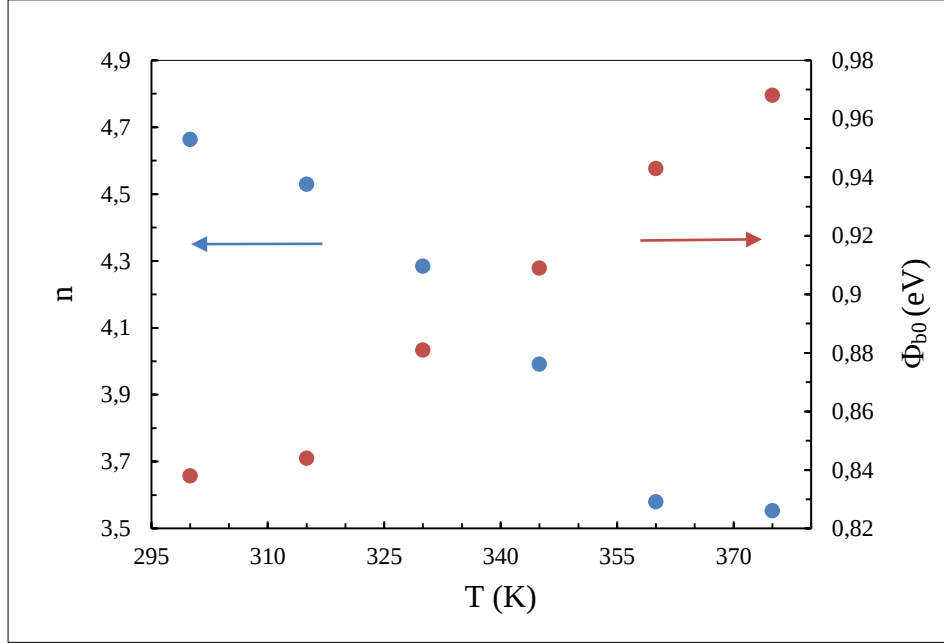
Termiyonik emisyon modeline göre; ileri besleme gerilim bölgesinde çizilecek $\ln I$ -V grafiğın lineer olması beklenir. Eğer grafik lineer çıkmıyorsa, idealite faktörü $n > 1$ bulunur ve kontak akımında termiyonik emisyon akımı tek başına geçerli olamaz. Bunun nedeni, tüketim bölgesindeki yeniden birleşme, arayüzey tabakası ve yalıtkan tabaka olabilir [64]. İdealite faktörlerinin, (300-375) K sıcaklık aralığındaki değerleri, farklı sıcaklıklar için toplu halde çizilen $\ln I$ -V grafiğının eğiminden denklem (2.41 eşitliği);

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (4.2)$$

kullanılarak bulundu ve bu değerler Çizelge 4.1 de verildi.

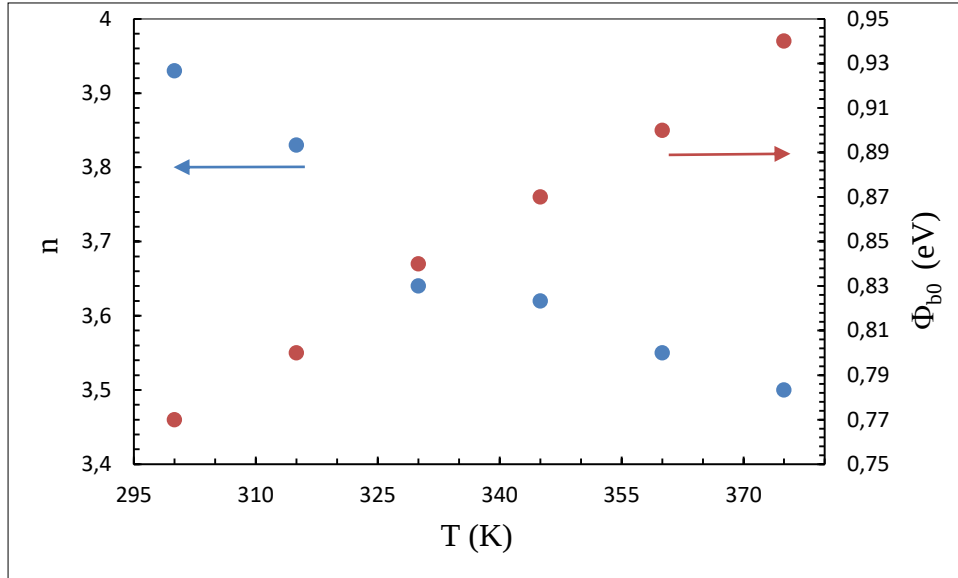
Üretilen diyotların (300-375) K sıcaklıkları arasındaki ölçümlerden alınan akım-gerilim değerlerinden çizilen grafikler Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verildi. Termiyonik emisyon teorisine göre, $\ln I$ -V grafiğının ileri besleme bölgesindeki eğiminden yararlanarak idealite faktörü (n) ve kesme noktasından engel yüksekliği (Φ_{b0}) hesaplandı.

Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için idealite faktörü 300 K sıcaklıkta 4,66 ve 375 K sıcaklıkta ise 3,55 olarak bulundu. Aynı sıcaklıklarda hesaplanan engel yükseklikleri ise sırasıyla 0,83 eV ve 0,96 eV'dur. Engel yükseklikleri ve idealite faktörlerinin sıcaklığa göre grafiği Şekil 4.5'de verildi.



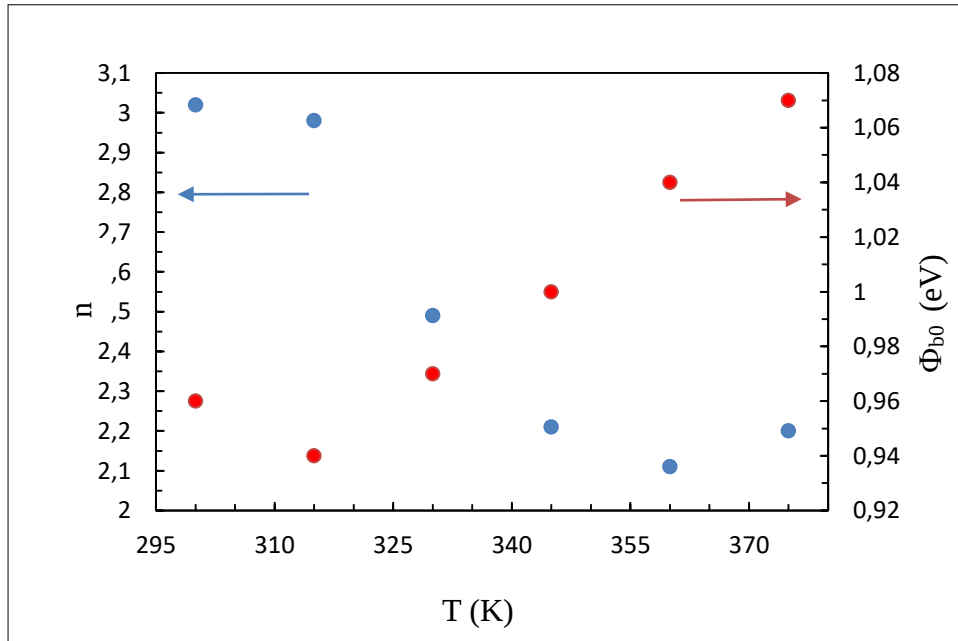
Şekil 4.5. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için kontakın Φ_{b0} engel yüksekliği ve n idealite faktörünün sıcaklığa göre grafiği

Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için 300 K ile 375 K sıcaklıklarında idealite faktörleri sırayla 3,93 ve 3,50 olarak hesaplandı. Numunenin aynı sıcaklıklarda hesaplanan engel yükseklikleri ise sırayla 0,77 eV ve 0,94 eV olarak bulundu. Engel yükseklikleri ve idealite faktörlerinin sıcaklığa göre grafikleri Şekil 4.6'da verildi.



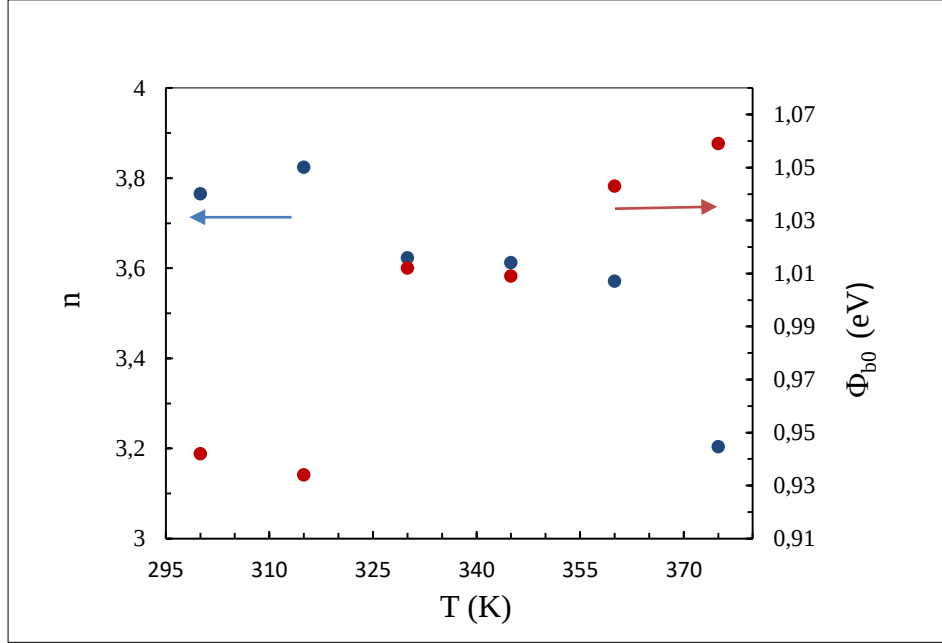
Şekil 4.6. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için kontağın Φ_{b0} engel yüksekliği ve n idealite faktörünün sıcaklığa göre grafiği

Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1: %2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K ve 375 K sıcaklıklarında idealite faktörleri sırayla 3,02 ve 2,20 hesaplandı. Numunenin aynı sıcaklıklarda hesaplanan engel yükseklikleri ise sırasıyla 0,96 eV ve 1,07 eV'dir. Engel yükseklikleri ve idealite faktörlerinin sıcaklığa göre grafikleri Şekil 4.7'de verildi.



Şekil 4.7. Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1: %2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için kontağın Φ_{b0} engel yüksekliği ve n idealite faktörünün sıcaklığa göre grafiği

Au/P3HT:PCBM(2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K ile 375 K sıcaklıklarında idealite faktörleri sırayla 3,76 ve 3,20 olarak hesaplandı. Numunenin aynı sıcaklıklarda hesaplanan engel yükseklikleri ise sırasıyla 0,94 eV ve 1,05 eV'dir. . Engel yükseklikleri ve idealite faktörlerinin sıcaklığa göre grafikleri Şekil 4.8'de verildi.



Şekil 4.8. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için kontakın Φ_{b0} engel yüksekliği ve n idealite faktörünün sıcaklığa göre grafiği

Grafikler incelendiğinde, her dört diyotta sıcaklık artarken engel yüksekliğinin arttığı idealite faktörünün azaldığı bulundu. Bunun nedeni, bu iki parametrenin sıcaklığa bağlı olmasıdır [64-67, 51, 78].

Metal-yarıiletken arayüzeyinde akımın iletimi sıcaklığa bağlıdır. Alçak sıcaklıklardaki akım; alçak engel yüksekliği olan bölgeleri geçen akımlardan meydana gelir. Bu yüzden idealite faktörü artarken engel yüksekliği azalır. Sıcaklığın artmasıyla daha yüksek engelleri geçebilen elektron sayısının artması hesaplanan engelin seviyesinin artmasına, idealite faktörünün düşmesine sebep olur [67-70]. Alçak sıcaklıklardaki engelin azalması ve idealite faktörünün yükselmesinin başka sebepleri arasında, ara bölgedeki yük dağılımının dengesiz ve arayüzeyin engel yüksekliğinin heterojen olan farklı engel yüksekliklerinden meydana gelmesindendir [71-74].

Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 incelendiğinde, ileri besleme bölgesinde alçak gerilimlerde doğrusallık görülürken yüksek gerilimlerde doğrusallıktan sapmalar görülür. Sapmanın nedenleri; seri direnç etkisi, P3HT:PCBM tabakası ve arayüzey durum yoğunluğundan kaynaklandığı söylenebilir [75, 59, 76 96].

İdealite faktörünün birden büyük çıkması; yüksek gerilimlerde difüzyon akımının artması veya tüketim bölgesindeki hol ve elektron yeniden birleşmelerine (recombination) bağlanabilir [77].

İdealitenin 1-2 arasında olması, difüzyon akımı yanında yeniden birleşme akımlarının olduğunun kanıtıdır. İdealitenin 2'den yüksek olması, yeniden birleşme akımlarının etkin olmasına bağlanabilir [78].

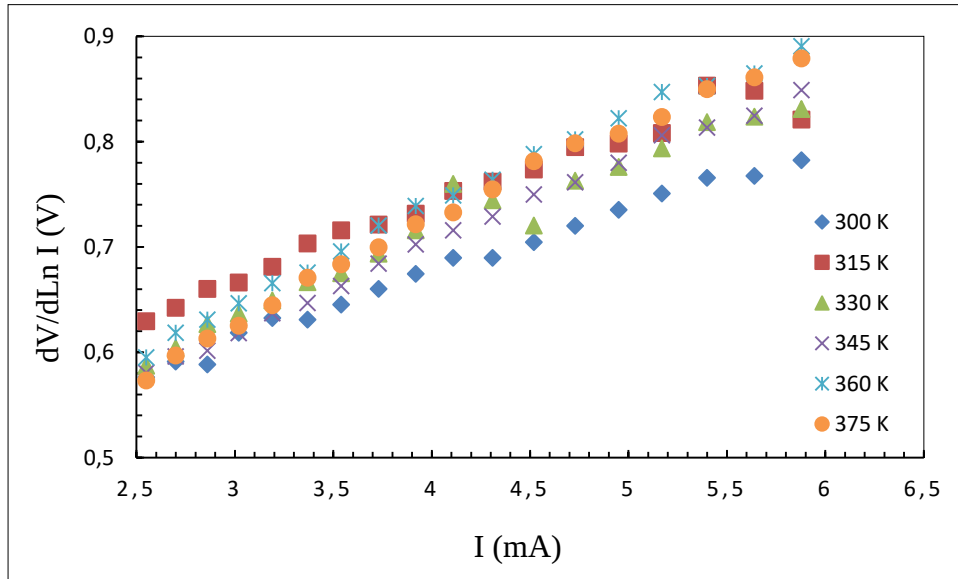
Termiyonik emisyon teorisine göre bulunan engel yüksekliklerinin dört örnekte de artan sıcaklıkla yükseldiği gözlemlendi. 330 K sıcaklıktaki engel yükseklikleri tetkik edildiğinde, engel yüksekliğindeki değişimler fark edilebilir. Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi ile Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi karşılaştırıldığında polimer tabakasının kalınlığı fazla olan Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinde engel yüksekliğinin daha yavaş yükseldiği söylenebilir [79]. Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag(1500 devir) numunesi ile Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin engel yüksekliklerinin özellikle 345 K ve yukarısı için belirgin bir şekilde arttığı görüldü. Bunun, katkı maddesi F₄TCNQ polimerinin ortama olan etkisine bağlanabilir. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ(1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin idealite faktörünün daha düşük olması, katkı maddesinin olmasıyla izah edilebilir [80]. Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi ile Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi karşılaştırıldığında 360 K ve yukarısı için belirgin bir şekilde arttığı görüldü. P3HT donörünün hacminin iki kat artması sonucu engel yüksekliği artmış ve idealite faktörü 1'e yakın bir değer kadar düşmüş olduğu gözlemlendi. Diyotun ideale doğru yaklaşması; diyotun özelliklerinin geliştiğinin göstergesidir. Bu haller organik polimerli arayüzeyin akım iletimine etki ettiğini gösterir. Arayüzey sebebiyle gerilim düşer. Bu durum engel yüksekliğinin değişmesine neden olur [81] ve diyotları ideal olmaktan uzaklaştırır. Ayrıca engel yüksekliğinin uygulanan gerilime bağımlılığını gösterir [82].

Schottky diyotlarda seri direncin, elektriksel özellikleri içinde önemli bir yeri vardır. İkinci bölümde verilen ve aşağıda yazılan Denk 2.75 ile Denk 2.78’de olduğu gibi $dV/d\ln(I)$ -I ve $H(I)$ -I fonksiyonlarının grafikleri yardımıyla diyotun n , R_s ve Φ_{b0} gibi temel değişkenler bulundu [60]:

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

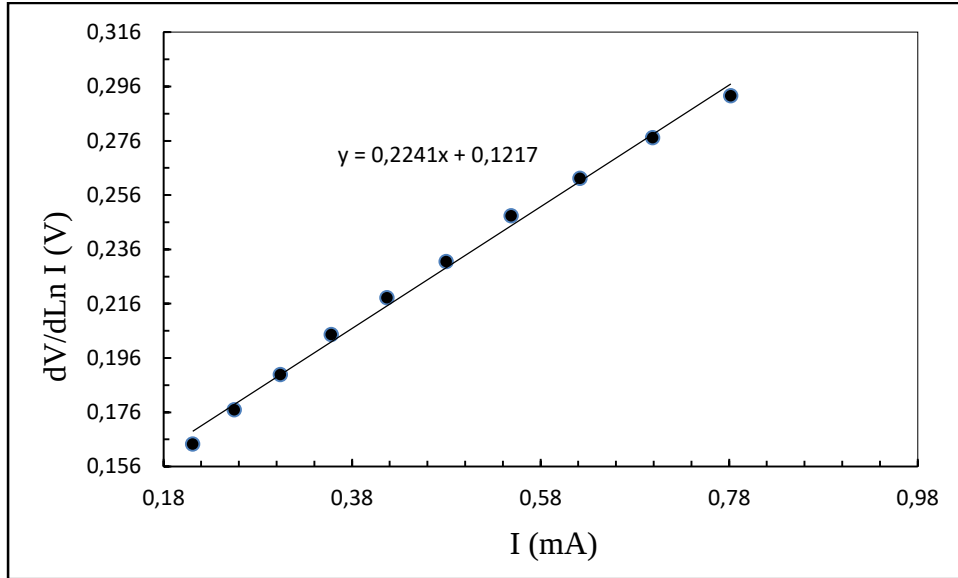
$$H(I) = I R_s + n\Phi_{b0}$$

Yüksek gerilim bölgesindeki seri direnç, akım-iletim mekanizmasında doğrudan ilişkili hale gelir. Seri direnç belirlenmesinde önemli metotlardan birisi, Cheung-Cheung metodudur. Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin farklı sıcaklıklar için $\frac{dV}{d\ln(I)}$ – I grafiği aşağıda Şekil 4.9 verildi.



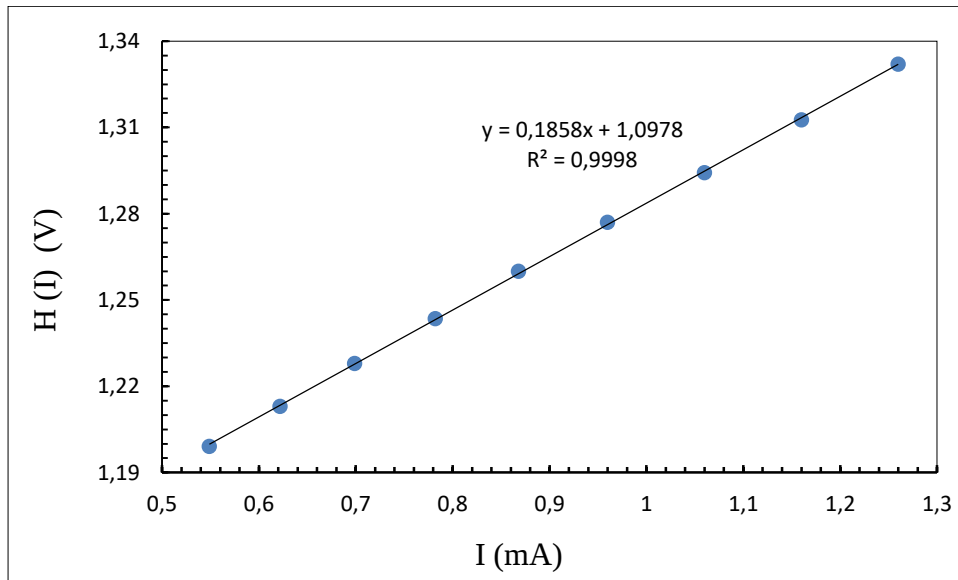
Şekil 4.9. Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ – I grafiği

Cheung-Cheung modeline göre, akım-gerilim özelliklerinden elde edilen $\frac{dV}{d\ln(I)}$ -I ve $H(I)$ -I fonksiyonlarının grafikleri yardımıyla diyotun n , R_s ve Φ_{b0} temel parametreleri elde edildi [60]. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K’deki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ – I grafiği aşağıdaki Şekil 4.10 gibidir.



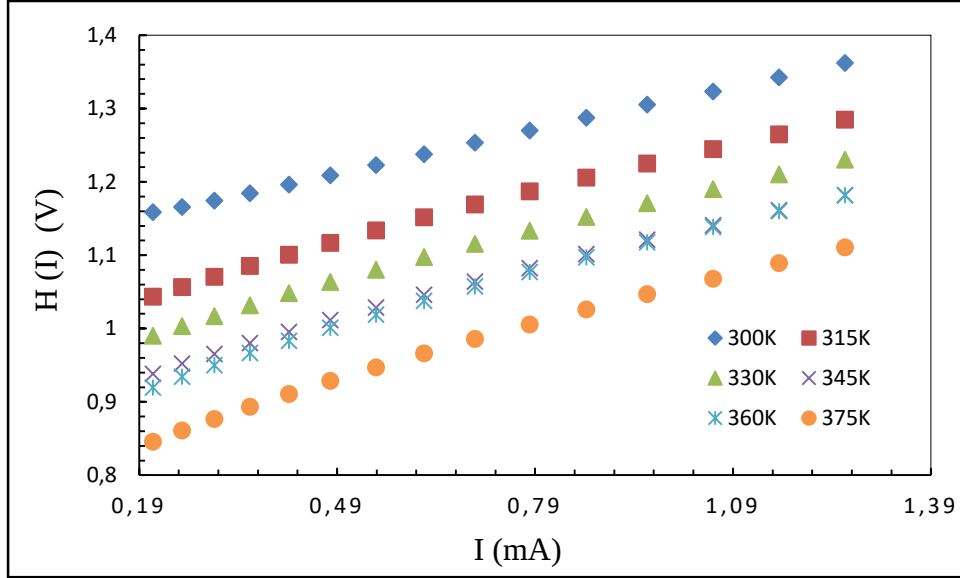
Şekil 4.10. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K'deki $dV/d\ln I$ - I grafiği

Şekil 4.11 Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K'deki $H(I)$ - I grafiği aşağıda görüldüğü şekildedir.



Şekil 4.11. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K'deki $H(I)$ - I grafiği

Şekil 4.12. Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $H(I)$ - I grafiği aşağıdaki şekilde verildi.

