

**Au/Antrakinon/p-Si/Al SCHOTTKY DİYODUN
TEMEL KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN
SICAKLIĞA BAĞLI I - V (AKIM-VOLTAJ) ve C - V
(KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN
TAYİN EDİLMESİ**

Zakir ÇALDIRAN

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN
2013
Her Hakkı Saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Au/Antrakinon/p-Si/Al SCHOTTKY DİYODUN TEMEL
KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI
I-*V* (AKIM-VOLTAJ) ve *C*-*V* (KAPASİTE-VOLTAJ)
ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ**

Zakir ÇALDIRAN

FİZİK ANABİLİM DALI

ERZURUM
2013

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**Au/Antrakininon/p-Si/Al SCHOTTKY DİYODUN TEMEL KARAKTERİSTİK
PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI $I-V$ (AKIM-VOLTAJ) ve $C-V$
(KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ**

Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN danışmanlığında, Zakir ÇALDIRAN tarafından hazırlanan bu çalışma 12/04/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Emre GÜR

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kadem MERAL

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi BAP kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 99/2011

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Au/Antrakininon/p-Si/Al SCHOTTKY DİYODUN TEMEL KARAKTERİSTİK PARAMETRELERİNİN SICAKLIĞA BAĞLI I - V (AKIM-VOLTAJ) ve C - V (KAPASİTE-VOLTAJ) ÖLÇÜMLERİNDEN TAYİN EDİLMESİ

Zakir ÇALDIRAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

Bu çalışmada; [100] doğrultusunda, 400 μm kalınlığında ve 1-10 $\Omega\text{-cm}$ öz direncine sahip p-Si yarıiletkeni üzerine elektrokimyasal yöntemle oluşturulmuş antrakininon organik malzemesi ile yapılan doğrultucu kontakların, değişen sıcaklık değerlerinde I - V (akım-voltaj) ve C - V (kapasite-voltaj) ölçümleri yapıldı ve bu ölçümlerden diyodun temel karakteristik parametreleri hesaplandı. Kimyasal temizlik işleminden sonra kristalin mat yüzeyine buharlaştırma ile Al, diğer yüzeyine ise elektrokimyasal işlem ile antrakininon organik malzemesi büyütüldü ve organik malzeme üzerine de 10^{-5} torr basınçta Au metali buharlaştırıldı. Elde edilen Au/Antrakininon/p-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I - V ve C - V ölçümleri alındı. Ayrıca aynı yöntemle yapılan Au/p-Si/Al referans numunesinin I - V ölçümleri laboratuvar sıcaklığında değerlendirildi. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı I - V grafiklerinin engel yükseklikleri (Φ_b) ve idealite faktörleri (n) hesaplandı. Yine I - V karakteristikleri yardımıyla Cheung fonksiyonları kullanılarak sıcaklığa bağlı idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri hesaplandı. Elde edilen I - V karakteristikleri incelendiğinde engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla arttığı, idealite faktörünün ise azaldığı görüldü. Bu durum engelin inhomojenliğine atfedildi. Ayrıca I - V ölçümlerinden yararlanılarak modifiye edilmiş Richardson eğrisi çizildi. Bu eğriden engel yüksekliği ve Richardson sabiti değerleri sırasıyla $\Phi_b=0,46$ eV ve $A^*=34$ A/K²cm² olarak bulundu. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodunun 500 kHz frekansta, sıcaklığa bağlı C - V ölçümleri alındı ve grafikleri çizildi. Bu grafikler yardımıyla difüzyon potansiyelleri, taşıyıcı konsantrasyonları, Fermi enerji seviyesi değerleri ve dolayısı ile de engel yüksekliği değerleri elde edildi. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodun C - V grafiğinden kapasitenin artan sıcaklık ile arttığı tespit edildi. Farklı sıcaklıklarda elde edilen $1/C^2$ - V eğrilerinin oldukça birbirine yakın olduğu ve lineer bir davranış sergiledikleri görüldü.

2013, 101 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, metal/organik/yarıiletken kontak, Antrakininon

ABSTRACT

Master Thesis

INDICATION OF BASIC CHARACTERISTIC PARAMETERS OF Au/Antrakinon/p-Si/Al SCHOTTKY DIOD DEPENDENT ON HEAT CURRENT- VOLTAGE (I - V) and CAPACITY-VOLTAGE (C - V) MEASUREMENTS

Zakir ÇALDIRAN

Atatürk University
Graduate School of Science
Major Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN

In this study, the current-voltage (I - V) and capacity-voltage (C - V) measurements of the rectifying contact, made up of antrakinon organic material formed by electro-chemical method with p-Si semiconductor which has the 1-10 Ω -cm resistivity and in the thickness of 400 μ m, the direction of [100], were measured and the main characteristics of the diode were calculated from these measurements. After chemical cleaning process, the substance Al was enlarged on the lusterless surface of crystal by vaporizing, and organic antrakinon material was enlarged to the other surface of the crystal by electro-chemical process. Then Au metal was vaporized on the organic material under 10^{-5} torr pressure. The I - V and C - V measurements were conducted based on the obtained the Au/Antrakinon/p-Si/Al structure's temperature. In addition, the I - V measurements of reference Au/p-Si/Al were evaluated in laboratory conditions. Ideality factors (n) and barrier heights (Φ_b) of the sample I - V plots of Au/Antrakinon/p-Si/Al diode dependent on the temperature were measured. Again with the help of the I - V characteristics, ideality factors dependent on heat, barrier heights and serial resistance values were measured using Cheung functions. When analyzed the obtained I - V characteristics, it was observed that the barrier height increased as the temperature increased and the ideality factor decreased as the temperature increased. This was referred to the barrier's being inhomogeneous. Also, modified Richardson curves were drawn using the I - V measurements. The values of barrier height and Richardson constant were found as $\Phi_b=0.46$ eV and $A^*=34$ A/ K^2cm^2 respectively. The C - V measurements dependent on temperature of Au/Antrakinon/p-Si/Al diode was done in 500 kHz frequency and graphics were drawn. With the help of these graphics diffusion potentials, carrier concentrations, Fermi energy level values and by this the barrier height values were found. It was determined that capacity increased parallel to temperature. It was also seen that the $1/C^2$ - V curves gained in different temperatures were similar to each other and showed a linear behavior.

2013, 101 Pages

Keywords: Schottky diode, metal/organic/semiconductor contact, Antrakinon

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünde yapılmıştır.

Çalışmalarım süresince her türlü desteğini gördüğüm, saygın kişiliği ve akademik vizyonu ile örnek aldığım çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN'a içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince teorik ve pratik bilgisinden istifade ettiğimiz hocamız Sayın Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT'e teşekkür ederim.

Özellikle elektrokimsal işlemlerin gerçekleştirilmesinde büyük gayret gösteren hocam Sayın Doç. Dr. Duygu EKİNCİ'ye ve laboratuvarında beraber çalıştığımız asistanı Sayın Ali YEŞİLDAĞ'a çok teşekkür ederim. Ayrıca sıcaklığa bağlı ölçü sisteminin kullanımı ve revizyonunda bana yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Dr. Süleyman TEKME'ne, çalışmalarım süresince katkılarından dolayı Sayın Arş. Gör. Ali Rıza DENİZ'e, Sayın Arş. Gör. İkrâm ORAK'a, Sayın Arş. Gör. Ömer ŞAHİN'e, Sayın Arş. Gör. Ali DİNÇER'e, Sayın Okt. Mustafa KILINÇ'a, Sayın Mehmet ŞİNOFOROĞLU'a ve Sayın Rıdvan OLUÇ'a teşekkür ederim.

Fizik Bölümü Yoğun Madde Fiziği laboratuvarlarında çalışma imkânı sağladığı için bölüm başkanlığına, tüm Fizik Bölümü elemanlarına ve araştırmacı arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim süresince sabır ile beni destekleyen aileme ve mesai arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Zakir ÇALDIRAN

Nisan, 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1. Metal/Yarıiletken Kontak Teknolojisinin Gelişimi.....	4
2.2. Metal/Yarıiletken Kontaklar.....	12
2.2.1. Doğrultucu (Schottky) kontaklar.....	12
2.2.1.a. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar.....	13
2.2.1.b. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	16
2.2.2. Omik Kontaklar	18
2.2.2.a. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontaklar.....	19
2.2.2.b. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken omik kontaklar	22
2.3. Tünelleme Eklemleri	24
2.4. Metal (Omik) / <i>p</i> -tipi Yarıiletken/ Metal (Doğrultucu) Yapısı	25
2.5. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Sıcaklığın Etkisi	25
2.6. Termiyonik Emisyon ve Akım-Voltaj Karakteristiği.....	26
2.7. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Bazı Schottky Diyot Parametrelerinin Tayin Edilmesi	32
2.8. Difüzyon Teorisi.....	34
2.9. Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi	34
2.10. Deplasyon Bölgesinde Rekombinasyon (yeniden birleşim) ve Jenarasyon (taşıyıcı oluşumu).....	36
2.11. Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı	38
2.12. İmaj Kuvvetinin Etkisinden Dolayı Engel Yüksekliğinin Azalması.....	39

2.13. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojen Olmayan Engel Yüksekliğinin Analizi.....	42
2.14. Seri Direnç Etkisi	46
2.15. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi	48
2.16. Arayüzey Tabakasının Kapasitansa Etkisi	52
2.17. Derin Tuzakların Kapasitansa Etkisi	55
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	56
3.1. Giriş	56
3.2. <i>p</i> -Si Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması.....	56
3.3. Elektrokimyasal Kaplama İşlemi	59
3.3.1. Elektrokimyasal cihaz	59
3.3.2. Elektrot yüzeylerinin modifikasyonu	59
3.4. Deney ve Ölçüm Sistemi	64
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	66
4.1. Giriş	66
4.2. <i>I</i> - <i>V</i> (Akım-Voltaj) Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması	66
4.3. <i>C</i> - <i>V</i> (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri ve Yapılan Hesaplamalar	80
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	89
5.1. Sıcaklığa Bağlı <i>I</i> - <i>V</i> Ölçümleri	89
5.2. Sıcaklığa Bağlı <i>C</i> - <i>V</i> Ölçümleri.....	92
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	102

SİMGELER DİZİNİ

A	Diyodun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
A^{**}	Diyodun etkin Richardson sabiti
C	Kapasite
E_c	İletkenlik bandının tabanı (minimumu)
E_v	Valans bandının tepesi(maksimumu)
E_c'	Metal içindeki termoiyonik emisyon için gerekli minimum enerji
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_{ss}	Arayüzey hallerinin enerjisi
h	Planck sabiti
J	Akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
J_{sT}	Ters-doyma akım yoğunluğu
J_T	a.c. tünel akımı
k	Boltzmann sabiti
m_e	Elektronun kütlesi
n	İdealite faktörü
n^{++}	aşırı katkılı n tipi yarıiletken
p^{++}	aşırı katkılı p tipi yarıiletken
N_v	Yarıiletkenin valans bandındaki hal yoğunluğu
N_a	Akseptör konsantrasyonu
N_{ss}	Yarıiletkenle dengede olan hal yoğunluğu
p_i	Asal taşıyıcı konsantrasyonu
I	Akım
I_0	Satürasyon akımı
q	Elektronun yükü

$f_F(E)$	Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonu
$g_c(E)$	İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
Φ_b	Schottky engel yüksekliği
$\bar{\Phi}_b$	Ortalama engel yüksekliği
Φ_b^c	Kapasite voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği
Φ_b^j	Düz beslem gerilimine bağlı olarak I - V ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
$\Psi(x)$	Yüzey potansiyeli
$\rho(x)$	Konuma bağlı uzay yükü yoğunluğu
δ	Metal ile yarıiletken arasındaki oksit tabakanın kalınlığı
σ	Arayüzey hallerinin tesir kesiti
σ_i	Standart sapma
ρ_i	Voltaj katsayısı
Q	Birim alan başına düşen yük yoğunluğu
R_s	Seri direnç
R_m	Tünelleme direnci
T	Sıcaklık
τ	Zaman sabiti
τ_r	Elektronların bu bölgeyi geçmesi için gerekli zaman
V_{dif}	Difüzyon potansiyeli
V_x	Enerjinin taşınma yönündeki hızı
w	Uzay yükü bölgesinin genişliği
β	Engel yüksekliğinin sıcaklık ile değişim katsayısı

Kısaltmalar

a.c	Alternatif akım
C-V	Kapasite-gerilim
d.c.	Doğru akım
FET	Field Effect Transistör (Alan Etkili Transistör)
IC	Integrated Circuit (Tümleşik Devre)
I-V	Akım-gerilim
SCLC	Space Charge Limited Current
TE	Termoiyonik Emisyon
MESFET	Metal -Semiconductor -Field Effect Transistör
MOS	Metal- Oxide- Semiconductor
MOSFET	Metal -Oxide- Semiconductor (Field Effect Transistör)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kontakdan önce metal ve n -tipi yarıiletkenine ait enerji bant diyagramları	13
Şekil 2.2. Kontakdan sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı	14
Şekil 2.3. Düz beslem durumunda metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı.....	16
Şekil 2.4. Metal/ p -tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı.....	17
Şekil 2.5. Kontak yapılmadan önce metal ve n -tipi yarıiletken enerji bant diyagramı...	20
Şekil 2.6. Kontakdan sonra metal ve yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı ..	20
Şekil 2.7. Düz beslem durumunda metal ve n -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı.....	21
Şekil 2.8. Ters beslem durumunda metal ve n -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı.....	21
Şekil 2.9. Metal/ p -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı a; kontakdan önce, b; kontakdan sonra, c; $V \neq 0$ durumunda	23
Şekil 2.10. p^+pM yarıiletken yapının termal dengede enerji-band diyagramı	25
Şekil 2.11. Düz beslem altındaki metal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi	27
Şekil 2.12. (a) Metal-dielektrik arayüzeyinde imaj yükü ve elektrik alan çizgileri, (b) Elektrik alan sıfırken potansiyelde meydana gelen bükülme, (c) Sabit elektrik alanda imaj yükünden dolayı oluşan bükülme.....	40
Şekil 2.13. Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip bir Schottky kontağın iki boyutlu bant diyagramı	42
Şekil 2.14. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi	47
Şekil 2.15. Metal p -tipi yarıiletken yapılarda doğrultucu kontağın; a) Potansiyel dağılımı, b) Yük dağılımı	48
Şekil 2.16. Arayüzey tabakasının zayıf, düşük frekans durumunda (a) ve yüksek frekans durumunda (b) Schottky engeli için eşdeğer devre yapısı	53
Şekil 2.17. Arayüzey tabakasının kalın, düşük frekans durumunda (a) ve yüksek frekans durumunda (b) Schottky engeli için eşdeğer devre yapısı.	54

