



**Au/C₂₀H₁₂/n -Si SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN (SBD_s) ELEKTRİKSEL
KARAKTERİSTİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ**

Kani MORAKİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2015

Kani MORAKİ tarafından hazırlanan “Au/C₂₀H₁₂/n -Si SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN (SBD_s) ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Prof. Dr. Ş. Bora ALKAN

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 09.02.2015

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

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
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.

Kani MORAKİ

09.02.2015

Au/C₂₀H₁₂/n -Si SCHOTTKY ENGEL DİYOTLARIN (SBDs) ELEKTRİKSEL
KARAKTERİSTİKLERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kani MORAKİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2015

ÖZET

Bu çalışmada, Au/C₂₀H₁₂/n-Si Schottky engel diyotları (SBDs) hazırlandı ve onların ters doyum gerilimi (I_0), idealite faktörü (n), sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{B0}), seri ve kısa-devre dirençleri (R_s , R_{sh}) gibi temel elektriksel parametreleri, doğru ve ters öngerilim akım-voltaj-sıcaklık (I-V-T) karakteristikleri kullanılarak belirlendi. I_0 , n , Φ_{B0} , R_s ve R_{sh} değerleri 160 K için sırasıyla 1.974×10^{-7} A, 6.434, 0.351 eV, 30.22 Ω ve 18.96 k Ω at ve 380 K için ise 1.061×10^{-6} A, 2.34, 0.836 eV, 5.82 Ω ve 24.52 k Ω bulundu. Deneysel sonuçlar n değerinin artan sıcaklıkla azalırken Φ_{B0} değerinin ise artmakta olduğunu gösterdi. Φ_{B0} değerinin sıcaklıkla değişimi, yarıiletken yasak enerji aralığının negatif sıcaklık değişim katsayına aykırıdır. Bu yüzden, Gaussian dağılıma bir delil teşkil etmek amacıyla $\Phi_{B0} - n$, $\Phi_{B0} - q/2kT$ ve $(n^{-1} - 1) - q/2kT$ grafikleri çizildi ve bunların bir doğru verdiği gözlemlendi. Ortalama engel yüksekliği değeri ($\bar{\Phi}_{bo}$), $n=1$ için, $\Phi_{B0} - n$ grafiğinin kesim noktasından 0.983 eV bulundu. Aynı zamanda, $\Phi_{B0} - q/2kT$ grafiğinin eğim ve kesişme noktasından; $\bar{\Phi}_{bo}$ ve standart sapması (σ_s) değerleri sırasıyla 1.123 eV ve 0.151 V bulundu. Böylece modifiye edilmiş Richardson grafiği elde edildi ve bu grafiğin eğim ve kesişme noktasından $\bar{\Phi}_{bo}$ ve Richardson sabiti (A^*) değerleri sırasıyla 1.116 eV ve 113.44 A.cm⁻²K⁻² olarak elde edildi. Elde edilen deneysel A^* (=113.44 A.cm⁻²K⁻²) n-Si için bilinen 112 A.cm⁻²K⁻² değerine çok yakın olduğu görülmektedir. Buna ilaveten, arayüzey durumlarının (N_{ss}) enerjiye bağlı dağılım grafikleri 120, 200, 300 ve 400 K sıcaklıkları için; voltaja bağlı etkin engel yüksekliği (Φ_e) ve idealite faktörü $n(V)$ değerleri kullanılarak elde edildi. Sonuç olarak, hazırlanan Au/C₂₀H₁₂/n-Si diyotların tüm sıcaklık aralığında akım-iletim mekanizmasının başarıyla termiyonik emisyon (TE) teorisi bazlı Gaussian dağılımlı (GD) engel yükseklikleri ile açıklanabilmektedir.

Bilim Kodu : 202.1.47
 Anahtar Kelimeler : Au/C₂₀H₁₂/n-Si Schottky engel diyotları, I-V-T karakteristikleri, Gaussian dağılım, Akım-iletim mekanizmaları, Arayüzey durumları, Seri ve kısa-devre dirençleri
 Sayfa Adedi : 57
 Danışman : Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL

INVESTIGATION OF TEMPERATURE DEPENDENT ELECTRICAL
CHARACTERISTICS OF THE Au/C₂₀H₁₂/n -Si SCHOTTKY BARRIER DIODES
(SBDs)

(M. Sc. Thesis)

Kani MORAKİ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2015

ABSTRACT

In this study, Au/C₂₀H₁₂/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) were fabricated and their main electrical parameters such as reverse-saturation current (I_0), ideality factor (n), zero-bias barrier height (Φ_{B0}), series and shunt resistances (R_s , R_{sh}) were determined by using the forward bias current-voltage-temperature (I-V-T) characteristics as 1.974×10^{-7} A, 6.434, 0.351 eV, 30.22 Ω and 18.96 k Ω at 160 K and 1.061×10^{-6} A, 2.34, 0.836 eV, 5.82 Ω and 24.52 k Ω at 380 K, respectively. Experimental results show that the value of n decrease with increasing temperature, but Φ_{B0} increases. The change in Φ_{B0} with temperature is not agreement with negative temperature coefficient of forbidden band-gap of semiconductor (Si). Thus, Φ_{B0} vs n , Φ_{B0} and $(n^{-1}-1)$ vs $q/2kT$ plots were drawn to obtain an evidence of a Gaussian distribution (GD) of the BHs and all of them have a straight line. The mean value of BH ($\bar{\Phi}_{B0}$) was found as 0.983 eV from the intercept of Φ_{B0} vs n plot (for $n=1$). Also, the value of $\bar{\Phi}_{B0}$ and standard deviation (σ_s) were found as 1.123 eV and 0.151 V from the slope and intercept of Φ_{B0} vs $q/2kT$ plot. By using the modified Richardson plot, the $\bar{\Phi}_{B0}$ and Richardson constant (A^*) values were obtained as 1.116 eV and 113.44 A.cm⁻²K⁻² from the slope and intercept of this plot, respectively. It is clear that this value of A^* (=113.44 A.cm⁻²K⁻²) is very close to their theoretical value of 112 A.cm⁻²K⁻² for n-Si. In addition, the energy density distribution profile of surface states (N_{ss}) was obtained from the forward bias I-V data by taking into account the bias dependent of the effective barrier height (Φ_e) and ideality factor $n(V)$ for four different temperatures (120, 200, 300, and 400 K). In conclusion, the I-V-T measurements of the Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD in the whole temperature range can be successfully explained on the basis of thermionic emission (TE) theory with GD of the BHs.

Science code	: 202.1.47
Key words	: Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD, I-V-T characteristics, Current-transport mechanisms, Gaussian distribution, Surface states, Series and shunt resistance
Page Number	: 57
Supervisor	: Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜL

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinde, deneylerimde ve akademik çalışmalarımda büyük katkısı olan saygıdeğer tez danışmanım ve hocam Prof. Dr. M. Mahir BÜLBÜKL' e, tüm çalışmalarım boyunca bana her türlü desteğini ve emeğini esirgemeyen Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a, numunelerimi hazırlayan Yrd. Doç. Dr. Sedat ZEYREK'e ve tüm değerli arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bütün eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteklerini esirgemeyen değerli annem Iran HOSEINI, babam Aziz MORAKI ve sevgili aileme sonsuz minnet ve teşekkürü kendime bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİ	5
2.1. Metal Yarıiletken (MS) Kontaklar.....	5
2.2. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Schottky Mott Teorisi	6
2.3. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	10
2.3.1. Termiyonik emisyon (TE) teorisi	12
2.3.2. Difüzyon teorisi	14
2.3.3. Tünelleme (Alan emisyonu:FE ve Termiyonik-alan amisyonu:TF).....	15
2.3.4. Tüketim bölgesinde üretilme ve yeniden birleşme	17
2.3.5. T_0 etkili akım iletimi/anomaly	18
2.4. Engel Homojensizliği	20
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	23
3.2. Kristal Temizleme.....	23
3.3. Spin Kaplama/Coating Yöntemi ile n-Si Üzerine Perilen ($C_{20}H_{12}$) Büyütülmesi	26
3.4. Au/Perilen/n-Si Schottky Engel Diyotların Hazırlanması	27
3.5. Deneysel Ölçüm Sistemi.....	28

	Sayfa
3.5.1. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı	29
3.5.2. HP 4192A LF empedans analizörü	30
4. DENEYSEL SONUÇLAR	31
4.1. Sıcaklığa bağlı engel yüksekliği (BH) ve idealite faktörünün (n) değerlendirilmesi	31
4.2. Seri direncin (R_s) ve yüzey durumlarının (N_{ss}) enerji dağılımlarının belirlenmesi	39
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	47
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Perilen'in bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	25
Çizelge 4.1. 160-380 K aralığında Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD'nin sıcaklığa bağlı I _o , n, Φ _{B_o} , n.T, R _s ve R _{sh} değerleri	33

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Metal/n-tipi yarıiletken (MS) kontaklar için elektron enerji bant diyagramı	7
Şekil 2.2. Metal/n-tipi yarıiletken (MS) kontaklar için enerji bant diyagramı	10
Şekil 2.3. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında temel akım iletim mekanizmaları; (a) engelin tepesi üzerinden metalin içerisine doğru elektronların iletimi (TE), (b) elektronların engel içinden doğrudan kuantum-mekaniksel tünellemeleri (TFE ve FE), (c) uzay yük bölgesinde yeniden birleşme (GR) ve (d) metalden yarıiletkene deşik enjeksiyonu.....	11
Şekil 2.4. a) FE ve b) TFE mekanizmalarının oluşumu.....	17
Şekil 2.5. Farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren $n(kT/q)-(kT/q)$ grafiği.....	19
Şekil 2.6. Homojen engel yüksekliğine sahip olmayan bir Schottky kontağın V gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı.....	21
Şekil 3.1. Omik kontak oluşturmak için kullanılan maske	24
Şekil 3.2. Spin kaplama düzeneği ve mekanizması	26
Şekil 3.3. Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maske	27
Şekil 3.4. Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si (MPS) tipi SBD'un şematik diyagramı	28
Şekil 3.5. Deneysel Ölçüm Sisteminin Şematik Görünümü	28
Şekil 4.1. Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD diyodu için 160-380 K sıcaklık aralığında deneysel ileri ve geri beslem I-V-T karakteristikleri.....	31
Şekil 4.2. Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD diyodu için 160-380 K sıcaklık aralığında n ve Φ_{B0} 'nun sıcaklığa bağlı değişimi	34
Şekil 4.3. 160-380 K aralığında Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD larda n 'nin 1000/T'ye göre değişimi	35
Şekil 4.4. 160-380 K aralığında Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD için Φ_{B0} ile n arasındaki ilişki ...	37
Şekil 4.5. 160-380 K aralığında Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD için Φ_{B0} ile $q/2kT$ arasındaki ilişki	38
Şekil 4.6. 160-380 K aralığında Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD için modifiye Richardson $\ln(I_0/T^2)-q^2\Phi^2/2k^2T^2$ nin q/kT ye göre grafiği.....	39
Şekil 4.7. Değişen sıcaklıklarda Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD'de N _{ss} 'in enerji yoğunluğu dağılım profilleri.....	41

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. a) Farklı sıcaklıklar için R_i -V grafiği ve b) Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD için sıcaklığa bağlı R_s ve R_{sh} değerleri	42
Şekil 4.9. Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD için 500 kHz' deki a) C-V ve b) G/ Φ -V grafikleri	44
Şekil 4.10. Au/C ₂₀ H ₁₂ /n-Si SBD için 500 kHz'deki R_i -V grafiği.....	45

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Perilen (C ₂₀ H ₁₂) 'in a) yapısal şeması, b) görünümü	26
Resim 2.2. Deneysel ölçüm sistemi	29
Resim 2.3. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı	29
Resim 2.4. HP 4192A LF empedans analizörü	30

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Alan
Å	Angstrom
Au	Altın
A[*]	Richardson sabiti
A^{**}	Etkin Richardson sabiti
C	Kapasitans
G	İletkenlik
C_m	Ölçülen kapasitans değeri
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_v	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_{Fn}	n- tipi bir yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
ε₀	Boşluğun elektrik geçirgenliği
ε_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ε_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Hz	Frekans birimi (Hertz)
K	Kelvin cinsinden sıcaklık
k	Boltzmann sabiti
m_e[*]	Elektronun etkin kütlesi
m₀	Serbest elektron kütlesi
m₀	Serbest elektron kütlesi
N_D	Verici katkı atomlarının yoğunluğu
N_A	Alıcı katkı atomlarının yoğunluğu

Simgeler	Açıklama
N_C	İletkenlik bandındaki izinli durumların yoğunluğu
N_V	Değerlik bandındaki izinli durumların yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
q	Elektrik yükü
R_s	Seri direnç
R_i	Diyotun direnci
R_{sh}	Kısa devre direnci
S_i	Silisyum
T	Mutlak sıcaklık
V	Gerilim
V_D	Difüzyon potansiyeli
V_F	Doğru beslem voltajı
V_R	Ters beslem voltajı
V_i	Arayüzey tabakası üzerine düşen gerilim
V_d	Diyot üzerine düşen gerilim
V_G	Metal doğrultucu kontağa uygulanan gerilim
W_D	Tüketim tabakasının kalınlığı
Φ_B	Potansiyel engel yüksekliği
Φ_{Bo}	Sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
$\delta (=d_i)$	Yalıtkan tabaka kalınlığı
Ω	Ohm
σ	Öz iletkenlik
ρ	Öz direnç
χ_s	Elektron yakınlığı

Kısaltmalar**Açıklama**

a.c.	Alternatif akım
d.c.	Doğru akım
C-V	Kapasitans-voltaj
G/ω-V	İletkenlik-voltaj
I-V	Akım-voltaj
MS	Metal/yarıiletken
MIS	Metal/yalıtkan/yarıiletken
MOS	Metal/oksit/yarıiletken
MPS	Metal/polimer/yarıiletken
SBD	Schottky engel diyotu
TE	Termiyonik Emisyon
TFE	Termiyonik Alan Emisyon
FE	Alan emisyon
DT	Difüzyon Teorisi
TED	Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MS) kontaklar üzerine ilk ciddi bilimsel çalışmalar W. Schottky tarafından gerçekleştirildiği için bu yapılara genelde Schottky engel diyotlar (SBD) denilir ve elektronik endüstrisinde halen en yaygın olarak kullanılan doğrultucu kontaklardandır. Schottky engel yüksekliği ve biçimi metal/yarıiletken (M/S) arayüzeyindeki termal davranışa oldukça duyarlıdır ve bu engel genelde metal/yarıiletken arayüzeyindeki yüklerin ayrışmasından dolayı ortaya çıkar. Schottky ve Mott engel oluşma mekanizmasını birbirlerinden bağımsız olarak yaklaşık aynı yıllarda açıkladı ve engel yüksekliğinin hesaplaması hakkında modeller önerdiler [1-6]. Onlara göre oluşan engel yüksekliği, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları (Φ_m ve Φ_s) arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Daha sonraları Cowley ve Sze [7], Schottky diyotlarda kullanılan arayüzey tabakası üzerine çalışmalar gerçekleştirdiler. Onlar, farklı metaller kullanılarak metal/yarıiletken (M/S) arayüzeyindeki Schottky engelin oluşumunu analize ettiler. Genelde, metal-yarıiletken (MS) kontaklar veya diğer adıyla Schottky engel diyotların zamanla teknolojik gelişimi kısaca aşağıda ki gibi özetlenebilir[2-4]:

- İlk olarak 1874'de Braun, Schottky diyotları radyo ve radar detektörü, nokta kontak metal-yarıiletken doğrultucular ve entegre devrelerde anahtar hızını artırmak amacıyla kullanmıştır.
- 1906 yılında ise Pickard Si kullanarak metal-yarıiletken kristal detektörler geliştirmiştir.
- 1907'de Pierce, yarıiletken üzerine metal buharlaştırıldığında diyotların doğrultma özelliği gösterdiğini bulmuştur.
- 1920'li yıllarda radyo dalgalarının algılanmasında vakum tüpleri kullanılmıştır.
- Metal-yarıiletken (MS) kontaklar hakkında bilimsel çalışmalar 1930'larda hız kazanmıştır ve 1938' de Schottky ve Mott metal ile yarıiletkenin arayüzeyinde oluşan potansiyel engeli ile ilgili teoriler birbirinden bağımsız olarak aynı dönemde geliştirmişler. W.Schottky sabit uzay yükü için elektrik alan şiddetinin, uzay yük tabakasının kenarından olan uzaklık ile artması sonucu bir parabolik potansiyel engel oluştuğunu (Schottky engeli) görmüştür. Mott ise hiç yük içermeyen ince bir yarıiletken

tabakayı, bir metal ile yarıiletken arasına sandviçleyerek, yüksek dirençli (yalıtkan) bölgede elektrik alan büyüklüğünün sabit ve potansiyelin bu bölgeye doğru geçerken lineer olarak arttığını (Mott engeli) görmüştür [2-3]. Schottky-Mott teorisine göre metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engelin kaynağı, büyük ölçüde metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Bu modele göre engelin büyüklüğü ise, yine metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron yakınlığı farkı alınarak elde edilir [3]. Ancak daha sonra yapılan çok sayıdaki deneysel ve teorik çalışmalar Schottky engel yüksekliğinin sadece metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bağlı olmadığını aynı zamanda MS kontağın hazırlanma yöntemlerine de bağlı olduğunu göstermiştir [8-22]. Çünkü yarıiletken yüzeyi ne kadar temizlenirse temizlensin, yüzeyde doğal olarak ince bir yalıtkan tabaka oluşabilir. Ayrıca, bu tabakanın kalınlığı ve kimyasal yapısı kontağın hazırlanma şartlarına göre değişebilir. Başka bir deyişle, çok ince de olsa metal/yarıiletken ara yüzeydeki bir tabakanın varlığı ve bu tabaka içinde bulunabilecek iyonlar nedeniyle oluşan elektronik arayüzey durum yoğunlukları (N_{ss}) yarıiletkene ait Fermi enerjisi seviyesinin (E_F), yarıiletkenin yasak enerji aralığındaki (E_g) yerini sınırlandırmaktadır. Yani, Schottky-Mott teorisi sadece ideal durumlar için geçerlidir denilebilir.

- Bethe 1942 de termiyonik emisyon (TE) teorisinin metal yarıiletken kontaklara uygulanabileceğini göstermiştir.
- Crowell ve Sze 1966' da Schottky'nin difüzyon teorisi ile Bethe'nin termiyonik emisyon teorisini birleştirmişlerdir [7]. Daha sonra, Card ve Rhoderick 1971'de ara yüzey tabakasının ve ara yüzey durum yoğunluğunun diyot karakteristiklerine etki ettiğini söylemişlerdir [8]. Özellikle 1990'lardan beri birçok metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), metal-polimer-yarıiletken (MPS), metal-ferroelektrik-yarıiletken (MFS) ve metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) tipi Schottky diyotların üretimi ve onların elektriksel karakteristiklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi konusunda çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır [21-42]. Metal-yarıiletken (MS) kontaklarda metal ile yarıiletken arasına büyütülen arayüzey tabaka, hem metal ile yarıiletkeni birbirinden izole eder hem de aralarındaki yük geçişlerini düzenler. Bu arayüzey tabakası doğal olarak genelde SiO_2 seçilir. Bu arayüzey tabakayı büyütebilmek için birçok metot vardır ve bunların başında termal veya buharda oksidasyon, anodik oksidasyon ve püskürtme metotları gelmektedir. Ancak tüm bu metotlar hem çok pahalı

hem de yüksek enerji tüketimi gerektirmektedir. Bu nedenle geleneksel yollarla büyütülmüş yalıtkan tabakaların yerine son zamanlarda üretim maliyetini ciddi ölçüde düşüren, spin kaplama yöntemiyle bol miktarlarda üretilebilen, organik ince filmler yani polimerler kullanılmaktadır.

Ayrıca, yüksek dielektrik sabitli bir arayüzey tabakanın metal ile yarıiletken arasında büyütülmesi, hem sızıntı akımlarını önemli ölçüde azaltabilir hem de birçok yüzey durumunu pasivize edebilir. Bu nedenle bu çalışmada Al/perilen/p-Si Schottky engel diyotları hazırlandı ve onların muhtemel akım-iletim mekanizmaları 160-380 K aralığında incelendi. Çünkü bir metal-polimer/organik-yarıiletken (MPS) tipi Schottky engel diyotların çalışma prensibi metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi Schottky engel diyotlarının çalışma prensibin oldukça benzerdir. Literatürde hem MIS hem de MPS tipi Schottky engel diyotlarla ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak bunların akım-iletim mekanizmaları ve metal yarıiletken arasında oluşan engelin biçimi hakkında geniş sıcaklık aralığında yapılan çalışmalar yeterli oranda değildir. Yapılan çalışmalar genelde oda sıcaklığı veya dar bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Baskın akım-iletim mekanizması sıcaklık, yüzey hazırlık süreci, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabakanın oluşumu, metal yarıiletken ara yüzeyinde engel yüksekliği, engel homojensizliği, yarıiletkenin katkı konsantrasyonu, arayüzey durumlarının enerji yoğunluğu dağılımı ya da kusurlar, aygıtın seri direnci ve kısa devre direnci gibi birçok parametreye bağlıdır [2-5,7-10].