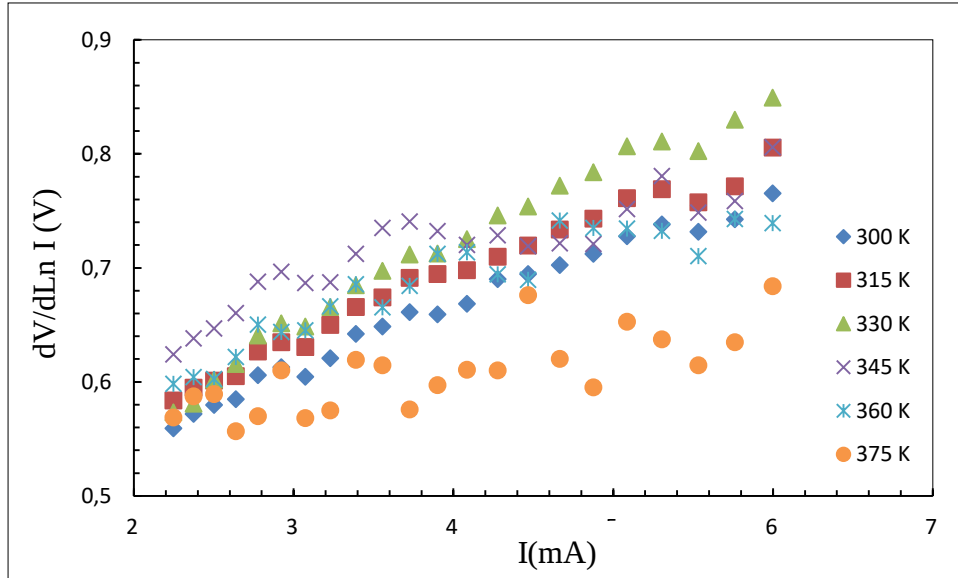


Şekil 4.12. Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklıkları arasındaki H(I) - I grafiği

H(I) - I grafiğin eğiminden de aynı şekilde R_s seri direnç hesaplanabilir. Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag(1500 devir) kontağı H(I)-I ve $\frac{dV}{d\ln(I)}$ -I grafiklerinden R_s seri direnç değerleri, 300 K sıcaklıkta 185,84 Ω ile 224,08 Ω ve 375 K'de 36,50 Ω ile 60,44 Ω olarak hesaplandı.

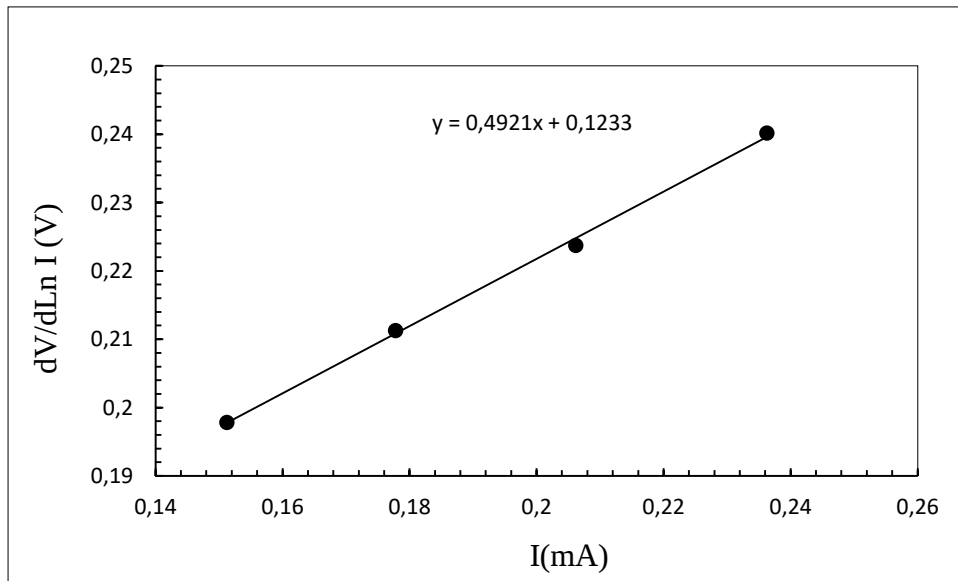
Cheung-Cheung metodunda akımı mA almak için 1000'le çarpılmıştır. Bu yüzden grafik üzerindeki seri drenç değerleri de 1000'le çarpılmalıdır. Çizelgeler de çarpılmış şekilde yazılmıştır.

Cheung-Cheung metoduyla (300-375) K sıcaklıkları arasında, n idealite faktörü, Φ_{b0} engel yüksekliği ve R_s seri direnç bulunabilir. Bulunan değerler Çizelge 4.1'de verildi. Şekil 4.13'te Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ - I grafiği aşağıdaki gibidir.



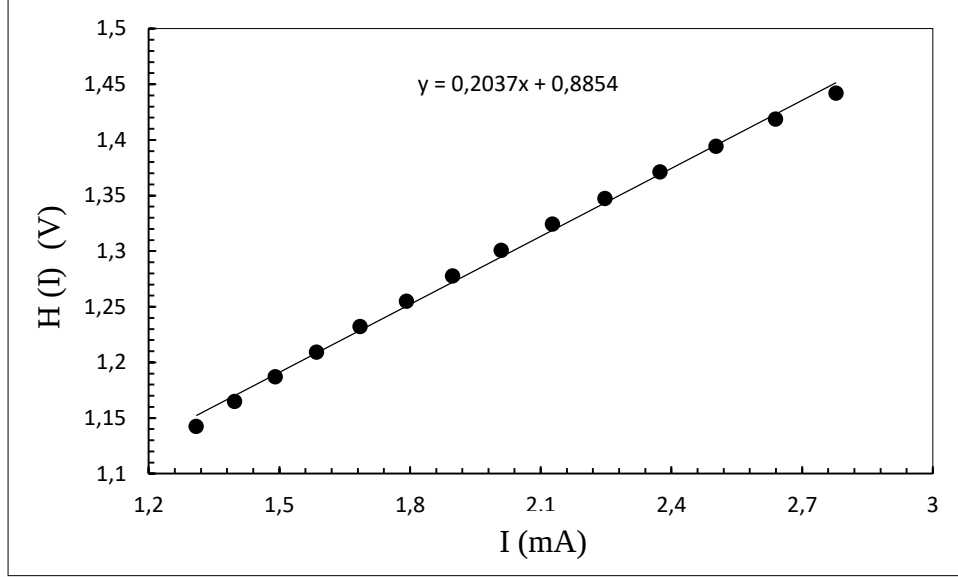
Şekil 4.13. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ - I grafiği

Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin 300 K sıcaklığındaki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ - I grafiğinden benzer yollarla 300 K sıcaklıkta 203,74 Ω ve 492,06 Ω olarak, 375 K sıcaklıkta ise 97,27 Ω ve 210,33 Ω olarak hesaplandı. Şekil 4.14 Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin 300 K sıcaklığındaki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ - I grafiği aşağıda verilmiştir.



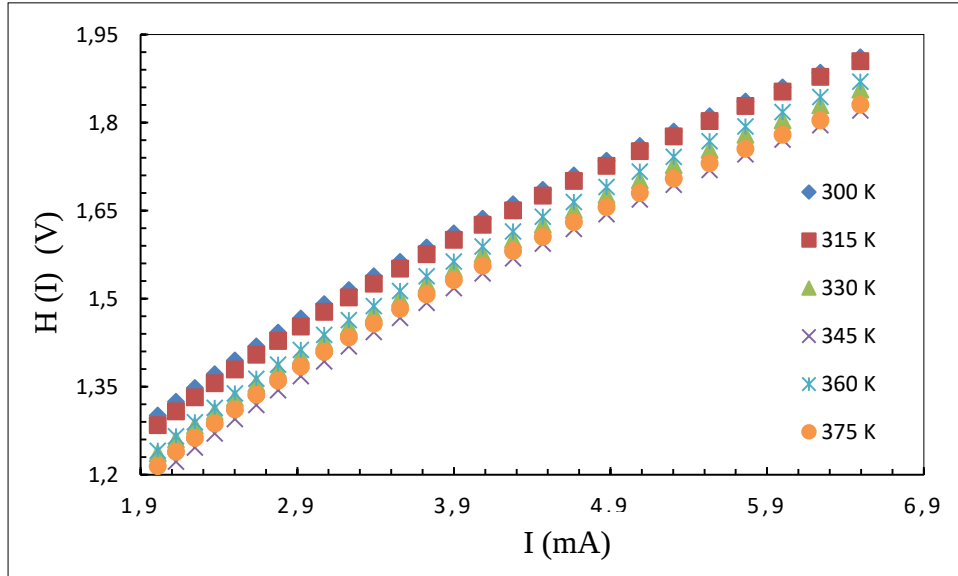
Şekil 4.14. Au/P3HT: PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin 300 K sıcaklığındaki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ - I grafiği

300 K’de R_s ve Φ_{b0} değerleri aşağıda verilen Şekil 4.15. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin 300 K sıcaklığında $H(I)$ - I grafiğinden bulundu.



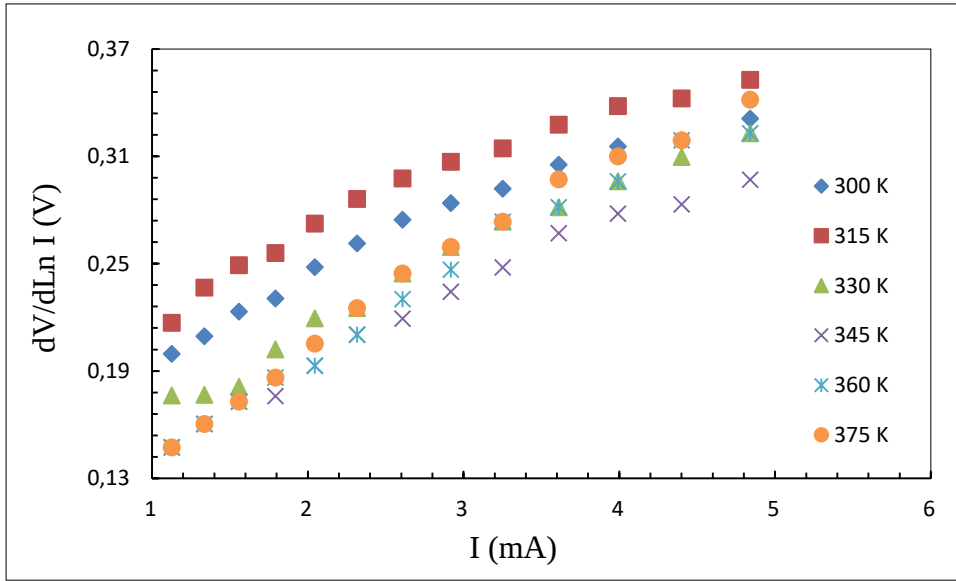
Şekil 4.15. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin 300 K sıcaklığında $H(I)$ - I grafiği

(300-375) K Φ_{b0} ve R_s değerleri aşağıdaki Şekil 4.16. Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin (300-375)K sıcaklıkları arasındaki $H(I)$ - I grafiğinden bulunan değerler Çizelge 4.2’de verildi.

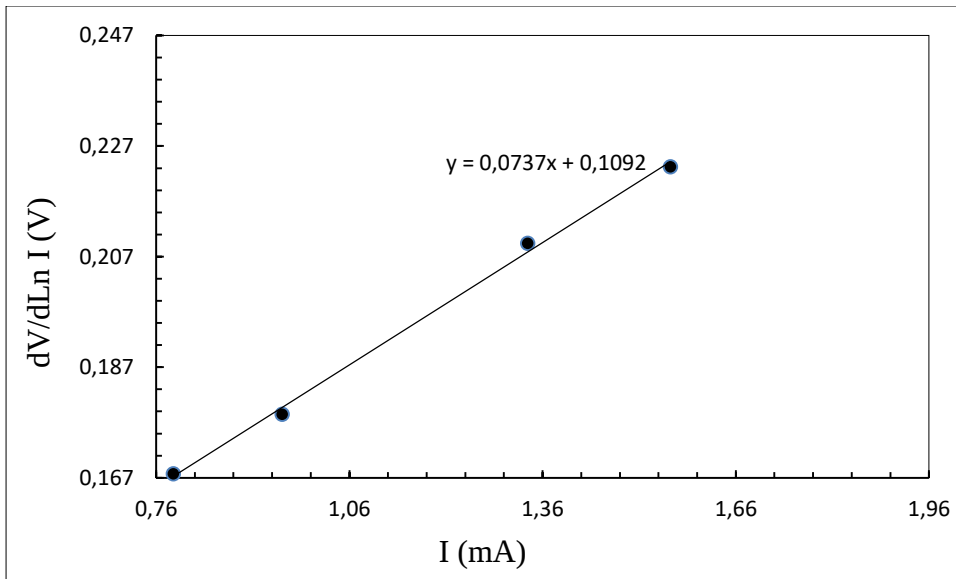


Şekil 4.16. Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $H(I)$ - I grafiği

Aşağıda verilen şekil 4.17 ve şekil 4.18 grafiklerinden n ve R_s değerleri bulunabilir. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için kontağın 300K sıcaklıkta R_s seri direnç değerleri 51,53 Ω ve 73,72 Ω olurken; 375 K sıcaklıkta R_s seri direnç değerleri 18,97 Ω ve 21,64 Ω olarak hesaplandı. Tüm sıcaklıklar için n ve R_s değerleri Çizelge 4.3'te verildi.

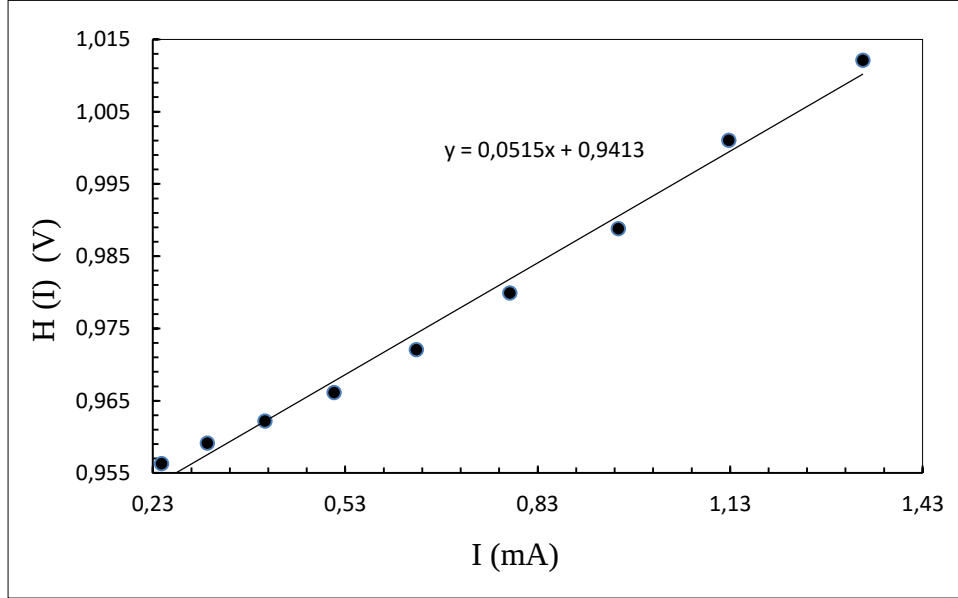


Şekil 4.17. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ - I grafiği

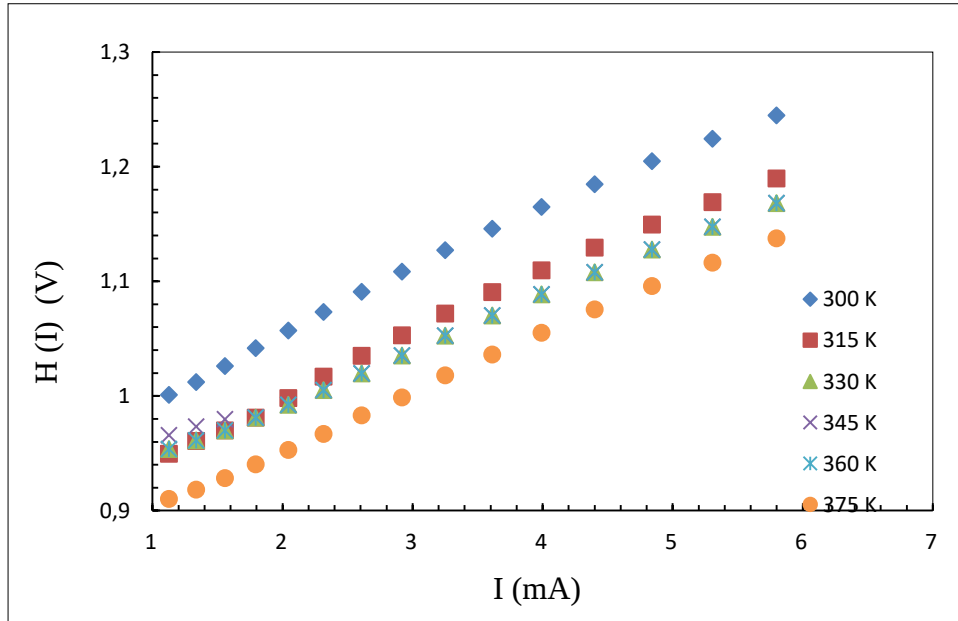


Şekil 4.18. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K sıcaklığındaki $\frac{dV}{d\ln(I)}$ - I grafiği

Altta verilen şekil 4.19 ve şekil 4.20 yardımıyla R_s ve Φ_{b0} değerlerini tüm sıcaklıklar için bulundu. Bulunan değerler Çizelge 4.3'te detaylı şekilde verildi.



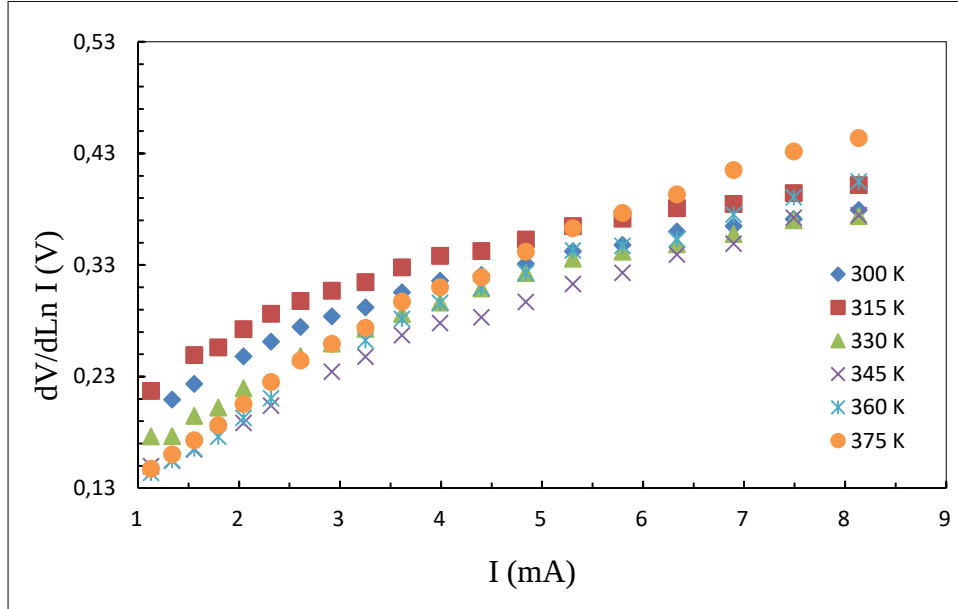
Şekil 4.19. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K sıcaklığındaki H (I) – I grafiği



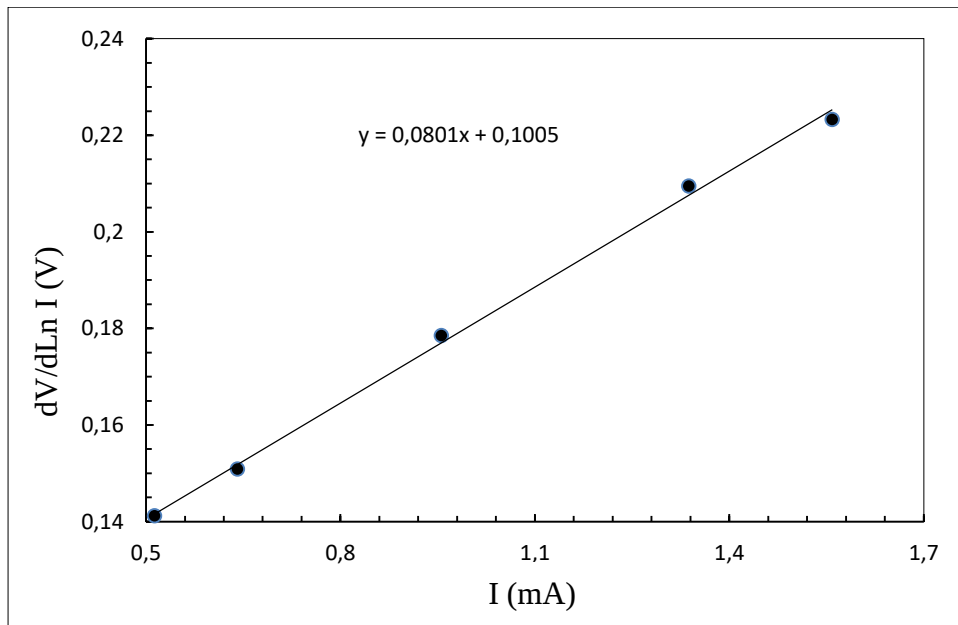
Şekil 4.20. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasında H (I) – I grafiği

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 grafikleri kullanılarak, n ve R_s değerleri Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için kontakın 300 K sıcaklıkta R_s seri dirençleri 69,82 Ω ve

80,06 Ω bulunurken, 375 K sıcaklıkta R_s seri dirençleri 17,76 Ω ve 21,91 Ω olarak hesaplandı. Bütün sıcaklıklar için n ve R_s değerleri Çizelge 4.4’de toplu bir şekilde verildi.

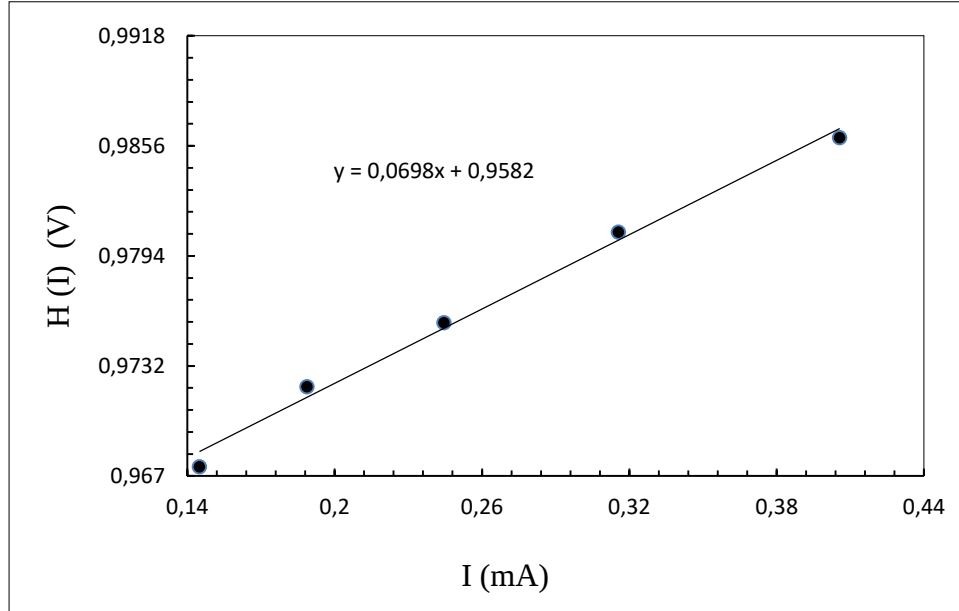


Şekil 4.21. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $\frac{dV}{d\ln(I)} - I$ grafiği

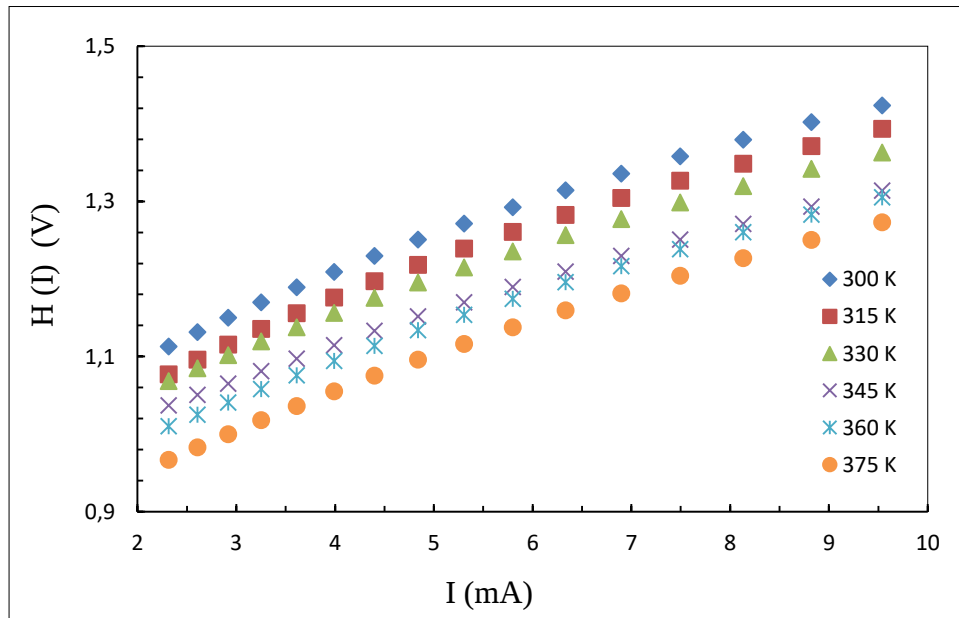


Şekil 4.22. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K sıcaklığındaki $\frac{dV}{d\ln(I)} - I$ grafiği

Aşağıdaki Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 grafikleri kullanılarak Φ_{b0} ve R_s değerleri Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için hesaplandı ve geniş bir şekilde Çizelge 4.4’de sunuldu.