Şekil 2.18. Yalıtkan arayüzey tabakasına sahip Schottky engeli için eşdeğer devre.....	54
Şekil 3.1. Buharlaştırma ünitesi	58
Şekil 3.2. Tavlama fırını	58
Şekil 3.3. Si elektrot yüzeylerinin antrakinon ile kaplama işleminin devre şeması	60
Şekil 3.4 Antrakinondiazonyum tuzunun kimyasal sentezi ve Si elektrot yüzeylerinin antrakinon molekülü ile elektrokimyasal olarak kaplanmasını gösteren basamaklar.....	61
Şekil 3.5. Si elektrot yüzeylerinin antrakinon molekülü ile elektrokimyasal olarak kaplanmasını gösteren voltamogram.....	62
Şekil 3.6. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyodunun kesit görüntüsü	63
Şekil 3.7. Sıcaklığa bağlı ölçümler için kullanılan kriyostat düzeneği.....	64
Şekil 3.8. Akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçüm sistemi	65
Şekil 3.9. Au/Antrakinon/p-Si/Al numunesinin ölçüm sırasındaki kesit görüntüsü.....	65
Şekil 4.1.a Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiği	69
Şekil 4.1.b. Referans Au/p-Si/Al ve Au/Antrakinon/p-Si/Al diyotlarına ait I - V grafiği	70
Şekil 4.2. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiğinden elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişimi	72
Şekil 4.3.a. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I) - I$ grafiği ...	72
Şekil 4.3.b. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $H(I) - I$ grafiği	73
Şekil 4.3.c. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimi	74
Şekil 4.4. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyodunun geleneksel metot ve Cheung fonksiyonları ile hesaplanan idealite faktörünün sıcaklığa karşı değişimi....	75
Şekil 4.5. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyodunun geleneksel metot ve Cheung fonksiyonları ile hesaplanan engel yüksekliğinin sıcaklığa karşı değişimi ..	75
Şekil 4.6. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait $[(1/n)-1]$ ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye karşı değişimi.....	78
Şekil 4.7. $\sigma_1 = 0,022$ V'ye göre, modifiye edilmiş $\ln(I_0/T^2) - e^2\sigma^2/(2kT)$ 'nin $1000/T$ 'ye karşı değişimi	79

Şekil 4.8.a. Au/p-Si/Al ve Au/Antrakininon/p-Si/Al diyotlarının laboratuvar sıcaklığında $f=500$ kHz sabit frekansta düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği.....	84
Şekil 4.8.b. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği.....	85
Şekil 4.9. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı ters beslem durumunda C-V grafiği	86
Şekil 4.10. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta farklı sıcaklıklarda $1/C^2$ -V grafiği.....	86
Şekil 4.11. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta farklı sıcaklıklarda $1/C^2$ -V grafiği.....	87
Şekil 4.12. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait $(1/C^2 - V)$ karakteristiğinden $f=500$ kHz sabit frekansta Fermi enerji seviyesinin sıcaklıkla değişimi	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Referans Au/p-Si/Al diyoduna ait I - V grafiğinden elde edilen temel diyot parametreleri	70
Çizelge 4.2. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiğinden elde edilen temel diyot parametreleri	71
Çizelge 4.3. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı $(1/C^2-V)$ değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri.....	88

1. GİRİŞ

Hayat şartlarını kolaylaştıran birçok elektronik devre elemanı doğrultma prensibine dayanarak işlevlerini yerine getirmektedir. Doğrultma işlemi kısaca; alternatif akımı doğru akıma çevirme işlemidir. Doğrultma işlemi, elektronik sistemlerde diyotlarla gerçekleştirilir. Metal-yarıiletken kontaklarda bu işlem yarıiletken tarafında oluşan uzay yükü bölgesinin uygulama gerilimi ile lineer olmayan davranışı sonucu gerçekleşmektedir. İki metalin birleşimi ile kontak oluşabileceği gibi bir metalle bir yarıiletkenin atomik düzeyde teması ile de kontak olabilir. Metalle yarıiletkenin belirli kurallar çerçevesinde birleştirilmesi ile oluşturulan Schottky diyotlar, yapısı itibari ile p-n ekleminden farklıdır. Akım, bir p-n ekleminde azınlık taşıyıcılarıyla sağlanırken, Schottky diyotlarda çoğunluk taşıyıcılarıyla sağlanmaktadır. Schottky kontaklar düşük gerilim, yüksek akım doğrultucuları olarak çalışırken, p-n eklemi yüksek gerilim, düşük akım doğrultucuları olarak çalışmaktadır. Ayrıca Schottky yapıların azınlık taşıyıcılarının çok az ve frekans tepkisinin yüksek olması gibi avantajlara sahip olmaları yanında yüksek anahtarlama hızına sahip olmaları bu diyotları IC (Integrated Circuit - Tümüleşik Devre) teknolojisi için önemli kılmaktadır.

Farklı malzemelerle yapılan metal-yarıiletken kontaklar gelişen elektronik sanayinde birçok alanda yer almaktadır. İlk maliyeti yüksek olsada avantajlarından dolayı elektronik sanayinde metal-yarıiletken kontaklardan elde edilen Schottky diyotlar güneş pilleri, mikrodalga karıştırıcı dedektörleri, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilimle değişen kondansatörler), hızlı anahtar (switching) uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Metal-yarıiletken arayüzeyinin en önemli özelliği, arayüzey boyunca oluşan potansiyel engelinin varlığıdır. Bu konu ile ilgili ilk çalışmalar 1870 li yıllarda yapılmış olsa da Schottky (1938); Mott (1938), elektronların gözlenen doğrultma yönünde potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon yolu ile geçtiğini açıklamışlardır. Mott (1938), potansiyel engelinin oluşmasını, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının

farklı olmasına dayandırmış, yüklü (safsızlık) atomlarının olmadığı arayüzey bölgesinde elektrik alanın sabit olduğunu ve elektrostatik potansiyelin metale olan yaklaşımla aynı uzaklıkta lineer olarak değiştiğini kabul etmiştir. Schottky (1938) ise, metal yaklaşımındaki gibi Poisson denkleminde göre elektrik alanın lineer olarak artması ve elektrostatik potansiyelin kuadratik olarak değişmesi için engel bölgesinin sabit olan yüklü kirliliklerin konsantrasyonunu içerdiğini varsaymıştır. 1900'li yılların başlarında kullanılan ilk pratik devre elemanı metal-yarıiletken diyot idi. Bu diyotlar nokta kontak olarak da adlandırılır. Nokta kontaklar ince metal bir telin yarıiletken yüzeyine dokundurulmasıyla yapılmıştır. Ancak bu kontaklar kolaylıkla üretilmediklerinden mekanik olarak fazla güvenilir olmamışlardır. Vakum teknolojisinin kullanılması ile günümüzde yeniden üretilebilen ve güvenilir metal-yarıiletken kontaklar üretilmeye başlanmıştır.

Arayüzey tabakasının kontak parametrelerini önemli derecede etkilediğinin anlaşılmasından sonra, arayüzey tabakası olarak farklı maddeler kullanılarak üretilen Schottky diyotlar üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Forrest *et al.* (2003) organik bileşiklerden 3,4,9,10- perylenetetracarboxylic dianhyride (PTCDA)'i arayüzey maddesi olarak kullanmak suretiyle, metal/organik/yarıiletken Schottky kontaklarını hazırlamışlardır. Yarıiletken olarak 10 Ωcm öz dirence sahip p-Si'yi kullanmışlardır. Schottky diyotlarının akım-gerilim karakteristiğinin, PTCDA'nın yüzeyinin üstünde kullanılan kontak metaline (Al, Au, Ti) kuvvetli bir şekilde bağlı olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca birçok farklı materyal kullanılarak, diyotların özelliklerinin (diyot kararlılığı ve çevre şartlarına duyarlılığı gibi) iyileştirilmesinin gerekliliğini vurgulamışlardır. Forrest and Schmidt (1986) organik/inorganik kontakın doğrultma karakteristiklerini ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir ve ilk defa bu tip kontaklarda iletkenliğin ve kapasitenin frekansa göre değişimini tartışmışlardır. Aynı zamanda düşük frekanslarda kapasite ve iletkenliğin uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak incelenmesiyle, yarıiletkenin yasak bandı arasındaki yüzey durumlarının yoğunluklarının büyüklüğünün ve enerjiye bağlılığının belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. n idealite faktörü değerinin ise inorganik materyallerle beraber organik materyallerle dengede olan yüzey durumlarına bağlı olduğunu göstermişlerdir.

İletken polimerler (polyprole, polythiophene, polyaniline,...) metalle kontak haline getirildiği zaman fotovoltaiik, elektroluminans ve doğrultucu etki gösterdiğinden, elektronik endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. İletken polimerler kolay hazırlanabilir, kolay şekil verilebilir, uygun maliyetli, esnek malzemelerdir. Bu elektriksel, mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Yukarıda da ifade edildiği gibi, hızlı anahtar uygulamaları, sensörler, FET'ler, MESFET'ler, mikrodalga devre elemanları, güneş pilleri, plastik bataryalar, varaktörler, elektrolüminesans cihazları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu nedenle günümüzde metalik polimer/inorganik-yarıiletken ve metal/polimer/yarıiletken kontaklar üzerinde çalışmalar artmıştır.

Organik malzemeler; iyonik ve kovalent bağlardan oluşur ve bağımsız moleküler yapıya sahip olup spin kaplama, vakumda buharlaştırma ile kaplama, elektrokimyasal kaplama gibi yöntemlerle elektronik ve optoelektronik devre elemanlarında ince filmler şeklinde oluşturulurlar (Yasuhiko 2000).

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada p-Si yarıiletken kristali yüzeyine elektrokimyasal yöntemle kaplanan antrakinin iletken organik malzemesi kullanılarak elde edilen Au/Antrakinin/p-Si/Al Schottky diyodunun 80 K ile 300 K sıcaklık aralığında *I-V* ve *C-V* karakteristikleri incelenmiştir. Tez çalışmasının birinci bölümü, konunun amacı ve önemini belirten “Giriş” kısmından oluşmaktadır. İkinci bölüm, konu ile ilgili literatür çalışmaları ve teorik bilgi içeren “Kuramsal Temeller” den oluşmaktadır. Üçüncü bölüm Au/p-Si/Al ve Au/Antrakinin/p-Si/Al diyotların imali için numune hazırlanması, temizlenmesi, elektrokimyasal yöntem, omik ve Schottky kontak yapılışını anlatan “Materyal ve Yöntem” den oluşmaktadır. Dördüncü bölüm, hazırlanan Au/p-Si/Al ve Au/Antrakinin/p-Si/Al Schottky diyodlarının *I-V* (akım-voltaj) ve *C-V* (kapasite-voltaj) karakteristiklerinin elde edilmesi, sıcaklığa bağlı değişimlerinin değerlendirilmesi ve elde edilen temel diyod parametrelerinin yorumlanmasını içeren “Araştırma Bulguları” kısmından oluşmaktadır. Elde edilen araştırma bulgularının genel değerlendirmesinin yapıldığı “ Tartışma ve Sonuç” bölümü ile tez bitirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Metal/Yarıiletken Kontak Teknolojisinin Gelişimi

Yarıiletkenler üzerine yapılan araştırmalar, yüz yıldan fazla bir geçmişe sahiptir. Silisyum yarıiletkeni ile elde edilen ilk kristal detektörün kullanılmaya başlamasından günümüze kadar yarıiletken teknolojisinde büyük ilerleme ve gelişme kaydedilmiştir. Yarıiletkenlerle yapılan ilk önemli uygulama, düşük frekanslı alternatif akımlar için selenyum doğrultucuların C.E. Fritts tarafından kullanılmasıdır. 1927 yılında P.H. Geiger ve L.O. Grondabl tarafından gerçekleştirilen bakır-oksit doğrultucular, telsiz ve batarya doğrultucu sistemlerinde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Yarıiletken malzemenin doğrultma özelliği, ilk olarak 1888 yılında Hertz tarafından radyo dalgalarının bulunması ile elektronik devrelerde yüksek frekanslı akımların dedeksiyonunu sağlamak için nokta kontaklı detektör yapmak suretiyle kullanılmıştır. 1939 yılında kristal detektörlerin geliştirilmesi sonucu termoiyonik lambalar yerini kristal detektörlere bırakmıştır.

Bakır sülfat ve demir sülfat gibi bileşikler üzerinde metaller ile oluşturulan nokta kontakların iletkenliklerindeki asimetric yapıyı 1874 yılında Braun'un keşfetmesi, ilk kontak ve doğrultma çalışmalarının başlamasına neden olmuştur. O yıllarda doğrultma mekanizması pekiyi anlaşılmamasına rağmen metallerle metalik sülfatların oluşturdukları kontak yapıların radyo alıcılarında kullanımları detektör amaçlı olmuştur. 1906 yılında Pickard, silisyum tabanlı nokta kontak detektörünün patentini almış ve 1907 yılında Pierce, farklı yarıiletkenler üzerine birçok metalin püskürtülmesiyle yapılan diyotların doğrultma karakteristiklerini açıklamıştır. Radar teknolojisinde mikrodalga sistemlerinin geliştirilmesiyle yüksek frekanslarda frekans değiştirici veya etkili bir doğrultucu olarak kullanılan yarıiletkenlerin olağanüstü malzemeler olması, dikkatlerin yarıiletkenler üzerinde toplanmasında büyük bir etken olmuştur. Bell laboratuvarlarında periyodik tablonun IVA grubunda germanyum üzerinde yapılan çalışmalar ile J. Bardeen ve W. H. Brattain tarafından transistörün icadı yarıiletken

teknolojisinin başlangıç noktasını oluşturmuştur. Transistörlerin keşfi ile yarıiletkenlerin temel özellikleri daha iyi anlaşılmasına yönelik yapılan elektriksel ve optiksel çalışmalar, çok hızlı bir biçimde artarak bu alanda son yüzyıl içerisinde büyük ilerlemelerin sağlanmasında temel etken olmuştur.