Genelde, MIS ya da MPS yapıların doğru beslem yarı logaritmik I-V karakteristikleri düşük ve orta gerilim bölgelerinde lineerdir. Ancak ileri pozitif gerilimlerde özellikle seri direnç (R_s) ve metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan ya da polimer tabakadan dolayı bir bükülme meydana gelir. Çünkü uygulanan dış gerilim/elektrik alan; arayüzey tabaka, seri direnç ve diyot üzerinde paylaşılacaktır. Dolayısıyla, hazırlanan bir Schottky tipi yarıiletken aygıtın elektriksel karakteristikleri incelenirken mutlaka aygıtın seri direnci, arayüzey tabakanın homojenliği ve kalınlığı ile yarıiletken arayüzey tabakası arasında oluşan çok sayıdaki arayüzey durumunun etkisini dikkate almak gereklidir.

Bu çalışmada Au/n-Si (MPS) tipi Schottky engel diyotların elektriksel özellikleri 160-380 K sıcaklık aralığında, doğru beslem I-V ölçümleri kullanılarak incelendi. Bu yarı-logaritmik I-V eğrileri her sıcaklıkta orta gerilimler için birer lineer bölge sergiledi. Bu

lineer bölgelerin kesim noktası ve eğimleri kullanılarak temel diyot parametreleri ve akım iletim mekanizmaları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelendi.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, MS Schottky engel diyotların tarihsel gelişimi, önemi ve kullanım alanları ile yapılan çalışmalar hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde, MS Schottky engel diyotların yapısı ve temel bazı akım iletim mekanizmaları ile ilgili teoriler üzerinde duruldu. Üçüncü bölümde, perilen arayüzey tabakalı Schottky engel diyotların hazırlanması aşamaları üzerinde duruldu. Ayrıca ‘‘Spin kaplama yöntemi’’ ve kullanılan deneysel sistem hakkında bilgi verildi. Dördüncü bölümde, hazırlanan diyotların akım- voltaj (I-V) karakteristikleri 80-380 K gibi geniş bir sıcaklık aralığında incelendi. Beşinci bölümde ise elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili tüm grafik ve tablolarla ilgili yorumlar, mevcut literatür ile kıyaslanarak sonuçlar yorumlandı.

2. TEORİ

2.1. Metal Yarıiletken (MS) Kontaklar

En basit aygıt olarak Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi için farklı yarıiletkenler ve farklı metaller uygun deney ortamında kontak edilir. Schottky diyotların tarihçesi çok eskiye dayanmasına rağmen halen günümüzde popülerliğini ve önemini korumaktadır. Son zamanlarda yarıiletken kristal ile kontak yapılacak metal arasına farklı polimer malzemeler büyütülerek olabildiğince aygıt performansının artırılması amaçlanmaktadır. Oluşturulan kantağın ideal olması için yarıiletken kristal yüzeyinin çok iyi temizlenmesi ve yüzeyin pasivize edilmesi gereklidir [30-42]. Bir metal ve yarıiletken kontak edildiklerinde oluşan kontak türünün omik veya doğrultucu olmasını seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s de yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda ise omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda omik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda da doğrultucu kontak oluşur. Genel olarak deney aşamasında omik kontaklar yapıldıktan sonra belirli bir süre tavlama yapılmaktadır [3-5].

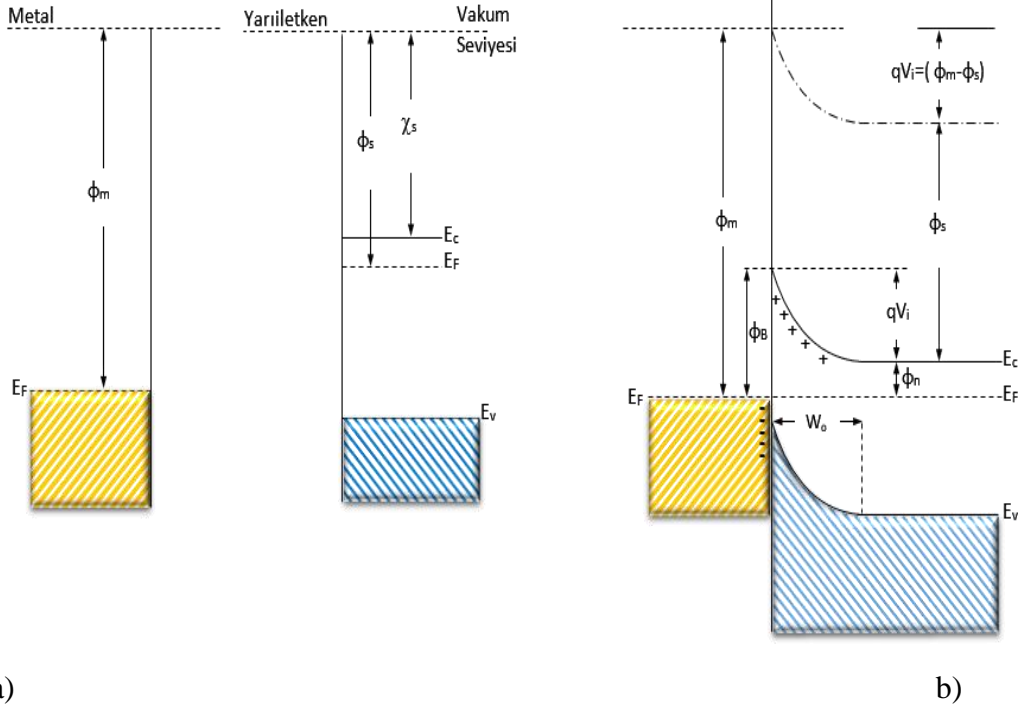
Metal-yarıiletken Schottky diyotlar tüm yarıiletken tabanlı devre elemanlarının temelini teşkil eder. Schottky diyotlar bir metal ile yarıiletkenin yüksek sıcaklık ve düşük basınç altında sıkı kontak edilmesiyle oluşturulur. Kontak edildiğinde ara yüzey bölgede yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engeli oluşur. Metal yarıiletken kontaklarda taşıyıcı yükler her iki yönde de rahatça hareket edebiliyorlarsa, bu tür davranışa “Omik” davranış denir. Ancak, bu yükler genelde pozitif beslem altında rahatlıkla engel üzerinden geçerken ve ters beslemde ise geçemiyorsa (daha büyük bir engel ile karşılaşılırsa) bu davranışa da “Doğrultucu” davranış denir. Yarıiletken aygıtların en önemli özellikleri ve doğrulma özelliğidir. İdeale yakın bir diyot için bu oran ($=I_F/I_R$) ileri pozitif voltajlar için 10^6 dan büyük olmalıdır. Ancak pratikte durum oldukça farklıdır. Yani bu oranlar yarıiletken-yarıiletkene veya diyottan diyoda oldukça farklılıklar gösterebilmektedir. Bunu için MS yapıların hazırlanması son derece titiz ve dikkatli yapılmalıdır.

2.2. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Schottky Mott Teorisi

Metal ile yarıiletken ara yüzeyinde yüklerin ayrışması sonucu meydana gelen potansiyel engeli ilk defa Schottky ve Mott tarafından açıklandı. Schottky ve Mott modeline göre, arayüzeyde oluşan potansiyel engeli iki farklı malzemenin (metal ve yarıiletken) iş fonksiyonları arasındaki farktan oluşmaktadır. Bu modeli açıklamak için, Şekil 2.1’de hem birbirinden ayrık/bağımsız metal ve yarıiletkenin (n-tipi) enerji bant diyagramları hem de kontak yapıldıktan sonraki denge durumu için enerji-bant diyagramlarının oluşumu resimlenmiştir. Şekil 2.1(a)’da Φ_m iş fonksiyonuna sahip olan bir metal ($\Phi_s < \Phi_m$) iş fonksiyonu Φ_s olan n-tipi yarıiletkenin elektron enerji bant diyagramlarını kontak edilmeden önceki durumları gösterilmiştir. Yarıiletken veya metallerde iş fonksiyonu, kendi Fermi seviyesindeki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak/uyarmak için gerekli olan enerjidir. İletkenler için Fermi enerji seviyesi (E_F) ise iletkenin hemen dışında elektronun sıfır kinetik enerjiyle bulunduğu enerji seviyesidir. Elektron yakınlığı (χ_s) ise katkılama oranına bağlı olmayan önemli bir yüzey parametresidir ve vakum seviyesi ile iletim bandının alt kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkı olarak tanımlanabilir. Φ_m , Φ_s ve χ_s birimleri genelde elektron volt (eV) olarak verilir [4].

Şekil 2.1 (b)’de bir metal ile n-tipi yarıiletkenin kontak edildikten sonraki termal denge durumuna karşılık gelen enerji-bant diyagramlarını temsil etmektedir. Metal ile yarıiletken birbirleriyle kontak edilince, metal tarafındaki elektronlara göre daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin (n-tipi) iletim bandındaki (E_c) elektronlar her iki taraftaki E_F seviyesi eşitlenene kadar yarıiletkenden metale doğru geçerek arkalarında deşikler bırakırlar. Yarıiletken den metala geçen geçişler nedeniyle yarıiletken tarafındaki serbest elektron yoğunluğu da azalır ve dolayısıyla E_F enerji seviyesi yarıiletkenin yasak enerji aralığının ortasına doğru kaymaya başlar. Yani, yarıiletken tarafında azalan elektron konsantrasyonu nedeniyle, E_c ve E_F seviyeleri arasındaki enerji yarılması artar ve dolayısıyla termal dengede durumuna ulaşınca E_F ’nin sabit kalmasından dolayı iletim bandı E_c . Şekil 2.1(b)’de görüldüğü gibi yukarı doğru bükülür [2-7]. Metale geçiş yapan yarıiletkenin iletim bandı elektronları, arkalarında pozitif yüklü iyonize vericiler bıraktıkları için metalin ön yüzeyine bakan yarıiletkenin ön bölgesi hareketli elektronlardan arındırılmış olur. Bu yük geçişleri sonucunda ise; arayüzeyin yarıiletken tarafında bir pozitif yük bölgesi “pozitif uzay yük bölgesi” ve arayüzeyin metal kısmında ise “negatif uzay yükü bölgesi” oluşur. Bu iki bölgenin toplam genişliği ise “Tüketim tabakası” ve “Schottky tabakası”

olarak adlandırılır. Aslında, bu tüketim tabakası hareketli yük içermediğinden dolayı yüksek dirençli bir dielektrik tabakadır.



Şekil 2.1. Metal/n-tipi yarıiletken (MS) kontaklar için elektron enerji bant diyagramı: (a) Birbirinden ayrıık, (b) Kontakt oluştuktan sonraki termal denge durumu.

Termal denge durumunda, Şekil 2.1(b)'de görüldüğü gibi yarıiletkende metale doğru bir iç/doğal elektrik alan veya potansiyel farkı meydana gelir. Metal ve yarıiletken termal olarak dengeye ulaştıklarında, yarıiletkenin yasak enerji aralığı (E_g), metal ile kontakt haline getirilmesiyle değişmeyeceğinden dolayı valans bandı E_v , iletim bandı E_c 'ye paralel olarak şekilde görüldüğü gibi (Şekil 2.1(b)) yukarı doğru parabolik olarak bükülür. Buna paralel olarak yarıiletkendeki vakum seviyesi de E_c ile aynı oranda yukarı doğru bükülmektedir. Böylece, termal dengede olan bir metal ile yarıiletken için engel yüksekliğini belirleyen önemli unsur vakum seviyesinin geçiş bölgesi boyunca sürekli kalmasıdır. Bu yüzden, yarıiletken tarafındaki vakum seviyesi sürekliliği sağlamak adına metal tarafındaki vakum seviyesine yaklaşmalıdır. Bu durumda, bantlardaki bükülmenin miktarı iki vakum seviyesi arasındaki farka, yani iş fonksiyonları arasındaki farka eşittir. Bu farkın büyüklüğü, $qV_i \cong (\Phi_m - \Phi_s)$ kadardır ve burada qV_i eV cinsinden verilen eklem built-in/kurulma voltajı olarak bilinen kontakt potansiyel farkıdır. Başka bir ifadeyle, yarıiletkenden metale geçen elektronların karşılaştıkları potansiyel engel yüksekliğidir. Yani, yarıiletkenden metale geçen elektronların gördüğü engel veya aşmak zorunda

kaldıkları engel (qV_i) ve metalden yarıiletkene geçecek taşıyıcıların gördükleri engel ise potansiyel engel (Φ_B) kadardır. Bu engel, Şekil 2.1 (b)' de görüldüğü gibi qV_i engelinden yaklaşık olarak E_F kadar daha büyük olup aşağıdaki eşitlikler yardımıyla elde edilir [2-4]:

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

$$\Phi_s = (\Phi_n + \chi_s) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.1 ve 2.2' den de görüldüğü gibi metalden yarıiletkene doğru geçecek taşıyıcıların karşılaştığı potansiyel engel yüksekliği (Φ_B),

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (2.3)$$

Burada,

$$\Phi_n = |E_C - E_F| = E_F = kT/q \cdot \ln(N_C/N_D) \quad (2.4)$$

eşitliği ile verilir. $\Phi_n = E_F$ eşitliği n-tipi yarıiletken için E_C referans alındığında, yarıiletkenin Fermi enerji seviyesidir. Eşitlik 2.3, birbirlerinden bağımsız olarak yaklaşık aynı zaman diliminde Schottky ve Mott tarafından türetilmiştir [2,4]. Eşitlik 2.3' den elde edilirken Φ_m ve Φ_s değerleri yüzey dipol katkılarının metalin yarıiletkenle kontak edilmesinden sonra değişmediği kabul edilmiştir. Birçok durumda engel yüksekliği Φ_B miktarı, termal enerji (kT/q) miktarından birçok kat büyüktür ve yarıiletkendeki uzay yük bölgesi, hareketli yüklerden yoksun, yüksek dirençli/yalıtkan tüketim bölgesi haline dönüşür. Bu durumda, engelin şekli yarıiletkendeki verici (n-tipi yarıiletkende) ve p-tipi yarıiletkende ise alıcı katkı atomlarının konsantrasyonuna bağlı olarak değişir.

Schottky [2,3] metal arayüzeyine doğru yarıiletkenin düzgün şekilde katkılındığını kabul eder ki; bu durum tüketim bölgesinde düzgün yük yoğunluğuna neden olur. Bu sabit uzay yük için elektrik alan kuvveti uzay yük tabasının sınırından itibaren artan uzaklıkla/derinlikle birlikte lineer olarak artar ve oluşan parabolik engel "Schottky engeli" olarak bilinir. Mott [2-4] ise homojen katkılanmış yarıiletken ile metal arasında sandviçlenmiş, herhangi bir yükten yoksun bir ince yarıiletken tabaka olarak kabul etmiştir. Bu ince bölgedeki elektrik alan kuvveti sabit ve bölge boyunca potansiyel lineer

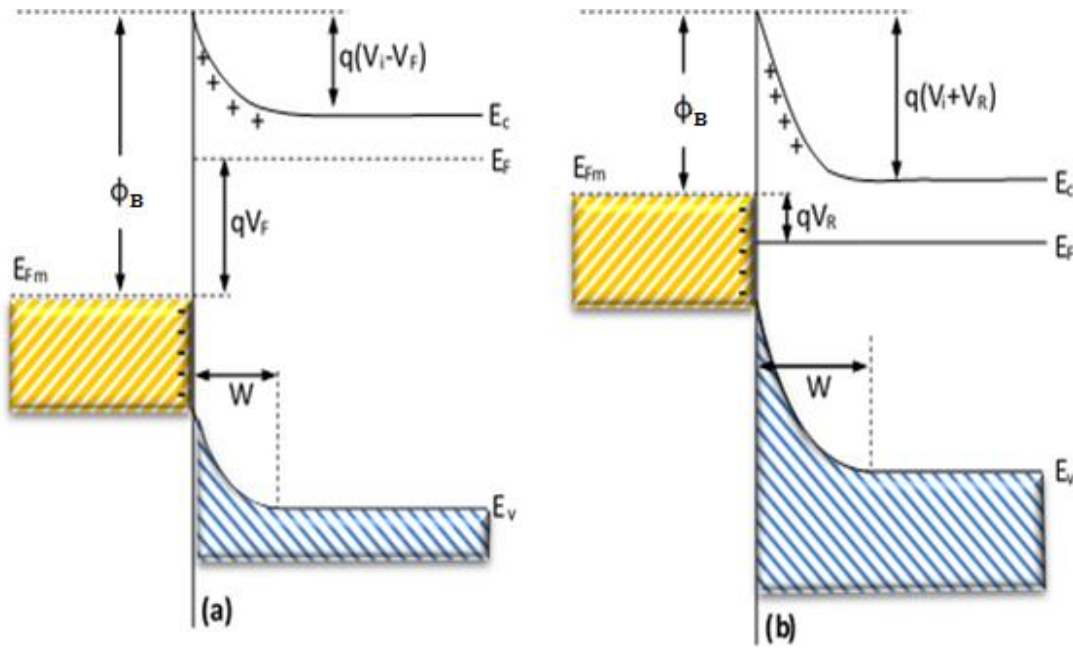
olarak artar. Bu tip engel ‘‘Mott engeli’’ olarak bilinir. Mott engeli, neredeyse özgün bir yarıiletken gibi az/düşük katkılı ve ince bir tabakanın metal ve yüksek katkılı yarıiletken arasında konulmasıyla ortaya çıkar.

Termal denge halinde, yarıiletken metale engel üzerinden geçiş yapan elektronların miktarı metalden yarıiletkene doğru geçen elektronların miktarı ile dengelenir ve bu durumda engel boyunca net yük geçişi sıfırdır. Bu genelde istenmeyen bir durumdur. Çünkü devreden/sistemden hep net bir yük geçişi olması beklenir ve bunu sağlamak için ise sistem ya doğru ya da ters yönde öngerilimlenir/beslenir.

Eğer metal/n-yarıiletken kontak doğru öngerilimlenirse /beslenirse ($V_F < \Phi_{B0}$) yarıiletken metale göre negatif olduğunda, tükenim bölgesi genişliği daralır ve Şekil 2.2(a)'da görüldüğü gibi bu bölge boyunca olan voltaj V_i 'den ($V_i - V_F$)'ye düşer. Başka bir ifadeyle, tüketim bölgesinin genişliği azalır ve dolayısıyla yük geçişleri kolaylaşır ya da yarıiletken tarafındaki elektronlar bu durumda daha düşük bir engelle karşı karşıya kalırlar ve bunun sonucunda yarıiletkenden metale doğru olan elektron akımı termal denge durumuna kıyasla artmış olur. Metalden yarıiletkene olan elektron akımında ise denge durumundaki değerine göre bir değişiklik oluşmaz. Bu durum, metal boyunca voltaj düşmesinin olmamasından dolayı Φ_B 'nin beslem voltajından etkilenmemesinin bir sonucudur. Böylece, yarıiletken üzerindeki negatif beslem için, metalden yarıiletkene doğru akıma neden olan, yarıiletkenden metale doğru net bir elektron akımı vardır. Bu kutuplanma türüne doğru/ileri beslendiği/öngerilimlendiği söylenir. Doğru öngerilim altında akım miktarı uygulanan V_F voltajıyla birlikte üstel olarak artar ve yeterince ileri voltajlarda R_s ve yalıtkan arayüzey tabakadan den dolayı akımda bir bükülme meydana gelir [2-4, 7-15]. Şekil 2.2(b)' de ise metal/n-tipi yarıiletkenin ters öngerilimlendiği enerji bant diyagramını göstermektedir.

Eğer metal/n-yarıiletken kontak ters beslenirse, termal denge durumundaki engel yüksekliği Φ_{B0} kabul edilirse, ($V_R < \Phi_{B0}$ olmak üzere) yarıiletken metale göre pozitif olduğunda, tükenim bölgesi genişliği iyice artar. Çünkü bu durumda hem iç hem dış elektrik alan aynı yönde olduğundan toplam elektrik alan iyice artar ve bunun sonucu olarak da tüketim bölgesi iyice genişler. Bu şartlar yük geçişleri iyice sınırlanır ve ters akım ideal durumda sıfıra yaklaşır. Şekil 2.2(b)'den de görüldüğü gibi bu bölge boyunca olan voltaj V_i 'den ($V_i + V_R$)'ye yükselir. Bu kutuplanma türüne ters/geri beslem olarak

adlandırılır. Gerek Şekil 2.1 ve gerekse Şekil 2.2'de görüldüğü gibi metalden yarıiletkene doğru görülen engel yüksekliği, yarıiletkenden metale doğru görülen engelden Fermi enerjisi (E_F) kadar büyüktür. Başka bir ifadeyle; doğru beslem ile ters beslenimin doğası oldukça farklıdır. Örneğin, doğru beslem altında iç ve uygulanan dış elektrik alan zıt yönlerdeyken ters beslem altında ise bu elektrik alanlar aynı yönlere sahiptir ve dolayısıyla ters beslemde tükenim bölgesi daha geniştir. Zaten MS kontaktları veya diğer adıyla Schottky engel diyotları (SBDs) benzeri yarıiletken aygıtların en önemli ortak özeliği doğrultma oranıdır ($RR=D.O.=I_F/I_R$). Yani yeterince ileri doğru beslemde diyottan çekilen akımın, aynı değerdeki ekşi/(ters) beslemdeki akım oranıdır ve bu oran ideale yakın diyotlarda 10×10^9 civarındadır. Doğrultma oranının yüksek olması aynı zamanda diyotun seri direncinin (R_s) düşük ve kısa devre direncinin (R_{sh}) ise yüksek olması demektir. Yine iyi bir diyot için R_s değerinin ideale yakın diyotlar için sıfıra yaklaşması ve R_{sh} değerlerinin ise 10×10^8 den daha büyük olmalıdır.