Şekil 4.23. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için 300 K sıcaklığındaki $H(I) - I$ grafiği



Şekil 4.24. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $H(I) - I$ grafiği

Dört diyottada yapılan hesaplamalarla iki yöntem kullanılarak ölçülen değerlerin uyumluluğu gözlenmiştir. Her sıcaklık için iki yöntemde de sıcaklık arttıkça seri dirençler azalmaktadır. Bunun nedeni, sıcaklık artışıyla serbest taşıyıcı konsantrasyonunun artmasıdır.

Yarıiletkenin büyük direncinden ötürü $\ln(I)$ - V eğrisine göre, Norde metodu engel yüksekliğinin hesaplamasında daha iyi bir yol olabilir. Direnci hesaplamak amacıyla geliştirilen metodun dezavantajı minimum nokta tanımlamadaki güçlüklerdir.

Norde fonksiyonu, (2.64 eşitliğiyle) aşağıdaki eşitliğe göre verilir;

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I(V)}{A^* AT^2} \right)$$

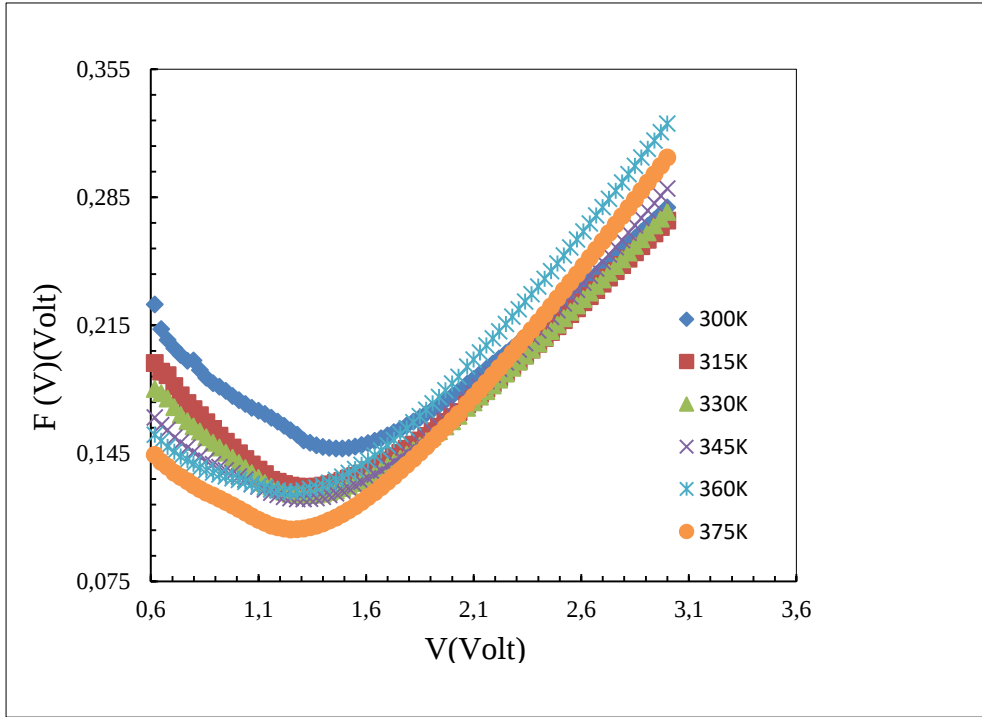
şeklinde verilir. Burada $\beta = q/kT$ ve γ ise idealiteden büyük bir değer olmak kaydıyla ($\gamma=1,5n$ alındı) $F(V)$ - V grafiği bir minimumdan geçer. $F_{\min}$ değerine göre $V_{\min}$ alınarak engel yüksekliği (2.74 eşitliği) aşağıdaki eşitliğe göre verilir;

$$\Phi_b = F_{\min} + \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q}$$

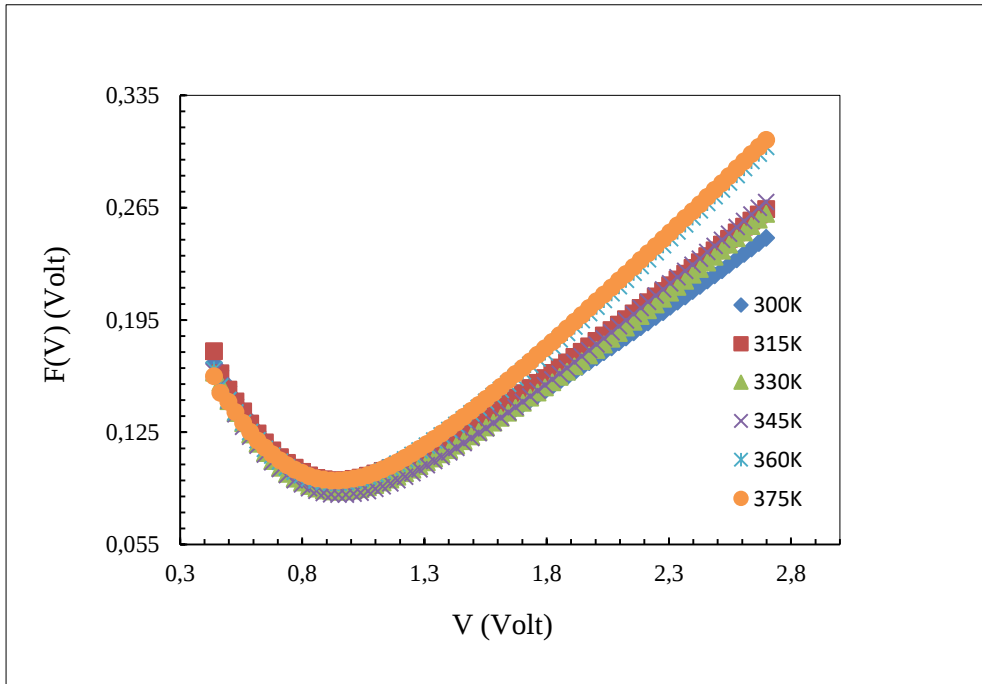
eşitliğinden $V_{\min}$ 'deki akım $I_{\min}$ olarak alınır ve R_s seri direnci (eşitlik 2.73'e göre) aşağıdaki denklemlerle;

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

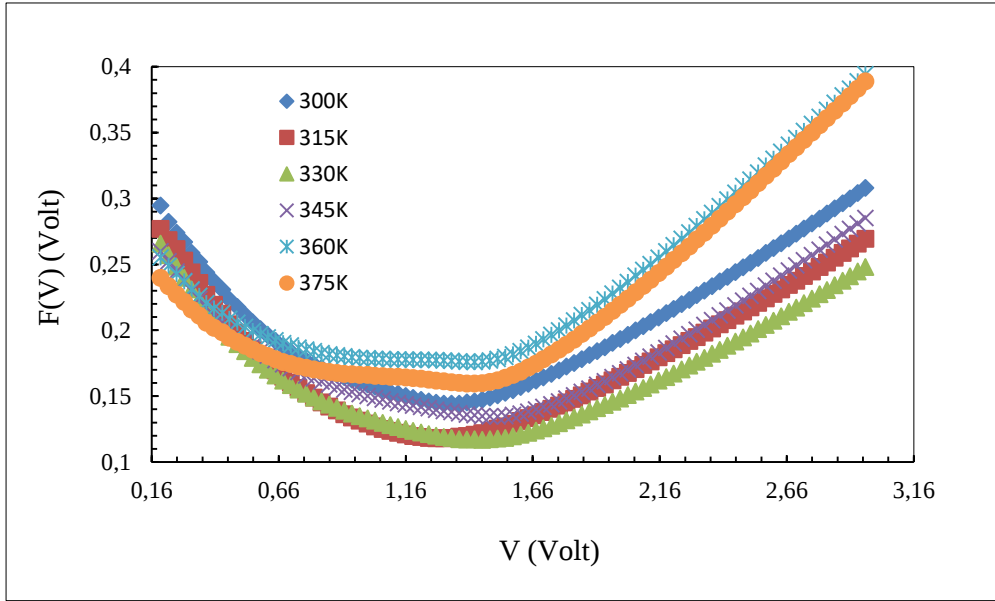
bulunur. Bu yöntemle hesaplanan dört numuneye ait seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) değerleri Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de verildi. Aynı zamanda Norde fonksiyonu $F(V)$ 'nin gerilime (V) karşı grafikleri Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de gösterildi.



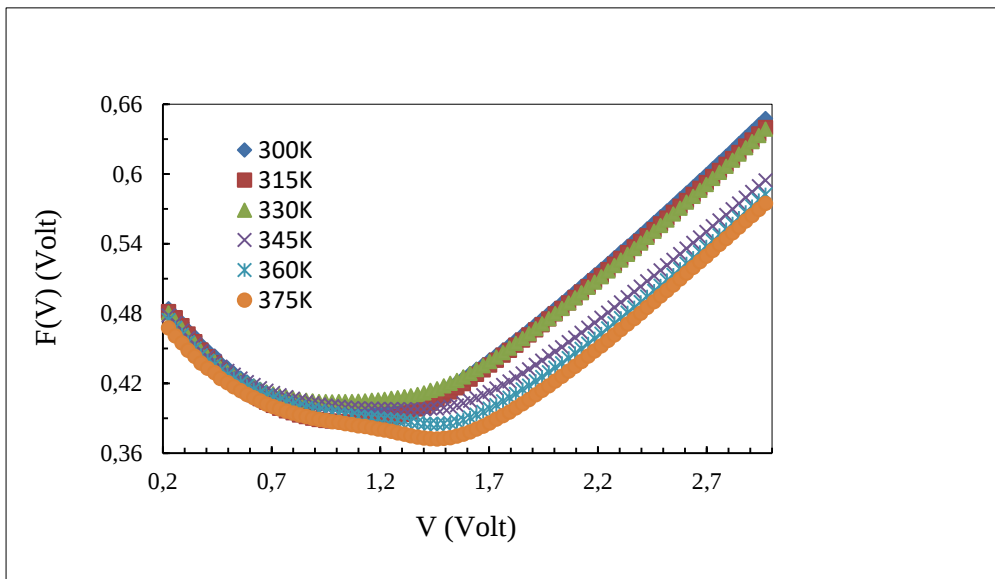
Şekil 4.25. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $F(V)$ - V grafiği



Şekil 4.26. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $F(V)$ - V grafiği

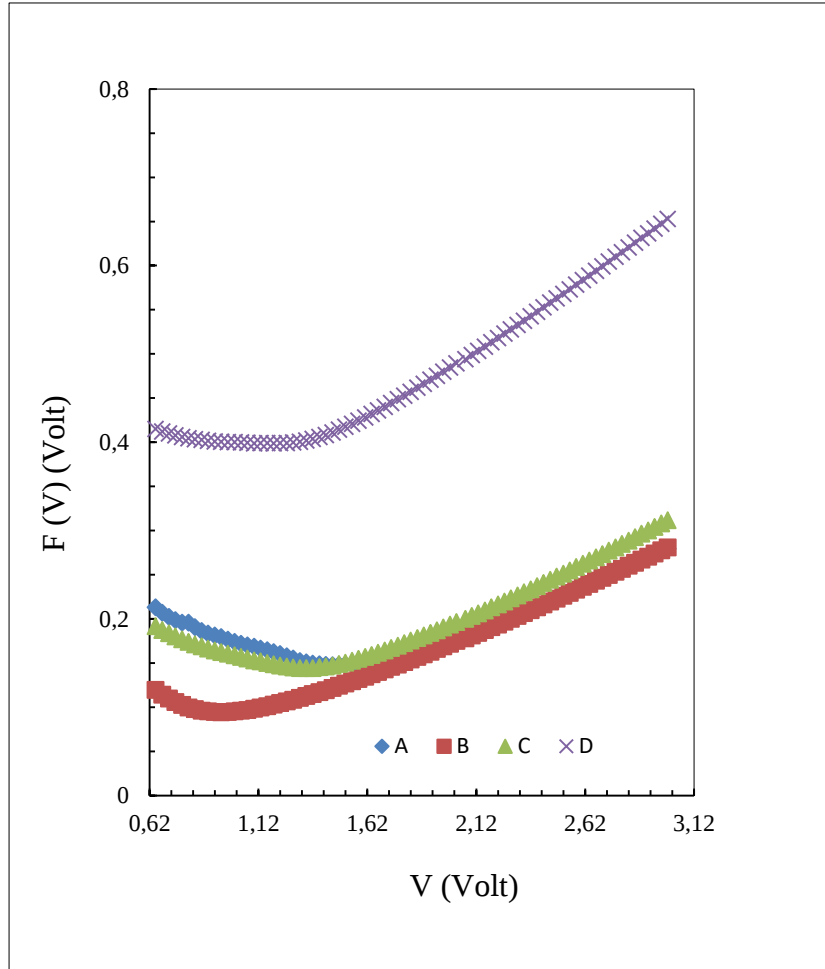


Şekil 4.27. Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $F(V)$ - V grafiği



Şekil 4.28. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklıkları arasındaki $F(V)$ - V grafiği

Aynı zamanda Şekil 4.29’da dört numunenin 300 K sıcaklıktaki Norde fonksiyonlarının $F(V)$ - V grafikleri verildi.



Şekil 4.29. 300 K’de A (Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir)), B (Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir)), C (Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir)) ve D (Au/P3HT: PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir)) numunelerinin F(V) – V grafiği

Norde yöntemiyle bulunan direnç değerlerinin Cheung yöntemiyle bulunan dirençlerle uyumlu olduğu Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklık aralığındaki I-V ölçümlerinden bulunan parametreler

T (K)	Φ_{bo} (eV)	Φ_{bo} (eV) F(V)-V	Φ_{bo} (eV) H(I)-I	n (I-V)	n dV/dln(I)-I	R_s (Ω) H(I)-I	R_s (Ω) F(V)-V	R_s (Ω) dV/dln(I)	I_0 (A)
300	0,83	0,33	0,22	4,66	4,67	185,84	198,44	224,08	1,96E-9
315	0,84	0,29	0,26	4,52	4,52	155,93	175,35	217,15	8.00E-9
330	0,88	0,29	0,26	4,28	4,32	98,58	145,77	151,78	9,82E-9
345	0,90	0,30	0,25	3,99	4,09	74,40	98,76	111,92	1,64E-8
360	0,94	0,32	0,24	3,58	3,60	51,44	84,01	97,57	2,14E-8
375	0,96	0,30	0,23	3,55	3,55	36,50	54,34	60,44	3,61E-8

Çizelge 4.2. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklık aralığında I-V ölçümlerinden bulunan parametreler

T (K)	Φ_{bo} (eV)	Φ_{bo} (eV) F(v)-V	Φ_{bo} (eV) H(I)-I	n (I-V)	n dV/dln(I)-I	$R_s(\Omega)$ H(I)-I	$R_s(\Omega)$ F(V)-V	$R_s(\Omega)$ dV/dln(I)	I_0 (A)
300	0,77	0,20	0,18	3,93	4,75	203,74	393,87	492,06	2,06E-8
315	0,80	0,21	0,19	3,83	4,38	178,70	311,73	403,82	2,93E-8
330	0,84	0,21	0,19	3,64	4,32	137,30	264,01	324,00	3,48E-8
345	0,87	0,21	0,20	3,62	4,03	127,69	228,17	266,57	5,36E-8
360	0,90	0,23	0,21	3,55	3,57	119,23	219,50	242,26	7,40E-8
375	0,94	0,24	0,22	3,50	3,43	97,27	174,89	210,33	9,49E-8

Çizelge 4.3. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklık aralığındaki I-V ölçümlerinden bulunan parametreler

T(K)	Φ_{bo} (eV)	Φ_{bo} (eV) F(v)-V	Φ_{bo} (eV) H(I)-I	n (I-V)	n dV/dln(I)-I	$R_s(\Omega)$ H(I)-I	$R_s(\Omega)$ F(V)-V	$R_s(\Omega)$ dV/dln(I)	I_0 (A)
300	0,96	0,34	0,22	3,02	4,21	51,53	63,90	73,72	1,58E-11
315	0,94	0,30	0,21	2,98	4,26	42,98	64,58	74,74	2,47E-10
330	0,97	0,32	0,21	2,49	4,21	39,70	41,23	48,44	3,77E-10
345	1,00	0,37	0,24	2,21	3,86	31,33	27,02	35,23	5,90E-10
360	1,04	0,45	0,27	2,11	3,38	24,17	26,91	28,40	1,10E-9
375	1,07	0,44	0,27	2,20	3,18	18,97	18,06	21,64	1,80E-9

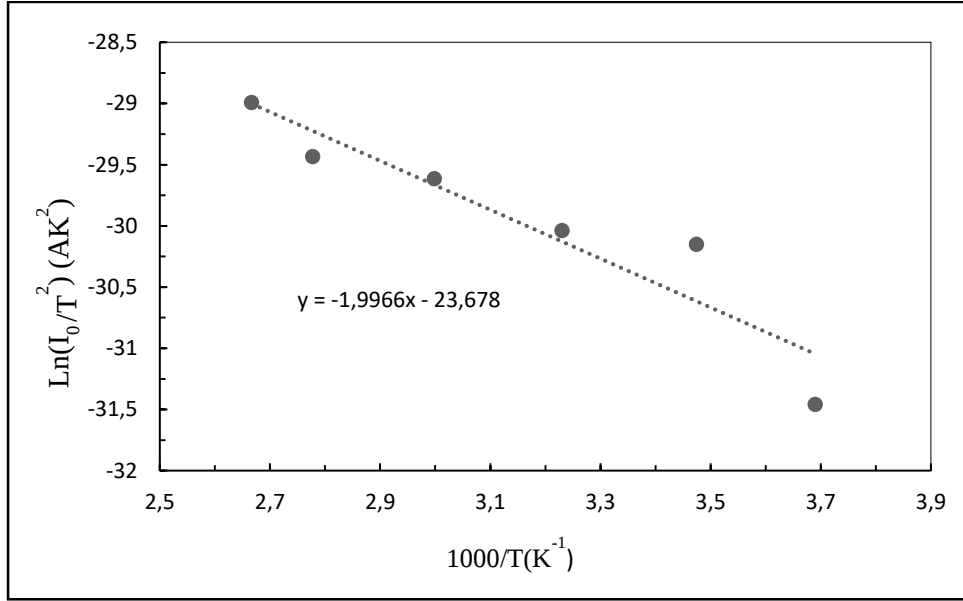
Çizelge 4.4. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için (300-375) K sıcaklık aralığındaki I-V ölçümlerinden bulunan parametreler

T(K)	Φ_{bo} (eV)	Φ_{bo} (eV) F(v)-V	Φ_{bo} (eV) H(I)-I	n (I-V)	n dV/dln(I)-I	$R_s(\Omega)$ H(I)-I	$R_s(\Omega)$ F(V)-V	$R_s(\Omega)$ dV/dln(I)	I_0 (A)
300	0,94	0,35	0,24	3,76	3,86	69,82	75,98	80,06	3,57E-11
315	0,93	0,32	0,23	3,82	3,79	69,75	72,13	79,92	2,98E-10
330	1,01	0,37	0,25	3,62	3,72	65,25	60,73	67,08	1,01E-10
345	1,00	0,38	0,26	3,61	3,66	33,05	37,57	38,38	5,72E-10
360	1,04	0,37	0,27	3,57	3,34	24,85	21,33	28,17	8,56E-10
375	1,05	0,40	0,27	3,20	3,18	17,76	15,93	21,91	2,12E-9

Engel yüksekliğini bulmanın bir başka metodu, Richardson eğrisi yöntemi olduğu 2. bölümde ayrıntılarıyla anlatılmıştı. Eğriyi veren eşitlik (2.61'e göre) aşağıdaki şekilde yazılmıştı;

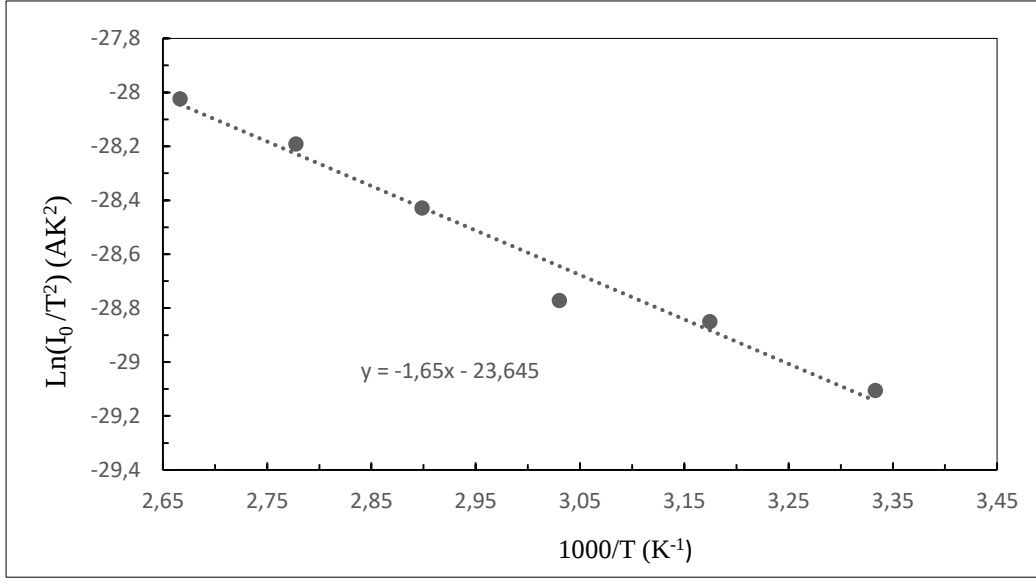
$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^{**}) - \frac{q\Phi_{b0}}{kT}$$

Eş. (2.61)'e göre; $\ln(I_0/T^2)-1000/T$ grafiğinin lineer olması beklenir. Grafiğin eğiminden sıfır K'deki engel yüksekliğini veren (Φ_{b0}) (bu değer aktivasyon enerjisine de karşılık gelir) düşey eksen kesim noktasından Richardson sabiti (A^{**}) bulunur. Her dört numunenin deneysel verileriyle çizilen $\ln(I_0/T^2)-1000/T$ grafikleri Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de verildi.



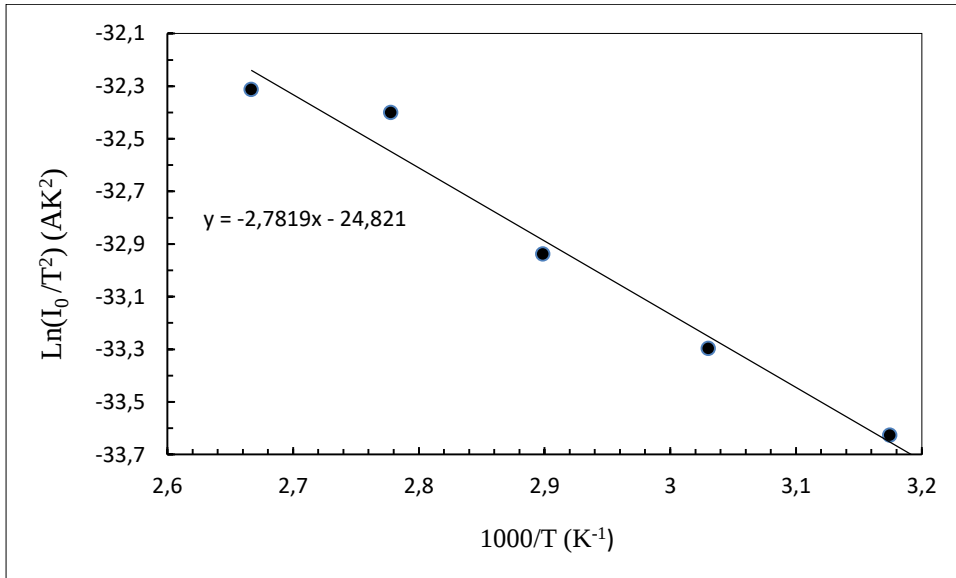
Şekil 4.30. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $\ln(I_0/T^2)-1000/T$ değişim grafiği

Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir), numunesi için bulunan Richardson sabiti ile sıfır besleme engel yüksekliği sırasıyla $2,97 \times 10^{-9} \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve 1,99 eV'dir.