Metal-yarıiletken kontakların doğrultucu olarak kullanılmaları ile ilgili ilk çalışmalar ve bu alanda ilk fikirler, 1930'lu yıllarda olgunlaşmış ve metallerle yarıiletkenlerin birlikte doğrultucu olarak kullanabilecekleri fikrinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. 1931'de Schottky ve diğer çalışma arkadaşlarınca, kontaktan bir akım aktığında kontakta bir potansiyel engelinin olduğu fikri öngörülmüştür. Ancak kuantum mekaniğinin gelişimi bu döneme rastladığından 1932 yılında Wilson ve diğer araştırmacılar doğrultma olayını engel içerisinde elektronların kuantum mekaniksel olarak tünelleme yaptıkları biçiminde açıklamaya çalışmışlar ve ortaya sürmüş oldukları bu mekanizmanın kolay akım akışının yönünü yanlış belirlediği sonradan anlaşılmıştır. 1938 yılında birbirinden bağımsız olarak Schottky ve Mott, doğrultma olayını elektronların bir potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon esaslı geçişleriyle açıklamışlardır. Mott (1938), potansiyel engelinin metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını açıklayarak elektrik alanın sabit, elektrostatik potansiyelin lineer olarak değişebilmesi için engel bölgesinin serbest yüklerden arınması gerektiğini rapor etmiştir. Aksine Schottky (1939), Poisson denkleminde göre elektrostatik potansiyelin ikinci dereceden, elektrik alanın ise lineer olarak artabilmesi için engel bölgesinin sabit yoğunluklu serbest yükler içermesi gerektiğini ileri sürmüştür. Engelin şeklini belirleyen uzay yükünün rolü hakkında ortaya atılan benzer fikirler Sovyetler Birliğinden Davydov (1939, 1941) tarafından ileri sürülmüştür. Silisyum ve germanyum tabanlı metal-yarıiletken kontaklar, İkinci Dünya Savaşı sırasında radar teknolojisinde yaygınca kullanıldı. Bu uygulama yarıiletken fiziğinin önemli derecede gelişmesine katkı sağlamıştır. Bu süreçte Schottky ve Mott tarafından ortaya atılan akım iletim mekanizmasına karşın Bethe (1942) tarafından termioyonik emisyon teorisini ortaya atmıştır. Savaş yıllarından sonra metal-yarıiletken kontaklar üzerine yapılan çalışmalar, nokta-kontak transistörün keşfiyle yoğunluk kazanmış ve dikkatlerin azınlık taşıyıcı enjeksiyonu ile çalışan nokta-kontaklar üzerine toplanmasına

neden olmuştur. 1950 ve 1960'larda geliştirilen yüksek vakum sistemlerinde yarıiletken yüzeyine metallerin buharlaştırılmalarıyla yapılan kontakların, nokta-kontaklardan çok daha kararlı ve tekrardan üretilebilir oluşları ile araştırmacıları cezbetmiştir. Mead and Mead and Spitzer (1964), bazı element ve III-V yarıiletkenler için yarılmış yarıiletken yüzeyini kullanarak metal-yarıiletken sistemlerin engel yüksekliği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalarda, tüm durumlar için yüzeydeki Fermi seviyesi konumunun, metalin iş fonksiyonundan bağımsız olduğu ve değerlik bant kıyısından itibaren yasak enerji aralığının üçte birine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Bu yıllardan 1980'lerin ortalarına kadar metal-yarıiletken kontaklar üzerinde yoğun araştırmalar yapılmış olmasına rağmen, ilgi günümüze kadar devam etmiştir. Bu bağlamda metal-yarıiletken ara yüzeylerinde ortaya çıkan akım iletim mekanizması, engel oluşumu ve dağılımının anlaşılmasında çalışmalar farklı bir seyir kazanmıştır. Tung (1991) Schottky diyotlarla ilgili yaptığı çalışmalarda Schottky engel diyotlarda deneysel olarak elde edilen I - V karakteristiklerinin bazı durumlarda termioyonik emisyon modeli ile uyuşmayabileceğini göstermiştir. İdealite faktörü $n > 1.03$ olması halinde termioyonik emisyon modelinden sapmaların meydana geldiği ve bu durumun termioyonik emisyon modeli ile doğrudan açıklanamayacağını ve genel olarak Schottky engel yüksekliğinin uygulama gerilimine bağlı olmasına atfedilebileceğini açıklamıştır. Ayrıca $n > 1$ olması; imaj kuvvet etkisiyle engelin azalması, jenerasyon-rekombinasyon akımları, arayüzey durumları ve tünelleme gibi mümkün mekanizmalara da atfedilmiştir. Yarıiletken yüzeyin farklı işlemlere maruz bırakılmasının Schottky engel yüksekliğinin değişimine sebep olduğu deneysel olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, yarıiletken yüzeyine, Schottky kontak oluşturmak için, kaplanan metal kontaklar vasıtasıyla yarıiletken yüzey şartlarının değişimi veya çeşitli işlemlerden dolayı oluşan metalik fazlar Schottky engel yüksekliğini değiştirebileceği saptanmıştır (Turner and Rhoderick 1968; Padovani 1968; Song *et al.* 1986; Rhoderick and Williams 1988; Maeda 2001; Werner and Güttler 1991; Chand and Kumar 1996; Abay *et al.* 2003; Coşkun *et al.* 2003; Hastas *et al.* 2004; Gülnahar and Efeoglu 2008; Gülnahar 2008; Korkut 2009).

Arayüzey tabakasının kontak parametrelerini önemli derecede etkilediğinin anlaşılmasından sonra, arayüzey tabakası olarak farklı maddeler kullanılarak üretilen Schottky diyotları üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Deneysel çalışmalarda elde edilen metal/organik/yarıiletken kontakların karakteristikleri incelendiğinde, organik tabaka diyodun etkin engel yüksekliğini arttırabilir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde polyprole, polythiophene ve polyaniline gibi iletken polimerler metalle kontak haline getirildiği fotovoltaiik, elektroluminans ve doğrultucu etki gösterdiği söylenebilir. Bu özelliklerinden dolayı iletken polimerler elektronik endüstrisinde ve bilimsel araştırmalarda önemli bir yere sahip olmaya başlamışlardır. İletken polimerler kolay hazırlanabilir, kolay şekil verilebilir, uygun maliyetli, esnek malzemelerdir. Bu elektriksel, mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı hızlı anahtar uygulamaları, sensörler, FET'ler, MESFET'ler, mikrodalga devre elemanları, güneş pilleri, plastik bataryalar, varaktörler, elektrolüninesans cihazları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kolay üretilmesi ve geniş kullanım alanına sahip olması metal/polimer/yarıiletken kontaklar üzerinde araştırmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Yarıiletken olarak polythiophene polimerini kullanıp bir metal/yarıiletken/metal Schottky diyonu imal edilmiştir ve bu diyonun akım-gerilim ve kapasite-gerilim karakteristikleri incelenmiştir. Kontak metali olarak Au ve Al kullanılarak kontağın Au tarafı omik, Al tarafı ise doğrultucu kontak özelliği göstermiştir (Türüt and Köleli 1992).

Polipirolün p-tipi Si üzerine anodik oksidasyon metodu ile kaplanmasıyla polimer/p-Si Schottky diyonu elde edilerek $I-V$ ve $C-V$ karakteristikleri incelenmiştir. Bu diyonun $I-V$ karakteristiğinden engel yüksekliği $\Phi_b=0.84$ eV ve $C-V$ karakteristiğinden $\Phi_b=0.94$ eV olarak bulunmuştur. İdealite faktörünün ise $n=1.2$ olarak bulunduğu bu diyot iyi bir doğrultucu kontak özelliği göstermektedir. Bu polimerlerin kaplama için eritme işleminden sonra, engel yüksekliğindeki artma ve idealite faktöründeki azalmanın

önemli derecede düzeltilebileceğini ve p-Si'un derin seviyelerinin karakterizasyonu için büyük engel yüksekliğine sahip metalik polipirol/p-Si yapıların kullanılabileceğini göstermiştir (Onganer *et al.* 1996).

Farklı sıcaklıklarda metallerle ve polimerlerle yapılan Schottky diyotlardan yapılan ölçümler diyot parametreleri hakkında pek çok bilgi vermektedir. İletken polimerler kullanılarak yapılan Schottky kontaklarda sıcaklığın artmasıyla engel yüksekliği artarken idealite faktörü azalmaktadır. Bu davranış arayüzeyde engel yüksekliklerinin bir Gauss dağılımına sahip olduğunu ve bu da arayüzeyde homojen bir dağılım olmadığını gösterir (Bandyopadhyay *et al.* 1999).

Konjuge polimerler katıhal devre elemanlarının üretimi için önemli bir yer tutmaktadır. Konjuge polimerlerin moleküler yapı içinde farklı gruplarının olması bu polimerlerin kimyasal ve elektrokimyasal yollarla yalıtkan bir malzeme olmaktan çıkıp metalik özellikler kazanacağını gösterir. Polimerler, uygun şartlar altında çevresel kararlılığının iyi olması, yüksek elektriksel iletkenliğine sahip olması, kolay ve ucuz üretilmesinden dolayı oldukça ilgi çekmişlerdir. Hem metalik hem de yarıiletken özelliğe sahip polimerlerden biri olan polipirol teknolojik açıdan çok önemlidir. Polipirol mikrodalgaları soğurma özelliğinden dolayı uçakların kaplamalarında kullanılır. Bu kaplama sayesinde radara yakalanmayan uçaklar yapılmaktadır. Moleküler elektronik cihazlar arasında polipirol, politiofen ve polianilin gibi konjuge polimerlere dayanan Schottky cihazları mükemmel elektriksel karakteristiklerinden dolayı önemli derecede ilgi görmüşlerdir. Polimerlerin bir diğer avantajı ise inorganik yarıiletkenlere dönüştürmede atomik seviyede düzenli yüzeylere ihtiyacının olmamasıdır (Camaioni *et al.* 2000; Aydoğan *et al.* 2005a).

Polyaniline/p-Si/Al yapılarında yaşlanma etkileri Sağlam *et al.* (2004) tarafından incelenmiştir. Polyaniline filmi anodizasyon metodu ile p-Si yüzeyine kaplanmışlardır. Polyaniline/p-Si/Al yapısının net bir şekilde doğrultma özelliği gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bu yapı için engel yüksekliğinin hemen alınan ölçümlerden bulunan 0,79

eV değerinden, 120 gün sonra alınan ölçümleri için 0,81 eV değerine değiştiğini rapor etmişlerdir. Aynı şekilde idealite faktörünün 2,09 değerinden, 1,85 değerine azaldığını belirtmişlerdir.

Aydoğan *et al.* (2005a) araştırmalarında bir Schottky diyodunun klasik modeli eklemine ani ve sabit engel yüksekliğine sahip olduğunu kabul etmektedir. Ancak *I-V* karakteristiklerinden elde edilen veriler termoiyonik emisyon modelinden sapmaların olduğunu göstermektedir ve bu durum engelin inhomojenliği ile açıklanmaktadır. Keza 45°C elektrolit sıcaklığında organik polipirolünün elektrokimyasal olarak n-Si üzerine kaplanmasıyla polipirol/n-Si yapısı elde edildi. Bu yapının 77-300K sıcaklık aralığında *I-V* ve *C-V* karakteristiklerinden engel yükseklikleri elde edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda *C-V*'den elde edilen engel yükseklikleri *I-V*'den elde edilen engel yüksekliklerinden daha yüksektir. Bu davranış arayüzey tabakaya, arayüzey hallerine ve engelin inhomojenliğine atfedilmiştir.

Aydoğan *et al.* (2005b) tarafından yapılan çalışmada Au/PANI/p-Si/Al yapısının 90-300K sıcaklık aralığında *I-V* karakteristikleri incelenmiştir. Termoiyonik- emisyon modeline dayalı *I-V* karakteristikleri gösteriyor ki, düşük sıcaklıklarda idealite faktörü artarken, sıfır beslem engel yüksekliğinde anormal bir azalma vardır. Bu davranış arayüzeyde etkili olan engel yüksekliği inhomojenliği nedeniyle engel yüksekliğinde bir Gauss dağılımı olduğu varsayılmasıyla açıklanmaktadır. Sonuç olarak Au/PANI/p-Si/Al yapısı iyi bir doğrultucu kontaklıdır ve p-Si'de Schottky engelin *I-V* karakteristiklerinin sıcaklığa bağlılığı, engel yüksekliklerinin Gauss dağılımı ile termoiyonik-emisyon mekanizmasına dayanarak açıklanmaktadır.

P₂ClAn emeraldine tuzu asetik asit (CH₃COOH) kullanarak kimyasal olarak sentezlenmiş ve elde edilen P₂ClAn(CH₃COOH) polimeri p-Si tabakanın önyüzüne buharlaştırılarak Al/P₂ClAn(CH₃COOH)/p-Si/Al heteroeklem yapısı elde edilmiştir. Bu yapının SCLC (space charge limited current) modeline uyduğu görülmüştür. Ayrıca yapının mobilitesi hesaplanmış ve literatürle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Düşük kapasite-voltaj-frekans ve iletkenlik-frekans ölçümlerinden arayüzey hal yoğunluğu için ortalama bir değer elde edilmiştir (Özdemir *et al.* 2007).

Dönel kaplama tekniği kullanılarak numune yüzeyine ince film oluşturulan organik Pyronine-B arayüzey tabakalı Au/Pyronine-B/n-InP ve arayüzeylessiz Au/n-InP schottky diyotların I - V karakteristiklerinden diyot parametreleri Soylu (2007) tarafından belirlenmiştir. Hazırlanan Au/n InP ve Au/Pyronine-B/n-InP Schottky kontakların I - V ve C - V ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak alındı. Oda sıcaklığında Au/Pyronine-B/n-InP yapısının engel yüksekliği referans Au/n-InP yapısınıninkine göre yaklaşık 0,18 eV artmasına rağmen 1,103 idealite faktörü değeri ile ideallik sınırı içinde kaldığı gözlemlendi. Deneyisel I - V verilerinden elde edilen engel yükseklikleri artan sıcaklıkla artarken idealite faktörleri azalmaktadır.

Au/Orcein/p-Si/Al diyodu yapılarak I - V değerlerinden diyot parametreleri hesaplandı. Daha sonra oda sıcaklığında bu yapının I - V , C - V ve C - F karakteristikleri incelenerek, diyodun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Aydoğan *et al.* (2010) tarafından belirlendi. I - V karakteristikleri kullanılarak idealite faktörü 2,48 ve engel yüksekliği 0,7 eV olarak hesaplanmıştır. Çıkan sonuçlardan orcein tabakası yapının etkin engel yüksekliğini arttırdığı gözlemlenmiştir. Çünkü bu tabaka Au ve p-Si arasında fiziksel bir engel oluşturmaktadır.