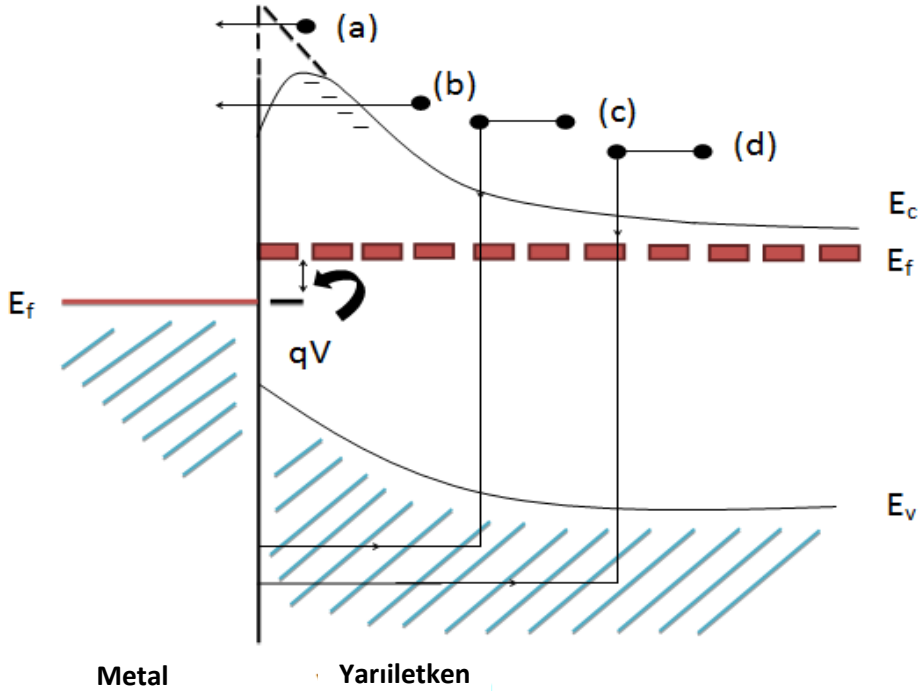


Şekil 2.2. Metal/n-tipi yarıiletken (MS) kontaktlar için enerji bant diyagramı (a) Doğru öngerilim altında ve (b) Ters öngerilim altında

2.3. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaktlarda Akım İletim Mekanizmaları

Schottky engel diyotlarda engel üzerinden veya içinden farklı yollarla akım iletimi olabilir, fakat ölçülen akım toplam akım miktarıdır. Hangi akım-iletim mekanizmalarının etkin

olduğu; özellikle yarıiletkenin katkılama oranlarına, diyotun sıcaklığına, kristal temizleme ve fabrikasyon işlemlerine, engelin biçimine ve uygulanan dış elektrik alana bağlıdır. Termal denge durumunda bir MS kontağa dış elektrik alan/voltaj uygulandığında yük taşıyıcıları metal ile yarıiletken arasındaki engeli aşmak suretiyle akım oluşturabilir ve akım Şekil 2.3’de görüldüğü gibi farklı iletim mekanizmaları oluşturabilir [7-14]. Metal-yarıiletken kontaklarda oluşan bu mekanizmalar üzerinde arayüzey durumları, seri direnç, metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabaka, gerilimin yönü, sıcaklık, yarıiletkenin tipi vb. faktörlerin etkisini belirlemek sonuçların doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Metal-yarıiletken sıkı kontak edildikten sonraki muhtemel bazı akım iletim mekanizmaları Şekil 2.3’ de temsil edilmiştir.



Şekil 2.3. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında temel akım iletim mekanizmaları; (a) engelin tepesi üzerinden metalin içerisine doğru elektronların iletimi (TE), (b) elektronların engel içinden doğrudan kuantum-mekaniksel tünellemeleri (TFE ve FE), (c) uzay yük bölgesinde yeniden birleşme (GR) ve (d) metalden yarıiletkene deşik enjeksiyonu

Yukarıda bahsedilen temel akım-iletim mekanizmaları: (a) engeli tepesi üzerinden metalin içerisine doğru elektronların iletimi (termiyonik emisyon:TE), (b) elektronların engel içinden doğrudan kuantum-mekaniksel tünellemeleri, engel içinde tünelleme, (termiyonik alan emisyon: TFE ve alan emisyon: FE), (c) uzay yük bölgesinde yeniden birleşme, (d)

metalden yarıiletkene elektron veya deşik enjeksiyonudur. Dolayısıyla M/S ara yüzeyinde gerçekleşen akım iletiminden söz ederken yalnız tek bir mekanizmadan bahsetmek doğru olmaz. Bu nedenle diğer mekanizmaların da katkısının hangi sıcaklık ve gerilim altında olabileceğini iyi bilmek gereklidir. Aksi takdirde elde edilecek sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği tartışılır hale gelir. Schottky engel diyotlarda en muhtemel mekanizma oda sıcaklığı ve üzeri ile orta katkılı yarıiletkenler için, yeterli termal enerjiyi kazanan yük taşıyıcısının potansiyel engeli üzerinden atlaması yani termiyonik emisyon (TE) mekanizmasıdır. Bu mekanizma, Schottky engel yüksekliğini elde etmekte yaygın olarak kullanılan bir modeldir/teoridir. Diğer akım-iletim mekanizmalarından TFE ve FE ise ancak düşük sıcaklık ve yüksek katkılı yarıiletkenlerde baskın olabilir [2-4, 43-47].

2.3.1. Termiyonik emisyon (TE) teorisi

Schottky tipi MS diyotlarda/kontaklarda TE teorisi, taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini (Φ_B) aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. TE teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontağa ait potansiyel engelinin, kT (Joule) veya kT/q (eV) enerjisinden daha büyük olduğu ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilmektedir. MS kontaklardaki akım mekanizmaları ilk olarak Bethe tarafından ve daha ayrıntılı olarak da Cowley ve Sze tarafından ortaya atılmıştır [7]. Bethe'nin MS kontaklarda akımın çoğunluk taşıyıcılar tarafından iletildiğini kabul ederek kurduğu TE'nin temel varsayımları aşağıda verilmiştir [2-4]:

- Engelinin yüksekliği, kT/q enerjisinden çok büyüktür.
- Schottky/tüketim bölgesinde taşıyıcı çarpışmaları olmamaktadır. Yani taşıyıcıların ortalama serbest yolları Schottky bölgesinin kalınlığından daha fazladır.
- Hem görüntü (hayali) kuvvetlerin etkisi ihmal edilmekte hem de engelin biçimi önemsenmemektedir (akım engel yüksekliğine/biçimine) zayıf bağlıdır.

TE teorisine göre yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu ($J_{s \rightarrow m}$), x yönünde engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların yoğunluğunun bir fonksiyonudur ve

$$J_{sm} = \int_{E_F+q\Phi_B}^{\infty} q \mathcal{G}_x dn \quad (2.5)$$

şeklinde verilebilir. Burada E_F metal içindeki TE için gerekli minimum enerji, v_x ise pozitif x yönündeki taşınma yönündeki hızdır. Kontak yüzeyine dik doğrultuda elektronların x yönündeki hız bileşeni v_x ile gösterilirse, yarıiletken yapıda hızları v_x ile $v_x+\Delta v_x$ arasında olan elektronların yoğunluk ifadesi aşağıdaki gibi verilir [2,3].

$$dn_x = N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \quad (2.6)$$

Burada N_d yarıiletkene katkılanan verici katkı atomların yoğunluğu, m_n^* elektronun etkin kütlesi, k Boltzmann sabiti ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Yarıiletkene bir dış gerilim uygulandığında elektronlar için yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu, $1/2(m_n^* v_x^2) > qV_d$ şartını sağlayan elektronların birim zamanda birim yüzeyden geçen sayısının e ile çarpımı;

$$\begin{aligned} J_{sm} &= \int_{v_{0x}}^{\infty} qv_x dn_x = \int_{v_{0x}}^{\infty} qN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} v_x \exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \\ &= qN_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) = qN_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{qV_D}{kT} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Eşitliği ile verilir. Metalden yarıiletkene doğru görülen engel yüksekliği ise;

$$q\Phi_{Bn} = qV_D + E_F \quad (2.8)$$

şeklinde olacaktır. Yarıiletkenin periyodik örgüsünde bulunan elektronlar için **etkin Richardson sabiti** (A^*),

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.9)$$

eşitliği ile verilir. Diğer taraftan yarıiletkenden metale olan akım yoğunluğu ifadesi ise

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontağı doğru beslemde iken engel yüksekliği azalacağından akım yoğunluğu değeri $\exp(qV/kT)$ çarpanıyla orantılı olarak artacaktır. Bu yüzden yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu J_{sm}

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.11)$$

eşitliğine dönüşür. Termal denge durumunda, yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene doğru akım yoğunlukları eşittir ve toplam akım yoğunluğu ifadesi net olarak

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

Eşitliği ile verilebilir. Burada, köşeli parantez önündeki tüm ifade sızıntı akımı olarak da adlandırılan doyma akım yoğunluğu ifadesidir. Yani doyma akım yoğunluğu ya da diğer adıyla ters beslem doyma akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.13)$$

ile verilir [2-4].

2.3.2. Difüzyon teorisi

Aralarında yoğunluk gradiyenti farkı bulunan bölgeler arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olan bölgeye doğru yük geçişlerine “difüzyon” denir. Schottky tarafından verilen difüzyon teori aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır [2,3]:

- Engel yüksekliği, kT/q enerjisinden oldukça büyüktür.
- Tüketim bölgesindeki yüklerin çarpışmaları ihmal edilmektedir.
- $x = 0$ ve $x = W$ konumundaki taşıyıcı yoğunluğu termal denge değerlerine sahiptir.

- Akım, difüzyon ve sürüklenme ile sınırlanmıştır.
- Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir yani katkı atomların yoğunluğu çok yüksek değildir ve değişmez.

Bu varsayımlardan ışığında akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan akım-voltaj (I-V) karakteristiğini çıkarmak için tüketim bölgesinde metal/n-tipi yarıiletken (M/S) kontaklar için akım yoğunluğu ifadesi;

$$J = J_{SD}[\exp(qV/kT) - 1] \quad (2.14)$$

eşitliği ile verilir [3]: Burada J_{SD} doyum akım yoğunluğu ifadesi olup,

$$J_{SD} = (q^2 N_c D_n / kT) [q(V_d - V) 2N_D / \epsilon_s]^{1/2} \exp(-q\Phi_B / kT) \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_c iletkenlik bandındaki izinli enerji seviyelerinin yoğunluğu, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik geçirgenliği/sabiti, D_n elektronlar için difüzyon sabiti, V_d difüzyon potansiyeli, N_D verici katkı atomlarının yoğunluğu, V diyot üzerine uygulanan voltaj, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık, q elektronik yük ve Φ_B ise metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engelin yüksekliğidir. Metal/p-tipi (MS) kontaklarda ise yukarıda bağıntılarda D_n yerine D_p , N_c yerine N_v , N_D yerine N_A yazmak yeterlidir.

2.3.3. Tünelleme (Alan emisyonu:FE ve Termiyonik-alan amisyonu:TF)

MS veya diğer adıyla Schottky engel diyotlarda özellikle düşük sıcaklıklarda ve yüksek katkılı yarıiletkenlerin kullanılması durumunda etkin olabilecek diğer bir akım iletim mekanizması da tünellemedir [2-4]. Tünelleme ya TFE ya da FE şeklinde olur: FE teorisi çok düşük sıcaklık ($T \leq 150$ K) ve çok yüksek katkılama ($N \geq 10^{18}$ cm⁻³) durumlarında etkin iken TFE orta sıcaklıklarda ve orta katkılı yarıiletkenlerde de etkin olabilir. Sıcaklık daha da artırılınca taşıyıcılar engeli rahatlıkla aşabilecek enerji kazanarak engel üzerinden geçiş yapabilirler ve bu durumda TE teorisi tek başına etkin olabilir. Metal-yarıiletken arayüzeyindeki tünelleme mekanizmasında taşıyıcılar engel genişliğinin ince olan kısımlarında engelin üzerinden atlamaksızın direk engel içerisinden tünellenebilirler [2,3].

Tünelleme teorisi ilk defa Padovani tarafından geniş olarak ele alınmıştır [43]. Daha sonra bu teori hakkında Padovani [44] ve Sexena [46] önemli çalışmalar yapmıştır.

Padovani'ye göre engel boyunca gerçekleşen tünelleme ya yarıiletkenin Fermi seviyesinden metale doğru (alan emisyonu, FE) elektron tünellemesiyle ya da daha fazla enerji kazanan ve dolayısıyla daha yüksek enerjilere uyarılabilecek ve engelin üst kısmına elektronların engel boyunca tünellenmesiyle (Termiyonik alan emisyonu, TFE) oluşur. Alan emisyonu (FE) veya doğrudan tünellenmenin oluşumu, yarıiletkenin aşırı oranda katkılıandığı durumda E_F enerji seviyesinin iletim bandına (E_c) yaklaşması ya da onun ile çakışması sonucu kuvvetle muhtemeldir (Şekil 2.4). Dolayısıyla burada hem TFE hem de FE teorileri biraz daha ayrıntılı olarak incelenecektir.

Hem TFE hem de FE teorileri için akım-voltaj ilişkisi,

$$I = I_o \exp\left(-\frac{qV}{E_o}\right) \quad (2.16)$$

ile verilir [2-4,44-46]. Bu eşitlikteki E_o ifadesi,

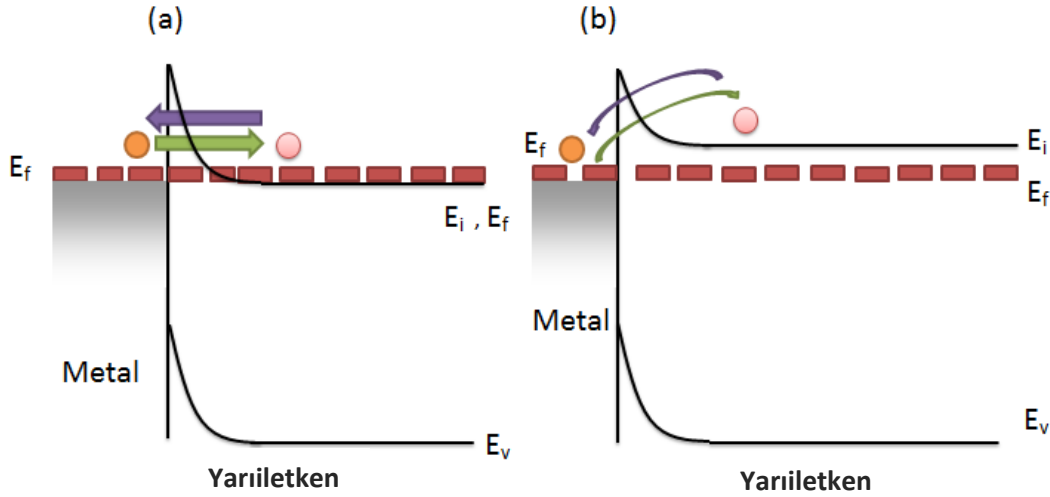
$$E_o = E_{oo} \coth\left(\frac{qE_{oo}}{kT}\right) \quad (2.17)$$

ve

$$E_{oo} = \frac{\hbar}{2} \left(\frac{N_d}{m^* \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

Eşitlikleri ile verilir. Burada E_{oo} çok önemli bir kıyas parametresi olup tünelleme olasılığını temsil eder. Bu eşitlikteki, m^* elektron etkin kütlesi, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, N_d verici katkı atomlarının yoğunluğu ve \hbar Planck sabitidir. kT/qE_{oo} oranı hem TE hem de tünelleme mekanizmaları hakkında önemli bilgiler verir. E_{oo} , tüketim bölgesi kenarında iletkenlik bandının tabanıyla çakışan enerjiye sahip bir elektron için karşı tarafa geçme ihtimaliyetinin $1/e'$ ye karşılık gelen Schottky engelini difüzyon potansiyelidir. kT

$\ll qE_{oo}$ ise alan emisyonu (FE), $kT \sim qE_{oo}$ ise termiyonik alan emisyon (TFE) ve $kT \gg qE_{oo}$ ise termioyonik emisyon (TE) mekanizmalarının olması beklenir [4,44-46].



Şekil 2.4. a) FE ve b) TFE mekanizmalarının oluşumu [4,44]

2.3.4. Tüketim bölgesinde üretilme ve yeniden birleşme

Tüketim bölgesindeki yüklerin oluşumu ve birleşmesi (generation-recombination) etkileri TE akım iletim teorisi bileşenine paralel bir artış verir. Bu etki özellikle orta sıcaklık bölgesinde önemli bir mekanizmadır [2,3]. Uzay yükü bölgesindeki rekombinasyon önemi Yu ve arkadaşları tarafından ayrıntılı olarak açıklanmıştır [48]. Rekombinasyon olayı genel anlamda lokal/bölgesel durumlar sonucunda ortaya çıkar. Shockley-Read ve Hall teorilerine göre, en etkin olan rekombinasyon merkezleri, band aralığının ortasına yakın ($\sim E_g/2$) enerjilere sahip merkezlerdir. Schottky diyotlarda rekombinasyonun olduğu durumlardaki akım iletim mekanizması p-n eklem diyotun akım iletim mekanizmasına benzemektedir. Doğru beslemdeki küçük pozitif voltajlar için etkin olan rekombinasyon akım yoğunluğu;

$$J_r = J_{ro} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.19)$$

eşitliği ile verilebilir [49]. Burada, $J_{ro} = qn_i w / 2\tau_r$ ve buradaki n_i ise asal elektron yoğunluğu olup $n_i \propto -qE_g / 2kT$ şeklinde bir orantı ile verilir. Ayrıca burada w , tüketim bölgesinin genişliği, τ_r elektronların bu bölgeyi geçmesi için gerekli zamandır. Homojen dağılıma

sahip arayüzey durumlarından/merkezlerden dolayı, elektron ve deşikler için yakalama tesir kesitleri eşittir. Rekombinasyon akımının TE akımına oranı,

$$T^2 \tau_r \exp \left[q \left(\frac{E_g + V - 2\phi_B}{2kT} \right) \right] \quad (2.20)$$

ile verilmektedir. Bu oran artan ϕ_r , V ve E_g ile artarken ϕ_B ile azalmaktadır. Düz beslemdeki rekombinasyon akımının sıcaklıkla ters orantılı değişimi yüksek ve düşük sıcaklıklarda iki farklı eğimi olan bir doğru verir. Bu bölgelerde, düşük sıcaklıklar için aktivasyon enerjisi (E_a), $\frac{E_g - V}{2}$ değerine ve yüksek sıcaklıklarda ise $\phi_B - V$ değerine yaklaşık olarak eşittir. Bu durumlar dikkate alındığında, MS kontaklarda ideal durumdan sapmaların temel nedenlerinden biri de rekombinasyon akımıdır. İdeal durumdan sapmalar özellikle M/S arayüzeyinde homojen olmayan arayüzey tabakası ve engel yüksekliğinden ve yüksek seri direnç (R_s) ile arayüzey durumlarından (N_{ss}) kaynaklanmaktadır ve bu sapma özellikle düşük sıcaklıklarda daha da artar. Bu nedenle düşük sıcaklıklarda veya daha geniş bir sıcaklık aralığında akım-iletim mekanizmalarını incelemek oldukça önemlidir.

Şayet tünelleme ve imaj kuvvet azalması düşük bir donör konsantrasyonu ile önemli derecede azaltılırsa, tüketim bölgesinde elektron-hol çiftlerinin jenerasyonundan (oluşması) dolayı fark edilebilir derecede bir ters akım oluşabilir. Bu işlem rekombinasyonun tersi bir işlem olup, generasyon mekanizmasıyla oluşan akım (J_g), $J_g = qn_i w / 2r\tau$ ile verilir. Tüketim bölgesinin genişliği $V_d + V$ ile orantılı olduğu için, akım yoğunluğu ters uygulama gerilimi ile artar. Jenerasyon akımı yüksek engel yüksekliği durumlarında ve kısa ömürlerin söz konusu olduğu yarıiletkenlerde çok önemlidir. Özellikle yüksek sıcaklıklardan ziyade düşük sıcaklıklarda çok önemlidir.