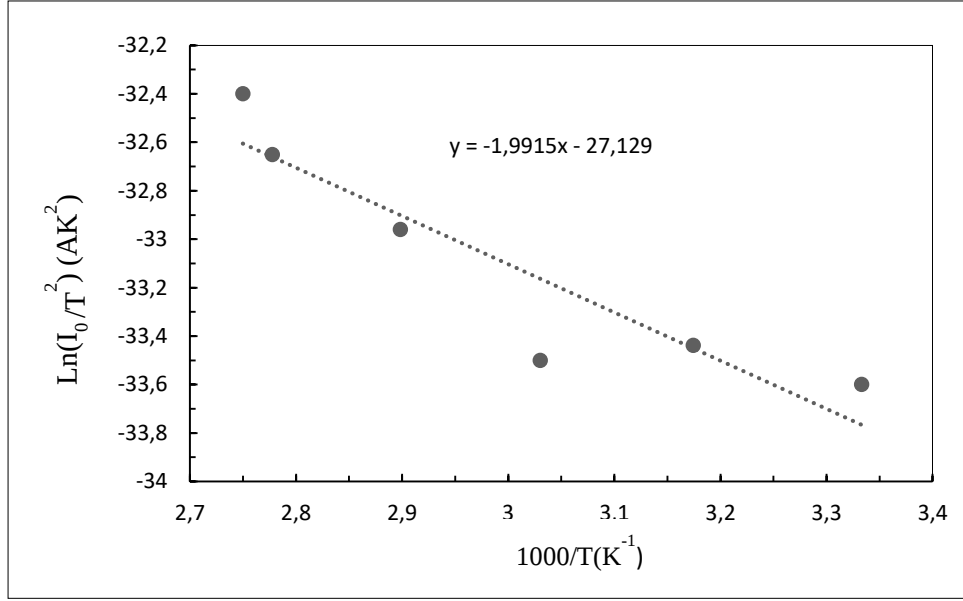
Şekil 4.31. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için $\ln(I_0 / T^2)$ -1000/T değişim grafiği

Aynı hesaplamalarla Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için sırasıyla $3,03 \times 10^{-12} \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve 1,65 eV olarak bulundu.



Şekil 4.32. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $\ln(I_0 / T^2)$ -1000/T değişim grafiği

Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ(1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için sırasıyla $9,40 \times 10^{-10} \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve 2,78 eV bulundu.

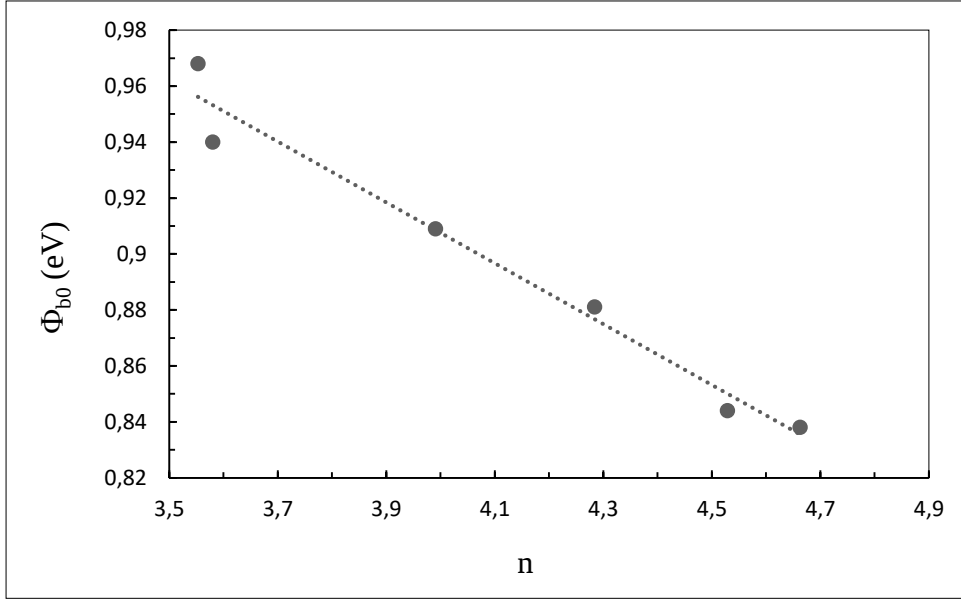


Şekil 4.33. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $\ln(I_0 / T^2)$ -1000/T değişim grafiği

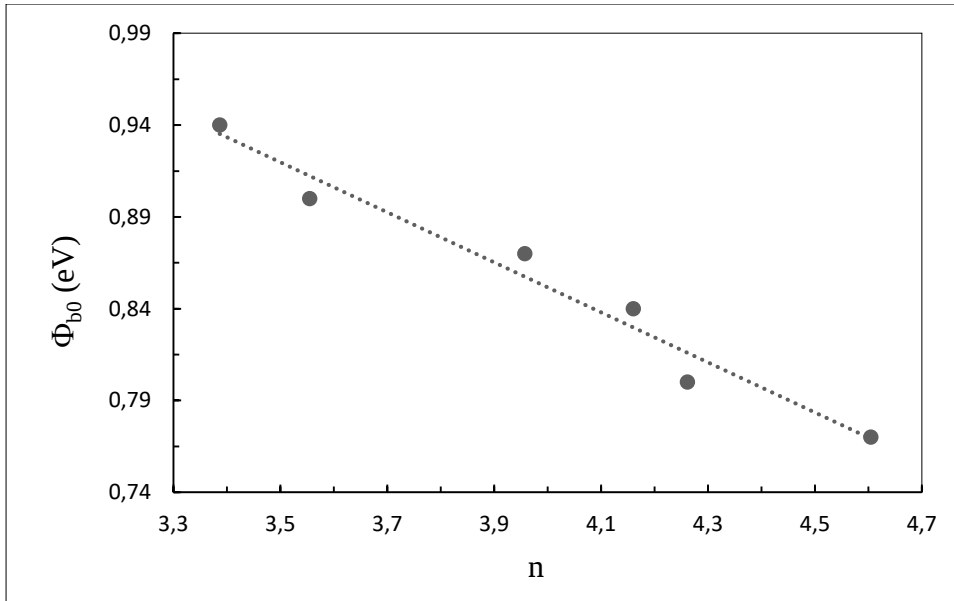
Au/P3HT:PCBM(2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) nümunesi için sırasıyla $9,43 \times 10^{-11} \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ve 1,99 eV olarak hesaplandı.

Dört numune için bulunan Richardson sabiti değerlerinin her biri n-tipi-6H-SiC'nin bilinen Richardson sabiti (A^*) $146 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ değerinden çok farklı olduğu görülmektedir [83,84,98]. Literatürde de hesaplanan deneysel verilere benzer sonuçlar mevcuttur [85, 86]. Richardson eğrisindeki sapmaların nedeni olarak, engel yüksekliğinin heterojen olmasına ya da farklı engel bölgelerinin olduğu arayüzeydeki gerilim değişimlerine bağlı olabilir [87, 88, 97].

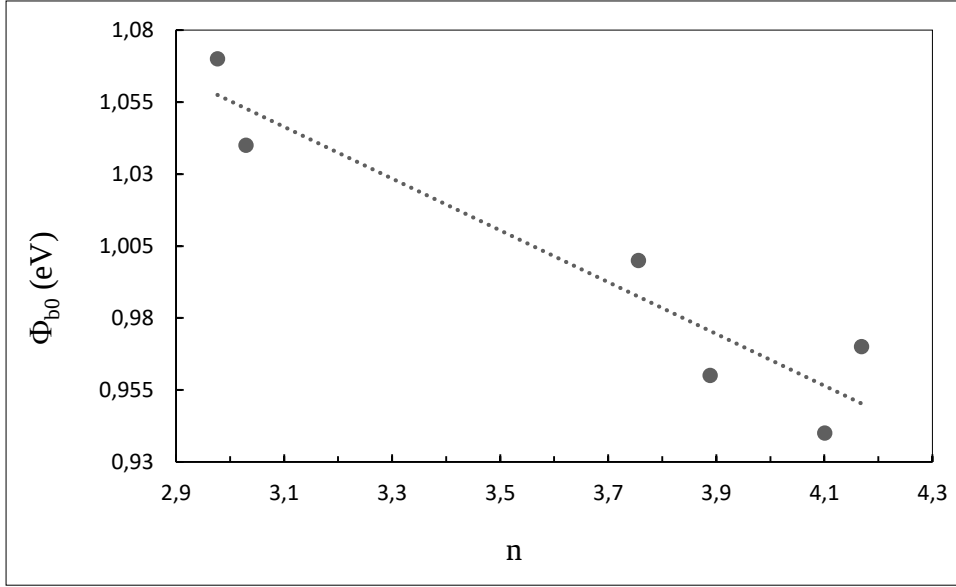
Sıfır gerilim engel yüksekliği (Φ_{b0}) ve idealite faktörü arasında grafikleri çizerek engel yüksekliği hakkında fikir edinilebilir. Bu amaçla deney sonuçlarına göre çizilen engel yüksekliği ve idealite faktörü ile ilgili grafikler Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'de verildi.



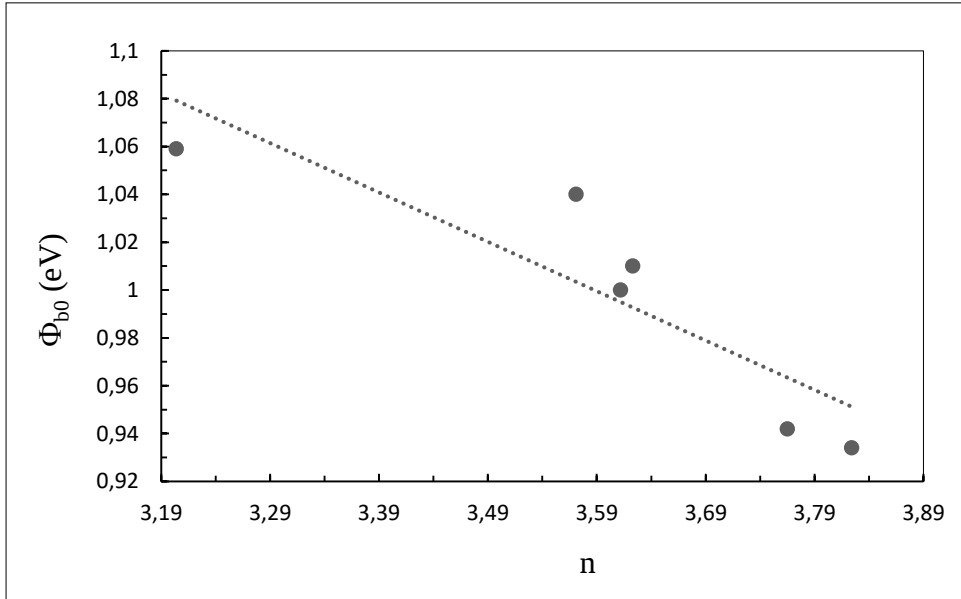
Şekil 4.34. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin Φ_{b0} - n grafiği



Şekil 4.35. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için Φ_{b0} - n grafiği



Şekil 4.36. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{b0} - n grafiği



Şekil 4.37. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{b0} - n grafiği

Grafikler incelendiğinde, engel yüksekliğinin idealite faktörüyle lineer olarak değişmesi, engel yüksekliğinin heterojen olduğunu gösterir [89].

Termiyonik emisyon metoduyla hesaplanarak bulunan deneysel karakteristiklerdeki sapmaları açıklayabilmek amacıyla Song ve arkadaşlarınca engel yüksekliği Gaussian dağılımı (GD) metodu önerilmiştir. Song ve arkadaşları I-V parametrelerindeki sapmanın nedeni olarak engel yüksekliğinin heterojen olmasını göstermektedirler [90].

Termoiyonik emisyon modeliyle hesaplanan Φ_{b0} ve n idealite faktörü değerlerinin yerine, Φ_{ap} ile n_{ap} görünen değerleri alındı [82]. Metoda göre, (Eş. 2.59'da) aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{b0}(T = 0 K) - \frac{q\sigma_0^2}{2kT}$$

Burada, Φ_{ap} deneysel yolla bulunan engel yüksekliği, σ_0 standart sapma ve Φ_{b0} ortalama engel yüksekliğidir. Engel yüksekliği hesaplarında standart sapmanın (σ_0) sıcaklığa bağlılığı genel olarak küçük olduğu için dikkate alınmayabilir [89].

Teoriye göre idealite faktörü sıcaklık ilişkisi aşağıdaki eşitliğe göre yazılır;

$$\left(\frac{1}{n_{ap}} - 1\right) = \rho_2 - \frac{q\rho_3}{2kT}$$

Burada, n_{ap} deneyden bulunan idealite faktörü, ρ_2 ile ρ_3 engel yüksekliği dağılımına bağlı gerilim katsayılarıdır. Gerilim katsayılarıyla, ortalama engel yüksekliği ve standart sapma arasında lineer bir ilişki mevcuttur.

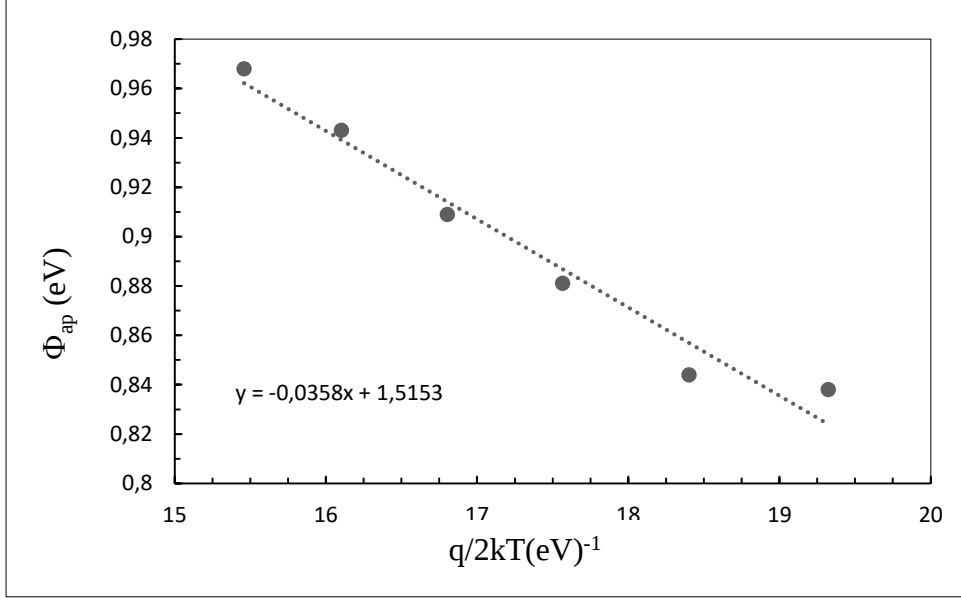
$$\bar{\Phi}_b = \bar{\Phi}_{b0} + \rho_2 V \quad (4.3)$$

$$\sigma_0 = \sigma_{s0} + \rho_3 V \quad (4.4)$$

Eş. 2.60, Eş. 4.3 ve Eş. 4.4'de görüldüğü şekilde, gerilim katsayıları sıcaklığa bağlı ve standart sapma miktarıyla ortalama engel yüksekliğine etki eden önemli değişkenlerdir. Standart sapma ne kadar küçükse, engel yüksekliği o kadar homojenizedir. Üretilen diyotların engellerinin homojenlik incelemelerini yapmak amacıyla Eş. 2.59 ve Eş. 2.60 kullanıldı. Denklemlere göre $\Phi_{ap} - q/2kT$ grafiğinin lineer olması beklenir. Doğrunun eğiminden standart sapma (σ_0) ile dikey eksen kesme noktasından ortalama engel yüksekliği bulunur.

Benzer şekilde $(1/n_{ap} - 1) - q/2kT$ grafiğinin de yine lineer olması beklenir. Doğru eğimi ρ_3 , dikey eksen kesme noktasıyla ρ_2 bulunur. Üretilen diyotların deneysel verileri kullanılarak grafikleri çizildi.

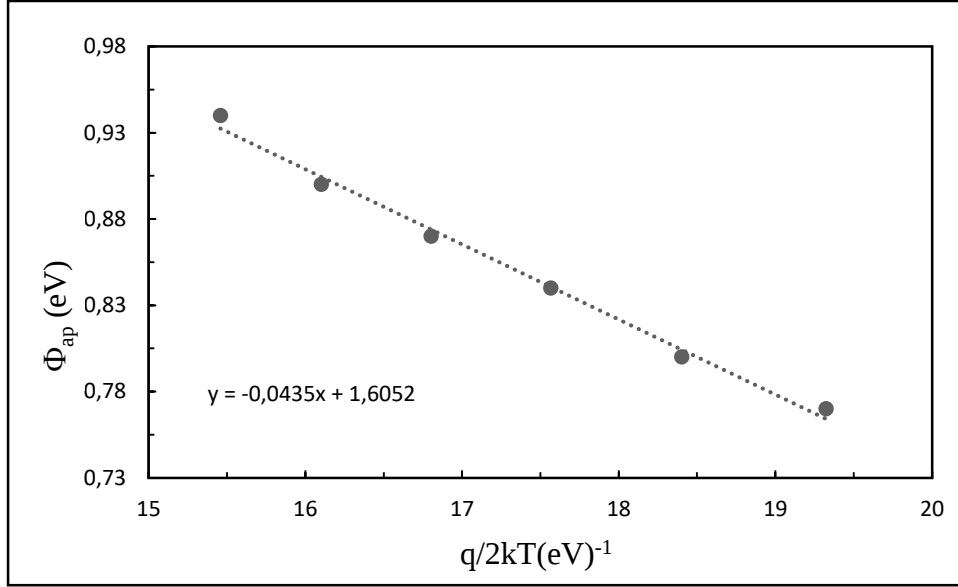
Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için çizilen Φ_{ap} - $q/2kT$ grafiği Şekil 4.38’de gösterildi.



Şekil 4.38. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{ap} - $q/2kT$ grafiği

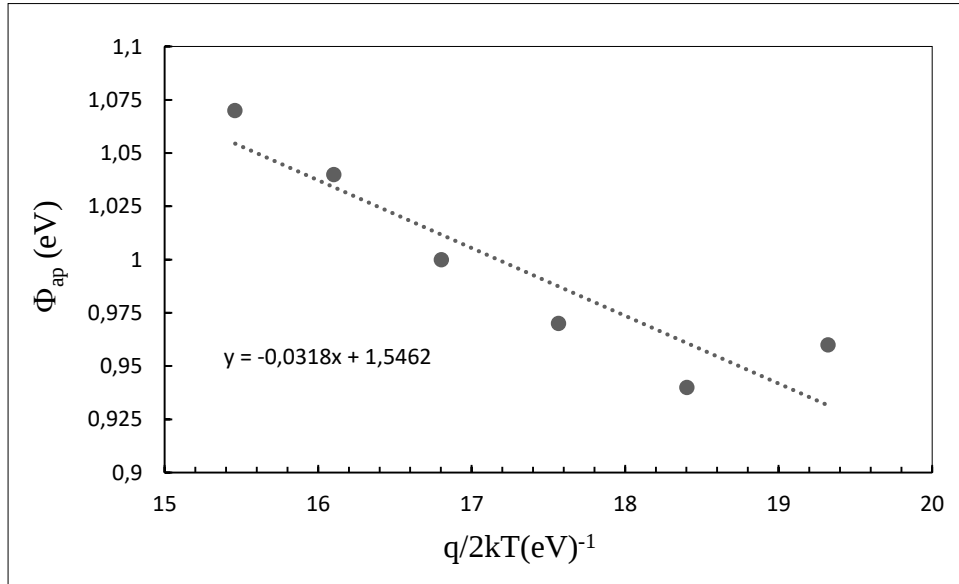
Grafikten (300 -375) K ortalama engel yüksekliği (Φ_{b0}) 1,52 eV ve standart sapma (σ_0) -0,04 V olarak hesaplandı.

Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için çizilen Φ_{ap} - $q/2kT$ grafiği Şekil 4.39’de verildi.



Şekil 4.39. Au/P3H:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için Φ_{ap} - $q/2kT$ grafiği

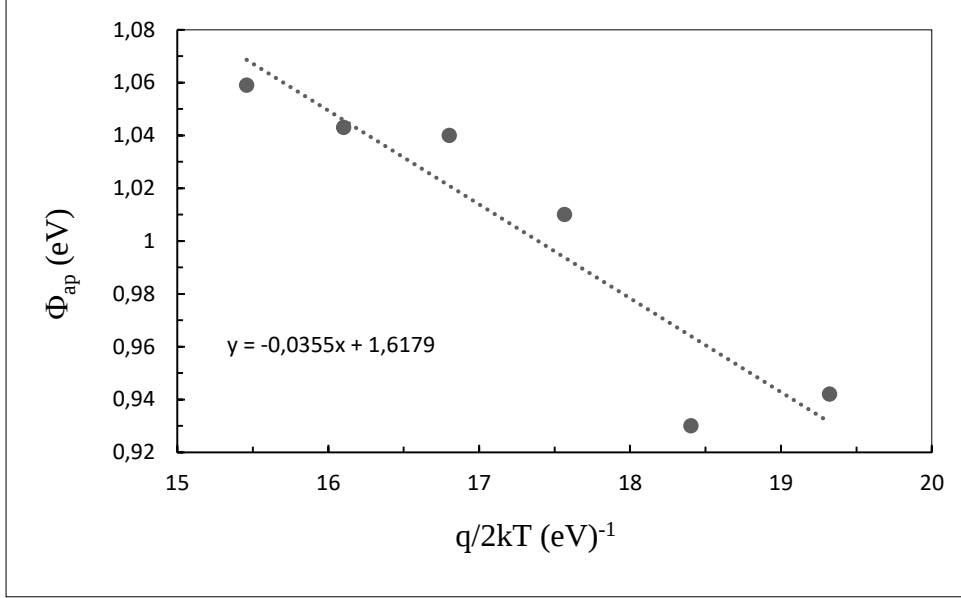
Grafiğe bakarak (300 -375) K ortalama engel yüksekliği (Φ_{b0}) 1,61 eV ve standart sapma (σ_0) -0,04V olarak okundu. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için çizilen Φ_{ap} - $q/2kT$ grafiği Şekil 4.40’da gösterildi.



Şekil 4.40. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{ap} - $q/2kT$ grafiği

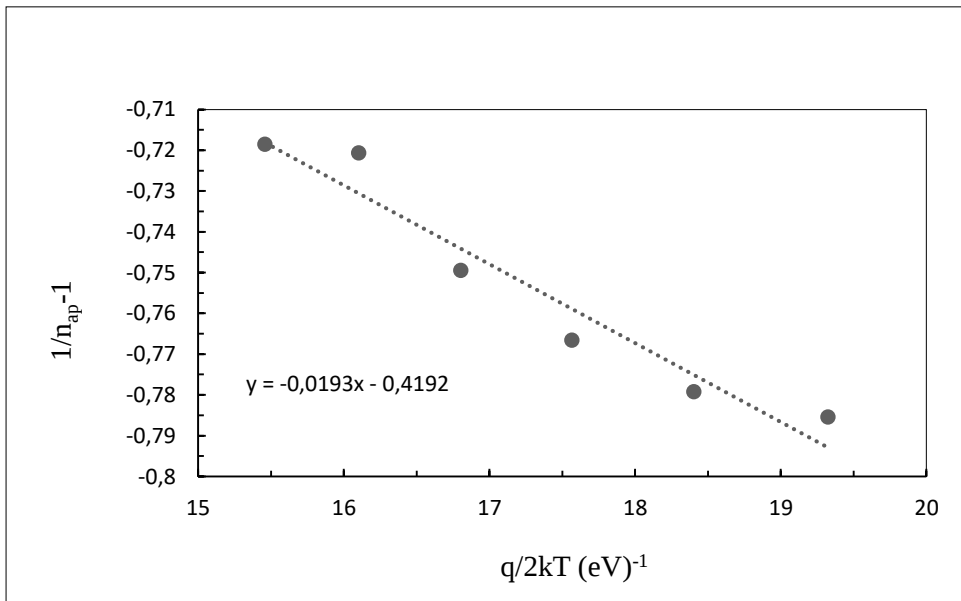
(300-375) K sıcaklık aralığında ortalama engel yüksekliği (Φ_{b0}) 1,55 eV ve standart sapma (σ_0) ise -0,03 V olarak bulundu.