Buna benzer bir çalışmada Indigotindisulfonate Sodium (IS) organiği kullanılarak yapılan Au/Indigotindisulfonate Sodium (IS)/n-Si/Al doğrultucu kontağın akım-voltaj ölçümlerinden diyot karakteristikleri Aydoğan *et al.* (2010) tarafından belirlendi. Oda sıcaklığında diyodun I - V , C - V ve C - F ölçümleri alındı. Hem Cheung hemde Norde fonksiyonları yardımıyla, diyodun I - V karakteristiğinden idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri belirlendi. Bu diyodun I - V karakteristiğinden idealite faktörü 1,73 ve engel yüksekliği 0,83 eV olarak hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre IS tabakası metal ile yarıiletken arasında fiziksel bir engel oluşturduğundan Au/Indigotindisulfonate Sodium (IS)/n-Si/Al yapısının engel yüksekliğini arttırmıştır.

Cu/n-InP ve PSP organik arayüzeyli Cu/PSP/n-InP Schottky kontaklarından, Cu/PSP/n-InP diyodu için 0,82 eV'lık bir engel yüksekliğine ulaşılmıştır. Bu yüksek performans Cu ile n-InP arasındaki arayüzey organik ince katmanın etkisine atfedilir. Cu/PSP/n-InP Schottky diyodun C - V ölçümleri kullanılarak difüzyon potansiyeli ve engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0,73 V ve 0,86 eV olarak hesaplanmıştır (Güllü *et al.* 2011).

Fe_3O_4 /Si eklemi oluşturularak TEM görüntüleri ve XRD ölçümlerinden Si yüzeyine kaplanmış Fe_3O_4 nano partüküllerin karakterizasyonu yapıldı. Yapılan Au/ Fe_3O_4 /p-Si Schottky diyotların I - V (Akım-Voltaj) ve 500 kHz frekansta C - V (Kapasite-Voltaj) ölçümleri alındı. I - V ölçümleri ile diyotların karakteristik parametreleri olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Aynı özellikteki diyotların engel yüksekliği değerlerinin 0,71-0,79 eV arasında değiştiği ve idealite faktörü değerlerinin 2,07-2,59 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Diyodun doğrultma oranı yaklaşık olarak 3×10^4 olarak hesaplandı. Bu diyotun I - V karakteristikleri incelendiğinde düşük gerilim değerlerinde omik özellik gösterdiği yüksek gerilim değerlerinde SCLC yapısına uyduğu söylenebilir (Çaldıran *et al.* 2013a).

Elektrokimyasal kaplama tekniği kullanılarak elde edilen organik arayüzeyli Au/Antrasen/n-Si/Al Schottky diyodun iyi bir doğrultma özelliği gösterdiği Çaldıran *et al.* (2013b) tarafından tespit edilmiştir. I - V (Akım-Voltaj) ölçümleri ile bu diyodun karakteristik parametrelerinden engel yüksekliği, idealite faktörü, arayüzey yoğunluğu ve seri direnç değerleri hesaplandı. Organik arayüzey malzemesinin Au ile yarıiletken n-Si arasında fiziksel bir engel oluşturarak Au/Antrasen/n-Si/Al diyodunun engel yüksekliğini artırdığı görülmüştür. Ayrıca bu diyotun I - V karakteristikleri incelendiğinde diyodun düzbeslem bölgesinin düşük gerilim değerlerinde omik özellik gösterdiği ve yüksek gerilim değerlerinde SCLC yapısına uyduğu söylenebilir.

2.2. Metal/Yarıiletken Kontaklar

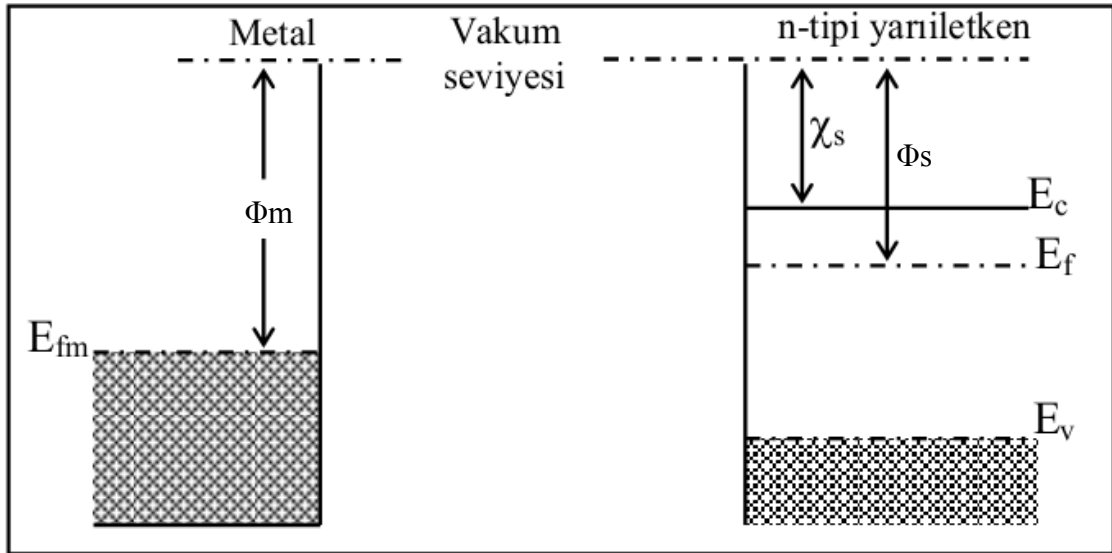
Metal-yarıiletken kontaklar, bir metalle yarıiletkenin atomik seviyede devamlılıkla birleştirilmesi sonucu oluşturulur. Bu kontaklarda metal olarak Au, Al, In, Ag, Sn gibi çeşitli metaller kullanılırken yarıiletken olarak n veya p tipi yarıiletken malzeme kullanılmaktadır. Böylece metal-yarıiletken kontakları, kullanılan yarıiletkenin tipine göre; metal n -tipi yarıiletken kontak ve metal p -tipi yarıiletken kontak olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Akım iletim durumlarına göre kontaklar; doğrultucu kontaklar (Schottky kontak) ve omik kontak olmak üzere iki durumda incelenir. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) olmak üzere metal/ n -tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ ise omik kontak oluşur. Metal/ p -tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ için omik kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ için ise doğrultucu kontak oluşur.

2.2.1. Doğrultucu (Schottky) kontaklar

İki iletken, kontak haline getirildiğinde aralarındaki yük alışverişinden sonra, yeni denge durumu meydana gelir ve her iki maddenin Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Bu kural sadece iki iletken arasındaki kontak durumunda değil, bir iletken ve bir yarıiletken (n -tipi ya da p -tipi) arasındaki kontak durumunda da meydana gelir. Oluşan yeni yük dağılımı nedeniyle kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir. İki metal arasında yapılan kontak durumunda, bu dipol tabakası kontağın her iki tarafındaki yüzey yükleri nedeniyle meydana gelir. Oluşan bu kontak, elektronların her iki yönde serbestçe hareket edebilmeleri nedeniyle omik kontak olarak adlandırılır. Şayet, kontağı oluşturan maddelerden biri metal diğeri yarıiletken ise oluşacak kontak omik ya da doğrultucu olabilir. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken ters yöndeki geçişleri, kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli nedeniyle zorlaşır. Yarıiletkenin iş fonksiyonuna göre bu durum n ve p tipi yarıiletkenler ile yapılan diyotlarda farklılıklar gösterir.

2.2.1.a. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

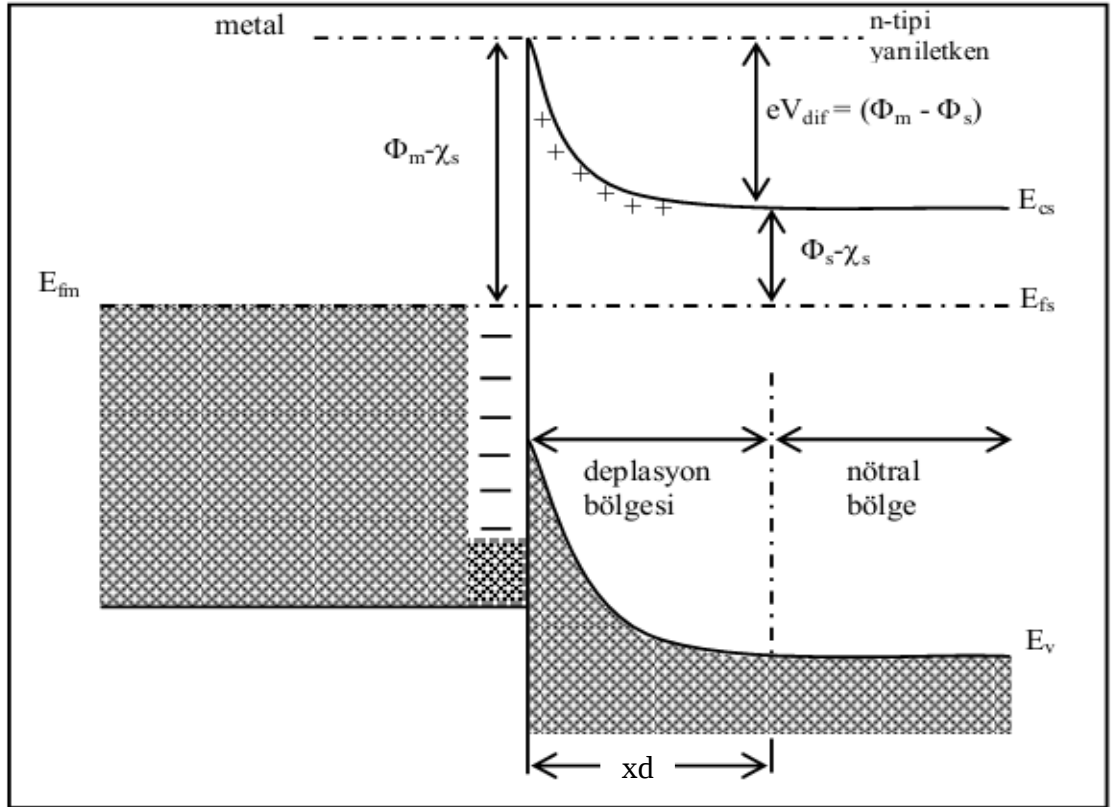
Bir metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde, metal-yarıiletken arayüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engel oluşur. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolaylıkla hareket ederken elektronların diğer yönde hareketi potansiyel engel tarafından zorlaştırılır. Şekil 2.1 $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda iş fonksiyonu Φ_m olan metal ile iş fonksiyonu Φ_s olan n-tipi yarıiletkenin kontakta önceki enerji bant diyagramlarını göstermektedir.



Şekil 2.1. Kontakta önce metal ve n-tipi yarıiletkenin ait enerji bant diyagramları

Vakum seviyesi olarak metalin tam dışındaki bir noktada sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi referans alınmıştır. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m); bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) de benzer şekilde yarıiletken için tanımlanır. Yarıiletkenin iş fonksiyonu değişken bir nicelikdir. χ_s ise yarıiletkenin elektron yakınlığıdır ve katkı atomlarının konsantrasyonundan bağımsızdır. Yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanındaki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak

için gerekli olan enerji “elektron yakınlığı” olarak tanımlanır. Kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontak sonrası termal denge sağlanıncaya kadar yarıiletkenin metale elektron geçişi olur. Termal denge durumunda Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Kontakta sonraki durum Şekil 2.2’de görülmektedir. Yarıiletkenin enerji seviyeleri $\Phi_m - \Phi_s$ kadar alçalmıştır. Kontakta oluşan dipol tabakası nedeniyle eklem üzerinde bir potansiyel engel oluşur. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği $\Phi_m - \Phi_s$ kadar, metal tarafındaki yüksekliği ise $\Phi_m - \chi_s$ kadardır. Difüzyon potansiyeli cinsinden bu engelin yüksekliği; $eV_{dif} = \Phi_m - \Phi_s$ şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 2.2. Kontakta sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı

Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metale geçerken bu engelle karşılaşırlar. Elektronlar metale geçtiklerinde yarıiletken tarafında iyonize olmuş donörleri bırakırlar. Yarıiletken tarafındaki bu yükler hareketsiz oldukları için uzay yüküdürler. Kontaktaki

yüzey tabakası potansiyel engelden dolayı “engel tabakası” olarak adlandırılır. Bu tabakanın kalınlığı iyonize olmuş donör konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyelinin değerine bağlı olarak değişir. Bu tabaka engel tabakası, uzay yükü bölgesi, geçiş bölgesi veya arınma bölgesi gibi isimlerle adlandırılır. Pozitif ve negatif yükler arasında kalan bu bölge kapasite özelliğine sahiptir ve “Schottky kapasitesi” olarak adlandırılır. Termal denge durumunda metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal yolla kazandıkları enerji potansiyel engelini aşmaya yetecek büyüklükte olduğu zaman, kontakta eşit ve zıt yönde bir I_0 sızıntı akımı oluşur. Yarıiletkene $-V$ gerilimi uygulanırsa metalden yarıiletkene geçen elektronlar için engel yüksekliği değişmez. Bundan dolayı yarıiletkenden metale doğru olan akım sabit kalır. Fakat yarıiletken tarafında iletkenlik bandı eV kadar yükseleceği için yarıiletkenden metale geçen elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalır. Bu durumda metalden yarıiletkene doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ faktörü kadar artar. Bu durumda oluşan net akım,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

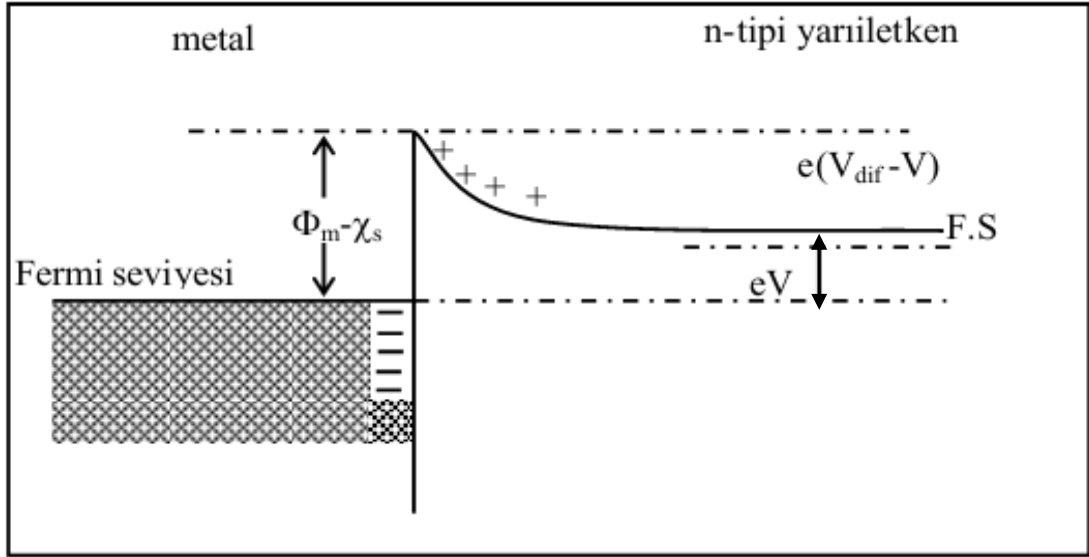
olarak ifade edilir (Ziel 1968; Rhoderick 1988). Bu ifadede ($eV \gg kT$) olması durumunda 1 rakamı diğer terimin yanında çok küçük bir değer olduğu için ihmal edilebilir. Bu durumda eşitlik;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \right] \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir.