2.3.5. T_0 etkili akım iletimi/anomaly

İdealite faktörünün (n) ideal durumdan ($=1$) çok büyük olması; hayali kuvvet etkisine, arayüzey durumlarının yoğunluğuna ve arayüzey tabakanın kalınlığına atfedilebilir [3,4] ve bu durumlarda n neredeyse sıcaklıktan bağımsızdır. Fakat n 'nin birden büyük olması eğer termoiyonik alan emisyonundan veya tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından kaynaklanıyorsa, idealite faktörü n sıcaklığa bağlıdır. Genelde, Schottky diyotların

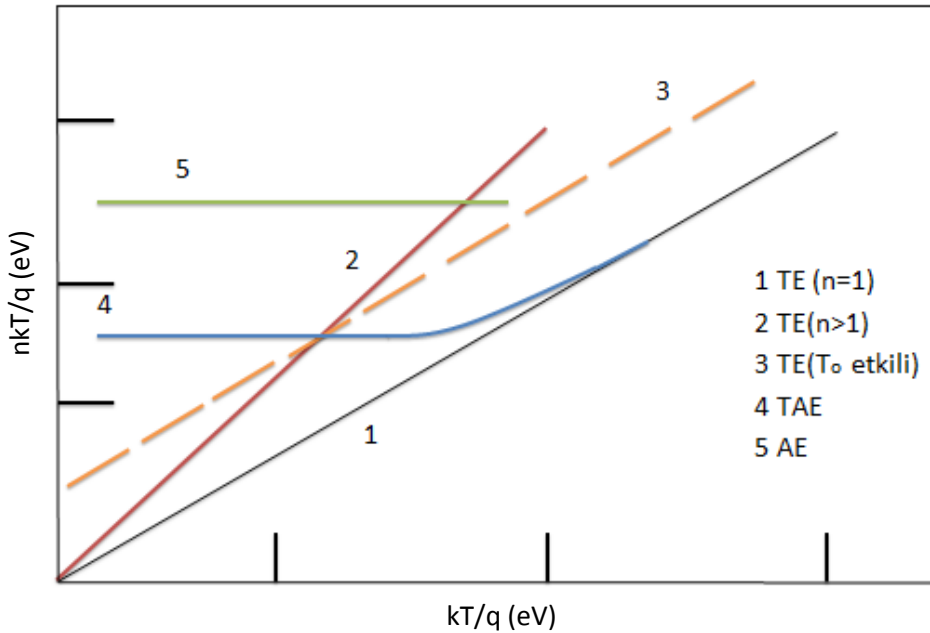
çoğunluğunda n sıcaklığa bağlıdır ve bu bağıllık düşük sıcaklıklarda daha fazladır. T_o etkili I-V veya J - V ($J=I/A$) karakteristiği,

$$J = A^{**} \cdot T^2 \exp \left[-\frac{q\phi_b}{k(T+T_o)} \right] \cdot \left\{ \exp \left[\frac{qV}{k(T+T_o)} \right] - 1 \right\} \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir [3]. Burada T_o geniş bir sıcaklık aralığında sabit bir sıcaklık olup voltajdan bağımsız olan bir parametredir. n 'nin sıcaklığa bağıllığı deneysel olarak $n=1+T_o/T$ olarak veya $n=(T+T_o)/T$ şeklinde ifade edilir. Yani n değeri birden büyük ve sıcaklığın tersi ($1/T$) ile lineer olarak artıyorsa, eşitlik 2.10' da köşeli parantez içindeki üstel ifade n değerini içermelidir:

$$J_n = A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

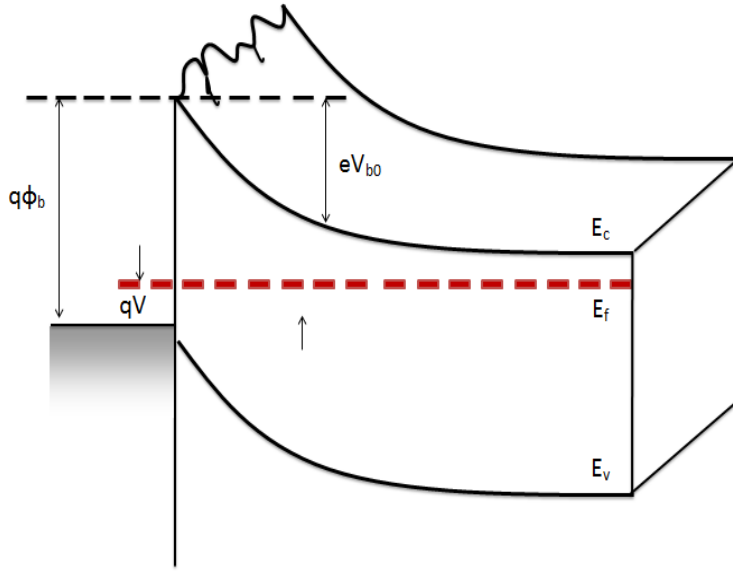
Sıcaklığın fonksiyonu olarak bazı temel akım-iletim mekanizmaları Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Burada, 1,2 ve 3 eğrileri, TE teorisinin baskın olduğu mekanizmaları göstermektedir ve bunlar sırasıyla $n=1$ (ideal), $n > 1$ ve T_o etkili durumlarına karşılık gelmektedir. 4 ile gösterilen eğri TAE ve 5 ise AE iletim mekanizmalarını göstermektedir [4].



Şekil 2.5. Farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren $n(kT/q)$ - (kT/q) grafiği

2.4. Engel Homojensizliği

Schottky kontaklarda, engel yüksekliği, $I-V$ ve $C-V$ ölçümleri için uygulamada farklı sonuçlar verir. Bu durum ölçümlerin doğasından kaynaklanır. Çünkü $I-V$ ölçümleri doğru beslemde değerlendirilirken, $C-V$ ölçümleri ters beslemde değerlendirilmektedir. Dolayısıyla ters beslem $C-V$ ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği genelde doğru beslemde bulunandan yaklaşık E_F enerji seviyesi kadar daha büyük olur. Doğru beslem altında Schottky kontaklar için $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi ve idealite faktörünün 1'den büyük olması farklı şekillerde açıklanmaktadır. Yarıiletken veya metalden kaynaklanan M/S arayüzeyinin düzgün olmaması, engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimlerine neden olarak homojen olmayan bir dağılıma neden olacaktır. Yarıiletken yüzeyinin yapısı, metaldeki atomik yapı, dislokasyonlar ve tanecik sınırlarının (grain boundary) yanı sıra metalin kalınlığının değişimi arayüzeyin pürüzlü olmasına neden olabilir. Bu potansiyel değişimlerin/engel homojensizliklerinin bir başka nedeni de alan emisyonundan dolayı bölgesel engel yüksekliğinin azalması olabilir [37,45]. Ayrıca arayüzeyde farklı metalik fazların etkisi ile de bu yerel değişimler ortaya çıkabilir. Bunun yanı sıra yarıiletkendeki donör atomlarının rasgele dağıldığı düzenli bir örgüde bu atomlar arasındaki düzensiz mesafeler de bahsedilen potansiyel değişimlerin bir başka nedeni olabilir [27,37,45]. Gaussian dağılım Şekil 2.6 da verildi. Şekilden de görüldüğü gibi M/S arayüzeyinde oluşan engel homojen olmayıp irili-ufaklı birçok küçük engelden veya patikalardan oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ölçülen düşük engel yükseklikleri görünen engellerdir. Yani elektronlar düşük sıcaklıklarda yeterince termal enerji kazanamadıklarından engelin tepesinden değilde bu patikalardan ya da daha düşük engeliciklerden rahatlıkla geçip akım artışına yol açmaktadır. Dolayısıyla bu yüksek akım da idealite faktörünün artmasını yol açar.



Şekil 2.6. Homojen engel yüksekliğine sahip olmayan bir Schottky kontağın V gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Perilenin Özellikleri

Bu çalışmada Au/C₂₀H₁₂/n-Si Schottky bariyer diyotlar (SBD), (100) yönelimli, 3 inç çaplı, 280 µm kalınlıklı ve 15-25 Ω cm özdirençli fosfor (P)-katkılı (n-Si) tek kristal Si üzerine büyütülmüştür. Metal olarak yüksek saflıktaki (%99.999) altın (Au) ve arayüzey tabakası olarak da perilen (C₂₀H₁₂) spin kaplama yöntemi kullanılarak n-Si üzerine büyütülmüştür. Kullanılan bu perilen arayüzey tabakasının özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir. Au/C₂₀H₁₂/n-Si Schottky engel diyotların (SBD) hazırlanma aşamaları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır:

3.2. Kristal Temizleme

Metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) ve metal-polimer-yarıiletken Schottky diyotları gibi elektronik aygıtlar hazırlarken birçok yüzey kusurunu ortadan kaldırmak için yarıiletken kristalin hem mekanik hemde kimyasal olarak çok iyi temizlenmesi gereklidir. Üstelik tüm temizleme aşamalarının mümkün olduğu kadar düşük basınçta ve temiz ortamda yapılması son derece önemlidir. Bu nedenle n-tipi Si yarıiletkenin kristal yüzeyinde tüm kimyasal temizleme ve durulama işlemleri ultrasonik banyoda ve ticari marka (MERCK) kimyasal asitler ile deiyonize su kullanılarak gerçekleştirildi. Yarıiletken kristalin temizlenmesinde öncelikle; su arıtma sisteminde hazırlanan yüksek özdirençli (~16-18 MΩ.cm) deiyonize su kullanılarak temizleme esnasında kullanılacak beher, cımbız vb. araç ve kaplar asetonla iyice yıkanıp deiyonize su ile durulandıktan sonra etüv fırınında yaklaşık 80 °C ısıtılarak sterilize edildi.

Perilenli Au/p-Si Schottky engel diyotları, 3 inch çaplı, (100) yönelimli, 280 µm kalınlıklı, 15-25 Ω cm özdirençli, P-katkılı (n-tipi) Si tek kristali üzerine büyütülmüştür. Si yarıiletken, trichloroethylene ve ethanol içinde ultrasonic olarak temizlendi, CP4 (HNO₃:HF:COOH C₂H₅:H₂O=3:1:2:2 molar oranlarında) çözeltisinde 30 s bekletildi, propylene glycol ile durulandı ve azot (N₂) gazı ile kurutuldu. Temizleme işleminden sonra Si yarıiletken sıra ile H₂SO₄ ve H₂O₂ % 20 HF, 6HNO₃:1HF:35H₂O % 20 HF çözeltilerine iyice çalkalandıktan sonra de-iyonize suda durulandı. Perilen'nin (C₂₀H₁₂) büyütülmesinden önce, organik kirliliklerin temizlenmesini sağlamak için, Si tabakası 10⁻⁸

mbar/Torr basınç altında 400 °C ye kadar ısıtıldı ve saf Ar ortamında temizlendi. Perilen ($C_{20}H_{12}$) ara yüzey polimer tabakasını büyötmek için alt taş hazırlandıktan sonra büyötmö odasına alındı. Kimyasal olarak temizlenen yarıiletkenin mat yüzeyi, omik kontakğı oluşturmak için aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirildi. Omik kontakların oluşturulmasında Şekil 3.1'de verilen metal maske kullanıldı. Yüksek vakumlu metal buharlaştırma sisteminde oluşturulan $\sim 10^{-6}$ Torr basınç altında, üzerinden akım geçirilen tungsten flaman yardımıyla, ~ 2000 Å kalınlığında oldukça saf (99.999 %) Au termal olarak buharlaştırıldı ve düşük dirençli bir omik kontak oluşturmak için 500 °C de tavlandı. Buharlaştırma ile elde edilen arka kontakğın, Si yaprağın üzerine çöktürölmesi ile omik kontak elde edilmiş oldu. Daha sonra numunenin iyi omik kontak karakterine sahip olup olmadığı I-V ölçüm metodu kullanılarak oda sıcaklığında test edildi ve akım ile voltaj arasında bir lineerlik gözleendiğinden omik kontakğın oluştuğuna kanaat getirildi.



Şekil 3.1. Omik kontak oluşturmak için kullanılan maske

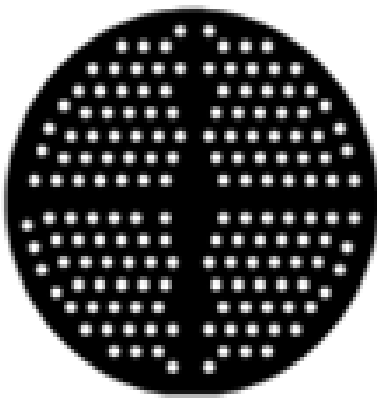
Çizelge 3.1. Perilen'in bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

Malzeme	Perilen
Diğer bazı adları	Perilen, peri-dinaphthalene, alpha perilen, Perilene; dibenz [de,kl]anthracene;
Molekül formülü	(C ₂₀ H ₁₂)
Görünümü (300°K)	Kahverengi, Katı
Yanma noktası	228,566 °C
Erime noktası	276-279 °C
Kaynama noktası	467,523 °C
Yüzey gerilimi	63,4850006103516 dyne cm ⁻¹
Yönelimleri (dimentions)	114x156 (7kB)
Molar kırıcılığı	90,307 cm ³
Molar soğurganlığı	38,500 M ⁻¹ cm ⁻¹ (435,7 nm de)
Yoğunluğu	1,287 gr.cm ⁻³
Buharlaşma ısısı	70,161 kJ mol ⁻¹
Buhar basıncı	0 mm Hg (25 °C de)
Molar hacmi	196,094 cm ³
Molar ağırlığı	252,31 gr mol ⁻¹
Kırılma indisi	1,887
Duygunluk (polarizability)	35,8x10 ⁻²⁴ cm ³
Suda çözünürlüğü	1,2x10 ⁻⁵ mmol.L ⁻¹ (diğer bütün polycyclic aromatic hydrocarbon'larda olduğu gibi çok düşüktür)
Bazı dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> • Polimerler ile oluşturulan karışımın mol kütlelerini düşüktür. • Oluşum esnasında kullanılan çözücünün polimerden uzaklaştırılması gerekir, bu da maliyeti yükseltir. • Çözücü dikkatli seçilmezse çevre kirliliği oluşturur. • Çok yüksek sıcaklıklara ve yüksek elektrik alana karşı dayanıklı değildir.

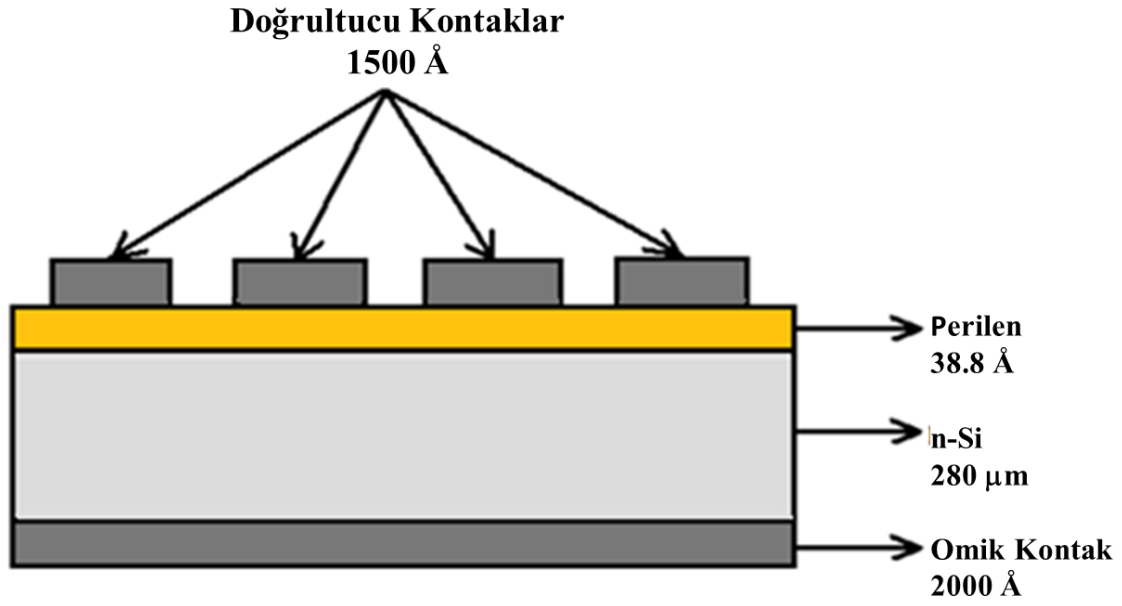
dönmenin etkisiyle wafer üzerine tamamen yayılması sağlanır. Bu yöntem sayesinde nanometre mertebesinde kalınlığa sahip ince filmler büyötmek mümkün olmaktadır. Genelde, kaplanacak olan malzeme uçucu bir sıvı ile karıştırılarak uygulanır ve hedeflenen kalınlığa ulaşınca kadar sıvı yarıiletken yüzeyine yayılırken dönme de devam eder.

3.4. Au/Perilen/n-Si Schottky Engel Diyotların Hazırlanması

Metal-Polimer-yarıiletken (MPS) tipi Schottky engel diyotları elde etmek için perilen ($C_{20}H_{12}$) (polycyclic aromatik hidrokarbon), 1M n-haxane (C_6H_{14}) içinde $70\text{ }^{\circ}C$ de çözüldü ve spin kaplama sistemi ile Si tabakasının parlak yüzeyi kaplandı. Üzerine perilen kaplanmış yüzey aşağı gelecek şekilde bakır maske üzerine yerleştirilerek yine metal-buharlaştırma sistemine alındı. Doğrultucu kontakın oluşturulmasında Şekil 3.5' de verilen metal (bakır) maske kullanıldı. Oldukça saf (99,999 %) Au yaklaşık 10^{-6} Torr basınç altında kristalin parlak yüzeyine küçük dairecikler (1 mm çaplı ve $\approx 1500\text{ \AA}$ kalınlığında) oluşturuldu. Bu şekilde Au/ $C_{20}H_{12}$ /n-Si (MPS) tipi Schottky engel diyotları (SBDs) oluşturma işlemi tamamlanmış oldu ve onların şematik diyagramı Şekil 3.4 'te verildi. Elde edilen bu MPS tipi SBD' lafın sıcaklığa bağlı akım-voltaj (I-V) ölçümleri, 160-380 K sıcaklık aralığında ve VPF-475 kriyostat içinde Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı kullanılarak gerçekleştirildi. Bütün bu elektriksel ölçümler oda sıcaklığında ve IEEE-488 AC/DC Çevirici kart takılı bilgisayar kullanılarak yapıldı.



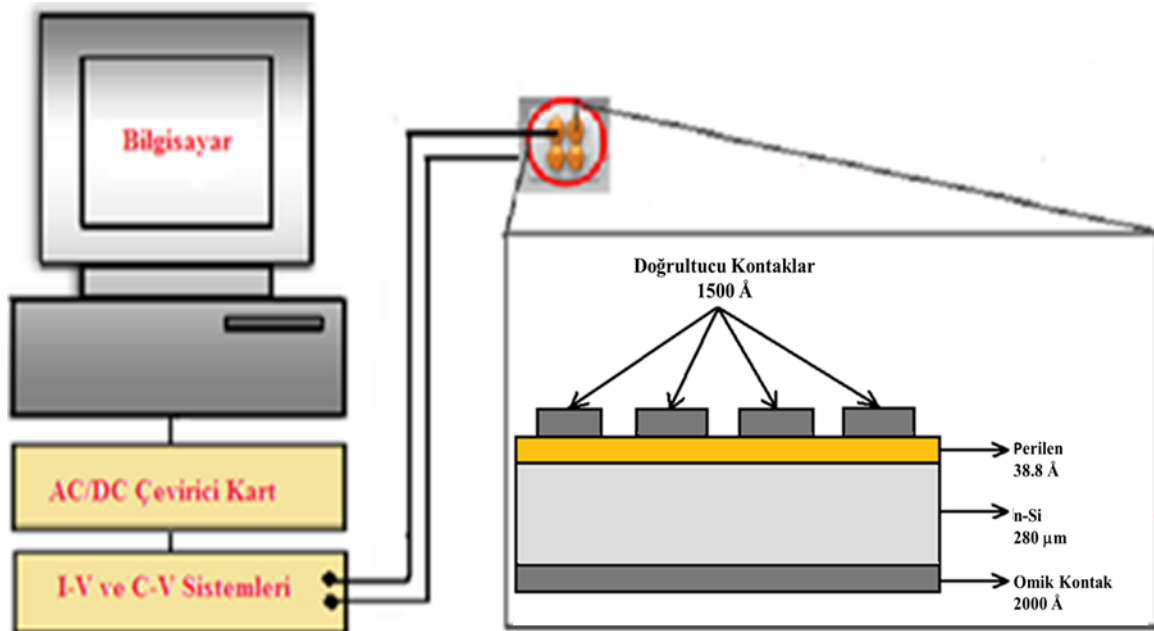
Şekil 3.3. Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maske



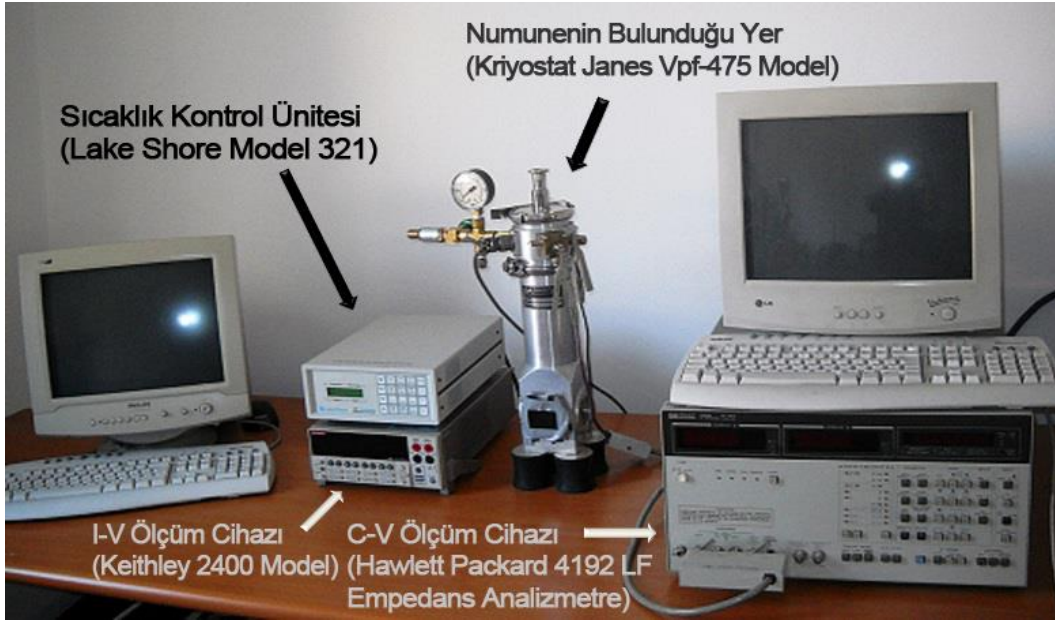
Şekil 3.4. Au/C₂₀H₁₂/n-Si (MPS) tipi SBD'un şematik diyagramı

3.5. Deneysel Ölçüm Sistemi

Deneysel ölçüm sistemi Şekil 3.5 de ve sisteme ait görünüm ise Resim 3.2' verilmiştir. Hazırlanan numunenin elektriksel karakteristikleri için gerekli tüm ölçümler, Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Yarıiletken Laboratuvarlarında gerçekleştirildi.