Au/P3HT:PCBM(2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için çizilen Φ_{ap} - $q/2kT$ grafiği Şekil 4.41’de verildi.



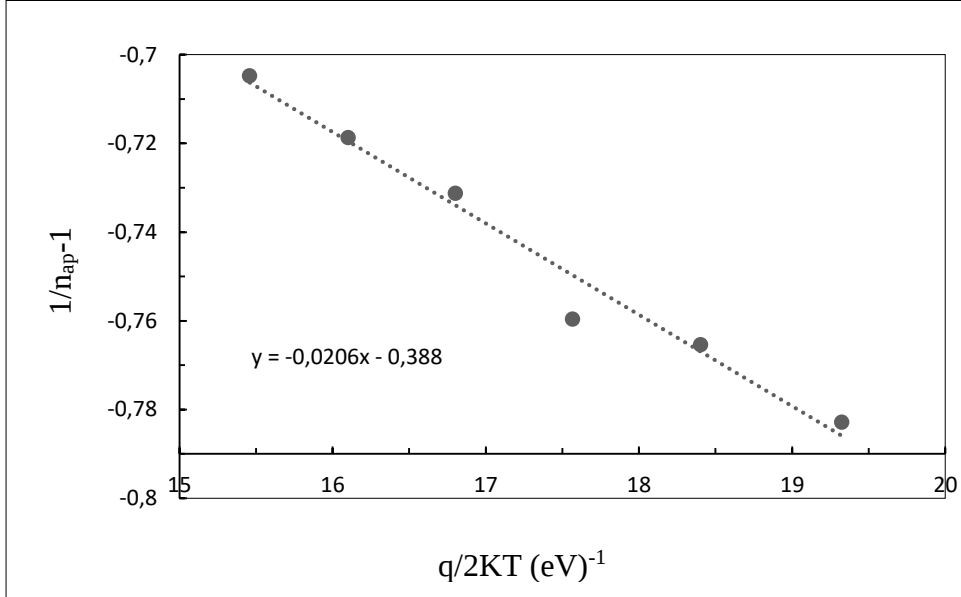
Şekil 4.41. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Φ_{ap} - $q/2kT$ grafiği

Buna göre, (300-375) K arasında ortalama engel yüksekliği (Φ_{bo}) 1,62 eV ve standart sapma (σ_0) ise - 0,04 V olarak okundu. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için çizilen $(1/n_{ap} - 1)$ - $q/2kT$ grafiği Şekil 4.42’de çizildi.



Şekil 4.42. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(1/n_{ap} - 1)$ - $q/2kT$ grafiği

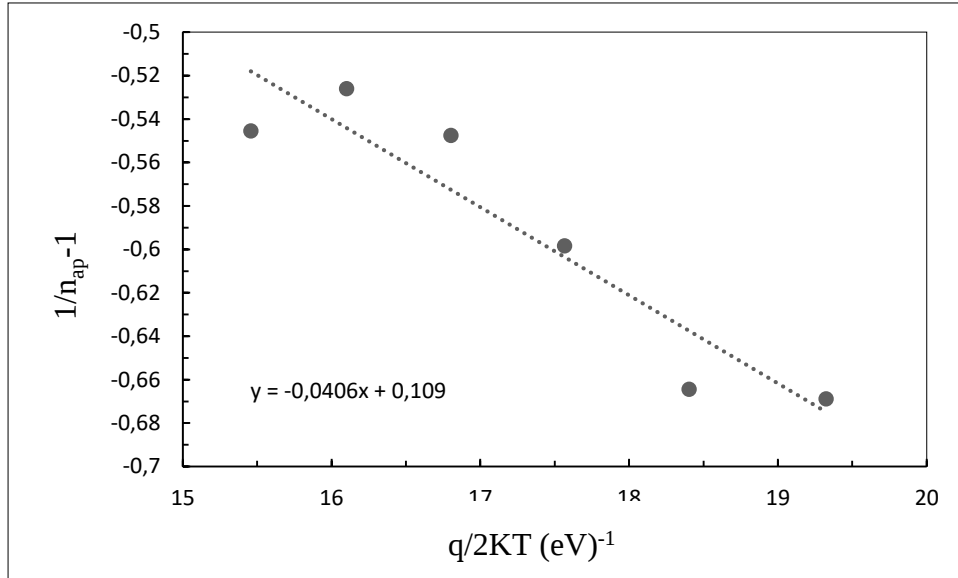
Grafik yardımıyla (300 - 375) K sıcaklık aralığında elde edilen gerilim sabitleri ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla -0,42 V ve -0,02 V olarak bulundu. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için çizilen $(1/n_{ap}-1) - q/2kT$ grafiği Şekil 4.43’de verildi.



Şekil 4.43. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için $(1/n_{ap} - 1) - q/2kT$ grafiği

Aynı Şekil 4.43. tetkik edildiğinde lineer bölge gözlenir. (300-375) K sıcaklık aralığında gerilim sabitleri ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla -0,39 V ve -0,02 V olarak okundu.

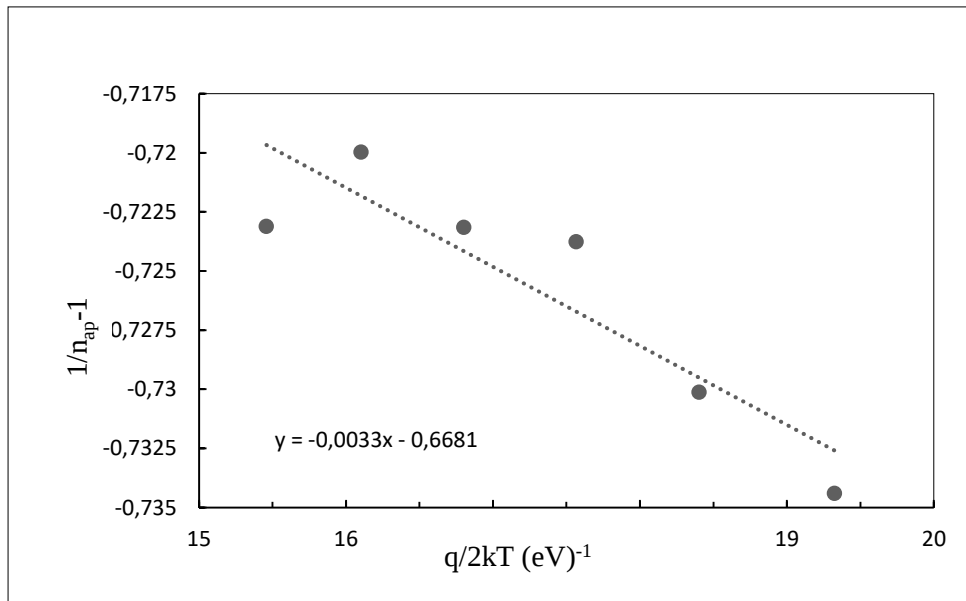
Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için çizilen $(1/n_{ap} - 1) - q/2kT$ grafiği 4.44’de gösterilmiştir.



Şekil 4.44. Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(1/n_{ap} - 1) - q/2KT$ grafiği

Şekil 4.44 incelendiğinde, (300-375) K sıcaklık aralığında ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla +0,10V ile -0,04V olarak hesaplandı.

Au/P3HT:PCBM(2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için çizilen $(1/n_{ap} - 1) - q/2kT$ grafiği Şekil 4.45’de verildi.



Şekil 4.45. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(1/n_{ap} - 1) - q/2KT$ grafiği

Şekil 4.45 bakıldığında (300-375) K sıcaklık aralığında, ρ_2 ve ρ_3 sırasıyla -0,67 V ile -0,003 V olarak bulundu.

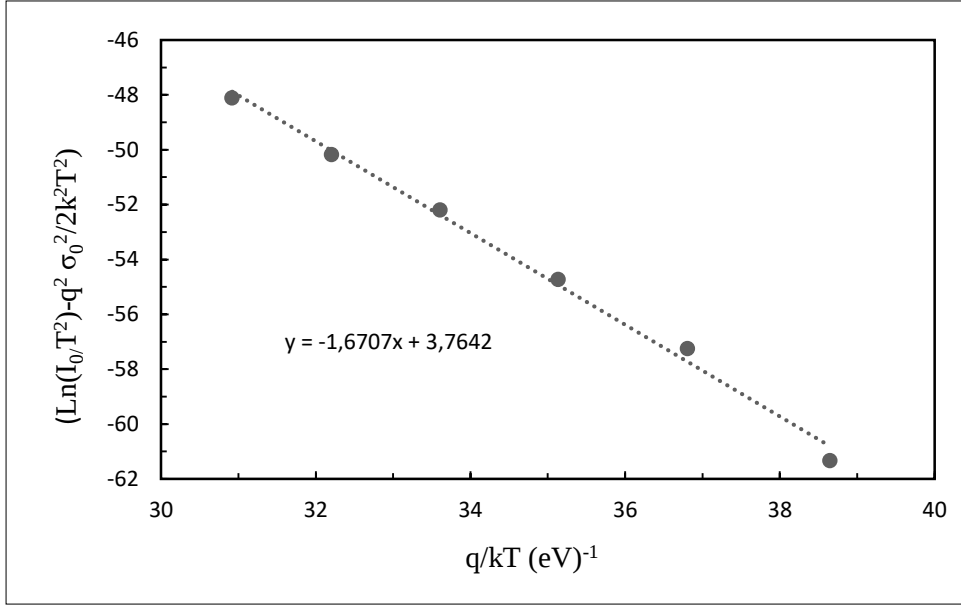
Şekil 4.38, Şekil 4.39, Şekil 4.40, Şekil 4.41, Şekil 4.42, Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’de görülen engel yüksekliğinin Gaussian dağılımı göstermesinin sebebi, engeli oluşturan yapıların heterojen olmasıyla izah edilebilir [91]. Bu durum arayüzey yapı farklılıkları, arayüzey kalitesi, elektrik yükleri içerebilir ve ölçüm cihazlarının hatasından kaynaklanabilir. Söz konusu Gaussian dağılımı daha önce n-tipi 6H-SiC araştırmacıları tarafından da rapor edilmiştir [92,93].

Üretilen dört örneğin bulunan ortalama engel yükseklikleriyle standart sapmaları karşılaştırıldığında düşük sıcaklarda göz ardı edilemeyecek şekilde büyük olduğu görülür. Bu durum engel yapısının heterojen olduğunun kanıtıdır [94,95].

Eş. 2.40 ve Eş. 2.59 kullanarak Richardson eşitliği modifiye edildiğinde;

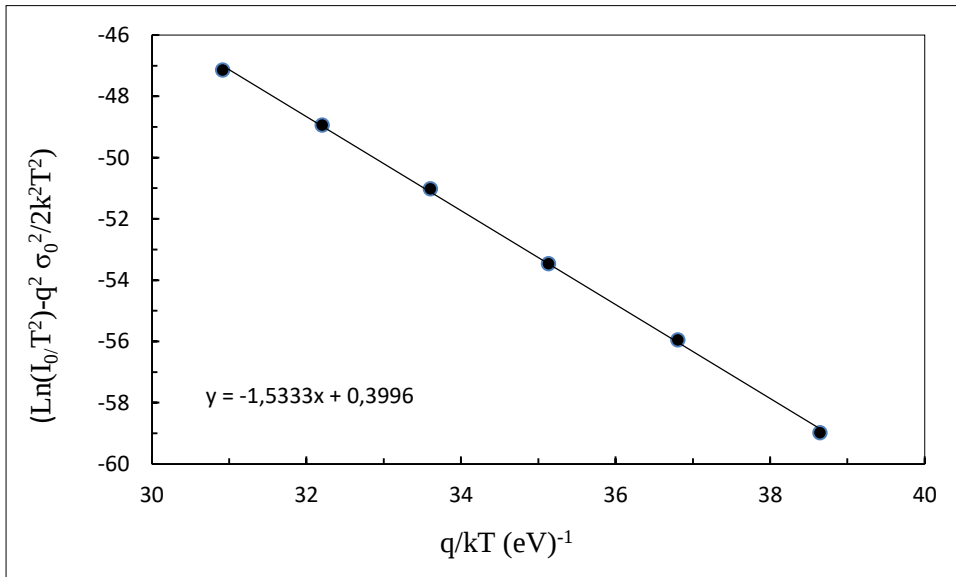
$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2\sigma^2}{2k^2T^2}\right) = \ln(AA^{**}) - \frac{q\bar{\Phi}_{b0}}{kT} \quad (4.5)$$

elde edilir. Dört örneğe ait önceden bulunan standart sapmayla (σ_0) çizilen $\ln(I_0/T^2)-q^2\sigma_0^2/2k^2T^2$ ’nin q/kT göre grafikleri Şekil 4.46, Şekil 4.47, Şekil 4.48 ve de Şekil 4.49’da verildi. Buna göre $\ln(I_0/T^2)-q^2\sigma_0^2/2k^2T^2$ ’nin q/kT (eV)⁻¹’ye göre grafiğin lineer olması beklenir. Doğrunun eğimi ortalama engel yüksekliği (Φ_{b0}) ve düşey eksen kesme noktası ise Richardson sabitini (A^{**}) verir.



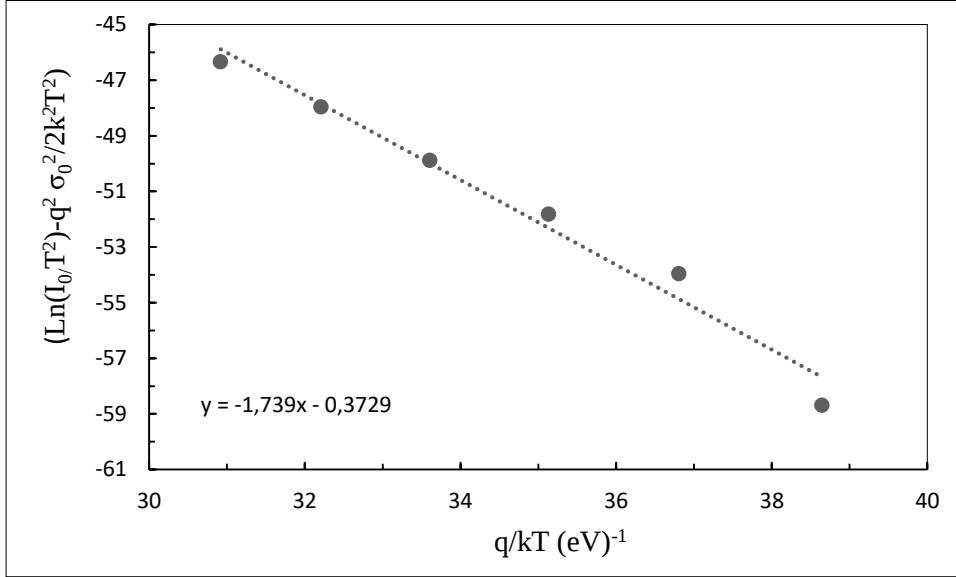
Şekil 4.46. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_0^2 / 2k^2 T^2) - q/kT$ grafiği

Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için Şekil 4.46 tetkik edilirse, lineer bir doğru bulunur. (300-375) K sıcaklık aralıklarında ortalama engel yüksekliği ve Richardson sabiti sırasıyla 1,67eV ve $2431,96 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ hesaplandı. Hesaplanan Richardson sabiti, n-tipi 6H-SiC için bilinen teorik değeri olan $146 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ değerinden farklıdır.



Şekil 4.47. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için $(\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_0^2 / 2k^2 T^2) - q/kT$ grafiği

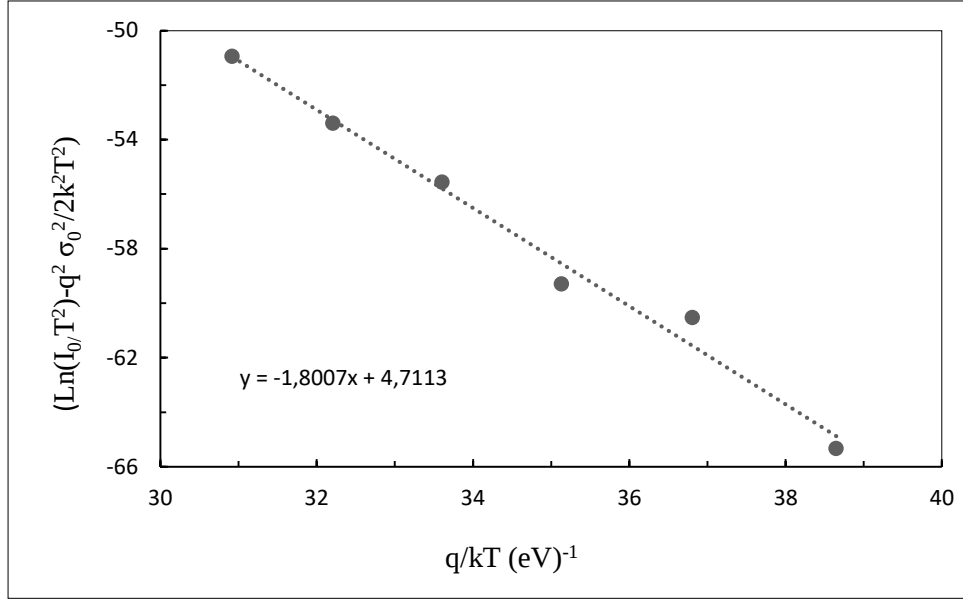
Şekil. 4.47 incelenirse, doğrusal olduğu görülür. (300-375) K sıcaklık aralıklarında ortalama engel yüksekliği ve Richardson sabiti sırasıyla 1,53 eV ve 84,39 $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olarak bulundu. Bu sonuç n-tipi 6H-SiC için bilinen değeriyle uyumludur.



Şekil 4.48. Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(\ln(I_0/T^2) - q^2 \sigma_0^2 / 2k^2 T^2) - q/kT$ grafiği

Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) örneği için çizilen grafik Şekil 4.48 tetkik edilirse (300-375) K sıcaklık aralıklarında ortalama engel yüksekliği ve Richardson sabiti sırasıyla 1,74 eV ve 39,11 $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olarak hesaplandı. Bu değer n-tipi 6H-SiC için bilinen değerinden oldukça farklıdır.

Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) örneği için çizilen grafik ise Şekil. 4.49'da verildi.



Şekil 4.49. Au/P3HT:PCBM (2: 1)/ 6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için $(\ln(I_0/T^2) - q^2\sigma_0^2/2k^2T^2) - q/kT$ grafiği

Şekil 4.49 grafiğinden (300- 375) K sıcaklık aralıklarında, ortalama engel yüksekliği ve Richardson sabiti sırasıyla 1,80 eV ve 6288,34 $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olarak bulundu.

Sonuç olarak (300 - 375) K sıcaklık aralıklarında modifiye edilen Richardson eğrilerinden bulunan ortalama engel yüksekliği değerleriyle, her dört nümune için Eş. 4.3'e göre bulunan ortalama engel yükseklikleri uyumludur [89].

Yarıiletkenin elektriksel karakteristiklerini akım iletim mekanizmasının yanı sıra arayüzeyin kalınlığının ve arayüzey durum konsantrasyonunun da etkilediği görülmüştür. Engel yükseliği (Φ_b) ile idealitenin bulunmasında arayüzey durum konsantrasyonunun (N_{ss}) önemli rolü vardır. Arayüzey tabakası çok kalın olduğunda metalle yarıiletken arasındaki iletim olasılığı azalır. Bu sebeple etkin engel yüksekliği (Φ_e) uygulanan gerilime bağlı hale gelir [90]. Etkin engel yüksekliğini (Φ_e) veren denklem;

$$\Phi_e = \Phi_{b0} + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right) V \quad (4.6)$$

biçimindedir. $\beta = 1 - 1/n(V)$ değeri gerilimle beraber etkin engel yükseklik değişimini gösterir. Gerilimle beraber değişen idealitenin ifadesi, $n(V)$, değeri ise Card ve Rhoderick tarafından tanımlanmıştır [47]. Buna göre $n(V)$ değerini veren ifade;

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left(\frac{\epsilon_s}{W_d} + qN_{ss}(V) \right) \quad (4.7)$$

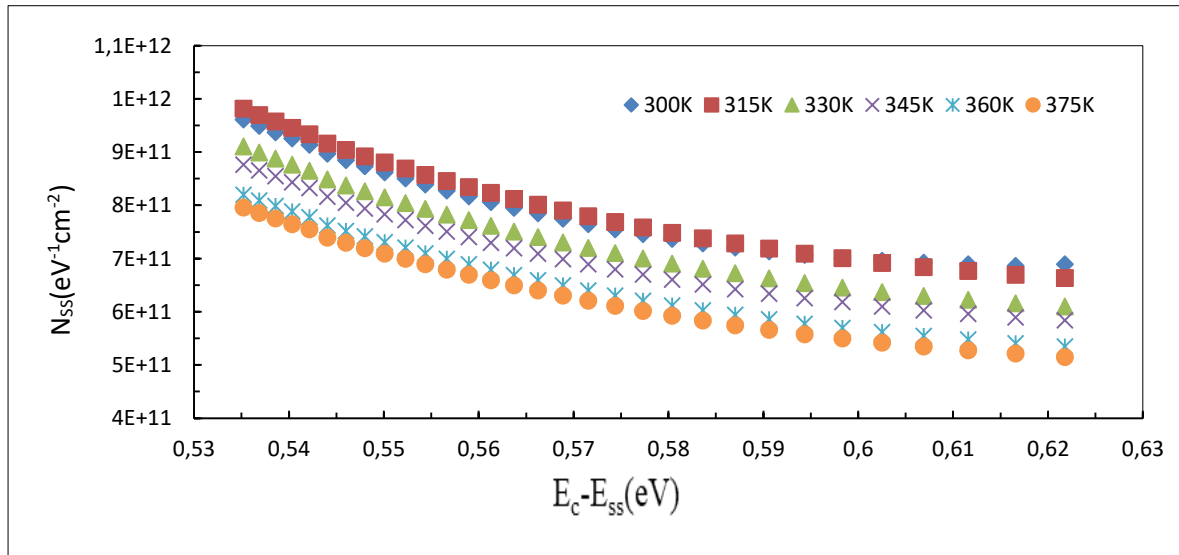
$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_d} \right] \quad (4.8)$$

N_{ss} arayüzey durum konsantrasyonunu, ϵ_i ile ϵ_s sırasıyla arayüzeyin ve yarıiletkenin dielektrik sabitini, W_d tüketim bölgesinin genişliği ve δ arayüzey tabakasının kalınlığını göstermektedir.