I net akımı pozitifdir. Bu duruma “düz beslem” durumu denir. Şekil 2.3 düz beslem durumunda metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın enerji bant diyagramını göstermektedir. Yarıiletken tarafına $+V$ gerilimi uygulanırsa iletkenlik bandı eV kadar

alçalır. Yarıiletkenin engel yüksekliği eV kadar artar. Oluşan net akım $-I_0$ değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna da ($eV \ll -kT$) “ters beslem” durumu denir (Ziel 1968; Rhoderick 1988).



Şekil 2.3. Düz beslem durumunda metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı

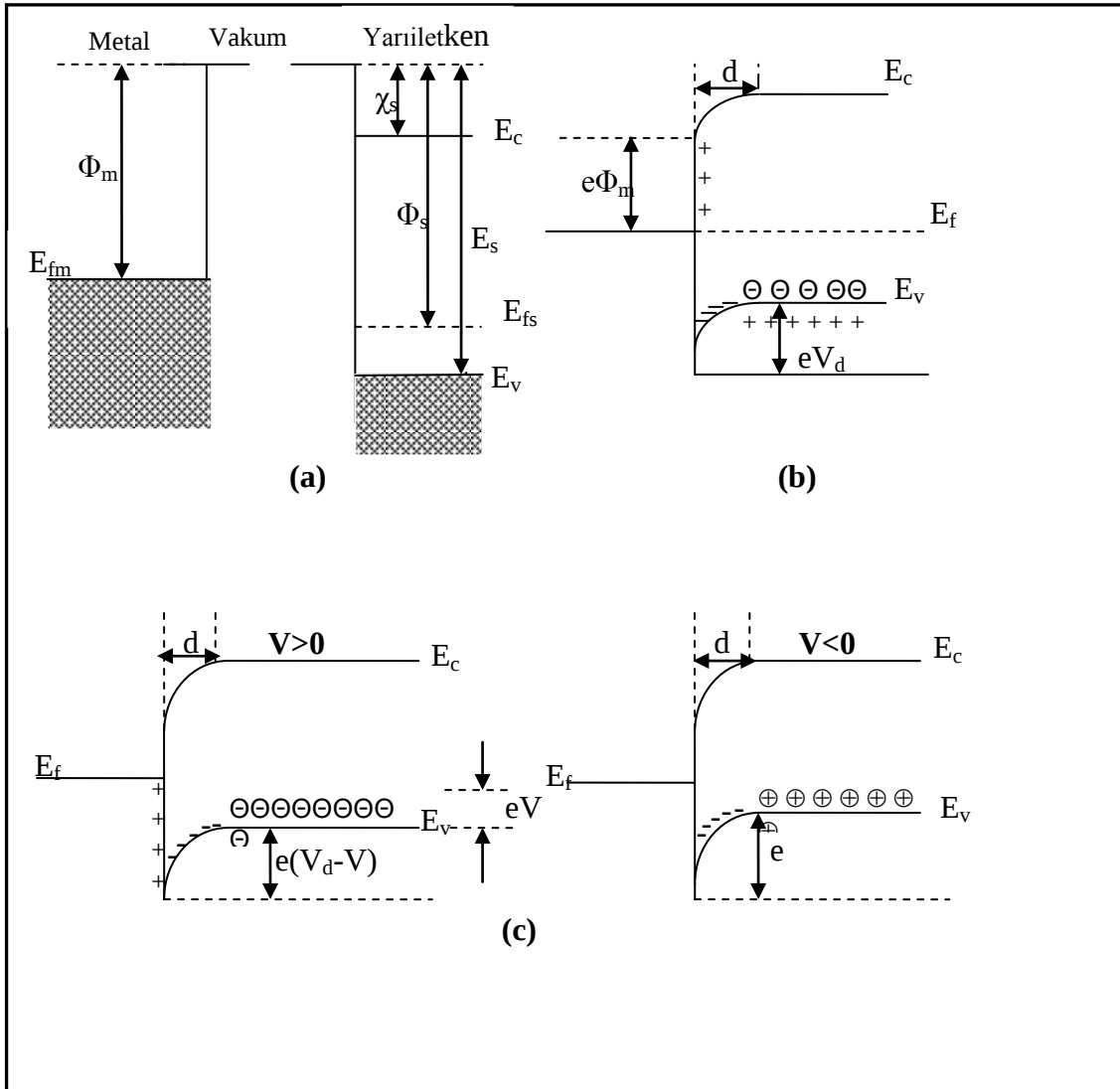
2.2.1.b. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Şimdi de bir metal ve bir p -tipi yarıiletken dikkate alalım ve oluşan kontak için $\Phi_m < \Phi_s$ olsun. Oda sıcaklığında akseptörlerin hepsinin iyonize olduğunu kabul edelim. Kontakta önce, Şekil 2.4.a’da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontakta sonra her iki maddenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metalden yarıiletkeneye doğru elektron akışı olur. Bunun sonucu olarak, yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler d kalınlığında bir uzay yükü tabakası içerisinde dağılırlar. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiği için, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m \quad (2.3)$$

olur. Burada V_{dif} difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği;

$e\Phi_b = E_s - \Phi_m$ ifadesi ile verilir.



Şekil 2.4. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontakın enerji-bant diyagramı a; kontakdan önce, b; kontakdan sonra ve termal dengede, c; $V \neq 0$ durumunda

Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanarak, metalin içine geçebilirler. Benzer şekilde metalde termal olarak oluşan bazı holler de engeli aşacak kadar enerji kazanarak, yarıiletkenin içine geçebilirler. Böylece kontakta engelden geçen eşit ve zıt yönlü iki I_0 akımı oluşur.

Yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa (Şekil 2.4.b), soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Bunun sonucu olarak yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşer ve buna bağlı olarak yarıiletkenden metale geçen holler için engel yüksekliği eV kadar azalır. Sonuçta sağdan sola doğru olan akım pozitif kabul edilirse, karakteristik akım,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

olacaktır. Bu durum bir doğrultucu karakterizasyonudur.

2.2.2. Omik kontaklar

Uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren metal/yarıiletken eklem **omik kontak** olarak tanımlanır (Neamen 1992; Brillson 1993). Aşırı katkılanmış p tipi bir yarıiletkende fermi enerji seviyesi (E_f), valans bandının içine girer. Bu durumda dar bir potansiyel engeli oluşacaktır ve oluşan potansiyel engel dalgaboyu mertebesinde olacağından tünelleme yolu ile her iki yönde serbestçe yük geçişi gözlenecektir. Akım-gerilim ilişkisi Ohm kanunu ile verilen kontaklar omik bir davranış sergilerler. Kontak direncinin değeri ise omik kontağın kalitesini belirler. Her iki yönde de akım akışına müsaade edecek omik kontak elde etmenin üç genel şekli vardır. Bunlardan ilki Schottky engel yüksekliği düşük olan bir eklem oluşturularak elektronların her iki yönde de geçiş yapabileceği bir kontak yapmaktır (non-rectifying barrier). İkincisi Schottky engel yüksekliği büyük olsa

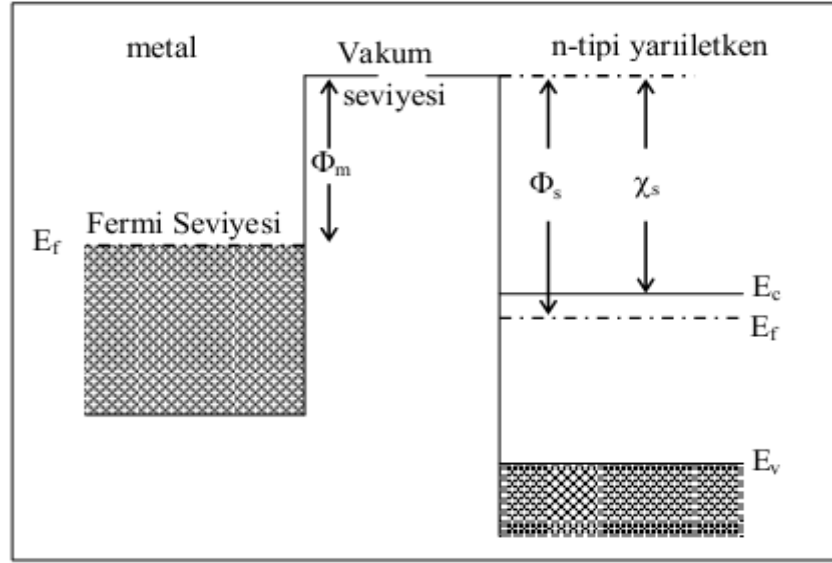
dahi elektronların tünelleme yapabileceği dar potansiyel engele sahip bir kontak oluşturmaktır (tunelling barrier). Bu tünelleme engeli, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik (n^{++} veya p^{++}) gösterecek şekilde katkılarla suretiyle elde edilir. Üçüncüsü termal difüzyonla dar bant aralıklı ve taban ile aynı özellikte bir tabaka oluşturmak suretiyle omik kontak oluşturmaktır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu ve fermi enerji seviyesinin pozisyonuna göre n ve p tipi yarıiletkenler ile yapılan omik kontaklar farklılıklar gösterir.

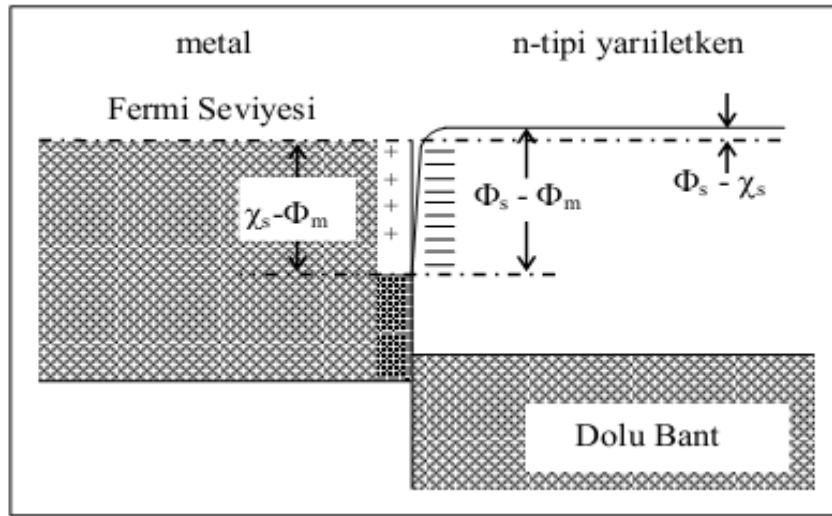
2.2.2.a. Metal/ n -tipi yarıiletken omik kontaklar

$\Phi_s > \Phi_m$ durumunda, bir metalle bir n -tipi yarıiletken arasında omik kontak oluşur. Şekil 2.5’de kontakta önce metalin ve yarıiletkenin enerji bant diyagramları verilmiştir. Kontakta önce metalin Fermi seviyesi yarıiletkenin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yukarıdadır. Kontakta sonra metaldeki elektronlar geride pozitif yükleri bırakarak yarıiletkene geçerler. Metal tarafında pozitif yüzey yükü, yarıiletken tarafında ise negatif yüzey yükü tabakası oluşur. Böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Yük alış veriş bittikten sonra yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil 2.6’da görüldüğü gibi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükselir. Kontak haline getirilmiş ve dengedeki metal-yarıiletken omik kontakta, metalden yarıiletkene ve yarıiletkenenden metale kolayca yük akışı olur.

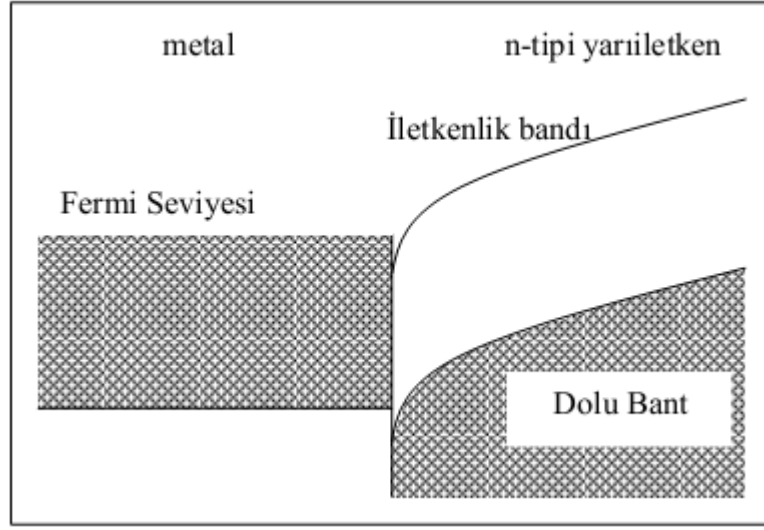
Metal tarafına pozitif bir V gerilimi uygulanırsa yarıiletkenenden metale akan elektronlar için engel olmadığından elektronlar bu yönde kolayca hareket ederler (Şekil 2.7). Yarıiletkene bir pozitif gerilim uygulanırsa elektronların karşılaşacakları engel yüksekliği yine çok küçük olacak ve elektronlar metalden yarıiletkene kolayca akacaktır (Şekil 2.8).