Şekil 3.5. Deneysel Ölçüm Sisteminin Şematik Görünümü



Resim 2.2. Deneysel ölçüm sistemi

3.5.1. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı

Keithley 2400 akım-gerilim ölçüm cihazı, hem akım kaynaklı gerilim ölçümü, hem de gerilim kaynaklı akım ölçümü yapabilmektedir. $\pm 1 \mu\text{V}$ ' dan $\pm 200 \text{ V}$ ' a gerilim ölçümü ve $\pm 10 \text{ pA}$ ' den $\pm 1 \text{ A}$ ' e kadar akım ölçümü yapabilmektedir. $\pm \% 0,15$ hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 ara yüzey veri yoluna sahiptir. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı Resim 3.4' de gösterilmiştir.



Resim 2.3. Keithley 2400 akım-gerilim kaynağı

3.5.2. HP 4192A LF empedans analizörü

HP 4192A LF empedans analizörünün frekans ölçüm sınırları 5Hz-13 MHz olup, osilatör genlik aralığı 5 mV-1 V arasındadır. Doğru akım, ileri ve ters besleme özelliğine sahip cihazın -35 V tan +35 V' a kadar ayarlanması mümkündür. Aynı anda empedans, admitans, kapasitans, indüktans ölçülebilmekle birlikte, aralarındaki faz değerlerini ve kalite faktörlerini de ölçülebilmektedir. $\pm\% 0,15$ hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 ara yüzey veri yoluna sahip olup test point yazılımı yardımı ile bilgisayar ile kontrol edebilmek mümkündür. HP 4192 ALF empedans analizörü Resim 3.5' de gösterilmiştir.

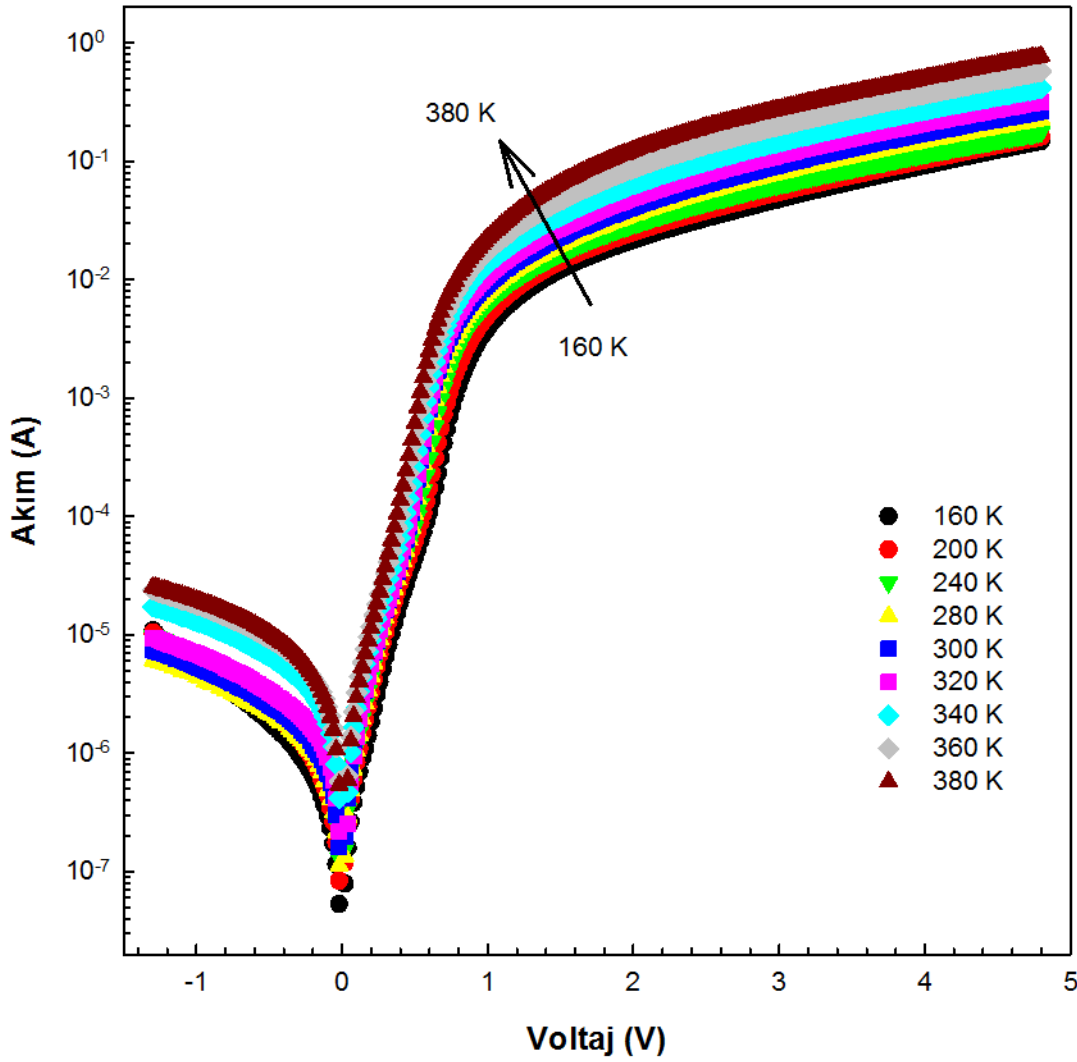


Resim 2.4. HP 4192A LF empedans analizörü

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Sıcaklığa bağlı engel yüksekliği (BH) ve idealite faktörünün (n) değerlendirilmesi

Şekil 4.1’de 160-380 K sıcaklık aralığında Au/C₂₀H₁₂/n-Si Schottky engel/bariyer diyotunun (SBD) yarı logaritmik I-V karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 4.1. Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD diyotu için 160-380 K sıcaklık aralığında deneysel ileri ve geri beslem I-V-T karakteristikleri

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi, ileri beslem LnI-V grafiği orta beslem voltaj bölgesinde ($0,1 \text{ V} \leq V \leq 0,5 \text{ V}$) her sıcaklık için lineer bir bölgeye sahiptir. Ancak R_s ve arayüzey tabakası olan C₂₀H₁₂’nin ortak etkisiyle ileri pozitif beslem voltaj alanında önemli ölçüde lineerlikten sapmaktadır [2,3,5,50,52,58,59]. Geri besleme bölgesinde uygulanan sıcaklığın

etkisiyle akımda yavaşça bir artış görülmektedir. Ancak metal elektrotlarda oluşan görüntü yük etkisi ve M/S arayüzeyinin etkisiyle sızıntı akımına bir doyuma ulaşılır görünmemektedir [2,71,72]. Bir SBD için, arayüzel tabakasının yokluğunda veya varlığında I ve V arasındaki ilişki ileri besleme bölgesinde ($V > 3kT/q$) TE teorisine göre aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [1-3]:

$$I = \underbrace{AA^*T^2 \exp(-q\Phi_{bo}/kT)}_{I_o} \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

Burada eşitlik (1) deki ön faktör geri doyum akımı (I_o) olarak belirlenirken IR_s ifadesiyle de R_s üzerinde gerilim düşmesi, A^* ile de n tip Si için $112 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olarak bilinen efektif Richardson sabitidir [3,2]. A diyotun alanını belirtir ve diğer değerler literatürde sıkça geçen niceliklerdir [3]. Ln I-V grafiğinin lineer bir kesitinden her sıcaklık için I_o 'ın değeri elde edilebilir. Yine bu grafiklerin eğimli bölgelerinden her sıcaklık için aşağıdaki eşitlikle idealite faktörünün (n) değeri hesaplanabilir [3,2]:

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

Buradan, Φ_{Bo} 'ın değeri, teorik A^* değeri (n tip Si için $112 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$) kullanılarak ve her sıcaklık için I_o değeri alınarak aşağıdaki gibi elde edilir [3,4]:

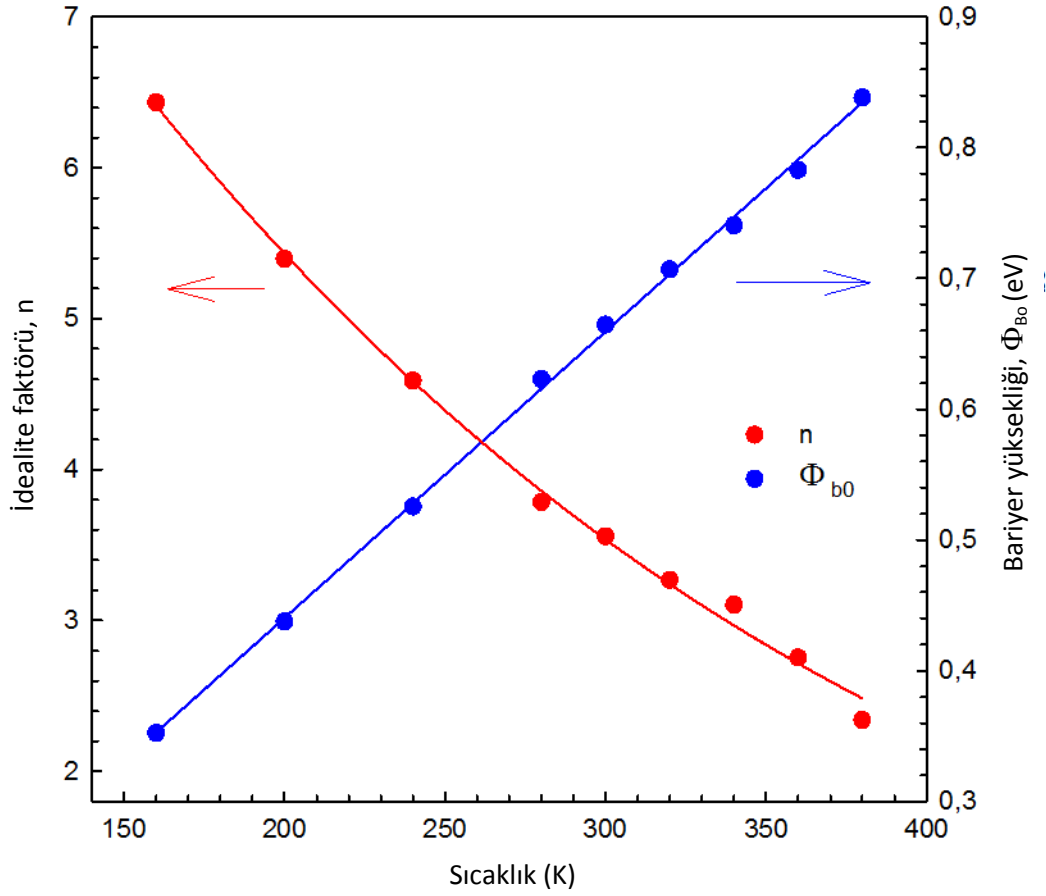
$$\Phi_{bo} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_o} \right) \quad (4.3)$$

Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD' nin sıcaklığa bağlı elde edilen deneysel I_o , n ve Φ_{Bo} değerleri Tablo 1'de çizelgeleştirilmiştir.

Çizelge 4.1. 160-380 K aralığında Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD'nin sıcaklığa bağlı I₀, n, Φ_{B0}, n.T, R_s ve R_{sh} değerleri

T (K)	I ₀ (A)	n	Φ _{B0} (eV)	nT (K)	R _s (at 5V) (Ω)	R _{sh} (at 0V) (Ω)
160	1,97E-07	6,43	0,352	1030	30,22	189605
200	3,64E-07	5,40	0,438	1079	27,95	119373
240	5,09E-07	4,59	0,526	1101	25,73	88429
280	4,62E-07	3,79	0,623	1060	20,21	84495
300	5,92E-07	3,56	0,665	1067	17,14	70411
320	7,26E-07	3,27	0,707	1046	14,14	51768
340	1,17E-06	3,10	0,741	1055	10,81	30023
360	1,36E-06	2,75	0,783	992	7,751	22395
380	1,06E-06	2,34	0,838	889	5,82	24525

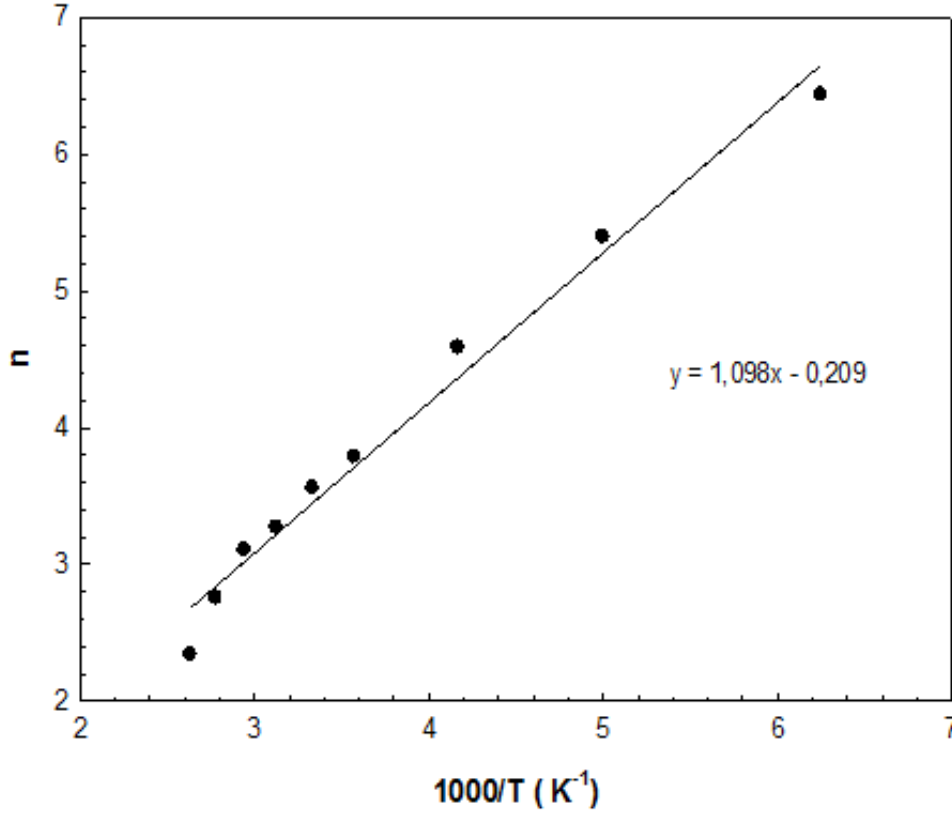
Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi bu değerler sıcaklığın güçlü bir fonksiyonu olarak sırasıyla 160 K'de $1,974 \times 10^{-7}$ A, 6,434, 0,351 eV ve 380 K'de $1,061 \times 10^{-6}$ A, 2,34, 0,836 eV olarak değişim gösterirler. Yine Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2'den sıcaklığın arttığı durumlarda Φ_{B0} değerleri artarken n değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.2. Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD diyodu için 160-380 K sıcaklık aralığında n ve Φ_{Bo} 'nun sıcaklığa bağlı değişimi

Φ_{Bo} 'nun sıcaklıkla artışı bize M/S arayüzeyi boyunca akım dağılımının sıcaklıkla aktive olan bir süreç olduğunu gösterir. Düşük sıcaklıklarda elektronlar düşük bariyer ya da yamaları aşmaya daha meyillidir. Bu yüzden akım iletimi akımın yamalardan ya da düşük bariyerlerden akmasının desteklendiği bir yol izlerken bu da yüksek bir n değerine neden olur [66-74,51]. Sıcaklık arttıkça yüksek bariyerleri aşmak için daha fazla taşıyıcının gerekli termal enerjiye sahip olabildiği görülür. Artan sıcaklıkla Φ_{Bo} artarken bariyer yüksekliğinin birbirini dengeleyen bir pozitif sıcaklık katsayısı ($\alpha = \Delta\Phi_{Bo}/\Delta T$) ve Si SBD'ler için Cowell ve Rideout tarafından geliştirilen bir de negatif sıcaklık katsayısı [34] veya Si için -4.73×10^{-4} eV/K'a eşit olan gizli bant geçişi vardır. Açık ki her bir durum için olan n değeri bir bütünün düşünülmesi durumundaki n değerinden daha büyük olacaktır. Bunun örnekleri C₂₀H₁₂ arayüzey tabakasında ve C₂₀H₁₂/n-Si arayüzeyinin yüzey durumlarının (N_{ss}) parçacık yoğunluğu dağılımında görülebilir [2,4,55,8]. Ayrıca, Şekil 4.3'te görüleceği gibi n'in sıcaklıkla değişimi sıcaklığın tersiyle (1/T) doğrusal olarak şöyle bir ilişki gösterir:

$$n(T) = n_o + \frac{T_o}{T} \quad (4.4)$$



Şekil 4.3. 160-380 K aralığında Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD larda n 'nin 1000/T'ye göre değişimi

n değerinin sıcaklıkla bu şekilde bağlılığı literatürde “T_o etkisi” veya “T_o anomalisi” olarak bilinir [4,5,21]. n_o ve T_o değerleri sabittir ve Şekil 4.3’de eğrinin kesim ve eğiminden sırasıyla 0.209 ve 1098 K olarak bulunur.

n değerinin birden daha büyük olması; TE teorisi, görüntü kuvvet etkisi, yüzey durumları, arayüzey tabakası, tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TFE) veya Alan Emisyonu (FE)) ve oluşum tekrar birleşim teorileriyle açıklanamamaktadır [3-9,21-46]. Artan sıcaklıkla birlikte Φ_{B0}’daki artış ve n’deki azalış TE teorisinden sapmanın bir kanıtı olabilir ve bu durumda TFE veya FE gibi akım tünelleme mekanizmalarının değerlendirmesinin daha olası garantili bir yol olduğu önerilebilir [21-46]. Diğer taraftan bu çalışmada seçilen n-Si 15-25 Ω.cm öz dirence veya 2,87x10¹⁴ cm⁻³-1,72x10¹⁴ cm⁻³ konsantrasyon aralığında verici atomlarına sahiptir. Bilindiği gibi FE ve TFE teorileri akım tünelleme parametresi E_o (=nkT/q) nın sıcaklıkla değişiminde şöyle bir değişikliği öngörmektedir [3,36]:

$$n_{min} = \frac{E_{oo}}{kT} \coth\left(\frac{E_{oo}}{kT}\right) = \frac{E_o}{kT}, \quad \text{with} \quad E_{oo} = \frac{h}{4\pi} \left(\frac{N_D}{m_e^* \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (4.5)$$

Burada m_e^* elektronların etkin kütlesini, ϵ_s ise Si için elektrik geçirgenlik değerini ve diğer birimler genel anlamlarını ifade etmektedir. E_{oo} değeri, $m_e^*=0,19 m_o$ ($m_o=9,1 \times 10^{-31}$ kg), Si geçirgenliği $\epsilon_s=11.8 \epsilon_o$ ve boşluğun geçirgenliği 8.85×10^{-12} F/m kullanılarak, 0,21 meV olarak tespit edildi. E_{oo} 'ın 0.21 meV olarak bulunan deneysel değerinin düşük sıcaklıklarda bile termal enerjinin (kT/q) teorik değerinden daha düşük olduğu açıktır. Bu sonuçlar hem FE hem de TFE teorilerinin ölçülen sıcaklıklarda muhtemel olmadıklarını doğrulamaktadır.