Arayüzey durum konsantrasyonun enerjisi n-tipi yarıiletken için E_{ss} olup yarıiletken yüzeyin iletkenlik bant sınırıyla arasındaki fark [44];

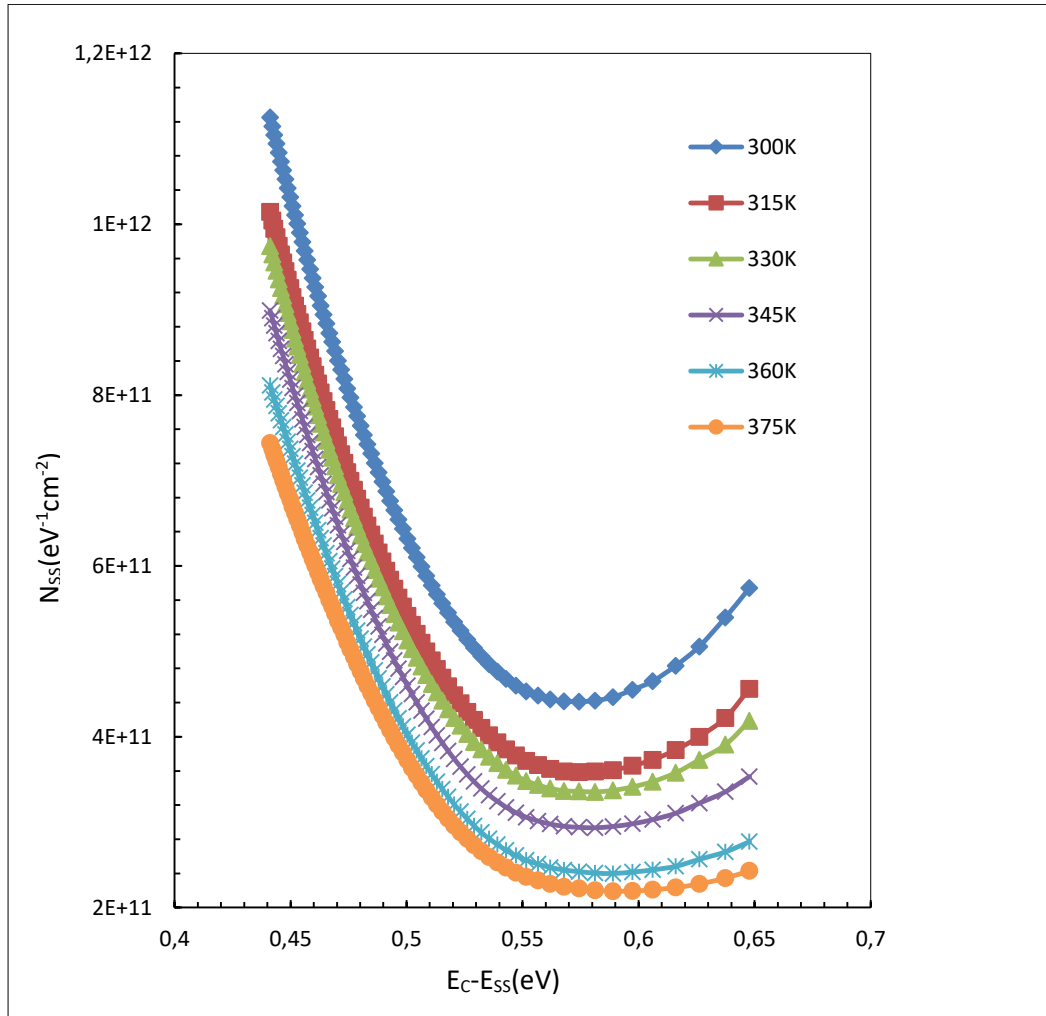
$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.9)$$

Burada q elektronun yükü Φ_e etkin engel yüksekliği, V uygulanan gerilim, E_{ss} n-tipi yarıiletkenin arayüzey durum konsantrasyon enerjisi, E_c yarıiletken yüzeyin iletkenlik bant sınır enerjisidir. 4.6 ve 4.9 denklemleri ile $E_c - E_{ss}$ farkı hesaplanabilir. Eş. 2.13 ve Eş. 4.8 yardımıyla gerilimin fonksiyonu olarak $n(V)$ ve arayüzey durum konsantrasyonu (N_{ss}) bulunmuştur. Çizilen grafikler aşağıda sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.50. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı ($E_c - E_{ss}$) grafiği

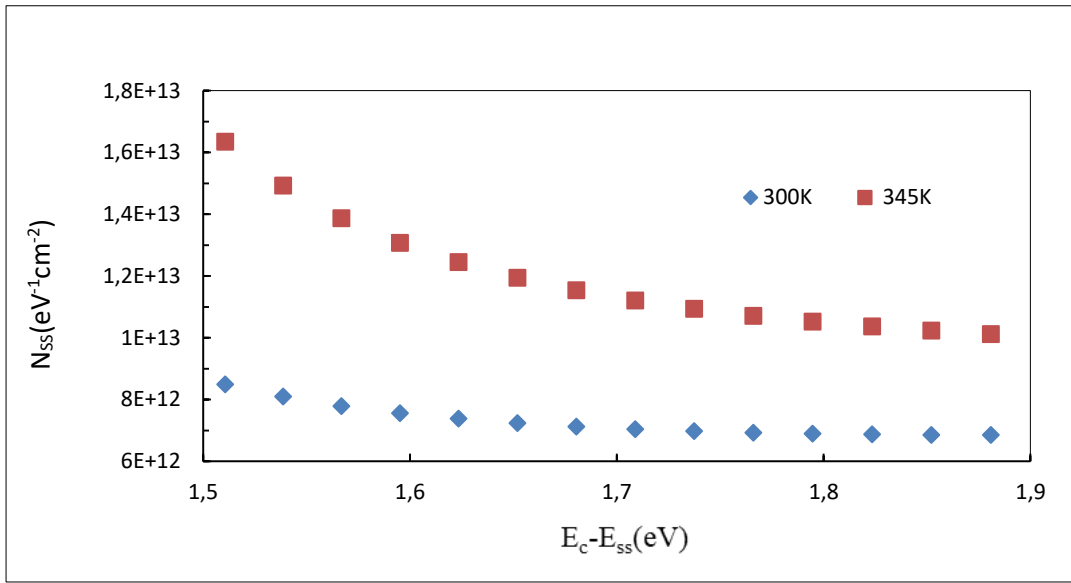
Şekil 4.50 grafiğini çizmek için Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin arayüzey tabakasının kalınlığı $\delta=100$ nm, arayüzeyin ve yarıiletkenin dielektrik sabitleri ise sırasıyla $\epsilon_i=3,7 \epsilon_0$ ve $\epsilon_s=9,6 \epsilon_0$ 'dir. Boşluğun dielektrik sabiti $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm olarak alınmıştır. Diğer gerekli veriler sekiz çizelgeden alınarak N_{ss} arayüzey durum konsantrasyonunu ve E_c-E_{ss} hesaplanarak grafik çizildi. N_{ss} değeri 300 K $1E+12$ ($eV^{-1}cm^{-2}$) en büyük değerini almakta ve sıcaklıkla azalmaktadır. Bu bize diyotun özelliklerinin geliştiğini, idealite faktörünün azaldığını gösterir.



Şekil 4.51. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı (E_c-E_{ss}) grafiği

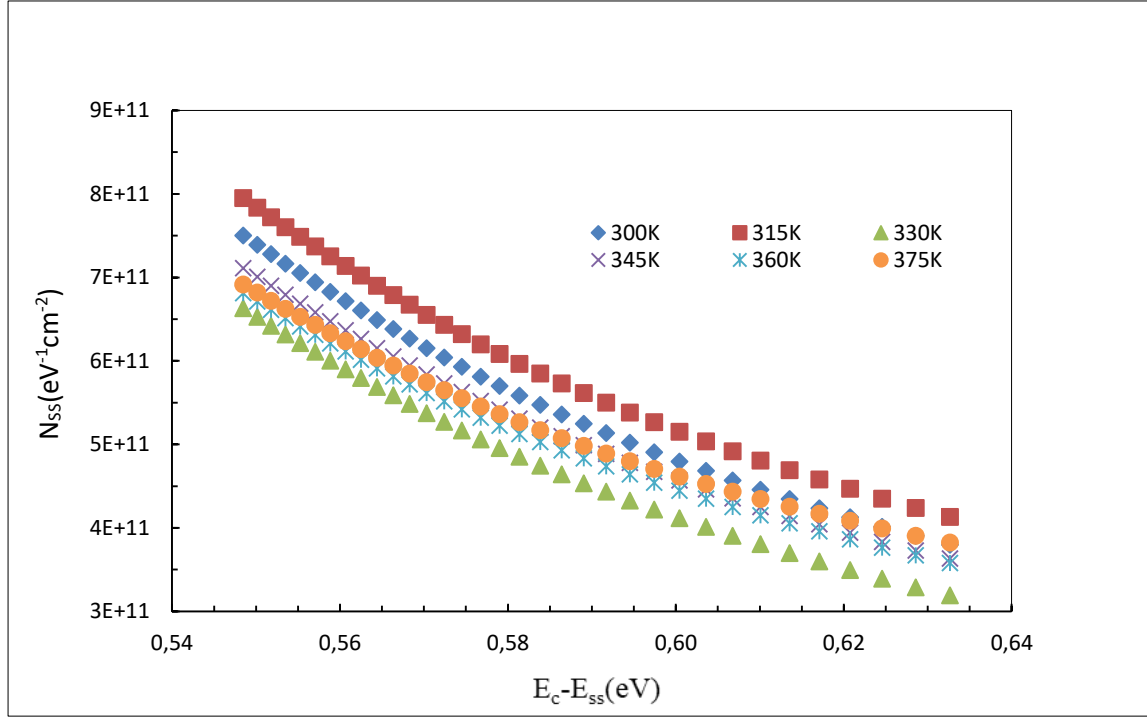
Şekil 4.51 grafiğini çizerken Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) numunesi için arayüzey tabakanın kalınlığı $\delta=140$ nm arayüzeyin ve yarıiletkenin dielektrik sabitleri ise sırasıyla $\epsilon_i=3,7 \epsilon_0$ ile $\epsilon_s=9,6 \epsilon_0$ 'dır.

Burada boşluğun dielektrik sabiti $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm olarak alındı. Diğer gerekli veriler sekiz çizelgeden alınarak N_{ss} arayüzey durum konsantrasyonunu ve E_C-E_{ss} hesaplanarak grafik çizildi. N_{ss} değeri 300 K’de $1,2E+12$ ($eV^{-1}cm^{-2}$) en büyük değerini almakta ve sıcaklıkla azalmaktadır. Bu bize diyotun özelliklerinin geliştiğini, idealite faktörünün ve seri direncinin azaldığını gösterir. Birinci numune ile ikinci numune aynı özelliklere sahip olup aralarındaki tek fark ikinci numune 40 nm daha kalındır. N_{ss} , on kat daha azalarak kontak özellikleri birincisine göre daha da gelişmiştir. Bunu Çizelge 2’den n ve Φ_b değerlerine bakarak görebiliriz.



Şekil 4.52. Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı (E_C-E_{ss}) grafiği

Şekil 4.52 çizmek için Au/P3HT:PCBM:F4TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin arayüzey tabakasının kalınlığı $\delta=100$ nm arayüzeyin ve yarıiletkenin dielektrik sabitleri sırasıyla $\epsilon_i=3,8$ ϵ_0 ile $\epsilon_s=9,6$ ϵ_0 ’dır. Boşluğun dielektrik sabiti $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm olarak alındı. Diğer gerekli veriler sekiz çizelgeden alınarak arayüzey durum konsantrasyonu N_{ss} ve E_C-E_{ss} hesaplanarak grafik çizildi. N_{ss} , 300 K ve 345 K sıcaklıklarında ölçülebilmektedir. Bunun nedeni F4TCNQ olabilir. Çünkü elektron kabul etme kabiliyeti yüksektir. N_{ss} 300 K $8E+12$ ($eV^{-1}cm^{-2}$) bulundu. Birinci numune ile üçüncü numune aynı özelliklere sahip olup aralarındaki tek fark üçüncü numune %2 oranında F4TCNQ içermektedir. N_{ss} artarak seri direncin düşüm hızını azaltmaktadır. Kontak özellikleri birincisine göre daha da gelişmiştir ve bunu Çizelge 3’den n ve R_s değerlerine bakarak görebiliriz.



Şekil 4.53. Au/P3HT:PCBM (2: 1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesi için arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) enerjiye bağlı (E_c-E_{ss}) grafiği

Şekil 4.53 grafiği elde edilirken Au/P3HT:PCBM (2: 1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin arayüzey tabakasının kalınlığı $\delta=100$ nm arayüzeyin ve yarıiletkenin dielektrik sabitleri sırasıyla $\epsilon_i=3,93 \epsilon_0$ ile $\epsilon_s=9,6 \epsilon_0$ alındı.

Burada boşluğun dielektrik sabiti $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-14}$ F/cm olarak alındı. Diğer gerekli veriler sekiz çizelgeden alınarak, arayüzey durum konsantrasyonu N_{ss} ve E_c-E_{ss} hesaplanarak grafikleri çizildi. N_{ss} , 300 K'de $8E+11$ ($eV^{-1}cm^{-2}$) değerini almakta ve sıcaklıkla azalmaktadır. Bu, bize diyotun özelliklerinin geliştiğini gösterir. Birinci numune ile dördüncü numune aynı özelliklere sahip olup aralarındaki tek fark dördüncü numunedeki P3HT hacim oranı PCBM'nin iki katıdır. N_{ss} azalarak kontak özellikleri birincisine göre daha da gelişmiştir bunu Çizelge 4'den n ve R_s değerlerine bakarak görebiliriz.

Polimerler katkılандıkları malzemelerin özelliklerini iyileştirdiği için birçok malzemede kullanılmaktadır. Bu konudaki araştırmalar devam etmektedir.

4.2. Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri

Sıcaklığa bağlı (C-V) sonuçlarından difüzyon gerilimi (V_d), verici konsantrasyonu (N_d), tüketim tabakası genişliği (W_D), Fermi enerjisi (E_F) ve engel yüksekliği (Φ_{b0}) parametreleri bulundu.

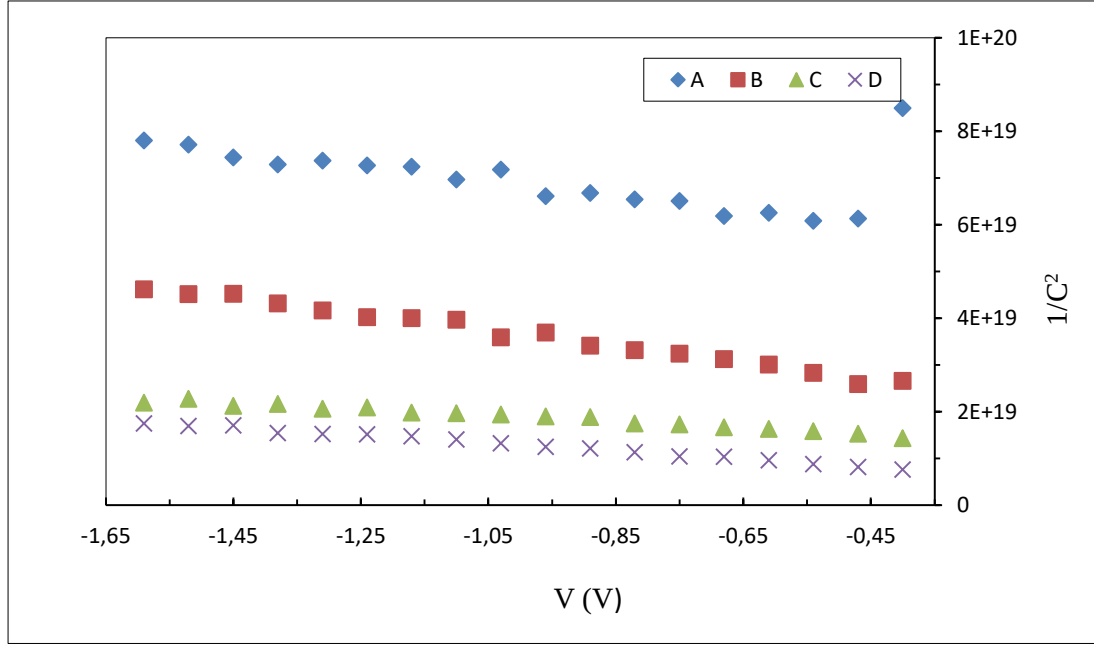
Üretilen, dört numunenin Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag(1500devir) diyot, Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-iC/Ag(750devir) diyot, Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ(1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyot ve Au/P3HT:PCBM(2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) diyodu, 200 kHz sabit frekans değerinde 300 K ile 375 K sıcaklık aralığında 15 K adımlar halinde C-V değerleri ölçüldü.

Kapasitans-gerilim (C-V) ölçümleri kullanılarak bulunan C^{-2} -V değişimi Şekil 4.50’de verilmiştir. 200 kHz frekansta ters beslemede ölçülen kapasitans-gerilim karakteristiklerinden bulunan C^{-2} -V eğrilerinin gerilim eksenine uzatılmasıyla belirlenen V_0 kesme geriliminden faydalanılarak difüzyon gerilimleri elde edildi. Doğruların eğimlerinden faydalanılarak, N_D verici konsantrasyonları bulundu. $T = 300\text{ K}$ ’de elde edilen difüzyon gerilimi (V_d) ve verici yoğunluğu (N_D) dört diyot için 1,36 V, 1,03 V, 1,14 V ve 1,53V ve $1,56 \times 10^{+15} \text{ cm}^{-3}$, $2,34 \times 10^{+15} \text{ cm}^{-3}$, $5,21 \times 10^{+15} \text{ cm}^{-3}$ ve $7,80 \times 10^{+15} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan verici konsantrasyonunun sıcaklıkla arttığı Şekil 4.52 ve 4.53’de görülebilir. V_0 ile V_d arasındaki bağıntı arayüzey durumları yok iken;

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q}$$

şeklindedir [4]. Denklem 2.81’de kT/q ifadesi eV cinsinden termal enerjidir. Çizilen C^{-2} -V grafiklerinin eğimlerinden N_D verici yoğunlukları (Eş. 2.82’de göre) bulunmuştur.

$$\frac{\partial C^{-2}}{\partial V} = \frac{-2}{q\epsilon_s A^2 N_D}$$



Şekil 4.54. A (Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir)), B (Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir)), C (Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir)) ve D (Au/P3HT: PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir)) numunelerinin 300 K’de C⁻²-V grafikleri

Ölçüm yapılan her sıcaklık için tüketim tabakasının genişliği (W_d),

$$W_d = \left(\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 V_d}{qNd} \right)^{\frac{1}{2}}$$

şeklinde verilen (2.83) ifadesinden hesaplanabilir. 300 K’de Au/P3HT:PCBM(1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) tüketim tabakasının genişliği $W_d=1,56 \times 10^{-5}$ cm olarak bulundu. Aynı sıcaklıkta Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) için $W_d = 2,34 \times 10^{-5}$ olarak hesaplandı. Yine 300 K’de Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) için $W_d = 5,21 \times 10^{-5}$ olarak bulundu. Au/P3HT:PCBM(2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) için aynı sıcaklıkta $W_d=7,80 \times 10^{-5}$ olarak hesap edildi.

Diğer sıcaklıklar için tüketim tabakasının değerleri Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de verilmiştir.

C⁻²-V grafiklerinden bulunan $\Phi_b(C-V)$ engel yüksekliğini; difüzyon gerilimi; Fermi Enerjisi ve Schottky engel düşmesine bağlayan denklem

$$\Phi_B = V_D + E_F - \Delta\Phi_B$$

(Eş. 2.84) şeklinde olup, burada E_F ; Fermi enerjisi V_D ise difüzyon gerilimidir. $\Delta\Phi_B$ (Eş. 2.85'e göre) sanal kuvvet engel alçalmasıdır.

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0} \right]^{\frac{1}{2}}$$

E_m (Eş. 2.86'ya göre) elektrik alandır ve aşağıdaki şekilde yazılır [4].

$$E_m = \left(\frac{2qN_A V_D}{\epsilon_s\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

E_F (Eş. 2.87'ye göre) Fermi enerjisi aşağıdaki denklemden bulunur.

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right)$$

Burada, N_c n-tipi 6H-SiC için iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu sıcaklığa bağlı olarak (Eş. 2.88'e göre);

$$N_c = 1.73 \times 10^{15} \times T^{\frac{3}{2}} (cm^{-3})$$

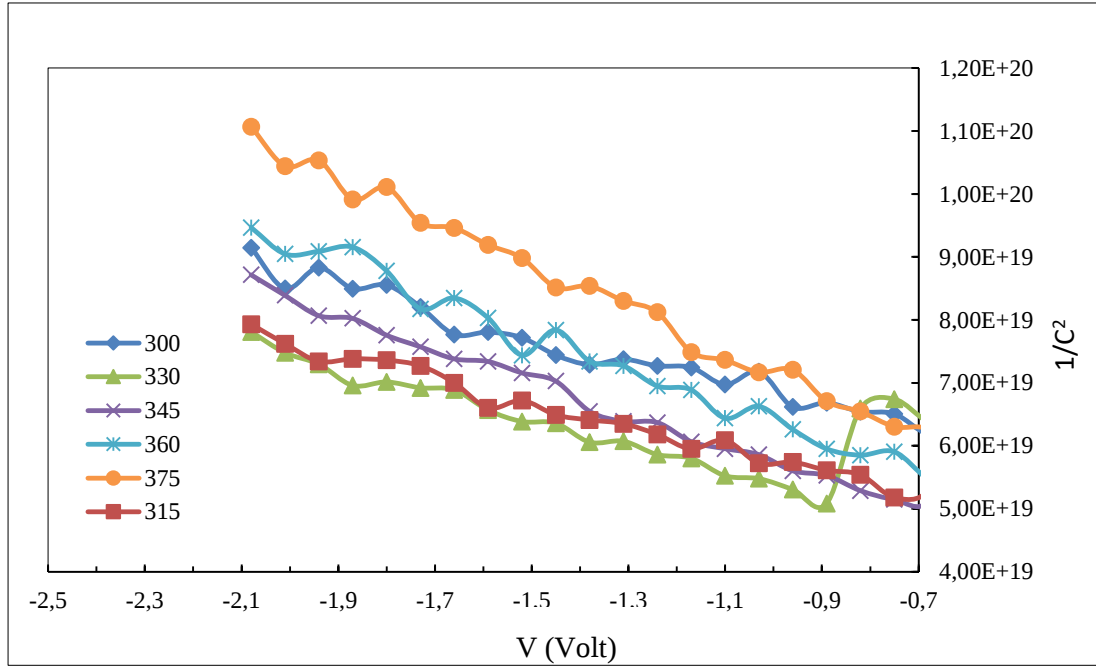
şeklindedir. Bunun sıcaklığa bağlı genel ifadesi (Eş. 2.89'a göre),

$$N_c = 2 \left(\frac{(2m^*kT)^{3/2}}{h^3} \right)$$

şeklinde verilir.

$$\Phi_{b0}^{CV} = V_{bi} + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right)$$

eşitliklerinden yararlanılır. Burada V_{bi} değeri $1/C^2$ 'nin gerilime (V) göre çizilen grafiğinin gerilim eksenini kestiği noktadan bulundu. Hesaplamalarda kullanılan elektronun etkin kütlesi n-tipi 6H-SiC için $0,2m_0$ olarak alındı.