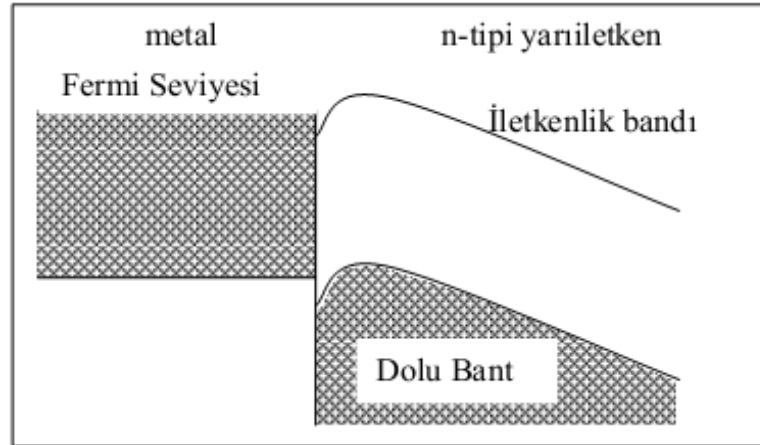
Şekil 2.5. Kontak yapılmadan önce metal ve n -tipi yarıiletken enerji bant diyagramı



Şekil 2.6. Kontakta sonra metal ve yarıiletken omik kantağın enerji bant diyagramı



Şekil 2.7. Düz beslem durumunda metal ve n -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı

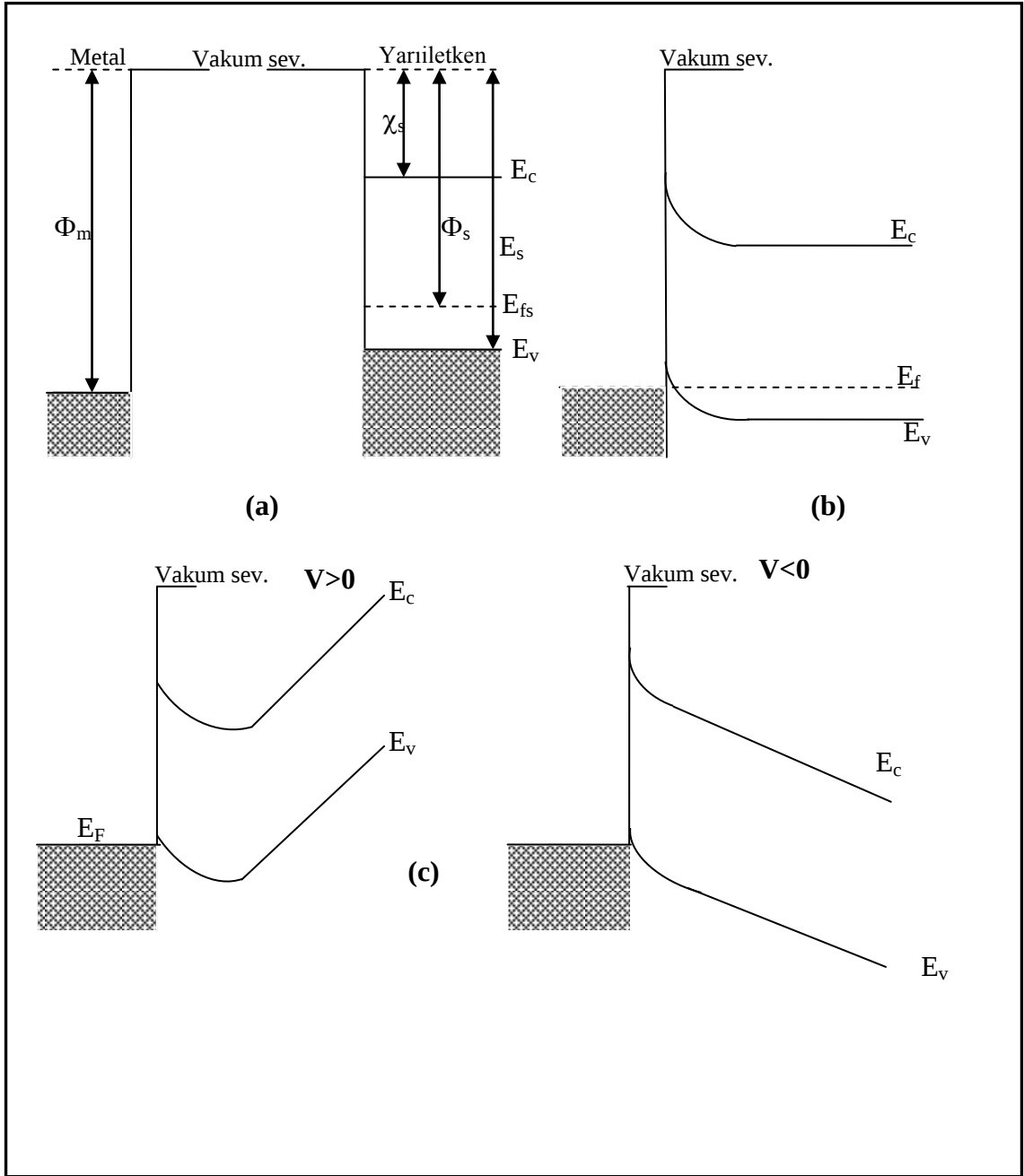


Şekil 2.8. Ters beslem durumunda metal ve n -tipi yarıiletken omik kontağın enerji bant diyagramı

Sonuç olarak böyle bir kontakta, elektronlar her iki yönde de kolayca hareket edebilirler. Omik kontağa bir $+V$ gerilimi uygulandığında, potansiyel bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Metale negatif bir $(-V)$ gerilim uygulandığında, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektron geçişi olmasından dolayı bu kontaklara **enjeksiyon kontaktarı** da denir (Ziel 1968).

2.2.2.b. Metal/*p*-tipi yarıiletken omik kontaklar

$\Phi_m > \Phi_s$ durumunda bir metalle bir *p*-tipi yarıiletken kontak halinde olsunlar. Şekil 2.9.a'da görüldüğü gibi, kontakta önceki durumda yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakta sonra termal denge durumunda bir yük mübadelesi meydana gelecektir. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (hollerden dolayı) bırakarak metal tarafına geçerler ve metal tarafında bir negatif yüzey yükünün oluşmasına neden olurlar. Buna bağlı olarak yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 2.9.b'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı düşer. Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla *p*-tipi olur. Elektronlar, metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca akabilirler. Bu yük hareketi, hollerin yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen holler yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralize olurlar. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler de kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler.



Şekil 2.9. Metal/*p*-tipi yarıiletken omik kontakın enerji bant diyagramı a; kontakdan önce, b; kontakdan sonra, c; $V \neq 0$ durumunda

2.3. Tünelleme Eklemleri

Tünelleme metal-yarıiletken doğrultucu diyotlardaki önemli bir akım iletim mekanizmasıdır. Elektronlar engel yüksekliğini aşmak yerine daralan engel genişliği sayesinde Schottky engeli boyunca tünellenirler. Geniş yasak enerji aralığına sahip yarıiletken numuneler üzerinde omik kontak yapmak çok zordur. Çünkü bu malzemeler üzerinde düşük engel yüksekliği oluşturmak suretiyle taşıyıcıların her iki yönde de geçiş yapabilmeleri pratik açıdan büyük güçlükler doğurur. Bu tür malzemeler için, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik gösterecek biçimde (n^{++} ya da p^{++}) katkılanmak suretiyle, büyük engel yüksekliğine sahip, ancak taşıyıcıların her iki yönde de tünelleme yapabilmesine izin verecek kadar dar potansiyel engeli oluşturmak mümkündür. Katkılama işlemi termal difüzyon, iyon ekme (ion implantation), ya da epitaksiyel büyütme tekniklerinden biri kullanılarak başarılabılır (Neamen 1992).

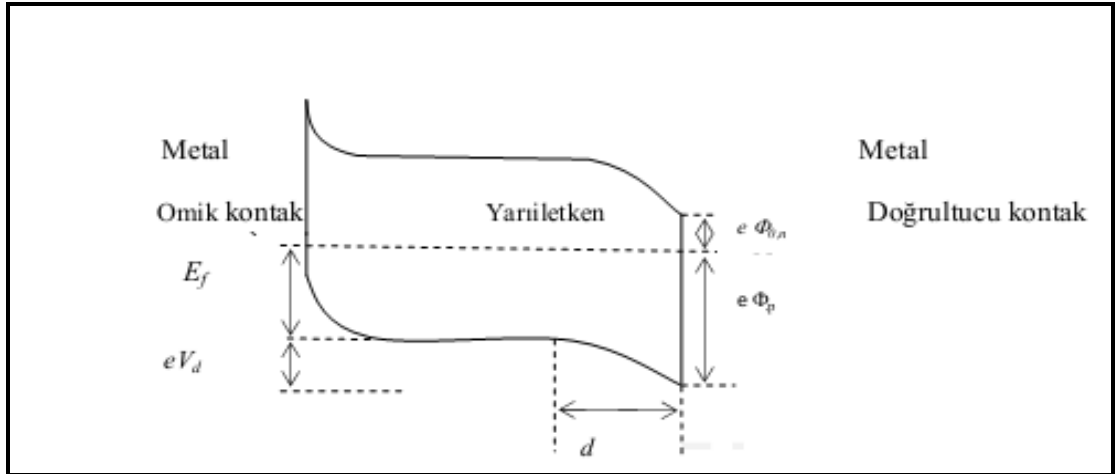
Coşkun (2000) tarafından bildirildiğine göre; bir doğrultucu kontakın uzay yükü bölgesinin genişliği (deplasyon bölgesi), yarıiletken katkılanan kirlilik atomlarına ait konsantrasyonun karekökünün tersiyle orantılıdır (Aydoğan 2003).

$$w = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s}{qN_d}\right) \left(\phi_b - (E_c - E_f) - V - \frac{kT}{q} \right)} \quad (2.5)$$

Bundan dolayı uzay yükü bölgesinin genişliği, katkı atomlarının konsantrasyonunun artmasıyla azalır. Bu durumda katkı konsantrasyonu arttıkça, potansiyel engel genişliği azalacak ve taşıyıcıların her iki yönde de tünelleme yapma ihtimaliyeti artacaktır. Bu yüzden tünelleme ile omik kontak oluşturmada yarıiletken yüzeyin aşırı tiplilik gösterecek seviyede katkılanması gerekmektedir.

2.4. Metal (Omik) /p-tipi Yarıiletken/ Metal (Doğrultucu) Yapısı

Temirci (2000) tarafından bildirildiğine göre, metal (Omik)/p-tipi Yarıiletken/ Metal (Doğrultucu) yapısı; p-tipi yarıiletkenin bir yüzeyinin hol bakımından çok zengin olan p^+ omik kontağı ile diğer yüzeyinin pM doğrultucu kontağı yapılmasıyla oluşturulur. Böyle bir yapının enerji-bant diyagramı Şekil 2.10'da görülmektedir. Bu yapının p^+ omik kontak tarafına pozitif bir gerilim uygulandığında yapı doğru beslemde, negatif bir gerilim uygulandığında yapı ters beslemde olur. p^+pM yapısı, diyot karakteristiği gösterdiği için böyle bir yapı, yarıiletken diyot olarak nitelendirilir (Kotan 2008).



Şekil 2.10. p^+pM yarıiletken yapının termal dengede enerji-bant diyagramı

2.5. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Sıcaklığın Etkisi

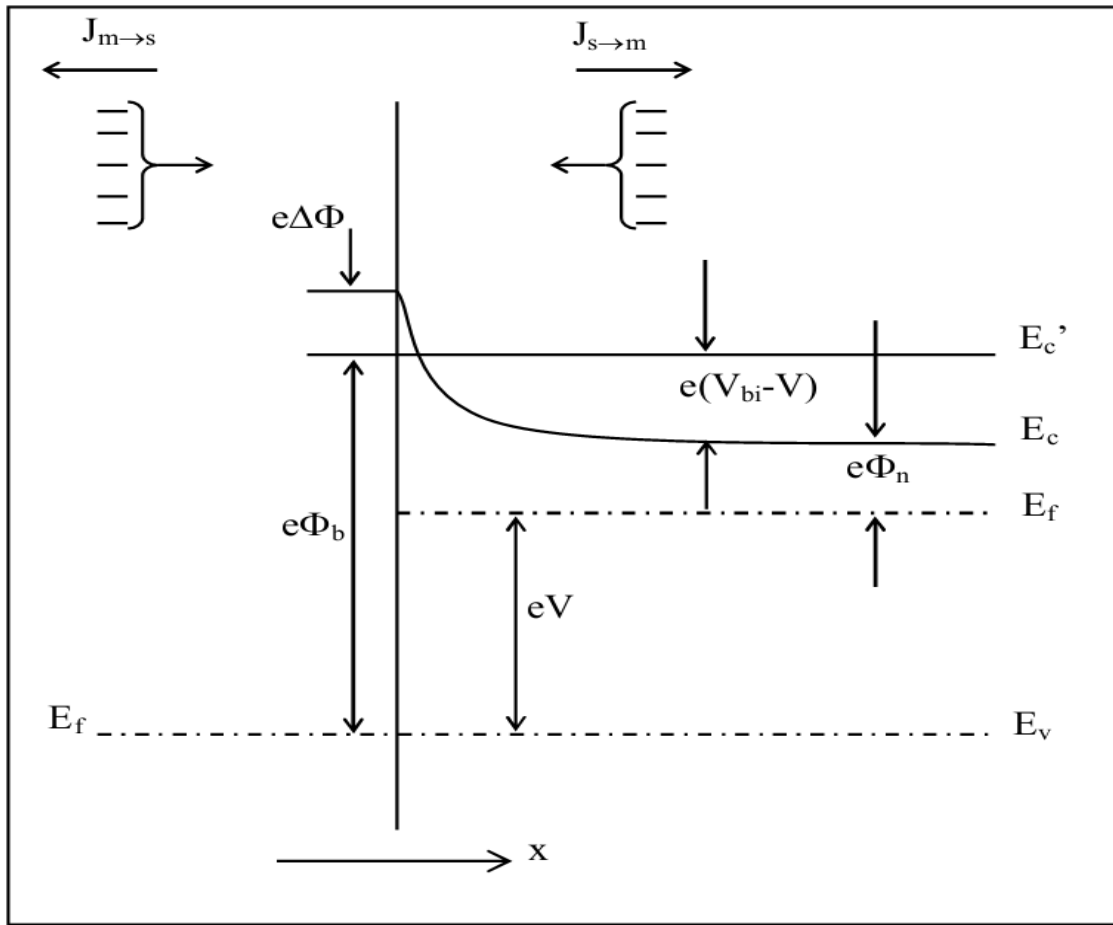
Yarıiletken devre elemanlarında kullanılan kontakların çoğu farklı şekillerde ısıya maruz kalmaktadır. Metalin yarıiletkene adhezyonunu artırmak için bu durum kaçınılmaz olabilir. İdeale yakın doğrultucu kontak elde ederken kontakın eriyebileceği sıcaklıktan kaçınmak çok önemlidir. Çünkü arayüzey yarıiletkenin içinde keskin metalik sivri bir çıkıntıya sahip düzlemsel olmayan yapıya sahip olmaya başlar. Bu durum oluştuğunda, çıkıntının ucundaki yüksek alan bölgesi elektriksel karakteristikleri nispeten bozulabilir (Aydoğan 2003).