Genellikle, her sıcaklık değeri için bulunan yüksek n değeri BH'nin homojen dağılmamasına bağlanır [26-37]. Diğer bir deyişle engel düşük BH yamalarının düzgün bir dağılım gösterdiği bariyer yapılarına sahiptir. Köşelere yakın bulunan yamaların sayısı çevre ile orantılıdır [43]. Diyotlardaki akım sıklıkla bu düşük yamalardan geçmeye meyilli olduğundan n ' in değerinde artış kaçınılmaz olacaktır. Bu yüzden BH elde etmek için diğer bir yol olan Φ_{B0} ile n arasındaki ilişkiyi kullanmaktır[51,75]. Ayrıca ideal olmayan SBD'ler için mümkün akım dağılım mekanizmasını sorgulamak ve anlamak için eşitlik (1) yeniden düzenlenir ve şu şekilde ifade edilir [5-52,61-70]:

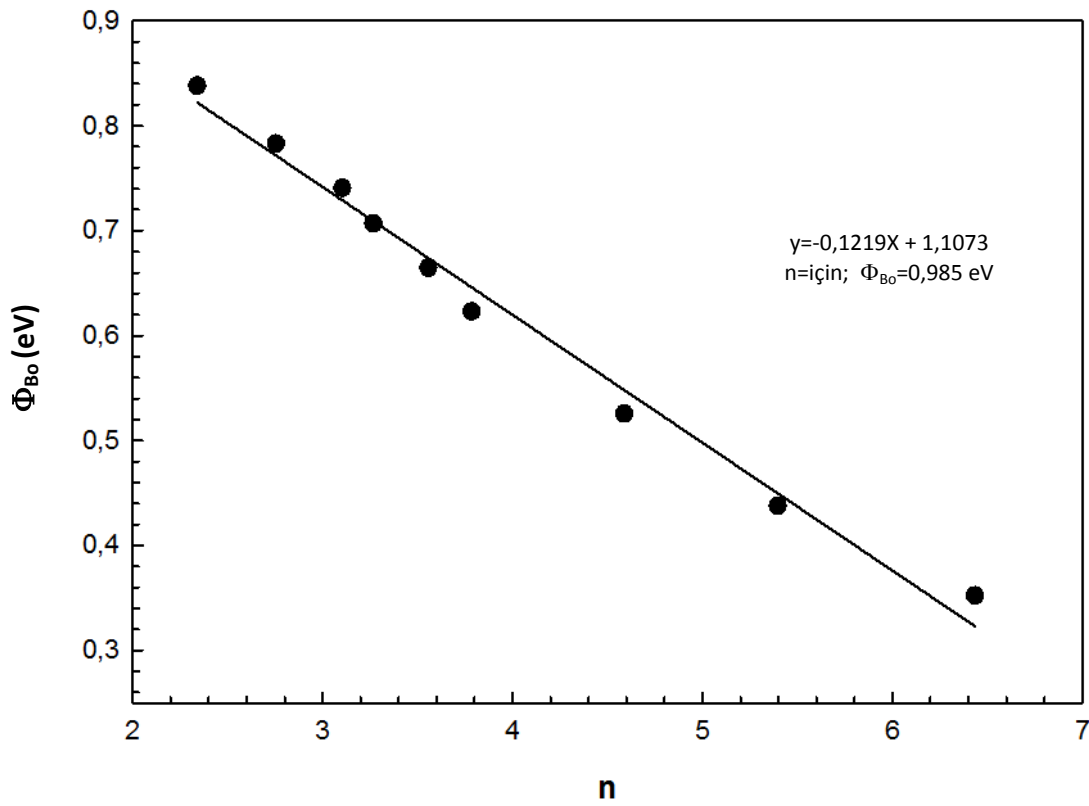
$$\Phi_{b0} = \bar{\Phi}_{b0} - \frac{q\sigma_s^2}{2kT} \quad (4.6)$$

Burada, $\bar{\Phi}_{b0}$, BH' nin ortalama değeri ve σ_s de standart sapmadır. Bu yüzden hem Φ_{B0} ile n hem de Φ_{b0} ile $q/2kT$ ' in ilişkisini inceleyen grafikleri kullanarak BH'lerin Gauss dağılımı (GD) gösterdiğine ilişkin bir kanıt elde edilir ve bunlar sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'da sunulur. Şekil 4.4'ten görülebileceği gibi $n=1$ için BH'ler ile idealite faktörleri arasındaki ilişkiden yaklaşık 0,983 eV'luk bir homojen BH sonucu elde edilmektedir. Ayrıca Şekil 4.5'da düz bir çizgi ile ifade edilen görünüşteki BH değeri ($\Phi_{app.} \equiv \Phi_{B0}$ olarak) kesit alanları için ortalama BH ($\bar{\Phi}_{B0}$) yi ve eğimli bölgeler için standart sapmayı (σ_s) verir. Bu yüzden bu değerler sırasıyla 1.123 eV ve 0.151 V olarak bulunur. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 birlikte tekrar gösterirler ki BH düzensizlikleri yüzünden n değerleri artışları ve Φ_{B0} azalışları kayda değer olacaktır.

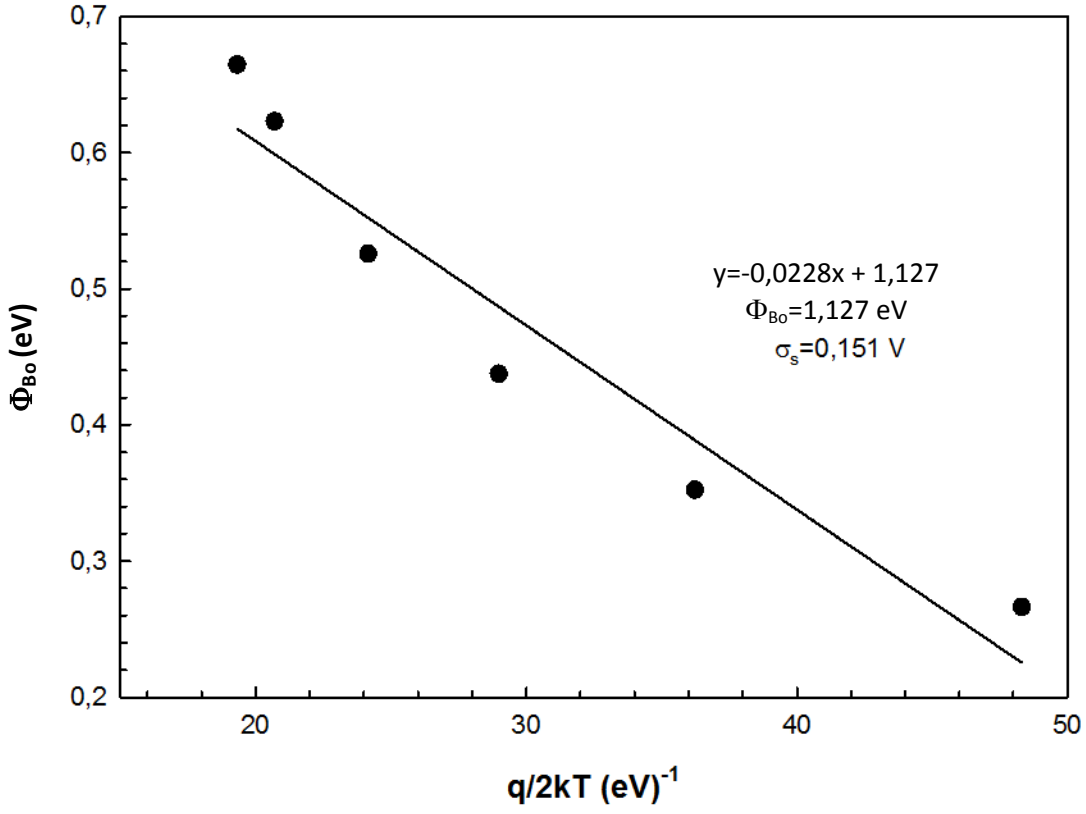
Şimdi $\ln(I_0/T^2)$ ile q/kT arasındaki geleneksel Richardson veya aktivasyon enerjisi grafikleri eşitlik (3) ve (6)'nın birleştirilmesiyle tekrar modifiye edilirse:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2 \sigma_o^2}{2k^2 T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\Phi_{Bo}}{kT} \quad (4.7)$$

Buradan, Şekil 4.5'dan elde edilerek eşitlik (7) de yerine konulan ve σ_s değeri kullanılarak ulaşılan modifiye Richardson grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.

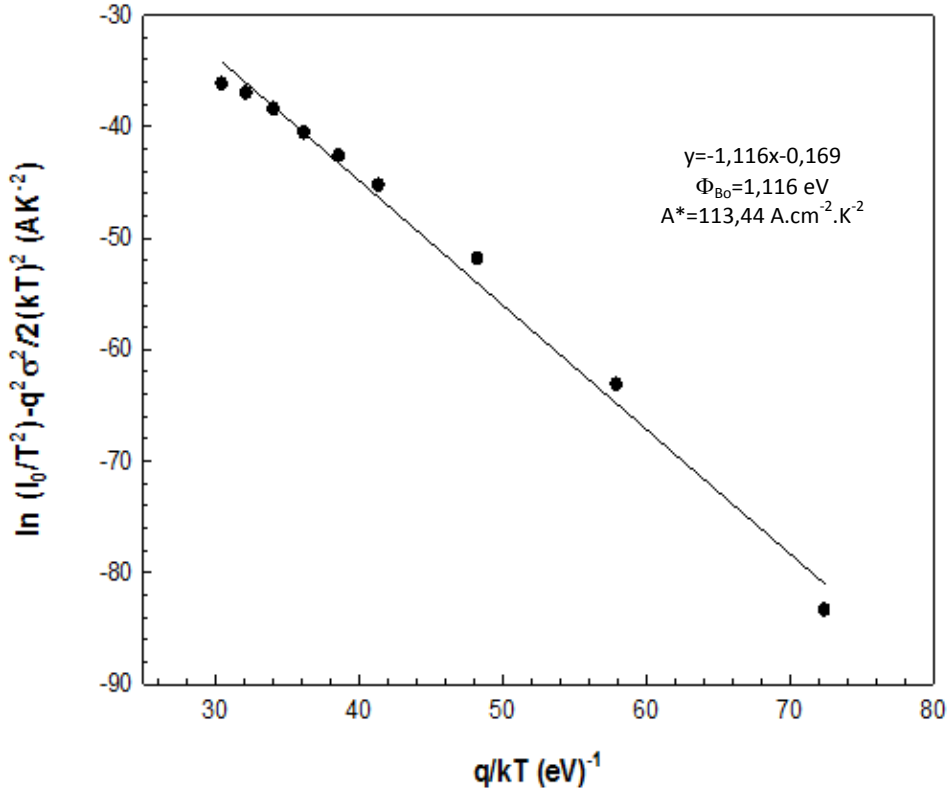


Şekil 4.4. 160-380 K aralığında Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için Φ_{Bo} ile n arasındaki ilişki



Şekil 4.5. 160-380 K aralığında Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için Φ_{B0} ile $q/2kT$ arasındaki ilişki

Şekilden görüleceği gibi tüm sıcaklık aralığında modifiye Richardson grafiğinin iyi bir lineer ilişkiye sahip olduğu açıktır. Bu yüzden $\bar{\Phi}_{B0}$ ve A^* değerleri sırasıyla grafiğin eğimli ve kesit bölgelerinden 1,16 eV ve 113,44 A.cm⁻²K⁻² olarak bulunur. Modifiye Richardson grafiğinden çıkarılan A^* değeri, n-Si için teorik olarak bilinen 112 A.cm⁻²K⁻² değeri ile uyumludur. Deneysel olarak bulunan $\bar{\Phi}_{B0}$ ve A^* değerleri sayesinde 160-380 K sıcaklık aralığında Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD' deki akım iletim mekanizması, bariyer yüksekliklerinin TE teorisine dayalı GD ile çok iyi bir biçimde açıklanabilmektedir.



Şekil 4.6. 160-380 K aralığında Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için modifiye Richardson $\ln(I_0/T^2) - q^2\Phi^2/2k^2T^2$ nin q/kT ye göre grafiği

4.2. Seri direncin (R_s) ve yüzey durumlarının (N_{ss}) enerji dağılımlarının belirlenmesi

Metal-yarı iletken tip (MS) SBD' nin kalite ve performansını arttırmak amacıyla, n-Si' nin üzerinde ince bir perilin (C₂₀H₁₂) arayüzey tabakası oluşturulmuştur. Bu organik/inorganik yapı veya metal-organik/polimer-yarı iletken (MPS) tip SBD'lerin N_{ss} ve R_s 'in azaltılmasında kullanışlı olması mümkündür. Yeterince kalın ($\geq 30\text{\AA}$) bir arayüzey tabakanın bulunması durumunda; yarı iletken ile denge halindeki N_{ss} 'in doluluk oranı değişimi, yarı iletkendeki Fermi enerji seviyesine göreli enerji seviyesindeki değişim ile belirlenir [8,75]. İdealite faktörü ($n(V)$) ve etkin BH (Φ_e) değerlerinin uygulanan öngerilim değerlerine bağımlılığı aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilebilir:

$$n(V) = (q/kT) \cdot V / \ln(I/I_0) \quad (4.8)$$

$$\Phi_e - \Phi_{Bo} = \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right) V \quad (4.9)$$

Buradan, N_{ss} 'in enerji yoğunluğu dağılımları Card ve Rhoderick tarafından [8] önerilen aşağıdaki eşitlikte voltaja bağımlı $n(V)$ değerlerinin $C_{20}H_{12}$ 'nin arayüzey dielektrik sabiti (ϵ_i) ve kalınlığı (δ) değerleri kullanılarak her sıcaklık için elde edilmiş ve Şekil 4.7'de verilmektedir.

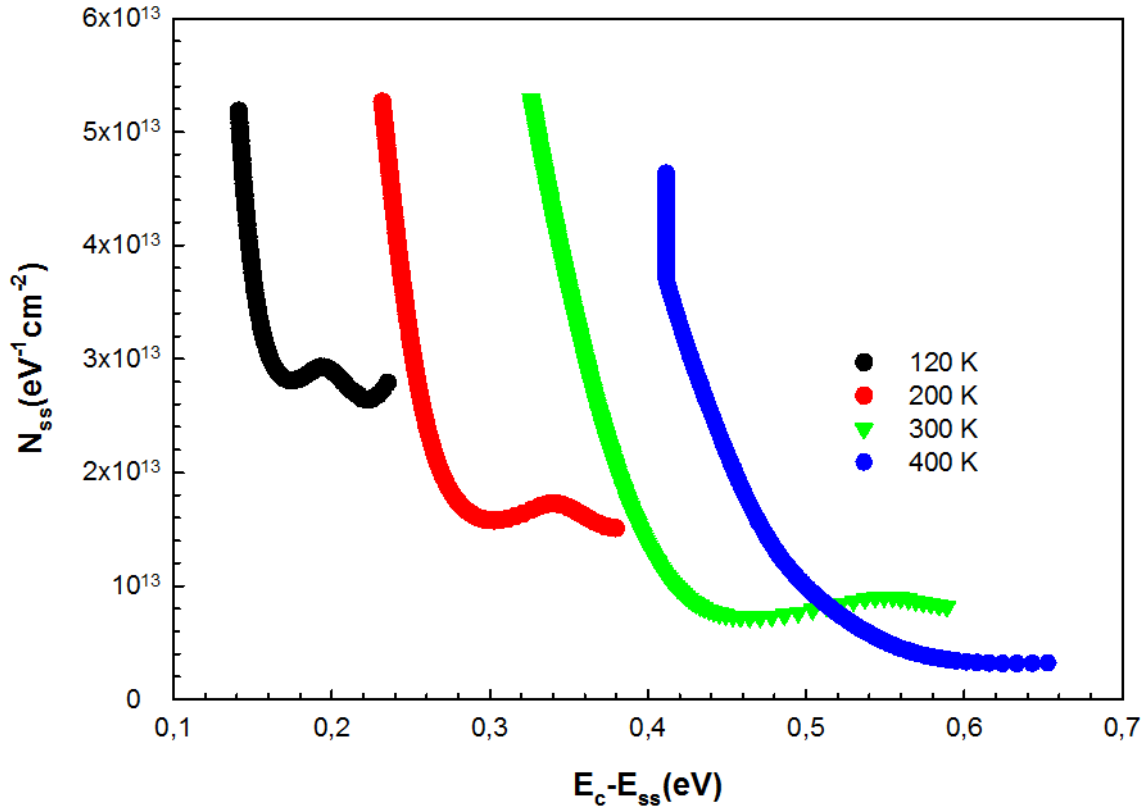
$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\delta}{\epsilon_i} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \quad (4.10)$$

Burada ϵ_i ve ϵ_s arayütsel tabakanın ve yarı iletkenin elektriksel geçirgenliği, δ arayüzey tabakanın kalınlığı, W_D mobil yük taşıyıcılarının elektrikle yüklendiği - ki bunlar iyonize alıcı veya vericilerden oluşan elementlerin bir karışımıdır - izolasyon alanının genişliğidir ve yeterli yükseklikteki frekanslarda (1 MHz) $C^{-2} - V$ grafiklerinden elde edilebilir. Eşitlik 11'de n-tipi yarı iletkenlerin yüzeylerindeki iletkenlik bandının (E_c) tabanındaki enerji seviyesi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.11)$$

Şekil 4.7'de görülebileceği gibi N_{ss} değeri her bir sıcaklık için Si'nin orta boşluğundan E_c 'nin tabanına doğru üstel artışa sahiptir ve sıcaklık etkisi altındaki yüklerin durumlarındaki yeniden yapılanma ve düzenlenmeye bağlı olarak bunların pozisyonları E_c 'nin kenarına doğru ötelenir. Buna ek olarak N_{ss} değerinin artan sıcaklık ile birlikte azaldığı açıkça görülmektedir. Genellikle N_{ss} ' in etkin olduğu değerler özellikle ileri beslemeli orta voltaj değerleridir. Ancak R_s ve arayüzey tabaka ise yeterince yüksek seviyeli ileri beslemeli voltajlarda etkilidir. Diyot üzerine voltaj uygulandığında bu; R_s , arayütsel tabaka (V_i) ve diyodun izolasyon alanı (V_d) arasında eşitlik 12'ye göre paylaşılacaktır:

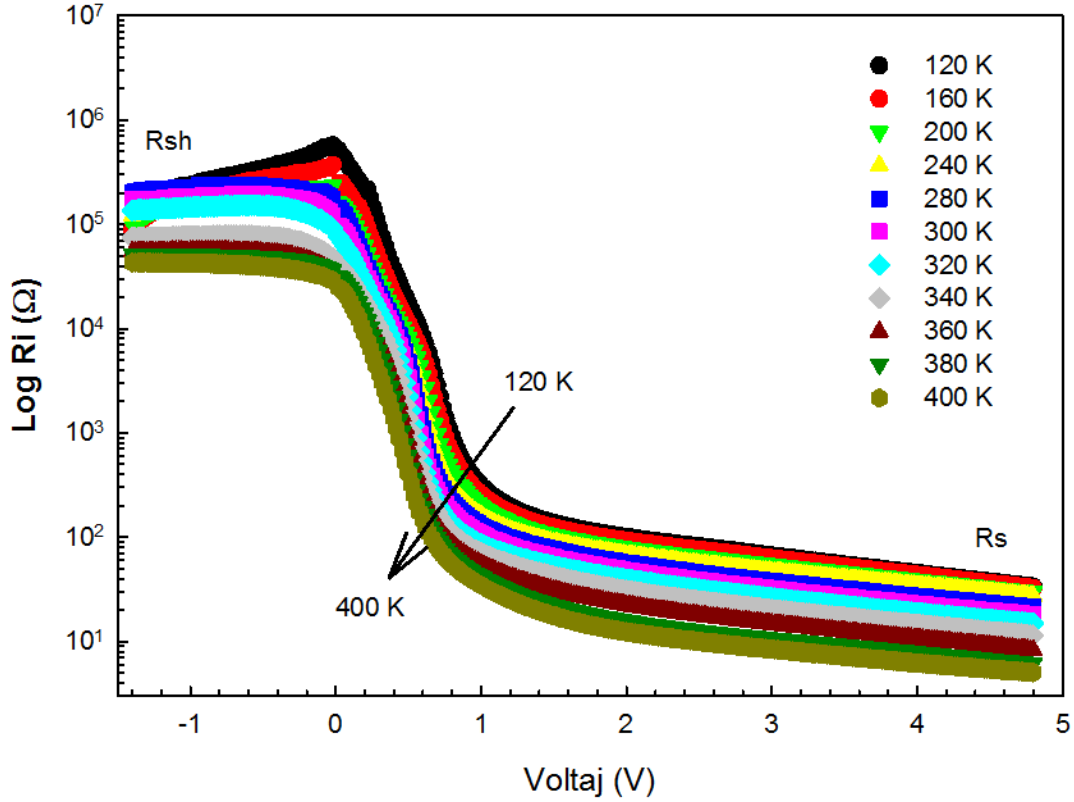
$$V_{app} = V_i + IR_s + V_d \quad (4.12)$$



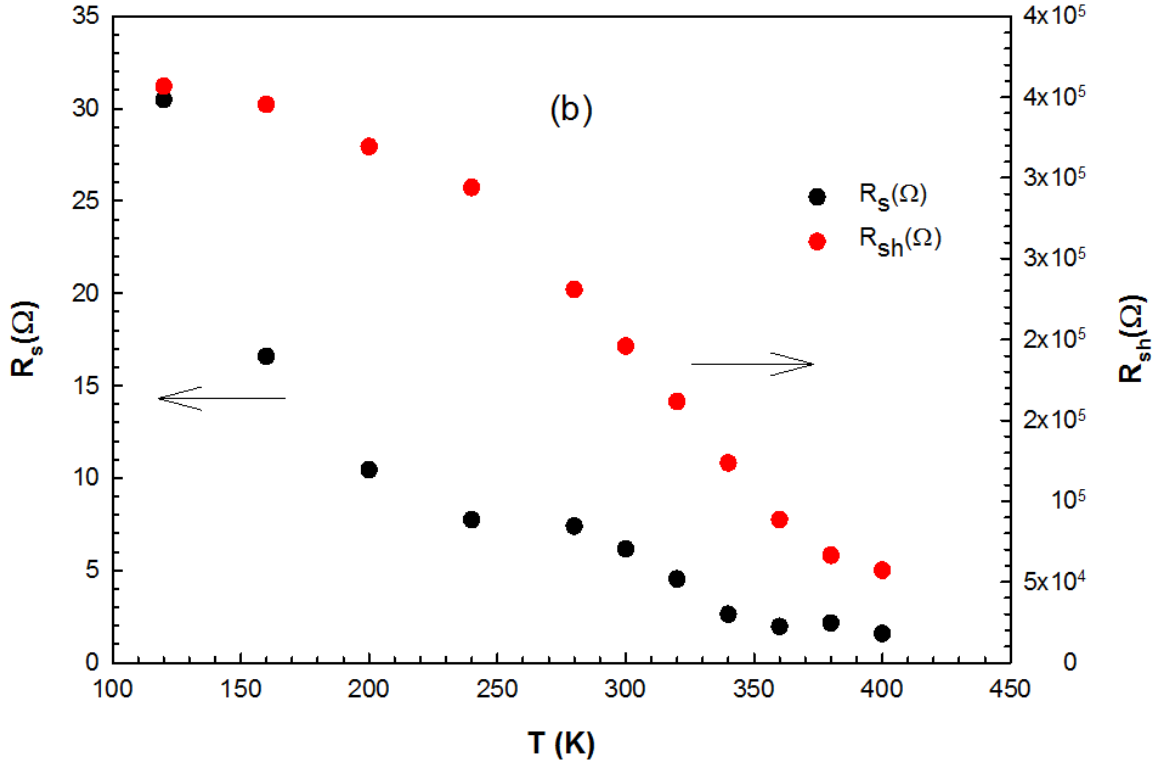
Şekil 4.7. Değişen sıcaklıklarda Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD’de N_{ss} ’in enerji yoğunluğu dağılım profilleri

Bu nedenle MIS veya MPS tipi SBD’lerin hem R_s hem de yüksek akım şönt direnç (R_{sh}) değerleri de bu diyotların performansını oldukça etkileyen önemli parametrelerdendir. Başka bir deyişle düşük R_s ve yüksek R_{sh} değerlerinin oluşumu uygulamada daha önemli bir problemdir ve elektriksel özelliklerin belirlenmesinde dikkate alınmalıdır. Öte yandan, ideal durumlarda R_s ve R_{sh} değerleri sırasıyla sıfıra yakın ve $10^9 \Omega$ ’dan yüksek olmalıdır. Direncin (R_i) veya R_s ’in değerlerinin düşük olması; M/S arayüzeyinde SBH’ın düşük olmasıyla ya da ağır katkılı ($>10^{17} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletken kullanarak BH boyunca geçişi arttırmakla sağlanabilir. R_s değerini azaltmak için özellikle yüzey hazırlama ve üretim işlemleri daha dikkatli yürütülmelidir. Bu şekilde R_s ’in etkisi minimize edilebilir. Böylece, N_{ss} etkisini düşürmek için 1 MHz’deki admittans ölçümleri (C-V ve G/ ω -V) ve Ohm kanunu ($R_i = dV_i/dI_i$) kullanılarak voltaja bağımlı R_i profili belirlenebilir çünkü yeterince yüksek frekansta ($f \geq 1$ MHz) yüzey durumlarının yükleri harici ac sinyaline karşılık veremezler[40]. I-V verilerinden Ohm kanunu kullanılarak farklı sıcaklıklar için $R_i - V$ grafiği elde edilmiş ve Şekil 4.8 (a) da gösterilmiştir. Bu şekilde gösterildiği gibi yeterince doğru yönlü besleme olduğunda, her sıcaklık için R_i ’nin değeri yaklaşık sabit bir değer

almakta ve bu da Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için R_s'in gerçek değerine karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, R_{sh}'in gerçek değerine karşılık gelen Ri değeri de her sıcaklık için neredeyse sabit bir değer alır. R_s'in (5 V'da) ve R_{sh}'in (0 V'da) sıcaklığa bağlı değişen değerleri de Şekil 4.8 (b)'de birlikte verilmiştir. Şekil 4.9 (a) ve (b)'de gösterildiği gibi R_s ve R_{sh} değerlerinin her ikisi de artan sıcaklık ile birlikte azalmaktadır.