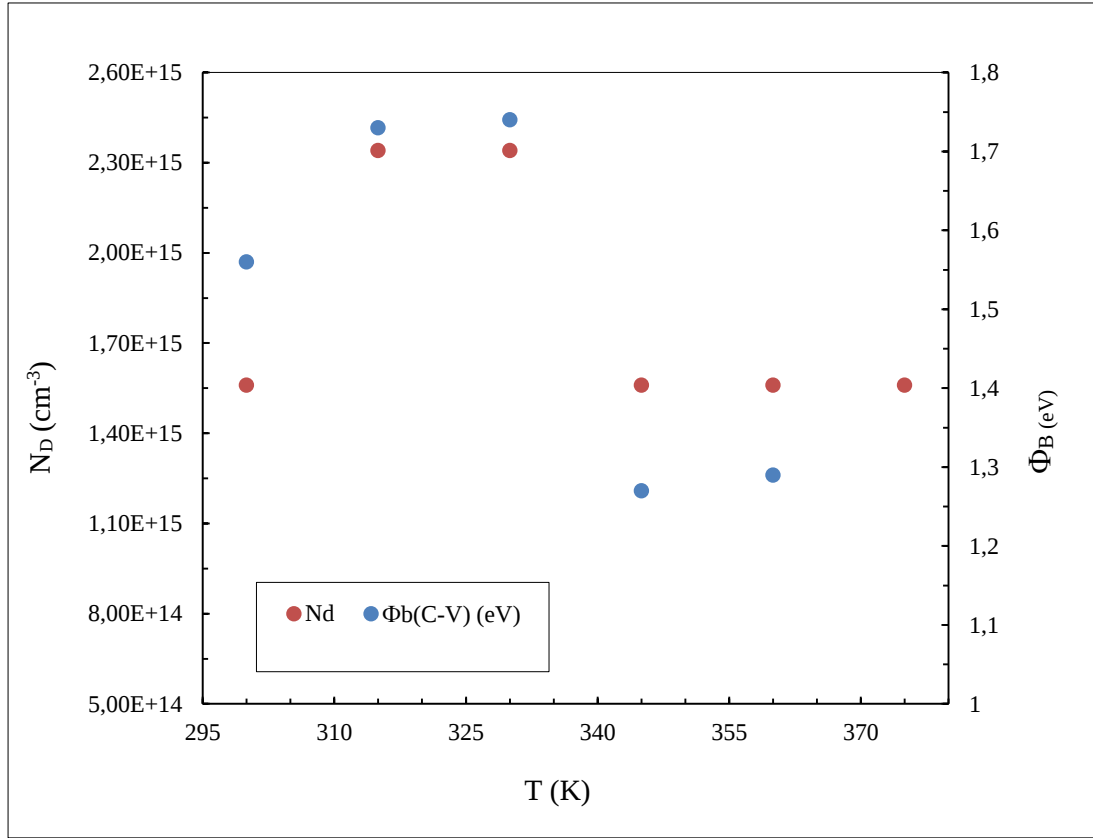


Şekil 4.55. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) numunesinin (300-375) K sıcaklık aralığındaki C^{-2} -V grafiği

V_d , N_D , E_F , $\Delta\Phi_B$, W_D ve $\Phi_B(C-V)$ değerleri çizilen $1/C^2$ -V grafiklerinden bulunup, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de verildi. $1/C^2$ -V grafikleri bütün sıcaklık değerlerinde birbirleriyle benzerlik göstermektedirler. Bunun nedeni, verici konsantrasyonlarının (N_D) sıcaklıkla çok değişmediği dolayısıyla sıcaklık artışlarından etkilenmediği olabilir. $1/C^2$ -V grafiklerinin sıcaklık artışıyla ters beslemede eğimlerinin azalması N_D değerinin artışına sebep olmaktadır. Bu durum, arayüzeyden kaynaklı ek kapasitansa ya da arayüzeydeki tuzaklardaki yüklere bağlanabilir.

Çizelge 4.5. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun 200 kHz’de (300-375) K sıcaklık aralığında C^{-2} -V grafiğinden elde edilen parametreler

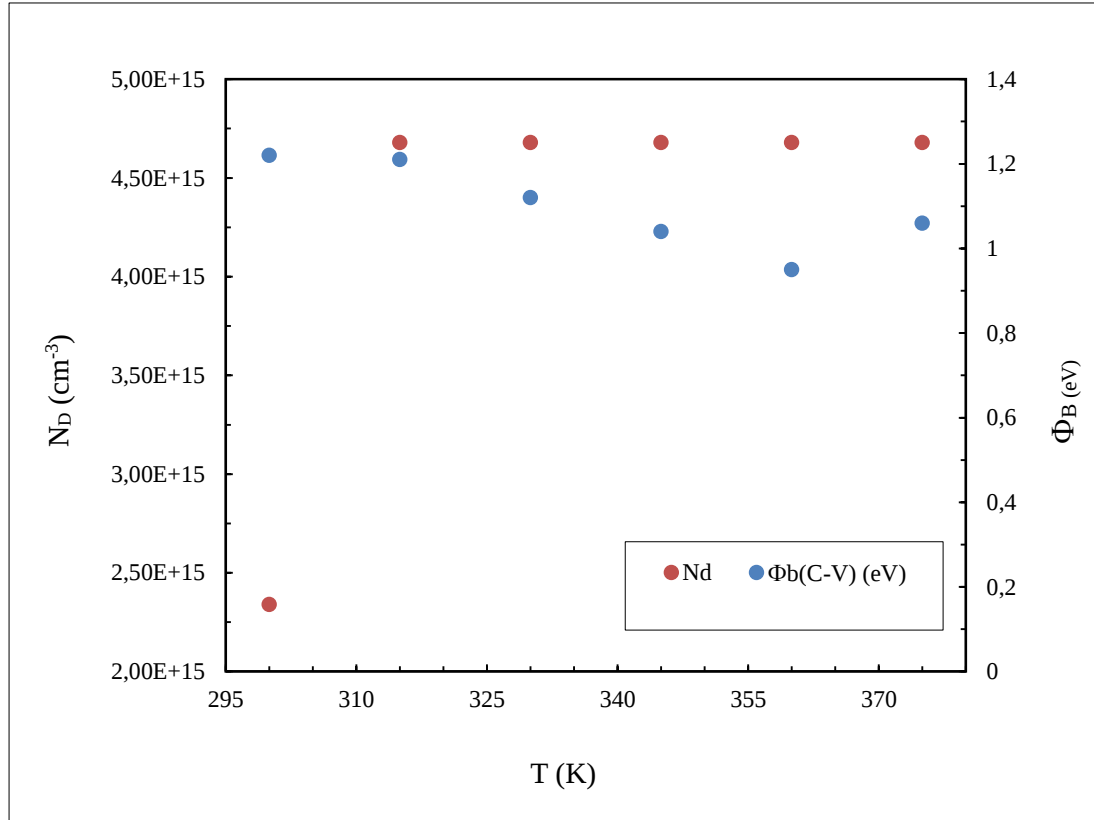
T (K)	V_0 (V)	V_D (eV)	N_d (cm ⁻³)	E_f (eV)	E_m (V. cm ⁻¹)	$\Delta\Phi_b$ (eV)	W_d (cm)	$\Phi_b(C-V)$ (eV)	$\Phi_b(I-V)$ (eV)
300	1,33	1,36	$1,56 \times 10^{15}$	0,22	28180,36	0,02	$9,63 \times 10^{-5}$	1,56	0,83
315	1,50	1,53	$2,34 \times 10^{15}$	0,22	36607,36	0,02	$8,35 \times 10^{-5}$	1,73	0,84
330	1,50	1,53	$2,34 \times 10^{15}$	0,23	36607,36	0,02	$8,35 \times 10^{-5}$	1,74	0,88
345	1,00	1,03	$1,56 \times 10^{15}$	0,26	24524,24	0,01	$8,39 \times 10^{-5}$	1,27	0,90
360	1,00	1,03	$1,56 \times 10^{15}$	0,27	24524,24	0,01	$8,39 \times 10^{-5}$	1,29	0,94
375	1,33	1,36	$1,56 \times 10^{15}$	0,29	28180,36	0,02	$9,65 \times 10^{-5}$	1,63	0,96



Şekil 4.56. 200 kHz frekans değerinde Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun (300-375) K sıcaklık aralığında Φ_B ve N_D 'ye karşı çizilen iki eksenli grafiği

Çizelge 4.6. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) Schottky engel diyotun 200 kHz'de (300-375) K sıcaklık aralığında çizilen C^{-2} -V grafiğinden elde edilen parametreler

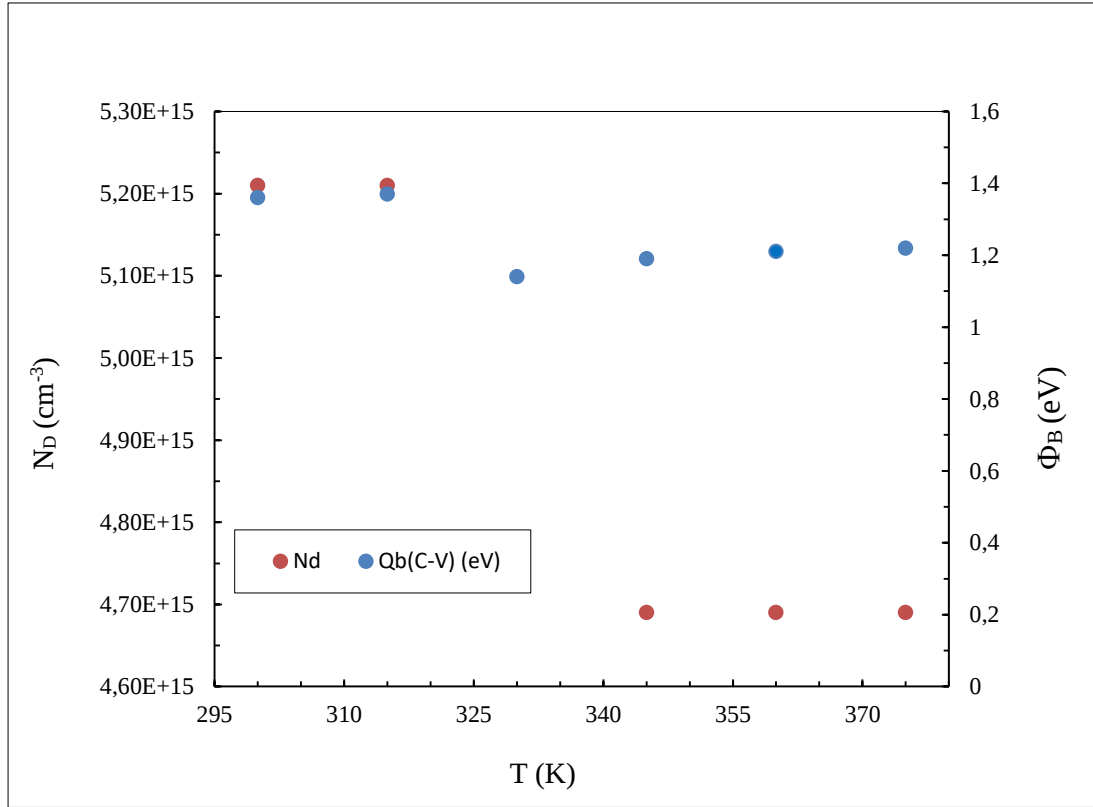
T (K)	V ₀ (V)	V _D (eV)	N _d (cm ⁻³)	E _f (eV)	E _m (10 ⁴ V. cm ⁻¹)	ΔΦ _b (eV)	W _d (10 ⁻⁵ cm)	Φ _b (C-V) (eV)	Φ _b (I-V) (eV)
300	1,00	1,03	2,34x10 ¹⁵	0,21	3x10 ⁴	0,02	6,84	1,22	0,75
315	1,00	1,03	4,68x10 ¹⁵	0,21	4,24x10 ⁴	0,02	4,84	1,21	0,79
330	0,90	0,92	4,68x10 ¹⁵	0,22	4,03x10 ⁴	0,02	4,60	1,12	0,82
345	0,80	0,83	4,68x10 ¹⁵	0,23	3,81x10 ⁴	0,02	4,35	1,04	0,86
360	0,70	0,73	4,68x10 ¹⁵	0,24	3,57x10 ⁴	0,02	4,08	0,95	0,90
375	0,80	0,83	4,68x10 ¹⁵	0,26	3,81x10 ⁴	0,02	4,35	1,06	0,94



Şekil 4.57. 200 kHz frekans değerinde Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750 devir) Schottky engel diyotun (300- 375) K aralığında Φ_B ve N_D 'ye karşı çizilen iki eksenli grafiği

Çizelge 4.7. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun 200 kHz'de (300-375) K sıcaklığında çizilen C⁻²-V grafiğinden elde edilen parametreler

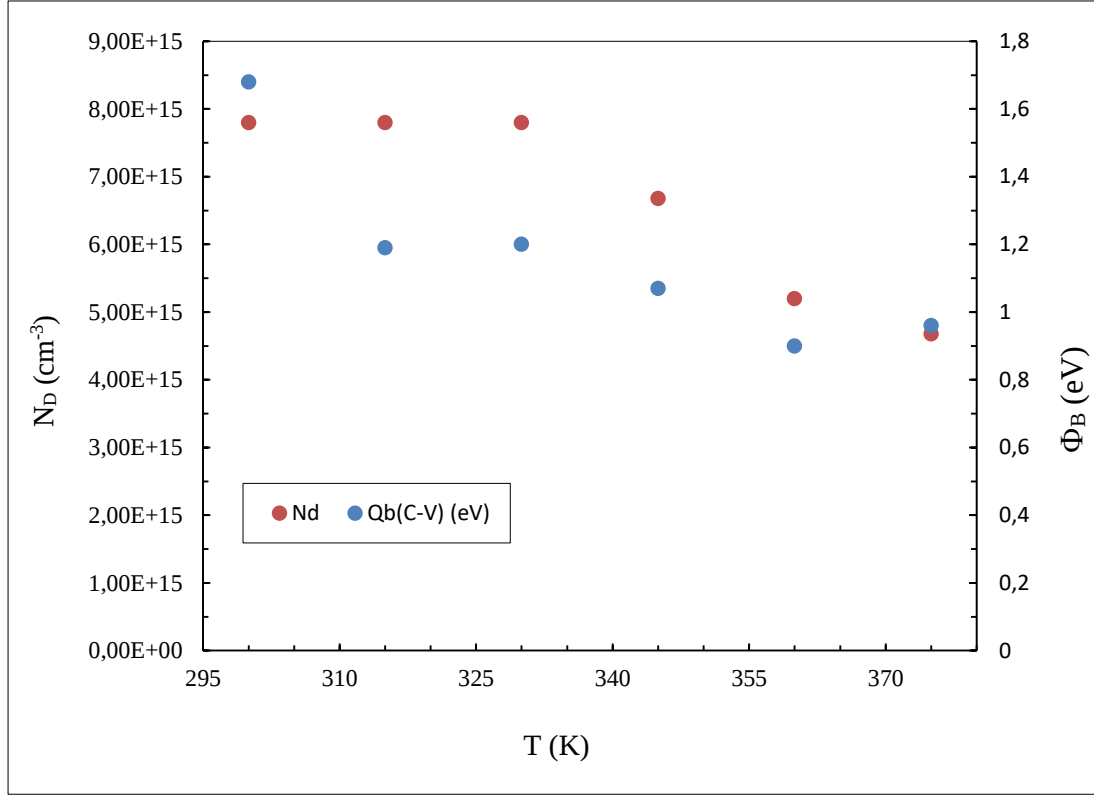
T(K)	V ₀ (V)	V _D (eV)	N _d (cm ⁻³)	E _i (eV)	E _m (10 ⁴ V. cm ⁻¹)	$\Delta\Phi_b$ (eV)	W _d (10 ⁻⁵ cm)	Φ_b (C-V) (eV)	Φ_b (I-V) (eV)
300	1,11	1,13	5,21x10 ¹⁵	0,19	4,71	0,02	4,83	1,36	0,83
315	1,11	1,13	5,21x10 ¹⁵	0,20	4,71	0,02	4,83	1,37	0,83
330	1,00	1,02	5,21x10 ¹⁷	0,08	44,8	0,02	0,45	1,14	0,87
345	0,90	0,92	4,69x10 ¹⁵	0,23	4,04	0,02	4,60	1,19	0,92
360	0,90	0,93	4,69x10 ¹⁵	0,24	4,04	0,02	4,60	1,21	0,99
375	0,90	0,93	4,69x10 ¹⁵	0,25	4,04	0,02	4,60	1,22	1,01



Şekil 4.58. 200 kHz frekans değerinde Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun (300- 375) K aralığında Φ_B ve N_D 'ye karşı çizilen iki eksenli grafiği

Çizelge 4.8. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun 200 kHz'de (300-375) K sıcaklık aralığında çizilen C⁻²-V grafiğinden elde edilen parametreler

T(K)	V ₀ (V)	V _D (eV)	N _d (cm ⁻³)	E _f (eV)	E _m (V.cm ⁻¹)	$\Delta\Phi_b$ (eV)	W _d (10 ⁻⁵ cm)	Φ_b (C-V) (eV)	Φ_b (I-V) (eV)
300	1,50	1,53	7,80x10 ¹⁵	0,18	4,68x10 ⁴	0,03	4,57	1,68	0,94
315	1,00	1,03	7,80x10 ¹⁵	0,19	5,48x10 ⁴	0,02	3,75	1,19	0,93
330	1,00	1,03	7,80x10 ¹⁵	0,20	5,48x10 ⁴	0,02	3,75	1,20	1,01
345	0,85	0,88	6,68x10 ¹⁵	0,22	4,69x10 ⁴	0,02	3,75	1,07	1,00
360	0,66	0,69	5,20x10 ¹⁵	0,24	3,66x10 ⁴	0,02	3,76	0,90	1,04
375	0,70	0,73	4,68x10 ¹⁵	0,25	3,57x10 ⁴	0,02	4,08	0,96	1,05



Şekil 4.59. 200 kHz frekans değerinde Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) Schottky engel diyotun (300-375) K aralığında Φ_B ve N_D 'ye karşı çizilen iki eksenli grafiği

Hesaplanan C-V sonuçlarıyla, hesaplanan I-V ve literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu olduğu bulundu. Φ_B (eV) değerleri sıcaklık artışıyla azalmaktadır.

Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 incelendiğinde, C-V tekniğinden hesaplanan engel yüksekliğinin, I-V tekniğinden hesaplanandan genel olarak büyük olduğu açıkça görülmektedir. Bu farklılığın sebebi arayüzey tabakası, engel yüksekliğinin heterojenliği ve yarıiletkendeki tuzaklar olmasına atfedilebilir [57,74]. I-V tekniği ve C-V tekniği ile hesaplanan engel yüksekliklerinin birbirine çok yakın olduğu, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4. 8 çizelgelerinden görülebilir. Bu da iki tekniğin ne kadar uyumlu olduğunu göstermektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, hazırlanan dört farklı diyotun (300-375) K sıcaklıkları arasında akım-gerilim ve kapasitans-gerilim ölçümleri alındı. Bu kontakların idealite faktörleri (n), engel yükseklikleri (Φ_{b0}), doyum akımları (I_0) gibi ana parametreleri bulundu. Kontakların seri dirençleri (R_s) iki farklı yolla bulundu. Bu kontaklarla ilgili Richardson doğruları çizilerek engel yüksekliği ve Richardson sabiti (A^*) bulunarak, bu bulgular literatür değerleriyle karşılaştırıldı. Engellerin heterojenliği araştırılarak, Gaussian dağılımları incelendi. Bu dağılımla ilgili ana parametreler bulundu ve bulgular önceki çalışmalarla mukayese edildi. Kapasitans-gerilim ölçümlerden alınan verilerle kontakların donör konsantrasyonu (N_d), Fermi enerjisi (E_F), tüketim bant genişliği (W_D), difüzyon gerilimi (V_d) ve engel yüksekliği (Φ_{C-V}) gibi ana parametreler bulundu. Bu parametreler, akım-gerilim karakteristiklerinden bulunan parametrelerle mukayese edildi.

Üretimi yapılan Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir), kontağın 300 K sıcaklığında idealite faktörü 4,66; engel yüksekliği; 0,83 eV ve doyma akımı $1,96 \cdot 10^{-9}$ A olarak bulundu. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750devir) kontağının aynı sıcaklıkta bulunan idealite faktörü 3,93; engel yüksekliği 0,77 eV ve doyma akımı $2,06 \cdot 10^{-8}$ A olarak bulundu. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) kontağı için 300K sıcaklığındaki idealite faktörü 3,02; engel yüksekliği 0,96 eV ve doyma akımı $1,58 \cdot 10^{-11}$ A olarak elde edildi. Au/P3HT:PCBM (2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) kontağın 300K sıcaklığındaki idealite faktörü 3,76; engel yüksekliği 0,94 eV ve doyma akımı $3,57 \cdot 10^{-11}$ A olarak elde edildi. Farklı sıcaklarda bulunan bu değişkenlerin sıcaklıkla değişim gösterdiği görüldü. Sıcaklık azalımıyla; idealite faktörü artarken, engel yüksekliği azalmaktadır. Bu durum, parametrelerin sıcaklığa bağlılığının göstergesidir. Buna neden; engelin heterojenliği, arayüzey durumlarına, arayüzeydeki gelişi güzel yük dağılımlarına ve parametrelerin sıcaklık bağımlılığına atfedildi. Başka bilim insanları benzer neticeleri elde etmişlerdir [66,71]. Üretilen kontaklarda polimer tabakanın elektriksel parametrelere etkileri açıkça görülmektedir. Polimer tabakanın varlığı, akım -iletim mekanizması üzerinde etkisini göstermiş ve arayüzeyin, iletim mekanizmasındaki önemini gözler önüne sermiştir. Bir grup bilim insanına göre; kontakların idealitelerinin 1'den yüksek çıkmasının nedeni, TE'den başka tüketim bölgesindeki elektron ve hol yeniden birleşmesi veya artan gerilimle artan difüzyon akımına atfedilebilir [77].

Her dört kontakın akım-gerilim eğrileri göz önüne alındığında ileri besleme bölgelerinde artan gerilime göre seri dirence bağlı bükülmeler görüldü. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir. Bu kontakların oda sıcaklığında Chueng - Chueng yöntemiyle ve Norde denklemleriyle bulunan dirençleri irdelendiğinde, Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (1500devir), kontakı için sırasıyla; 224,08 Ω , 185,84 Ω ve 198,44 Ω değerleri bulundu. Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag (750devir) kontakı için oda sıcaklığında sırayla; 492,06 Ω , 203,74 Ω ve 393,87 Ω neticeleri bulundu. Au/P3HT:PCBM:F₄TCNQ (1:1:%2)/6H-SiC/Ag (1500 devir) kontakı oda sıcaklığında sırasıyla; 73,72 Ω , 51,53 Ω ve 63,90 Ω olarak bulundu. Au/P3HT:PCBM(2:1)/6H-SiC/Ag (1500 devir) kontakı oda sıcaklığında sırayla; 80,06 Ω , 69,82 Ω ve 75,98 Ω olarak bulundu. Farklı yöntemlerle elde edilen dirençlerin kontaklar için uyum içinde olduğu görüldü. Bulunan direnç değerleri gözönüne alındığında direncin azalan sıcaklıkla arttığı görüldü. Buna neden olarak sıcaklık azalmasıyla idaelitenin artması ve serbest taşıyıcı konsantrasyonunun düşmesi gösterilebilir [76]. Bulunan direnç değerleri analiz edildiğinde polimer tabakasının etkisi görülmektedir.

Yarıiletkenlerde önemli parametrelerin bulunması amacıyla Richardson eğrileri çizilmiş ve eğrilerden engel yüksekliği ve Richardson sabitleri bulunmuştur. Dahası bulunan Richardson sabitlerinin, n-tipi 6H-SiC yarıiletkeni için bilinen $146 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ değerinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Diğer araştırmacılar da benzer neticeler bulmuşlardır. Richardson eğrilerindeki sapmanın, engel yüksekliklerinin heterojen olmasına ya da farklı engel yüksekliği bölgelerinin olduğu arayüzeydeki gerilim değişimlerine atfedilebilir [87, 88]. Bilim insanlarına göre bu durum engelin uzaysal heterojenliğine bağlanmaktadır [68]. Bu farklılığın sebebini açıklamak amacıyla, her dört nümuneden hesaplanan verilerle engelin heterojenlik incelemesi yapılmıştır. Engellerin etkin engel yükseklikleri bulunmuştur. Bu amaçla Gaussien dağılım ana parametreleri bulmak amacıyla gerekli eğriler çizildi ve bu teoriden ortalama engel yükseklikleri (Φ_{b0}) ile standart sapma (σ_0) miktarları bulunmuştur.

Her dört nümune için hesaplanan standart sapma değerleriyle ortalama engel yüksekliklerinin büyüklükleri karşılaştırıldığında, standart sapma değeri ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Bu durum engel dağılımının heterojenliğinin göstergesidir [14,56]. Bu sonuçlar akım iletim mekanizmasında termoiyonik emisyon modelinden sapmaların da sebebini açıklamaktadır [35].

Bulunan standart sapma sonuçlarına bağlı Richardson eğrileri tekrar çizilerek ortalama engel yüksekliği ve Richardson sabitleri tekrar bulundu. Aynı bölgede Au/P3HT:PCBM (1:1)/6H-SiC/Ag(750devir) kontağın ortalama engel yüksekliği ve Richardson sabiti sırayla 1,53 eV ve $84,39 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olarak hesaplandı. Bu netice Richardson sabiti $146 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ile uyum halindedir [55]. Düzeltilmiş Richardson eğrilerinden bulunan ortalama engel yüksekliğiyle kontakların hesap edilen etkin engel yükseklikleri (Φ_e) uyumludur. Bu neticelerle bulunan aktivasyon enerjileri literatürle uyum halindedir [63]. Neticede düzeltilmiş Richardson eğrilerinden bulunan değerler engelin heterojen olduğunun kanıtlamaktadır.