Devre elemanı uygulamalarında diyotda akım akışı ile oluşan ısının bir sonucu olarak bir düzensizlik oluşabilir. Gözlenen metalurjik değişimler için I - V karakteristiklerinin bozulmasını açıklamak oldukça zordur. I - V karakteristiklerindeki değişim her zaman engel yüksekliğindeki bir değişimle basitçe açıklanamayabilir. Bazen karakteristikler donör veya akseptör olarak davranan atomların yarıiletkene difüze oldukları kabul edilerek yorumlanabilir veya yarıiletkende katkı atomlarının etkin yoğunluğunun değiştirilmesi için elektriksel olarak aktif merkezler oluşturulur. Katkı yoğunluğu arttıkça engel daralır ve termoiyonik alan emisyonu oluşabilir. Yarıiletken içine giren atomlar veya kusurlar asıl katkı atomlarıyla zıt polaritede iseler etkin hal yoğunluğu azalır ve bazen p-n eklemine oluşabileceği durum elde edilir. Bunun en iyi örneği Al/Si kontaktlardır ve teknolojik öneminden dolayı yaygınca çalışılmaktadır (Rhoderick 1992).

2.6. Termoiyonik Emisyon ve Akım-Voltaj Karakteristiği

Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı termoiyonik emisyon olarak tanımlanır. Schottky kontaktlarda bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi bu teori ile açıklanmaktadır. Metal/yarıiletken Schottky diyotlarda termoiyonik emisyon teorisi taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar akımı sağlar. Metal/yarıiletken kontağa bir gerilim uygulandığında metal ve yarıiletkendeki Fermi enerji seviyeleri artık aynı hizada olmayacak ve termal olarak uyarılmış elektronlar engelin diğer tarafına geçeceklerdir. Yarıiletken tarafındaki elektronlar için engel yüksekliği, uygulanan gerilime göre değişir. Doğru beslem altında elektronlar için engel yüksekliği azalacak ve bu sayede metalden yarıiletkene doğru olan akım artacaktır. Ters beslem durumunda ise engel artacak ve metalden yarıiletkene doğru olan akım azalacaktır.

Sze (1981) tarafından bildirildiğine göre; termoiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontakta ait potansiyel engelinin, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilmektedir. Buna paralel olarak deplasyon bölgesinde görülen sürüklenme ve difüzyon bu teoriye göre ihmal edilmektedir (Aydoğan 2003).



Şekil 2.11. Düz beslem altındaki metal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi

Şekil 2.11'de V büyüklüğünde düz beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak görülmektedir. Burada $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım

yoğunluğu, x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu nedenle,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} v_x dn \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_c metal içindeki termoiyonik emisyon için gerekli minimum enerji, v_x taşınma yönündeki hızdır. Artan elektron konsantrasyonu,

$$dn = g_c(E) f_F(E) d(E) \quad (2.7)$$

ile verilir. Burada $g_c(E)$, iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu ve $f_F(E)$, Fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonudur. Maxwell-Boltzmann yaklaşımı uygulanarak elektron konsantrasyonu için,

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[\frac{-(E - E_F)}{kT}\right] dE \quad (2.8)$$

yazılabilir. $(E - E_c)$ enerjisi serbest elektronun kinetik enerjisi olarak kabul edilirse, bu durumda,

$$\frac{1}{2} m_n^* v^2 = E - E_c \quad (2.9)$$

$$dE = m_n^* v dv \quad (2.10)$$

ve

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (2.11)$$

olur. Bu sonuçlar kullanılarak (2.11) ifadesi yeniden düzenlenirse,

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp \left(\frac{-e\phi_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-m_n^* v^2}{2kT} \right) 4\pi v^2 dv \quad (2.12)$$

elde edilir. Bu denklem, hızları v ve $v + dv$ aralığında değişen elektronların sayısını verir. Hız, bileşenlerine ayrılırsa; $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ şeklinde olur. Buradan (2.6) ifadesi,

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp \left(\frac{-e\phi_n}{kT} \right) \int_{v_{0x}}^{\infty} v_x \exp \left(\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* v_y^2}{2kT} \right) dv_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* v_z^2}{2kT} \right) dv_z, \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. v_{0x} hızı, x doğrultusundaki harekette elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için gerekli olan minimum hızdır. Son ifadede aşağıdaki değişken değiştirmeleri yapılabilir,

$$\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \equiv \alpha^2 + \frac{e(V_{bi} - V)}{kT} \quad (2.14.a)$$

$$\frac{m_n^* v_y^2}{2kT} \equiv \beta^2 \quad (2.14.b)$$

$$\frac{m_n^* v_z^2}{2kT} \equiv \gamma^2 \quad (2.14.c)$$

Ayrıca minimum v_{ox} hızı için, $\frac{1}{2} m_n^* v_{0x}^2 = e(V_{bi} - V)$ yazılabilir. Bu durumda $v_x \rightarrow v_{ox}$

şartı için $\alpha = 0$ olur. Yine $v_x dv_x = \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right) \alpha d\alpha$ yazılabilir. Bu ifadeler (2.13)

denkleminde kullanılırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp \left(\frac{-e\phi_n}{kT} \right) \exp \left[\frac{-e(V_{bi} - V)}{kT} \right] \\ \times \int_0^\infty \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^\infty (-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^\infty (-\gamma^2) d\gamma \quad (2.15)$$

Bu son ifadenin integrali alınırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e(\phi_n + V_{bi})}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.16)$$

ya da

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\phi_b}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.17)$$

olur. Uygulama gerilimi sıfır olduğunda $J_{s \rightarrow m}$ ile $J_{s \rightarrow m}$ tamamen eşittirler. Yani,

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\phi_b}{kT} \right] \quad (2.18)$$

olur. Eklemdeki net akım yoğunluğu $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$ olur. Daha açık ifadeyle net akım yoğunluğu,

$$J = \left[A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\phi_b}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.19)$$

olur. Burada A^* termioyonik emisyon için Richardson sabiti olup,

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.20)$$

ile verilir. Genel bir durum için (2.19) ifadesi,

$$J = J_{sT} \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.21)$$

olarak yazılabilir. Burada J_{sT} ters-doyma akım yoğunluğu olarak bilinir ve

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\phi_b}{kT} \right) \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir. ϕ_b Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azaldığı

ve $\phi_b = \phi_{b0} - \Delta\phi$ şekline verildiği dikkate alınarak (2.22) ifadesi yeniden,

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\phi}{kT}\right) \quad (2.23)$$

şeklinde yazılır. Engel yüksekliğindeki $\Delta\phi$ değişimi, artan elektrik alanla ya da artan ters beslem gerilimi ile artacaktır.

2.7. Cheung Fonksiyonları Yardımıyla Bazı Schottky Diyot Parametrelerinin Tayin Edilmesi

Metal/yarıiletken kontak yapısının doğru beslem I - V karakteristikleri yardımıyla Schottky diyot parametrelerinin hesaplanmasında Cheung and Cheung (1986), tarafından farklı bir model sunulmuştur. Termoionik emisyonun bulunan akım yoğunluğu (J), diyaodun etkin alanı A ile çarpılırsa diyaodan geçen toplam akım;

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.24)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadede $eV \gg kT$ ise, 1 ihmal edilebilir. Pratikte uygulanan gerilimin tamamı deplasyon bölgesine düşmediği dikkate alındığında, ideal durumdan sapmaların söz konusu olacağı söylenebilir. İdeal durumdan sapmaları ifade edebilmek için birimsiz sabit olan (n) idealite faktörü dikkate alınmalıdır. Bu durumda yukarıda ifade edilen akım denklemini aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.25)$$

uygulanan gerilim V 'nin IR_s kadarlık miktarı seri direnç bölgesine düşeceği için V yerine $(V) - IR_s$ yazarak (2.25) denklemini aşağıdaki şekilde yeniden yazabiliriz.

$$I = A.J = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.26)$$

Son eşitlikten;

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.27)$$

ifadesi elde edilir. (2.27) eşitliğinin $\ln I$ 'ya göre türevi alınırsa;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.28)$$

ifadesi elde edilir. (2.28) eşitliğinde, $\frac{dV}{d(\ln I)}$ 'nın I 'ya göre grafiği bir doğru olacaktır.

Bu grafikten elde edilecek olan doğrunun eğimi nötral bölge direncini ya da R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun düşey eksenini kestiği noktadan (n) idealite faktörü bulunabilir (Aydoğan 2003). Potansiyel engeli Φ_b 'yi bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (2.29)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. (2.27) ve (2.28) eşitliklerinden;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.30)$$

yazılabilir. (2.30) eşitliğinde $H(I) - I$ grafiği çizildiğinde bu grafik de bir doğru şeklinde olacak ve bu doğrunun eğimi de R_s seri direncini verecektir. Bu doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği $e\Phi_b$ bulunur.

2.8. Difüzyon Teorisi

Aralarında yoğunluk farkı bulunan iki bölge arasında, yoğunluğun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye doğru gerçekleşen yük geçişleri difüzyon olarak tanımlanır. Metal-yarıiletken kontaklarda yük geçişleri, sıvılar ve gazlarda olduğu gibi elektronların/hollerin yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye difüzyonu ile meydana gelir. Aşağıdaki varsayımlar dikkate alınarak difüzyon teorisi şöyle açıklanır;

- 1- Potansiyel engelin yüksekliği kT/q enerjisinden çok daha büyüktür,
- 2- Tükenim bölgesindeki elektronların çarpışmaları ihmal edilir,
- 3- $d=0$ ve $d=w$ 'daki taşıyıcı konsantrasyonları akımdan etkilenmemiştir (yani onlar termal denge değerine sahiptir)
- 4- Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir (Sze 1981).

2.9. Termioyonik Emisyon Difüzyon Teorisi

Crowell ve Sze termioyonik emisyon ve difüzyon teorisini birleştirerek Termioyonik emisyon difüzyon teorisini geliştirdiler. Bu teori metal yarıiletken arayüzey kenarında tanımlanmış olan rekombinasyon hızı üzerine kurulmuştur. Metal ile yarıiletken gövde arasına uygulanan gerilim, metale doğru bir elektron akışına neden olur. Taşıyıcıların bir kısmı optik fonon geri saçılmalarına bir kısmı da kuantum mekaniksel yansımalara uğradığından akım değeri azalır. Sze bunun nedenini rekombinasyon hızındaki azalmaya bağlamıştır. Termioyonik emisyon difüzyon teorisine göre elektronlar metal yarıiletken arayüzeyinde optik fononlarla etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri göz önüne alınarak A^* Richardson sabiti A^{**} olarak değişir. Buna göre en genel I - V (akım-gerilim) ifadesi,

$$J = J_o \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (2.31)$$

ile verilir. Burada T sıcaklık, n diyodun idealite faktörü ve J_o doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_o = -A^{**} T^2 \exp\left[\frac{-q\phi_B}{kT}\right] \quad (2.32)$$

şeklinde ifade edilir. A^{**} , düzenlenmiş etkin Richardson sabitidir. β engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısı olmak üzere,

$$A^{**} = A^{**} \exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \quad (2.33)$$

ile verilir. Eğer metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir oksit tabakası (MIS-MOS) varsa Richardson sabiti oksit tabakasına bağlı etkin değer alır ve A^{**} yerine yalıtkan oksit tabakası nedeniyle A_{etk} alır:

$$A_{etk} = A^{**} \exp\left[\frac{-4\pi\delta}{h(2m^*\chi)^{1/2}}\right]^{1/2} \quad (2.34)$$

Burada δ , metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir oksit tabakanın kalınlığı, $m^*=m_o$ etkin kütle, h Planck sabiti, χ ise yarıiletkenin elektron yakınlığıdır. İdeal diyottan sapmaları belirlemek amacıyla idealite faktörü, “ n ” olarak tanımlanır. Termoiyonik emisyon teorisine göre ideal bir Schottky diyotta $n=1$ ’dir. Buna göre akım yoğunluğu ifadesi;

$$J = J_o \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.35)$$

şeklini alır. Burada n idealite faktörü 1'den uzaklaştıkça engel yüksekliğinin voltaja bağıllığı artmaktadır. İdealite faktörü yarıiletken ile dengede arayüzey durumları N_{ss} ve metal yarıiletken arasındaki yalıtkan oksit tabakasının kalınlığı (δ) cinsinden,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (2.36)$$

olarak ifade edilir. Bu denklemde ikinci terimin artması ile ideallikten uzaklaşılır. Yani idealite faktörü, hem yalıtkan tabaka kalınlığının artmasıyla hem de arayüzey durumlarının artması ile doğru olacak şekilde artmaktadır. Engel alçalması ve A^{**} 'nın alana bağımlı olması nedeniyle gerçek Schottky diyotlarında n idealite faktörü $1 < n < 1,2$ arasında değer alır (Güzel 2006).

2.10. Deplasyon Bölgesinde Rekombinasyon (yeniden birleşim) ve Jenerasyon (taşıyıcı oluşumu)

Sıfır Kelvin sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda bir yarıiletkenin iletkenlik bandında elektronlar ve valans bandında holler bulunur. İletkenlik bandındaki serbest elektronun valans bandındaki bir hol ile birleşmesi sonucu bir enerji açığa çıkar. Bu şekilde serbest bir elektron ile holün yok olması (yeniden birleşmesi) olayı rekombinasyon olarak adlandırılır. Tersine, yeterli enerjiyi alan bir elektron kovalent bağdan koparak serbest hale gelebilir. Bu olay jenerasyon (elektron-hol çiftinin oluşması) olarak adlandırılır. Uzay yükü bölgesindeki rekombinasyonun önemi Yu *et al.* (1968) tarafından ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Rekombinasyon olayı genel anlamda lokal durumlar sonucunda ortaya çıkar. Shockley-Read (1950) ve Hall teorilerine göre, en etkin olan rekombinasyon merkezleri, band aralığının ortasına yakın enerjilere sahip merkezlerdir. Schottky diyotlarda rekombinasyonun olduğu durumlardaki akım iletim mekanizması p-n eklem diyodun akım iletim mekanizmasına benzemektedir. Sah *et al.* (1957) düz beslemdeki küçük akımlar için akım yoğunluğunun yaklaşık olarak;

$$J_r = J_{r0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (2.37)$$

ile verilebileceğini açıklamışlardır. Burada $J_{r0} = \left(\frac{qn_i w}{2\tau_r}\right)$ dir. Burada n_i , asal elektron konsantrasyonu olup $n_i \alpha \left(\frac{-qE_g}{2kT}\right)$ şeklinde bir orantı vardır. Ayrıca burada w , deplasyon bölgesinin genişliği, τ_r , elektronların bu bölgeyi geçmesi için gerekli zamandır. Homojen dağılıma sahip merkezlerden dolayı elektron ve holler için yakalama tesir kesitleri eşit olur.