Şekil 4.8. a) Farklı sıcaklıklar için R_i-V grafiği ve b) Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için sıcaklığa bağlı R_s ve R_{sh} değerleri



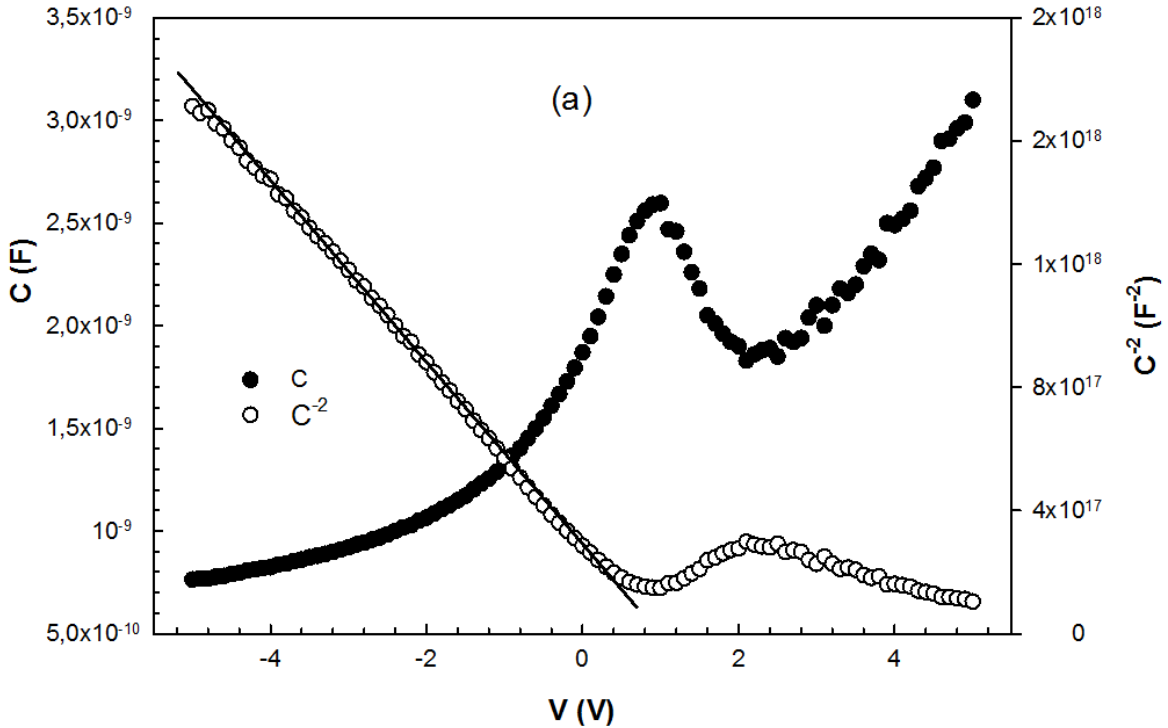
Şekil 4.8. (devam) a) Farklı sıcaklıklar için R_i -V grafiği ve b) Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için sıcaklığa bağlı R_s ve R_{sh} değerleri.

MIS tipi SBD için R_s 'in gerçek değerini ortaya çıkarmanın ikinci yolu, yeterli yükseklikteki frekansta ($f \geq 0.5$ MHz) kondansatör-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V) ölçümlerini kullanmaktır. Bu yüzden Au/C₂₀H₁₂/n-Si için C-V ve G/w-V ölçümleri HP 4192A LF empedans analizörünün oda sıcaklığında 500 kHz'de kullanılmasıyla gerçekleştirilmiş sırasıyla ve Şekil 4.9 (a) ve (b) de verilmiştir. Şekil 4.9 (a)' dan görüleceği gibi Si için yasak bant geçişinde, n-Si ve C₂₀H₁₂'nin arayüzeyindeki yüzey durumlarının parçacık yoğunluğu dağılımları yüzünden C değeri izolasyon bölgesindeki (yaklaşık 1 V'da) belirgin bir artışı ifade edecektir. MIS tipi SBD ile birlikte metal oksit yarıiletken (MOS) yapıları veya kondansatörleri için R_s 'in gerçek değerini düzgün biçimde ortaya çıkarmak için genel olarak diğerlerine göre daha uygun olduğu düşünülebilecek bir yöntem Nicollian ve Brews [40] tarafından geliştirilmiştir ve I-V verisinden elde edilmektedir. Diyodun tüm ölçüm aralığındaki R_i değerlerinin belirlenmesine olanak tanır. Bu metoda göre yeterince yüksek frekanslardaki ($f \geq 500$ kHz) güçlü birikim bölgelerindeki R_i değerleri, MIS veya MOS tipindeki SBD yapıları için R_s 'in gerçek değerine karşılık gelmekte ve aşağıdaki gibi ölçülen C_{ma} ve G_{ma} değerlerinden çıkarılabilmektedir [40]:

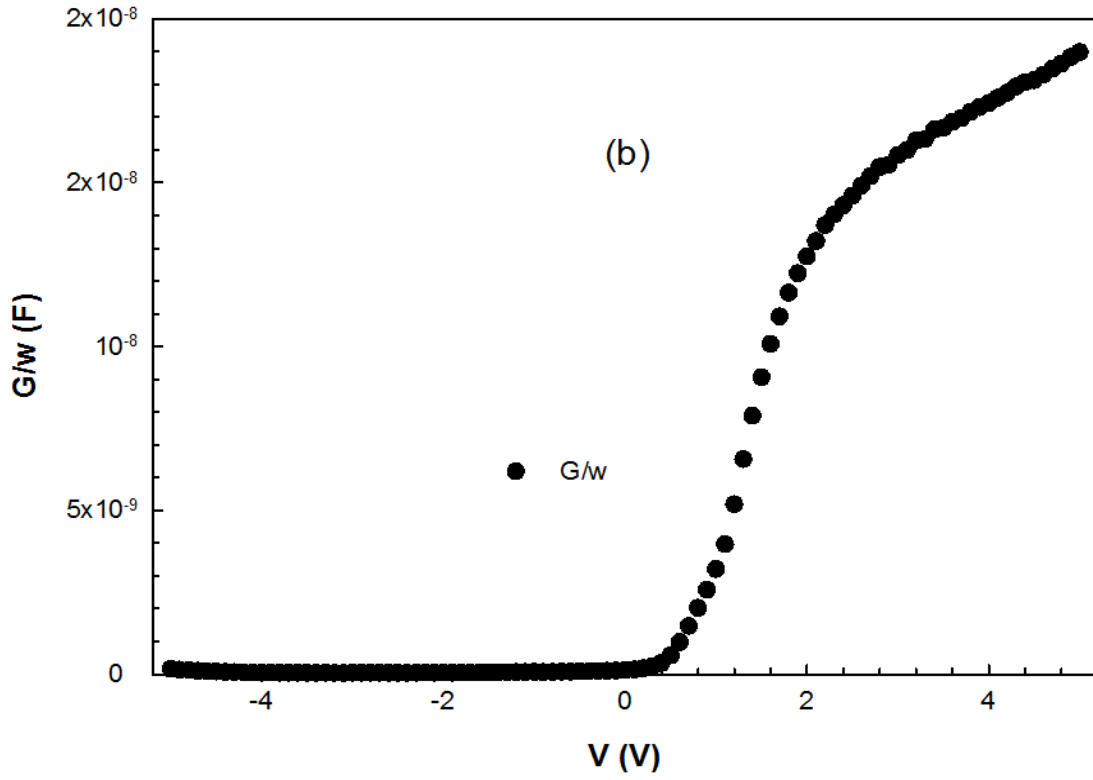
$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.13)$$

Burada $\omega (=2\pi f)$ açısal frekansı, C_m ve G_m/ω güçlü birikim bölgesindeki C ve G değerlerini gösterir. G ve G/ω 'ın birimleri sırasıyla Ω^{-1} ya da S ve Farad'dır. Burada, G and C ' yi aynı birimde (Farad) göstermek için G değerleri ω ile bölünmüştür. Böylece voltaja bağlı R_s değerleri; eşitlik 13'e göre Şekil 4.9' da verilen, 500 kHz'deki G ve C verilerinden elde edilmiştir ve Şekil 4.10'de gösterilmiştir. Bu oldukça anlamlı değerler, admittans tabanlı ölçüm metotlarının ($C-V$ ve $G/w-V$) uygulamalarında R_s ' in etkilerine özel ilgi gösterilmesini gerektirir.

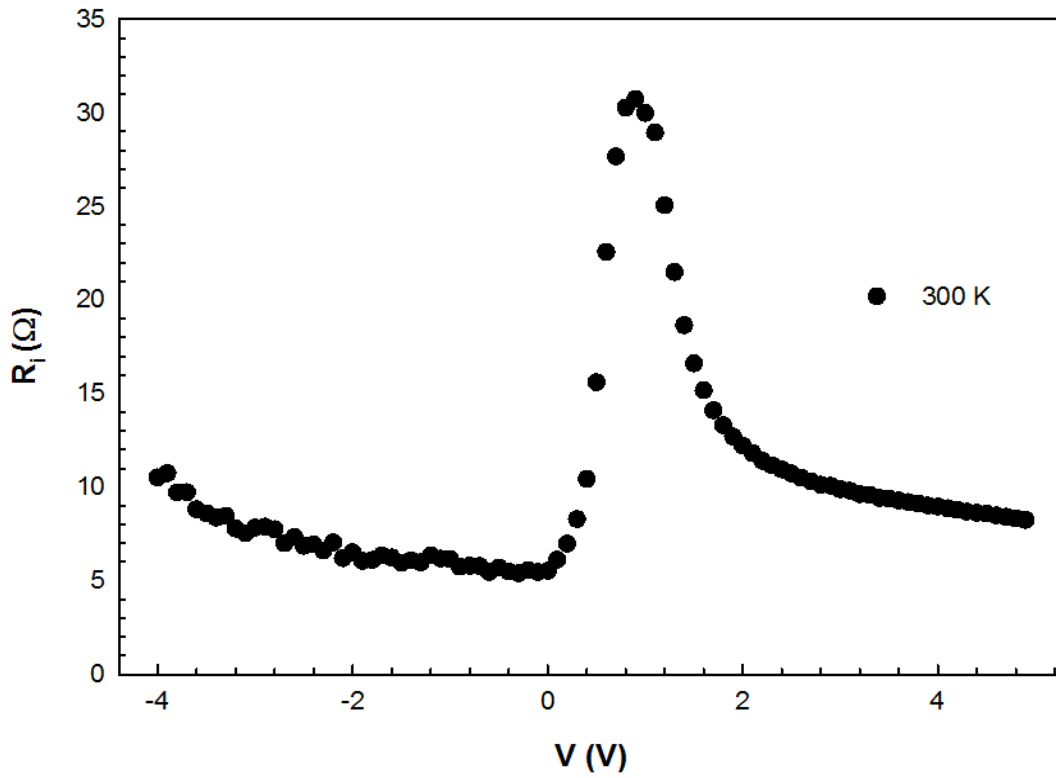
Şekil 4.8 ve 4.10' de görüldüğü gibi I-V ve iletkenlik ölçümleri metotlarından elde edilen deneysel R_s değerleri arasında oda sıcaklığında ve yeterli yükseklikteki ileri beslemelerde bir denklik söz konusudur. N_{ss} ve R_s ' in her ikisi için de elde edilen deneysel değerler Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için kabul edilebilecek en düşük değerlerdir.



Şekil 4.9. Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için 500 kHz' deki a) C-V ve b) G/Φ-V grafikleri



Şekil 4.9. (devam) Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için 500 kHz’deki a) C-V ve b) G/Φ-V grafikleri



Şekil 4.10. Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD için 500 kHz’deki R_i -V grafiği

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Au/C₂₀H₁₂/n-Si (SBD) schoottky engel diyotları hazırlandı ve onların ileri ve düz beslemlerdeki I-V ölçümleri 160-380 K sıcaklık aralığında incelendi. Şekil 4.1'den de görüleceği gibi, ileri beslem yarı-logaritmik LnI-V eğrileri orta beslem voltajlarında (0.1 V ≤ V ≤ 0.5 V) her sıcaklık için lineer bir bölgeye sahiptir. Ancak bu lineerlikten, özellikle R_s ve arayüzey tabakasından (C₂₀H₁₂) dolayı ileri pozitif beslem voltaj alanında önemli ölçüde sapar [2, 3, 5, 50,52,58,59]. Geri/ters besleme bölgesinde ise sıcaklığın etkisiyle akımda yavaşça bir artış görülmekte fakat metal elektrotlarda oluşan görüntü yük etkisi ve M/S arayüzeyindeki arayüzey tabakasından dolayı sızıntı (leakage) akımı doyuma ulaşmamıştır [2,71,72]. Yarı-logaritmik LnI-V eğrilerin lineer kısımlarının eğiminden idealite faktörü (n) ve V=0 ' da akım eksenini kestiği noktadan da doyum akımı (I₀) elde edildi. Diyodun alanı ve doyum akımı (I₀) değerleri kullanılarak da sıfır-beslem engel yüksekliği (Φ_{B0}) hesaplandı. Yarı-logaritmik LnI-V eğrilerinin yeterince ileri pozitif voltajlardan diyodun seri direnci (R_s) ve yeterince ters negatif voltajlardan ise diyodun kısa-devre direnci (R_{sh}) Ohm yasası kullanılarak hesaplandı. Her sıcaklık için elde edilen bu değerler Çizelge 4.1'de verildi. Çizelgeden de görüldüğü gibi, bu temel diyot parametrelerinin neredeyse tümü sıcaklığa bağlı oldukça değişmektedir ve bu değişim özellikle düşük sıcaklıklarda çok daha fazladır. Ayrıca Şekil 4.3'den de görüleceği gibi n'in sıcaklıkla değişimi sıcaklığın tersiyle(1/T) doğrusal bir şekilde artmaktadır. İdealite faktörünün sıcaklığa bu şekilde bağlılığı literatürde "T₀ etkisi" veya "T₀ anomalisi" olarak bilinir [4, 5, 21]. Bu grafikten, n₀ ve T₀ değerleri sırasıyla 0.209 ve 1098 K olarak bulundu.

İdealite faktörü değerinin birden daha büyük olması; TE teorisi, görüntü kuvvet etkisi, yüzey durumları, arayüzey tabakası, tünelleme (Termiyonik Alan Emisyonu (TFE) veya Alan Emisyonu (FE)) ve oluşum tekrar birleşim teorileriyle açıklanamamaktadır [3-9,21-46]. Artan sıcaklıkla birlikte Φ_{B0}'daki artış ve n'deki azalış TE teorisinden sapmanın bir kanıtı olabilir ve bu durumda TFE veya FE gibi akım tünelleme mekanizmalarının değerlendirmesinin daha olası garantili bir yol olduğu önerilebilir. [21-46] Diğer taraftan bu çalışmada seçilen n-Si 15-25 Ω.cm öz dirence veya 2.87x10¹⁴ cm⁻³-1.72x10¹⁴ cm⁻³ konsantrasyon aralığında verici atomlarına sahiptir. Bilindiği gibi FE ve TFE teorileri akım tünelleme parametresi E₀ (=nkT/q) nın sıcaklıkla değişiminde şöyle bir değişikliği öngörmektedir [3,36]. Bu nedenlerden dolayı, bizim diyotlarda FE ve TFE teorilerinin etkin olma ihtimali çok zayıftır. Ayrıca E₀₀ tünelleme parametresinin 0.21 meV olarak

bulunan deneysel değerinin düşük sıcaklıklarda bile termal enerjinin (kT/q) teorik değerinden daha düşük olduğu açıktır.

Au/C₂₀H₁₂/n-Si (SBD) için elde edilen deneysel I_0 , n , Φ_{B_0} , R_s ve R_{sh} değerleri sırasıyla; 160 K'de 1.974×10^{-7} A, 6.434, 0.351 eV, 30.22 Ω ve 18.96 k Ω ile 380 K'de 1.061×10^{-6} A, 2.34, 0.836 eV, 5.82 Ω ve 24.52 k Ω olarak bulunmuştur. Hem izelge 4.1'den hem de Şekil 4.2'den grldği gibi artan sıcaklık artışı ile n değeri azalırken Φ_{B_0} artmaktadır. Φ_{B_0} 'daki sıcaklık ile olan bu değişimin yarı iletkenin (Si) yasak enerji aralığının negatif sıcaklık katsayısı ile uyumlu olmadığı açıkça görülmektedir. Yani Φ_{B_0} -T grafiği pozitif sıcaklık katsayısına sahiptir ve bu da literatüre aykırıdır. Φ_{B_0} 'nun sıcaklıkla artışı bize M/S arayüzeyi boyunca akım dağılımının sıcaklıkla aktive olan bir süreç olduğunu gösterir. Düşük sıcaklıklarda elektronlar düşük bariyer/engel ya da patikalardan aştıma daha meyillidir. Yani düşük sıcaklıklarda yeterince enerji kazanamayan taşıyıcılar, ortalama engel yüksekliğini aştamazlar ancak bu düşük engellerden kolayca geçerek akımın artmasına ve dolayısıyla idealite faktörünün artmasına yol açmaktadır [66-74,51]. Sıcaklık arttıa yüksek engelleri aştık için daha fazla taşıyıcının gerekli termal enerjiye sahip olabildiği görülür. Artan sıcaklıkla Φ_{B_0a} artarken engel yüksekliğinin birbirini dengeleyen bir pozitif sıcaklık katsayısı ($\alpha = \Delta\Phi_{B_0}/\Delta T$) ve Si SBD'ler için Cowell ve Rideout tarafından geliştiren bir de negatif sıcaklık katsayısı [34] veya Si için -4.73×10^{-4} eV/K'a eşit olan yasak bant geçişi vardır. Yani yüksek n değerleri sadece arayüzey durumları ve arayüzey tabakasının kalınlığıyla açıklanamaz. Engelin biçimi ve yüksekliği de idealite faktörü üzerinde son derece etkindir.

Hem bu durum hemde idealite faktörünün her sıcaklık için idealden ($n=1$) büyük çıkması, saf TE teorisinden bir sapma olduğunun açık bir göstergesidir. Bu durumu açıklayabilmek için, Φ_{B_0} - n ve Φ_{B_0} - $e(n^{-1}-1)$ ile Φ_{B_0} - $q/2kT$ grafikleri, engel yüksekliğinin sıcaklık değişiminin Gauss dağılıma (GD) uyup-uymadığını açıklamak amacıyla Φ_{B_0} ile n ve Φ_{B_0} ve $(n^{-1}-1)$ ile $q/2kT$ grafikleri çizildi. Φ_{B_0} ile n ($n=1$ için) grafiğinin kesitinden $\bar{\Phi}_{b_0}$ değeri 0.983 eV olarak bulunmuştur. $\Phi_{B_0} - q/2kT$ grafiğinin eğimi ve ekseni kestiği noktadan, $\bar{\Phi}_{b_0}$ ve standart sapma (σ_s) değeri 1.123 eV ve 0.151 V olarak bulunmuştur. Böylece modifiye edilmiş Richardson grafiği kullanılarak $\bar{\Phi}_{b_0}$ ve Richardson sabiti (A^*) değerleri, bu grafiğin eğimi ve kesitinden sırasıyla, 1.116 eV ve 113.44 A.cm⁻²K⁻² olarak elde edilmiştir. A^* 'ın deneysel olarak elde edilen bu değerinin n-Si için 112 A.cm⁻²K⁻² olan

teorik değere çok yakın olduğu açıkça görülmektedir. Deneysel olarak bulunan $\bar{\Phi}_{B0}$ ve A^* değerleri sayesinde 160-380 K sıcaklık aralığında Au/C₂₀H₁₂/n-Si SBD' deki akım iletim mekanizması, engel yüksekliklerinin TE teorisine dayalı GD ile çok iyi bir biçimde açıklanabileceğini göstermektedir.