Arayüzey hal konsantrasyonu artan sıcaklık ile düştüğü görülmüştür. Buradaki değişim metal-yarıiletken arasındaki engelin heterojen olmasıyla ve idealitenin sıcaklığa bağımlılığıyla izah edilmiştir [14,56]. Her sıcaklıkta bulunan arayüzey durum yoğunluklarının ve idealite faktörü değerlerinin yükselen sıcaklıkla düşmesi sıcaklığa bağlı I-V karakteristiklerinin arayüzey durumlarından büyük oranda etkilendiğinin göstergesidir.

Polimerler malzemelerin özelliklerini iyileştirdiği için birçok alanda kullanılmaktadır. Bu konudaki araştırmalar devam etmektedir.

Kapasitans-gerilim ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak yapıldı. Katkı konsantrasyonu (N_d), Fermi enerjisi (E_F), tüketim bant genişliği (W_D), difüzyon gerilimi (V_d) ve engel yüksekliği (Φ_{C-V}) bulundu. Sonuçlar, Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8’de toplu bir şekilde verildi. C-V tekniğinden bulunan engel yüksekliğinin, I-V tekniğinden bulunandan yüksek olduğu görülmektedir. Bu farkın nedeni; arayüzey tabakası, yarıiletkendeki tuzaklar ve engel yüksekliğinin heterojen olmasına atfedildi [46,48]. Donor konsantrasyonu yükselen sıcaklıkla yükselirken, engel yüksekliğinin yükselen sıcaklıkla düştüğü görülmüştür. I-V metoduyla bulunan engel yüksekliği ise sıcaklık yükselişiyle beraber yükselmektedir. Buna sebep; C-V metodunun engel azalmalarına hassas olmadığından bütün alandaki ortalama engel yüksekliğini içerirken, I-V metoduysa engel azalmalarına hassas olmasına atfedilebilir. Sonuçta C-V metoduyla bulunan engel yüksekliği sonucuyla Gaussian dağılım sonucunda bulunan ortalama engel yüksekliklerinin uyumlu olduğu görüldü. Bu halinde kapasitans-gerilim metodunun engel azalmalarını kapsamadığı, engeli ortalama şeklinde ölçtüğü görüldü.

Bu tezde, n-tipi 6H-SiC tabanlı ve polimer arayüzeyli Schottky kontaklar üretildi ve kontakların belirli bir sıcaklık aralığındaki temel parametreleri belirlendi. Bu inceleme ileri seviyelere götürülebileceği gibi optiksel özellikler, güneş pilleri ve sensör alanlarında kullanımı araştırılabilir ve geliştirilebilir. Schottky kontaklar arayüz durumlarının dağılımı ile ilgili parametrelerin hesaplanması ve akım iletim mekanizmalarının belirlenmesi çalışmaları farklı arayüz yapıları ve farklı yarıiletken malzemeler için halen güncelliğini korumaktadır.

KAYNAKLAR

1. Aydoğan, Ş. (2011). *Katıhal fiziği*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 283.
2. Sze, S. M. (1981). *Metal – semicontuctor contacts, physic of semicontuctors devices*. New York: Wiley, 225.
3. Kıymaz, A. (2010). *N-GaP yariletkeni ile hazırlanan metal yariletken kontakların diyot ve optik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-12.
4. Rhoderick, E. H. and Williams R. H. (1988). *Metal–semiconductor contacts*. Oxford: Oxford Press, 21-45.
5. Kosyachenko, L. A., Sklyarchuk M. and Sklyarchuk, F. (1998). Electrical and photoelectric properties of Au-SiC Schottky barrier diodes. *Solid-State Electronics*, 42(1), 145-151
6. Roccaforte, F., La Via, F., Raineri, V., Pierobon, R. and Zanoni, E. (2003). Richardson’s constant in inhomogeneous silicon carbide Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 93(11), 9137-9144.
7. Ergen, D. E. (2009). *Au/n-GaAs metal yariletken kontakların optik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-17.
8. Emtsev, K. V., Bostwick, A., Horn, K., Jobst, J., Kellogg, G. L., Ley, L. and Rotenberg, E. (2009). Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide. *Nature Materials*, 8(3), 203.
9. Berger, C., Song, Z., Li, X., Wu, X., Brown, N., Naud, C., Mayou, T., Li, J., Hass, A. N., Marchenkov, E. H. and Conrad, E. H. (2006). Electronic confinement and coherence in patterned epitaxial graphene. *Science*, 312(5777), 1191-1196.
10. Benmaza, H., Akkal, B., Abid, H., Bluet, J. M., Anani, M. and Bensaad, Z. (2008). Barrier height inhomogeneities in a Ni/SiC-6H Schottky n-type diode. *Microelectronics Journal*, 39(1), 80-84.
11. Sefaoğlu, A., Duman, S., Doğan, S., Gürbulak, B., Tüzemen, S. and Türüt, A. (2008). The effects of the temperature and annealing on current–voltage characteristics of Ni/n-type 6H–SiC Schottky diode. *Microelectronic Engineering*, 85(3), 631-635.
12. Gülen, Y., Alanyalıoğlu, M., Ejderha, K., Nuhoğlu, Ç. and Turut, A. (2011). Electrical and optical characteristics of Au/PbS/n-6H–SiC structures prepared by electrodeposition of PbS thin film on n-type 6H–SiC substrate. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(6), 3155-3159.
13. Asubay, S., Genisel, M. F. and Ocak, Y. S. (2014). Electrical parameters of a DC sputtered Mo/n-type 6H-SiC Schottky barrier diode. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28, 94-97.

14. 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.
15. Güllü, Ö., Kilicoglu, T. and Türüt, A. (2010). Electronic properties of the metal/organic interlayer/inorganic semiconductor sandwich device. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71(3), 351-356.
16. Saçak, M. (2018). *Polimer kimyası*. Ankara: Gazi Kitapevi, 70-72, 437-441.
17. Von Hauff, E., Dyakonov, V. and Parisi, J. (2005). Study of field effect mobility in PCBM films and P3HT: PCBM blends. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87(1-4), 149-156.
18. Paternó, G., Cacialli, F. and García-Sakai, V. (2013). Structural and dynamical characterization of P3HT/PCBM blends. *Chemical Physics*, 427, 142-146.
19. Yağlıoğlu, E. and Özmen, Ö. T. (2014). F4-TCNQ concentration dependence of the current—voltage characteristics in the Au/P3HT: PCBM: F4-TCNQ/n-Si (MPS) Schottky barrier diode. *Chinese Physics B*, 23(11), 117306.
20. Yüksel, Ö. F., Tuğluoğlu, N., Gülveren, B., Şafak, H. and Kuş, M. (2013). Electrical properties of Au/perylene-monoimide/p-Si Schottky diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 577, 30-36.
21. Hendi, A. A. and Al Orainy, R. H. (2014). Rectifying properties of TIPS-pentacene: rhodamine blend organic semiconductor-on-p-silicon diodes. *Synthetic Metals*, 193, 31-34.
22. Dimitrakopoulos, C. D. and Malenfant, P. R. (2002). Organic thin film transistors for large area electronics. *Advanced Materials*, 14(2), 99-117.
23. Wu, Z., Tao, C. A., Lin, C., Shen, D. and Li, G. (2008). Label-Free Colorimetric Detection of Trace Atrazine in Aqueous Solution by Using Molecularly Imprinted Photonic Polymers. *Chemistry—A European Journal*, 14(36), 11358-11368.
24. Gao, J., Roehling, J. D., Li, Y., Guo, H., Moulé, A. J. and Grey, J. K. (2013). The effect of 2, 3, 5, 6-tetrafluoro-7, 7, 8, 8-tetracyanoquinodimethane charge transfer dopants on the conformation and aggregation of poly (3-hexylthiophene). *Journal of Materials Chemistry C*, 1(36), 5638-5646.
25. Loiudice, A., Rizzo, A., Grancini, G., Biasiucci, M., Belviso, M. R., Corricelli, M. and Petrozza, A. (2013). Fabrication of flexible all-inorganic nanocrystal solar cells by room-temperature processing. *Energy & Environmental Science*, 6(5), 1565-1572.
26. Ingram, I. D., Tate, D. J., Parry, A. V., Sebastian Sprick, R. and Turner, M. L. (2014). A simple method for controllable solution doping of complete polymer field-effect transistors. *Applied Physics Letters*, 104(15), 58_1.
27. De Bettignies, R., Leroy, J., Firon, M. and Sentein, C. (2006). Accelerated lifetime measurements of P3HT: PCBM solar cells. *Synthetic Metals*, 156(7-8), 510-513.

28. Reyes-Reyes, M., Kim, K. and Carroll, D. L. (2005). High-efficiency photovoltaic devices based on annealed poly (3-hexylthiophene) and 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl-(6, 6) C 61 blends. *Applied Physics Letters*, 87(8), 083506.
29. İnternet: Lepak, S., Boncel, S., Jóźwik, I., Jakubowska, M., Koziol, K. and Łękawa-Raus, A. (2017, August). CNT fibers p-doped with F4TCNQ (2, 3, 5, 6-Tetrafluoro-7, 7, 8, 8-tetracyanoquinodimethane). In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017*, 10445, 104454. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10445/104454S/CNT-fibers-p-doped-with-F4TCNQ-2356-Tetrafluoro-7788-tetracyanoquinodimethane/10.1117/12.2280093.short?SSO=1>, Son Erişim Tarihi: 02.11.2019.
30. Taşcıoğlu, İ., Özmen, Ö. T., Şağban, H. M., Yağlıoğlu, E. and Altındal, Ş. (2017). Frequency dependent electrical and dielectric properties of Au/P3HT: PCBM: F4-TCNQ/n-Si Schottky Barrier Diode. *Journal of Electronic Materials*, 46(4), 2379-2386.
31. Rhoderic, E. H. and Williams, R. H. (1988). *Current-transport mechanisms, metal-semiconductors contacts*. Oxford: Clarendon, 55.
32. Mott, N. F. (1938) Note on the contact between a metal and an insulator or Semiconductor. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34, 568-572.
33. Kar, S., Panchal, K. M., Bhattacharya, S. and Varma, S. (1982). On the mechanism of carrier transport in metal-thin-oxide semiconductor diodes on Polycrystalline silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(12), 1839-1845.
34. Sharma, B. L. (1984). *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications*. New York: Plenum Press, 1-51.
35. Cova, P. and Singh, A. (1990). Temperature dependence of IV and CV characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes. *Solid-State Electronics*, 33(1), 11-19.
36. Beethe, H. A (1942). Theory of the boundary layer of crystall rectifiers. *Radiation Laboratory Report*, 43, 12.
37. Crowell, C. R. and Sze, S. M. (1966). Current transport in metal-semiconductor barriers. *Solid-State Electronics*, 9(11-12), 1035-1048.
38. Sze, S. M. and Kwokü K. (2007). Ng, "Metal-semiconductor contacts", *Physics of semiconductor devices* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, 245-300.
39. Aven, M. and Mead, C. A. (1965). Electrical transport and contact properties of low resistivity n-type zinc sulfide crystals. *Applied Physics Letters*, 7(1), 8-10.
40. Singh, A., Reinhardt, K. C. and Anderson, W. A. (1990). Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-insulator-semiconductor junctions. *Journal of Applied Physics*, 68(7), 3475-3483.
41. Padovani, F. A. and Stratton, R. (1966). Field and thermionic-field emission in Schottky barriers. *Solid-State Electronics*, 9(7), 695-707.

42. Schockley, W. and Read, W. T. (1950). Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Physical Review*, 87, 835.
43. Jones, F. E., Wood, B. P., Myers, J. A., Daniels-Hafer, C. and Lonergan, M. C. (1999). Current transport and the role of barrier inhomogeneities at the high barrier n-InP| poly (pyrrole) interface. *Journal of Applied Physics*, 86(11), 6431-6441.
44. Sharma, B. L. (1984). *Physics of schottky barrier junctions, metal-semiconductor contacts schottky barrier junctions and their applications*. New York and London: Plenum Press, 1-56.
45. Altındal, Ş., Dökme, İ., Bülbül, M. M., Yalçın, N. and Serin, T. (2006). The role of the interface insulator layer and interface states on the current-transport mechanism of Schottky diodes in wide temperature range. *Microelectronic Engineering*, 83(3), 499-505.
46. Bengi, S. (2013). *Al/HfO₂/p-Si (MIS) yapının elektriksel ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve radyasyona bağlı incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 63-70.
47. Card, H. C. and Rhoderick, E. H. (1971). Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589-1601.
48. Çuha, B. (2010). *Au/n-Si(111) Schottky kontakların elektriksel karakteristiklerinin geniş bir sıcaklık aralığında incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 69-73.
49. Bhuiyon, A. S., Martinez, A. and Esteve, D. (1988). A new richarson plot for non-ideal Schottky diodes. *Thin Solid Films*, 1(61), 93-100.
50. Ghandhi, S. K. (1983). *VLSI fabrication principles*. New York: John Wiley & Sons, 401-405.
51. Tung, R. T. (1992). Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509.
52. Crowell, C. R (1977). The physical signifiance of the T₀ anomalies in schottky barriers. *Solid State Electronics*, 20(3), 171-175.
53. Wu, X., Yang, E. S. and Evans, H. L. (1990). Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces. *Journal of Applied Physics*, 68(6), 2845-2848.
54. Güzel, T. (2015). *6H-SiC tabanlı Schottky diyotların hazırlanması ve geniş sıcaklık aralığında elektriksel parametrelerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 66-74.
55. Levine, T. D. (1971). Schottky barrier anomalies and interface states. *Journal of Applied Physics*, 42(10), 3991-3999.
56. Werner, J. H. and Güttler, H. H. (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 69(3), 1522-1533.

57. Tung, R. T. (1991). Electron-transport of inhomogeneous Schottky barriers. *Applied Physics Letters*, 58(24), 2821-2823.
58. Yıldız, D. E., Altındal, Ş. and Kanbur, H. (2008). Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes. *Journal of Applied Physics*, 103(12), 124502.
59. Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053.
60. 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.
61. Farag, A. A. M. and Soliman, H. S. and Atta, A. A. (2012). Analysis of dark and photovoltaic characteristics of Au/Pyronine G (Y)/p-Si/Al heterojunction. *Synthetic Metals*, 161(23-24), 2759-2764.
62. Cimilli, F. E., Efeoğlu, H., Sağlam, M. and Türüt, A. (2009). Temperature-dependent current-voltage and capacitance-voltage characteristics of the Ag/n-InP/In Schottky diodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 20(2), 105-112.
63. Gülnahar, M. (2014). Temperature dependence of current-and capacitance-voltage characteristics of an Au/4H-SiC Schottky diode. *Superlattices and Microstructures*, 76, 394-412.
64. Kaushal, P., Chand, S. and Osvald, J. (2013). Current-voltage characteristics of Schottky diode simulated using semiconductor device equations. *International Journal of Electronics*, 100(5), 686-698.
65. Duman, S., Ejderha, K., Yiğit, Ö. and Türüt, A. (2012). Determination of contact parameters of Ni/n-GaP Schottky contacts. *Microelectronics Reliability*, 52(6), 1005-1011.
66. Göksu, T., Yıldırım, N., Korkut, H., Özdemir, A. F., Turut, A. and Kökçe, A. (2010). Barrier height temperature coefficient in ideal Ti/n-GaAs Schottky contacts. *Microelectronic Engineering*, 87(9), 1781-1784.
67. Korkut, H., Yıldırım, N., Turut, A. and Dogan, H. (2009). Analysis of current-voltage-temperature characteristics and T₀ anomaly in Cr/n-GaAs Schottky diodes fabricated by magnetron sputtering technique. *Materials Science and Engineering: B*, 157(1-3), 48-52.
68. Özdemir, S. and Altındal, Ş. (1994). Temperature dependent electrical Characteristics of Al-SiO_x-p-Si solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 32, 115-127.
69. Kumar, A. A., Rao, L. D., Reddy, V. R. and Choi, C. J. (2013). Analysis of electrical characteristics of Er/p-InP Schottky diode at high temperature range. *Current Applied Physics*, 13(6), 975-980.
70. Chen, J., Wang, Q., Lv, J., Tang, H. and Li, X. (2015). Current-voltage-temperature and capacitance-voltage-temperature characteristics of TiW alloy/p-InP Schottky barrier diode. *Journal of Alloys and Compounds*, 649, 1220-1225.

71. Aydin, M. E., Akkilic, K. and Kiliçoğlu, T. (2004). Relationship between barrier heights and ideality factors of H-terminated Pb/p-Si contacts with and without the interfacial oxide layer. *Applied Surface Science*, 225(1-4), 318-323.
72. Güttler, H. H. and Werner, J. H. (1990). Influence of barrier inhomogeneities on noise at Schottky contacts. *Applied Physics Letters*, 56(12), 1113-1115.
73. Boussouar, L., Ouennoughi, Z., Rouag, N., Sellai, A., Weiss, R. and Ryssel, H. (2011). Investigation of barrier inhomogeneities in Mo/4H-SiC Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 88(6), 969-975.
74. Dobročka, E. and Osvald, J. (1994). Influence of barrier height distribution on the parameters of schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 65, 575.
75. Yasin, M., Tauqeer, T., Karimov, K. S., San, S. E., Kösemen, A., Yerli, Y. and Tunc, A. V. (2014). P3HT: PCBM blend based photo organic field effect transistor. *Microelectronic Engineering*, 130, 13-17.
76. Altındal, Ş., Tataroğlu, A. and Dökme, I. (2005). Density of interface states, excess capacitance and series resistance in the metal-insulator-semiconductor (MIS) solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 85(3), 345-358.
77. Szatkowski, J. and Sierański, K. (1988). Interface effects on Mg-Zn₃P₂ Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 31(2), 257-260.
78. Sah, C. T., Noyce, R. N. and Shockley, W. (1957). Carrier generation and recombination in pn junctions and pn junction characteristics. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 45(9), 1228-1243.
79. Yu, H., Li, Y., Dong, Y. and Huang, X. (2016). Fabrication and optimization of polymer solar cells based on P3HT: PC70BM system. *International Journal of Photoenergy*, 2016, 8.
80. Özmen, Ö. T. (2014). Effects of PCBM concentration on the electrical properties of the Au/P3HT: PCBM/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes. *Microelectronics Reliability*, 54(12), 2766-2774.
81. Kırsoy, A., Ahmetoglu, M., Asimov, A. and Kucur, B. (2015). The electrical properties of Au/P3HT/n-GaAs Schottky barrier diode. *Acta Physica Polonica A*, 128(2), 170-173.
82. Gunduz, B., Yahia, I. S. and Yakuphanoglu, F. (2012). Electrical and photoconductivity properties of p-Si/P3HT/Al and p-Si/P3HT: MEH-PPV/Al organic devices: Comparison study. *Microelectronic Engineering*, 98, 41-57.
83. Khanna, S. and Noor, A. (2010). Electrical characterization of Chromium/4H-SiC Schottky Barrier Diodes. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(3), 220-226.
84. Itoh, A., Kimoto, T. and Matsunami, H. (1995). High performance of high-voltage 4H-SiC Schottky barrier diodes. *IEEE Electron Device Letters*, 16(6), 280-282.

85. Waldrop, J. R., Grant, R. W., Wang, Y. C. and Davis, R. F. (1992). Metal Schottky barrier contacts to alpha 6H-SiC. *Journal of Applied Physics*, 72(10), 4757-4760.
86. Shalish, I. and Shapira, Y. (2000). Thermal stability of Re Schottky contacts to 6H-SiC. *IEEE Electron Device Letters*, 21(12), 581-583.
87. Chand, S. and Kumar, J. (1997). Electron transport and barrier inhomogeneities in palladium silicide Schottky diodes. *Applied Physics A*, 65(4-5), 497-503.
88. Kang, W. P., Davidson, J. L., Gurbuz, Y. and Kerns, D. V. (1995). Temperature dependence and effect of series resistance on the electrical characteristics of a polycrystalline diamond metal-insulator-semiconductor diode. *Journal of Applied Physics*, 78(2), 1101-1107.
89. Biber, M. (2003). Low-temperature current-voltage characteristics of MIS Cu/n-GaAs and inhomogeneous Cu/n-GaAs Schottky diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 325, 138-148.
90. Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R. L., Laflère, W. H. and Cardon, F. (1986). On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage- temperature and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid-State Electron*, 29, 633-638.
91. Defives, D., Noblanc, O., Dua, C., Brylinski, C., Barthula, M. and Meyer, F. (1999). Electrical characterization of inhomogeneous Ti/4H-SiC Schottky contacts. *Materials Science and Engineering: B*, 61, 395-401.
92. Yue-Hu, W., Yi-Men, Z., Yu-Ming, Z., Qing-Wen, S. and Ren-Xu, J. (2011). Al/Ti/4H-SiC Schottky barrier diodes with inhomogeneous barrier heights. *Chinese Physics B*, 20(8), 087305.
93. Chand, S. and Kumar, J. (1996). Evidence for the double distribution of barrier heights in Schottky diodes from I-V-T measurements. *Semiconductor Science and Technology*, 11(8), 1203.
94. Werner, J. H. and Güttler, H. H. (1991). Transport properties of inhomogeneous Schottky contacts. *Physica Scripta*, 1991(39), 258.
95. Lakshmi, B. P., Reddy, M. S. P., Kumar, A. A. and Reddy, V. R. (2012). Electrical transport properties of Au/SiO₂/n-GaN MIS structure in a wide temperature range. *Current Applied Physics*, 12(3), 765-772.
96. Pakma, O., Serin, N., Serin, T. and Altındal, Ş. (2008). The influence of series resistance and interface states on intersecting behavior of I-V characteristics of Al/TiO₂/p-Si (MIS) structures at low temperatures. *Semiconductor Science and Technology*, 23(10), 105014.
97. Fonash, S. J. (1975). The role of the interfacial layer in metal - semiconductor solar cells. *Journal of Applied Physics*, 46, 1286-1289.

98. Gümüş, A., Türüt, A. and Yalcin, N. (2002). Temperature dependent barrier characteristics of CrNiCo alloy Schottky contacts on n-type molecular-beam epitaxy GaAs. *Journal of Applied Physics*, 91(1), 245-250.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ALTAN, Hayati
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 04.02.1966, Balıkesir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (542) 625 29 72
 e-mail : hayataltansene@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Fizik Bölümü	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Fizik Bölümü	1997
Lisans	Uludağ Üniversitesi/Fizik Öğretmenliği	1987
Lise	İvrindi Lisesi	1983

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1989-Halen	MEB	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Altan, H., Özer, M. (2017, 22 Aralık). *Polimer arayüzey tabakalı SiC schottky bariyer diyotunun akım-iletim mekanizmalarının incelenmesi*. 23. Yoğun Madde Fiziği 22 Aralık 2017 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara/TÜRKİYE (Poster bildirisi).
- Altan, H., Özer, M. (2018, 21-23). *September investigation of electronic Parameters of n-type-6H-SiC/Au schottky diode with polimer interface*. WITAM-2018 International Congress On The World Of Technology And Advanced Materials 21-23 September 2018, Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir/TÜRKİYE (Poster bildirisi).

3. Altan, H., Özer, M. (2018, 21-23). *September electrical measurements of Au/P 3HT:PCBM(1:1)/n-6H-SiC/Ag schottky diode depends on temperature schottky diode depends on temperature*. WITAM-2018 International Congress On The World Of Technology And Advanced Materials 21-23 September 2018, Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir/TÜRKİYE (Poster bildirir).
4. Altan, H., Özer, M. (2018, 26-28 October). *Electrcal properties of metal semiconductor structure with interfacial layer*. İCENTE'18 International Conference on Engineering Technologies Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Konya/TÜRKİYE (Poster Bildiri)
5. Altan, H., Özer, M. (2018, 21 Aralık). *Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda akım iletimini etkileyen etkenler*. 24. Yoğun Madde Fiziği 21 Aralık 2018 Bilkent Üniversitesi, Ankara/TÜRKİYE (Poster bildirir).

Hobiler

Spor, Okumak.



GAZİ GELECEKTİR..