Arayüzey durumlarının (N_{ss}) enerji bağlı değişim profilleri de; her bir sıcaklık için idealite faktörü ve engelin voltaja bağlı değişimi dikkate alınarak elde edildi. Elde edilen N_{ss} değerleri her sıcaklık için Si yarıiletkenin yaklaşık yasak enerji aralığının ortasından iletim bandının (E_c) kenarına doğru üstel artmaktadır. Bu durum sıcaklık etkisi altındaki tuzaktaki yüklerin yeniden yapılanma ve düzenlenmeye bağlandı. Bunlara ilave olarak, N_{ss} değerinin artan sıcaklık ile birlikte azaldığı açıkça görülmektedir. Genellikle N_{ss} ' in etkin olduğu değerler özellikle ileri beslemeli orta voltaj değerleridir. Ancak R_s ve arayüzey tabaka ise yeterince yüksek ileri beslemeli voltajlarda etkilidir. Çünkü diyot üzerine voltaj uygulandığında bu; R_s , arayüzey tabaka (V_i) ve diyodun izolasyon alanı (V_d) arasında paylaşılacaktır.

Bu çalışmada, sıcaklığa bağlı I-V-T ölçümlerine ilaveten, Au/C₂₀H₁₂/n-Si (SBD) için, C-V ve G/w-V ölçümleri HP 4192A LF empedans analizörünün oda sıcaklığında 500 kHz'de kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. MIS veya MPS tipi Schottky engel diyotlarında R_s 'in gerçek değerini doğru bir biçimde elde etmek için Nicollian and Brews [40] tarafından önerilen R_s modeli genel olarak diğerlerine göre daha uygun olduğu bilinmektedir. Bu yöntem kullanılarak da diyodun tüm ölçüm aralığındaki rezistans (R_i) değerlerinin dağılım profili oda sıcaklığı için elde edildi. Bu metoda göre yeterince yüksek frekanslardaki ($f \geq 500$ kHz) güçlü birikim bölgelerindeki R_i değerleri, MIS veya MOS tipindeki SBD yapıları için R_s ' in gerçek değerine karşılık gelmektedir. G and G/ω 'ın birimleri sırasıyla Ω^{-1} ya da S ve Farad'dır. Burada, G and C ' yi aynı birimde (Farad) göstermek için G değerleri ω ile bölünmüştür. Nicollian and Brews [40] tarafından önerilen admittans metodu kullanılarak elde edilen R_s değerleriyle Ohm yasası kullanılarak elde edilen değerleri yaklaşık olarak uyum içindedir. N_{ss} ve R_s ' in her ikisi için de elde edilen deneysel değerleri, Au/C₂₀H₁₂/n-Si (SBD) için yüksek olmayıp makul değerlerdir.

Hazırlanan bu tez sonucunda, ileride yapılacak benzeri çalışmalara destek olur amacıyla tarafımızdan verilebilecek bazı öneriler şunlardır:

1. Geleneksel metal yarıiletken kontaklardan Au/n-Si diyotlarda, farklı polimer arayüzey tabakaların kullanılması maliyet, fiyat ve enerji tüketimi açısından verimli olabilir.
2. İletim mekanizmaları ve metal/yarıiletken arayüzeyinde oluşan engelin biçimi hakkında daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için doğru ve ters beslem I-V ve C-V ölçümleri daha geniş bir sıcaklık ve voltaj aralığında gerçekleştirilmelidir.
3. Hazırlanan diyotların C-V ve G/w-V ölçümleri hem sıcaklığa hem de frekansa bağlı incelenmelidir.

KAYNAKLAR

1. Welker, H. (1976). Walter Schottky. *Physics Today*, 29(6), 63.
2. Rhoderick, E. H., Williams, R. H. (1988). *Metal Semiconductor Contacts*. Oxford: Oxford Press, 257-264.
3. Sze, S. M., Kwok. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). New Jersey: John Wiley&Sons, 362-390.
4. Sharma, B. L. (1984). *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press, 1-3.
5. Ozavcı, E., Demirezen, S., Aydemir, U., and Altındal, Ş. (2013). A detailed study on current-voltage characteristics of Au/n-GaAs in wide temperature range. *Sensors and Actuators A*, 194, 259-268.
6. Tyagi, M. S. (1991). Introduction to Semiconductor Materials and Devices, *John Wiley&Sons*, New York, 271- 291
7. Cowley, A. M., Sze, S. M. (1965). Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212-3220.
8. Card, H. C., 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.
9. Tung, R. T. (1992). Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509.
10. Horvath, Z. J. (1988). Domination of the thermionic-field emission in the reverse I-V characteristics of n-type GaAs Schottky contacts. *Journal of Applied Physics*, 64(12), 6780.
11. Özdemir, A. F., Turut, A. and Kökçe, A. (2006). The double Gaussian distribution of barrier heights in Au/n-GaAs Schottky diodes from I-V-T characteristics. *Semiconductor Science and Technology*, 21(3), 298.
12. Soylu, M., Yakuphanoglu, F. (2010). Analysis of barrier height inhomogeneity in Au/n-GaAs Schottky barrier diodes by Tung model. *Journal of Alloys and Compounds*, 506(1), 418.
13. Hudait, M. K., Venkateswarlu, P. and Krupanidhi, S. B. (2001). Electrical transport characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge at low temperatures. *Solid-State Electronics*, 45(1), 133-141.
14. Leroy, W. P., Opsomer, K., Forment, S. and Van Meirhaneghe R. L. (2005). The barrier height inhomogeneity in identically prepared Au/n-GaAs Schottky barrier diodes. *Solid-State Electronics*. 49(6) 878.

15. Güllü, Ö., Biber, M., Van Meirhaeghe, R. L. and Türüt, A. (2008). Effects of the barrier metal thickness and hydrogen pre-annealing on the characteristic parameters of Au/n-GaAs metal-semiconductor Schottky contacts. *Thin Solid Films*, 516(21), 7851.
16. Korkut, H., Yıldırım, N. and Türüt, A. (2009). Thermal annealing effects on I-V-T characteristics of sputtered Cr/n-GaAs diodes. *Physica B.*, 404(21), 4039.
17. Tung, R. (1991). Electron-transport of inhomogeneous schottky barriers. *Applied Physics Letters*, 58(24), 2821.
18. Werner, J. H., Gütter, H. H., (1991). Barrier inhomogeneities at Schottky contacts, *Journal of Applied Physics*, 69(3), 1522-1532.
19. Altuntaş, H., Altındal, Ş., Shtrikman H. and Özçelik, S. (2009). A detailed study of current-voltage characteristics in Au/SiO(2)/n-GaAs in wide temperature range. *Microelectronics Reliability*. 49(8), 904.
20. Karataş, Ş., Altındal, Ş., (2005). Analysis of I-V characteristics on Au/n-type GaAs Schottky structures in wide temperature range. *Material Science and Engineering B.*, 122(2), 133.
21. Alialy, S., Altındal, Ş., Tanrikulu, E. E. and Yıldız, D. E. (2014). Analysis of temperature dependent current-conduction mechanisms in Au/TiO₂/n-4H-SiC (metal/insulator/semiconductor) type Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Physics*, 116(8), 083709.
22. Turut, A. (2012). Determination of barrier height temperature coefficient by Norde's method in ideal Co/n-GaAs Schottky contacts. *Turkis Journal of Physical*, 36, 235.
23. Aydemir, U., Şafak, Y., Altındal, Ş., Agasiyev, A. A. (2009). Frequency Dependent Electrical Characteristics of Metal-Ferroelectric-Semiconductor (Au/SrTiO₃/n-Si) Structures. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials – Symposia*, 1(3), 258.
24. Şafak, Y., Aydemir, U., Altındal, Ş., Mammadov, T. S. and Tataroğlu, A. (2009). Temperature Dependent Electrical Characteristics of Metal-Ferroelectric-Semiconductor (Au/SrTiO₃/n-Si) Structures. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials – Symposia*, 1(3), 266.
25. Altuntaş, H., Bengi, A., Aydemir, U., Asar, T., Çetin, S. Ş., Kars, İ., Altındal, Ş., Özçelik, S. (2009). Electrical Characterization of Current Conduction in Au/TiO₂/n-Si at Wide Temperature Range. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 12(6), 224-232.
26. Altuntas, H., Bengi, A., Asar, T., Aydemir, U., Sarıkavak, B., Ozen, Y. and Altındal, Ş. (2010). Interface state density analyzing of Au/TiO₂ (rutile)/n-Si Schottky barrier diode. *Surface and Interface Analysis*, 42(6-7), 1257-1260.
27. Taşçıoğlu, İ., Aydemir, U., Şafak, Y., Özbay, E. (2010). Temperature dependent Profile of the surface states and Series Resistance in (Ni/Au)/AlGaIn/GaN Heterostructures. *Surface and Interface Analyses-WILEY*.

28. Uslu, H., Altındal, Ş., Aydemir, U., Dökme, İ. and Afandiyeva, I. M. (2010). The interface states and series resistance effects on the forward and reverse bias I–V, C–V and G/ω–V characteristics of Al–TiW–Pd₂Si/n-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 503(1), 96-102.
29. Bengi, A., Aydemir, U., Altındal, Ş., Özen, Y. and Özçelik, S. (2010). A comparative study on the electrical characteristics of Au/n-Si structures with anatase and rutile phase TiO₂ interfacial insulator layer. *Journal of Alloys and Compounds*, 505(2), 628-633.
30. Gökçen, M., Altındal, Ş., Karaman, M. and Aydemir, U. (2011). Forward and reverse bias current–voltage characteristics of Au/n-Si Schottky barrier diodes with and without SnO₂ insulator layer. *Physica B: Condensed Matter*, 406(21), 4119-4123.
31. Çakar, M., Yıldırım, N., Karatas, S., Temirci, C. and Turut, A. (2006). Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Sn/rhodamine-101/n-Si and Sn/rhodamine-101/p-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Physics*, 100(7), 074505-074505.
32. Özdemir, A. F., Gök, A. and Türüt, A. (2007). The electrical measurements in poly(2-chloroaniline) based thin film sandwich devices. *Thin Solid Films*, 515(18), 7253-7258.
33. Kılıçoğlu, T., Aydın, M. E., Topal, G., Ebeoğlu, M. A. and Saygılı, H. (2007). The effect of a novel organic compound chiral macrocyclic tetraamide-I interfacial layer on the calculation of electrical characteristics of an Al/tetraamide-I/p-Si contact. *Synthetic Metals*, 157(13), 540-545.
34. Gullu, O., Turut, A. (2009). Electrical analysis of organic interlayer based metal/interlayer/semiconductor diode structures. *Journal of Applied Physics*, 106(10), 103717-103717.
35. Akkılıç, K., Aydın, M.E., Uzun, İ. and Kılıçoğlu, T. (2006). The calculation of electronic parameters of an Ag/chitin/n-Si Schottky barrier diode, *Synthetic Metals*, 156(14-15), 958-962.
36. Aydın, M.E., Kılıçoğlu, T., Akkılıç, K. and Hoşgören, H. (2006). The calculation of electronic parameters of an Au/β-carotene/n-Si Schottky barrier diode. *Physica B.*, 381(1-2), 113-117.
37. Abthagir, P. S., Saraswathi, R. (2001). Junction properties of metal/polypyrrole Schottky barriers. *Journal of Applied Polymer Science*, 81(9), 2127-2135.
38. Taşcıoğlu, İ., Aydemir, U. and Altındal, Ş. (2010). The explanation of barrier height inhomogeneities in Au/n-Si Schottky barrier diodes with organic thin interfacial layer, *Journal of Applied Physics*, 108(6), 064506-064511.
39. Dökme, İ., Altındal, Ş., Tunç, T. and Uslu, I. (2010). Temperature dependent electrical and dielectric properties of Au/polyvinyl alcohol (Ni,Zn-doped)/n-Si Schottky diodes. *Microelectron Reliability*, 50(1), 39-44.

40. Kang, K. S., Chen, Y., Lim, H. K., Cho, K. Y., Han, K. J. and Kim, J. (2009). Performance enhancement of polymer Schottky diode by doping pentacene. *Thin Solid Films*, 517(21), 6096-6099.
41. Uslu, H. (2010). Au/(Co, Zn-Katkılı) Polivinil Alkol/n-Si Schottky Engel Diyotlarının Hazırlanması ve Elektriksel Özelliklerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 36-40.
42. Bülbül, M. M., Zeyrek, S., Altındal, Ş. and Yüzer, H. (2006). On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si₃N₄/p-Si (MIS) Schottky diodes, *Microelectron. Engin.* 83(3), 577-581.
43. Padovani, F. A. and Sumner, G. G. (1965). Experimental Study of Gold-Gallium Arsenide Schottky Barriers. *Journal of Applied Physics*, 36, 3744 - 3747.
44. Padovani, F. A. (1966). Graphical Determination of the Barrier Height and Excess Temperature of a Schottky Barrier. *Journal of Applied Physics*, 37, 921.
45. Hackam, R., Harrop, P. (1972). Electrical properties of nickel-low-doped n-type gallium arsenide Schottky-barrier diodes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 19(12), 1231.
46. Saxena, A. N. (1969). Forward current-voltage characteristics of Schottky barriers on n-type silicon. *Surface Science*, 13, 151-171.
47. Aboelfotoh, M. O. (1991). Temperature dependence of the Schottky-barrier height of tungsten on n-type and p-type silicon. *Solid-State Electronics*, 34(1), 51-55.
48. Yu, A. Y. C., Snow, E. H. (1968). Surface Effects on Metal-Silicon Contacts. *Journal of Applied Physics*, 39(7), 3008-3016.
49. Sah, R. Y., Noyce, R. N. and Shockley, W. (1957). Carrier generation and recombination in pn junctions and pn junction characteristics. *Proceedings of the IRE*, 45(9), 1228-1243.
50. Chand, S., Kumar, J. (1995). Current-voltage characteristics and barrier parameters of Pd₂Si/p-Si (111) Schottky diodes in a wide temperature range. *Semiconductor science and technology*, 10(12), 1680.
51. Tung, R. T. (2001). Recent advances in Schottky barrier concepts. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 35(1), 1-138.
52. Özavcı, E., Demirezen, S., Aydemir, U. and Altındal, Ş. (2013). A detailed study on current-voltage characteristics of Au/n-GaAs in wide temperature range. *Sensors and Actuators A: Physical*, 194, 259-268.
53. Reddy, M., Kang, H. S., Lee, J. H., Reddy, V. R. and Jang, J. S. (2014). Electrical properties and the role of inhomogeneities at the polyvinyl alcohol/n-inp schottky barrier interface. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(2).

54. Rajagopal Reddy, V., Janardhanam, V., Leem, C. H. and Choi, C. J. (2014). Electrical properties and the double Gaussian distribution of inhomogeneous barrier heights in Se/n-GaN Schottky barrier diode. *Superlattices and Microstructures*, 67, 242-255.
55. Song, Y. P., Van Meirhaeghe, R. L., Laflere, W. H. and Cardon, F. (1986). On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers. *Solid-State Electronics*, 29(6), 633-638.
56. Sariyıldız, A., Vural, Ö., Evecen, M. and Altındal, Ş. (2014). Single Gaussian distribution of barrier height in Al/PS–ZnPc/p-Si type Schottky barrier diode in temperature range of 120–320 K. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25(10), 4391-4397.
57. Altındal, S., Sari, B., Unal, H. I. and Yavas, N. (2009). Electrical characteristics of Al/polyindole schottky barrier diodes. I. Temperature dependence. *Journal of applied polymer science*, 113(5), 2955-2961.
58. Bülbül, M. M., Bengi, S., Dokme, I., Altındal, Ş. and Tunç, T. (2010). Temperature dependent capacitance and conductance-voltage characteristics of Au/polyvinyl alcohol (Co, Zn)/n-Si Schottky diodes. *Journal of Applied Physics*, 108(3), 034517-034517.
59. Dökme, I., Altındal, Ş. (2006). On the intersecting behaviour of experimental forward bias current–voltage (I–V) characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes at low temperatures. *Semiconductor science and technology*, 21(8), 1053.
60. Tataroğlu, A. and Altındal, Ş. (2009). The distribution of barrier heights in MIS type Schottky diodes from current–voltage–temperature (I–V–T) measurements. *Journal of Alloys and Compounds*, 479(1), 893-897.
61. Janardhanam, V., Jyothi, I., Ahn, K. S. and Choi, C. J. (2013). Temperature-dependent current–voltage characteristics of Se Schottky contact to n-type Ge. *Thin Solid Films*, 546, 63-68.
62. Dogan, H., Elagoz, S. (2014). *Temperature-dependent electrical transport properties of (Au/Ni) n-GaN Schottky barrier diodes*. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*.
63. Kumar, A., Arafin, S., Amann, M. C. and Singh, R. (2013). Temperature dependence of electrical characteristics of Pt/GaN Schottky diode fabricated by UHV e-beam evaporation. *Nanoscale research letters*, 8(1), 1-7.
64. Lakshmi, B. P., Reddy, M., 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.
65. Kumar, A., Vinayak, S. and Singh, R. (2013). Micro-structural and temperature dependent electrical characterization of Ni/GaN Schottky barrier diodes. *Current Applied Physics*, 13(6), 1137-1142.

66. Hudait, M. K., Krupanidhi, S. B. (2001). Interface states density distribution in Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge and n-GaAs substrates. *Materials Science and Engineering: B*, 87(2), 141-147.
67. Lee, B. H., Jeon, Y., Zawadzki, K., Qi, W. J. and Lee, J. (1999). Effects of interfacial layer growth on the electrical characteristics of thin titanium oxide films on silicon. *Applied physics letters*, 74, 3143.
68. Mönch, W.(1999). Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 17(4),867- 1876.
69. Schmitsdorf, R. F., Kampen, T. U. and Monch, W. (1997). Explanation of the linear correlation between barrier heights and ideality factors of real metal-semiconductor contacts by laterally nonuniform Schottky barriers. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 15(4), 1221-1226.
70. Rajagopal Reddy, V., Janardhanam, V., Leem, C. H. and Choi, C. J. (2014). Electrical properties and the double Gaussian distribution of inhomogeneous barrier heights in Se/n-GaN Schottky barrier diode. *Superlattices and Microstructures*, 67, 242-255.
71. Chattopadhyay, P., Daw, A. N. (1986). On the current transport mechanism in a metal—insulator—semiconductor (MIS) diode. *Solid-state electronics*, 29(5), 555-560.
72. Tecimer, H., Türüt, A., Uslu, H., Altındal, Ş. and Uslu, İ. (2013). Temperature dependent current-transport mechanism in Au/(Zn-doped) PVA/n-GaAs Schottky barrier diodes (SBDs). *Sensors and Actuators A: Physical*, 199, 194-201.
73. Toumi, S., Ferhat-Hamida, A., Boussouar, L., Sellai, A., Ouennoughi, Z. and Ryssel, H. (2009). Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in tungsten/4H-SiC (000-1) Schottky diodes. *Microelectronic Engineering*, 86(3), 303-309.
74. Evans-Freeman, J. H., El-Nahass, M. M., Farag, A. A. M. and Elhaji, A. (2011). Current transport mechanisms and deep level transient spectroscopy of Au/n-Si Schottky barrier diodes. *Microelectronic Engineering*, 88(11), 3353-3359.
75. Reddy, M., Kang, H. S., Lee, J. H., Reddy, V. R. and Jang, J. S. (2014). Electrical properties and the role of inhomogeneities at the polyvinyl alcohol/n-inp schottky barrier interface. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(2).
76. Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R. and Graham, W. R. (1991). Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: a numerical study. *Journal of applied physics*, 70(12), 7403-7424.
77. Nicollian, E. H.and Brews, J. R. (1982). MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology (Vol. 1987). New York et al.: Wiley.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : MORAKİ, Kani
 Uyuğu : İnan
 Doğum tarihi ve yeri : 21.09.1981, TABRİZ
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : -
 Faks : -
 e-mail : kanimoraki@yahoo.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /F.B.E.	Devam Ediyor
Lisans	İslamik Azad Tabriz Üniversitesi	2008
Lise	Baharan / TABRİZ	2004

Yabancı Dil

Türkçe, İngilizce

Yayınlar

- Moraki, K., Bülbül, M. M., Zeyrek, S., Bengi, S., Altındal, Ş. (2014). Temperature dependence of electrical parameters of the Au/n-Si structure with interfacial layer at low temperatures, Nanoscience&Nanotechnology For Next Generation.
- Moraki, K., Bengi, S. Bülbül, M. M. (2014, 21-24 July). Analysis of the current-voltage characteristics of Au/Perylene/n-Si structure at room temperature, Turkish Physical Society 31st International Physics Congress.

Hobiler

Kitap okumak, müzik.



GAZİ GELECEKTİR..