Rekombinasyon akımının termoiyonik emisyon akımına oranı,

$$T^2 \tau_r \exp\left[q\left(\frac{E_g + V - 2\Phi_b}{2kT}\right)\right] \quad (2.38)$$

ile verilmektedir (Karataş 2003). Bu oran τ_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 sıcaklıklarda aktivasyon enerjisi $(E_g - V)/2$ değerine ve yüksek sıcaklıklarda ise $(\Phi_b - V)$ değerine yaklaşık olarak eşittir. Bu durumlar dikkate alındığında Schottky diyotlarda ideal durumdan sapmaların bir nedeni de rekombinasyon akımıdır. İdeal durumdan sapmalar özellikle düşük sıcaklıklarda daha belirgin olduğu için düşük sıcaklıklardaki ölçülerin de dikkate alınması gerekir.

Şayet tünelleme ve imaj kuvvet azalması düşük bir donör konsantrasyonu ile önemli derecede azaltılırsa, deplasyon bölgesinde elektron-hol çiftlerinin üretiminden dolayı fark edilebilir derecede bir ters akım oluşabilir. Bu işlem rekombinasyonun tersi bir

işlem ve akım yoğunluğu bileşenini $J_g, \left(J_g = \frac{qn_i w}{2\tau_r} \right)$ artırır. Deplasyon 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. Çünkü, termoiyonik emisyon bileşeninden daha düşük aktivasyon enerjisine sahiptir.

Deplasyon bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon etkileri, termoiyonik emisyon akım taşınma mekanizması bileşenine paralel bir artış verir. Bu durum özellikle orta dereceli sıcaklıklarda (175°K-235°K) önemli bir mekanizmadır (Rhoderick 1988).

2.11. Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı

Homojen olmayan engele sahip bir Schottky diyot modeli için aşağıdaki temel ifadeler kullanılmaktadır.

$$\Phi_b^j = \bar{\Phi}_b - \frac{\sigma_s^2}{\left(\frac{2kT}{q} \right)} \quad \text{ve} \quad \Phi_b^c = \bar{\Phi}_b \quad (2.39)$$

Burada Φ_b^j , düz beslem gerilimine bağlı olarak I - V ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği, Φ_b^c , kapasite voltaj ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği, $\bar{\Phi}_b$, ortalama engel yüksekliği ve σ_s standart sapmadır. Yukarıdaki son iki ifade homojen olmayan Schottky engeli için sıcaklık ve bahsedilen parametreler arasındaki ilişkiyi vermektedir. Bu ifadelere göre, I - V ve C - V karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin farklı olması anlamına da gelmektedir. Ayrıca, gerilim altında engel dağılımının değiştiği dikkate alınırsa, idealite faktörünün de açıklanması bu ifadelerle mümkün olabilir. (2.39) ifadesi potansiyel engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı

değişimi hakkında bilgi vermektedir. Her sıcaklık için I - V karakteristiğinin sıfır uygulama gerilimine fit edilmesiyle bulunan I_0 doyma akımlarından hesaplanan engel yüksekliklerinin, $1/T$ 'ye karşı değişim karakteristiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi $\left(\frac{q\sigma_s^2}{2k}\right)$ olur ve bu değerlerden standart sapma bulunur. Bu lineer doğrunun potansiyel engel yüksekliğini kestiği nokta ise ortalama engel yüksekliğini verir.

2.12. İmaj Kuvvetinin Etkisinden Dolayı Engel Yüksekliğinin Azalması

İdeal bir Schottky diyot için engel yüksekliği ifadesi;

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (2.40)$$

ile verilmektedir. Fakat bazı etkiler teorik olarak verilen bu gerçek Schottky engel yüksekliği ifadesini değiştirebilir. Bu etkilerden ilki; Schottky etkisi veya imaj kuvvet etkisinden dolayı engel yüksekliğinin azalmasıdır.

Metalden x kadar uzaklıktaki bir mesafede bir dielektrikteki bir elektron bir elektrik alan oluşturacaktır. Elektrik alan çizgileri, metal yüzeyine dik olmalıdır ve bu çizgiler metalin yüzeyinden iç kısma doğru x kadarlık bir mesafede yerleşmiş bir $+e$ imaj yükününkü ile aynı olacaktır. Bu imaj etkisi Şekil 2.12.a'da gösterilmiştir. İmaj yükü ile Coulumb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etki eden kuvvet,

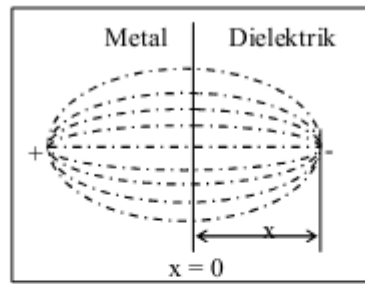
$$F = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -eE \quad (2.41)$$

ifadesi ile verilir (Neamen 1992). Potansiyel ifadesi ise,

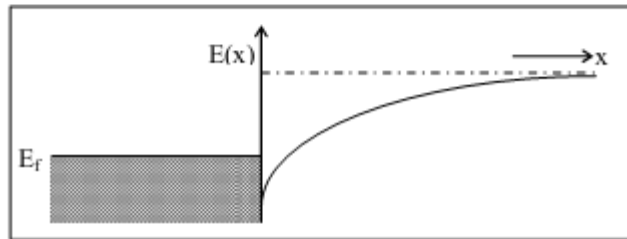
$$-\Phi(x) = +\int_x^\infty E dx' = +\int_x^\infty \frac{e}{4\pi\epsilon_s 4(x')^2} dx' = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.42)$$

ile verilir. Burada x' integral değişkeni olup, $x=\infty$ için potansiyel sıfır kabul edilmektedir.

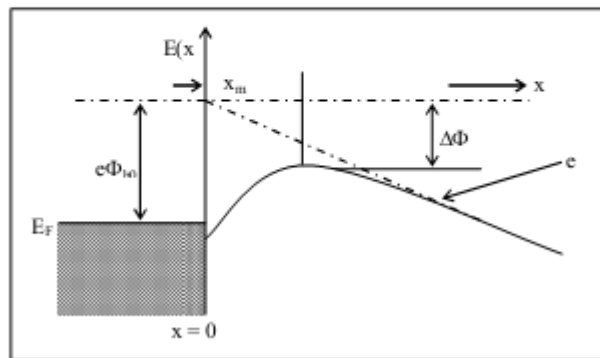
Elektronun potansiyel enerjisinin $-e\Phi(x)$ değişimi başka elektrik alanının olmadığı kabul edilerek Şekil 2.12.b'de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.12. (a) Metal-dielektrik arayüzeyinde imaj yükü ve elektrik alan çizgileri, (b) Elektrik alan sıfırken potansiyelde meydana gelen bükülme, (c) Sabit elektrik alanında imaj yükünden dolayı oluşan bükülme.

Dielektrikteki bir elektrik alanının varlığında potansiyel ifadesi ilave bir terim alarak modifiye edilir ve aşağıdaki gibi olur;

$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} - Ex \quad (2.43)$$

Sabit bir elektrik alanının varlığında elektronun potansiyel enerji değişimi Şekil 2.8.c.'de gösterilmiştir. Bu şekilde potansiyel engeli piki azalmıştır. Potansiyel engeli pikinin bu şekilde azalması Schottky etkisi ve imaj kuvveti etkisi ile engel yüksekliğinin azalması olarak bilinir.

$$\frac{d(e\Phi(x))}{dx} = 0 \quad (2.44)$$

Şartı dikkate alınarak maksimum engelin konumu,

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (2.45)$$

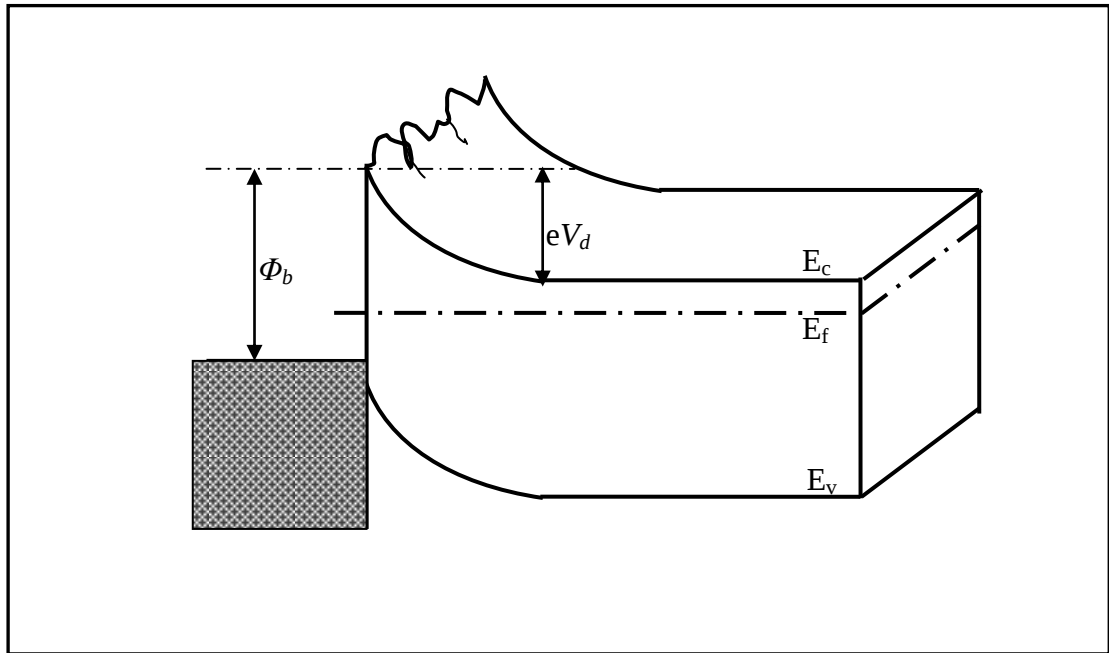
ve Schottky engel yüksekliğinin azalması,

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.46)$$

ile verilir.

2.13. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojen Olmayan Engel Yüksekliğinin Analizi

Schottky kontaklarda engel yüksekliği, akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçümleri için farklı sonuçlar verir. Schottky kontaklarda I - V ve C - V ölçümlerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yüksekliğinin değişimi ve idealite faktörünün 1'den büyük olması farklı şekillerde açıklanmaktadır. Metal/yarıiletken arayüzeyinin düzgün olmaması, Şekil 2.13'de gösterilen V_d (built-in voltajı) ve engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimlerine neden olarak inhomojen bir dağılıma neden olacaktır. Metaldeki atomik yapı, dislokasyonlar ve tane sınırlarının yanı sıra metalin kalınlığının değişimi arayüzeyin pürüzlü olmasına neden olabilir. Bu potansiyel değişimlerin bir başka nedeni de; alan emisyonundan dolayı lokal engel yüksekliğinin azalması olabilir.



Şekil 2.13. Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip bir Schottky kontakın iki boyutlu bant diyagramı

Ayrıca arayüzeyde farklı metalik fazların etkisi ile de bu lokal değişimler ortaya çıkabilir. Bunun yanı sıra yarıiletkendeki donör atomlarının rastgele dağıldığı düzenli bir örgüde, donör atomları arasındaki düzensiz mesafeler de bahsedilen potansiyel

değişimlerin bir başka nedeni olabilir. Potansiyel değişim modeli homojen olmayan Schottky kontaklar için daha önce yapılan çalışmalardan farklıdır (Aydoğan 2003).

Metal-yarıiletken kontaklarda yukarıda ifade edilen çeşitli nedenlerden kaynaklanan anormallikler, kontakların ideal davranmamasına neden olmakta ve engel parametrelerinin uygulanan gerilimle değişmesine neden olmaktadır. Böylece Schottky engel parametreleri, bu homojensizliklerden dolayı uygulanan gerilime hassas olmaktadır. Ayrıca bu homojensizlikleri tasvir etmek için biri Tung'un "*pinch-off*" modeli ve diğeri paralel iletkenlik modeli olmak üzere genelde iki farklı yaklaşım kabul edilmektedir (Gülnahar 2008).

Homojen olmayan metal-yarıiletken yapılarda serbest yük taşınım işi genelde paralel iletkenlik modeliyle ve dolayısıyla termoiyonik emisyon denklemiyle açıklanmaya çalışılmaktadır. Bu modele göre akım, denk. (2.35)'te gösterildiği gibi her biri kendi alan ve Schottky engel yüksekliğine sahip tüm dağılımlarda akan akımların toplamı olarak kabul edilmekte ve farklı engel yüksekliklerine sahip olan dağılımların birbirleriyle etkileşmemeleri üzerine kurulmaktadır. Ancak Tung'un "*pinch-off*" modelindeyse toplam akım, dağılımlarda akan akımın ve homojen Schottky engel yüksekliğine sahip tüm alan içerisinde akan akımın toplamı biçimindedir ve farklı Schottky engel yüksekliğine sahip komşu dağılımlar arasında etkileşmeyi hesaba katmaktadır. Bu modelde küçük bir dağılım içerisinde akan akım, uygulanan gerilime ve dağılım parametresine bağlı olan etkin bir Schottky engel yüksekliğine ve etkin bir alana sahip bir diyodun akımına benzerdir. Ayrıca bir dağılım parametresine sahip olan bu model, düşük gerilim ve düşük sıcaklıklarda görülen anormallikleri açıklayabilmektedir. Ancak bu model, paralel iletkenlik modeli kadar açık olan bir model değildir. Çünkü "*pinch-off*" modelinde dağılım alanı ve Schottky engel yüksekliğinin azalması gibi dağılım parametrelerini ve dağılım sayısını I - V karakteristiklerine ilişkilendirmek zordur. Ayrıca bu model, engel homojensizliklerinin geniş ve düşük engel yüksekliğine sahip dağılımın çok az olduğu durumda geçerlidir. Paralel iletkenlik modelinde uzaysal engel homojensizlikleri, şimdiye kadar Gauss dağılımı, çoklu-Gauss dağılımı, sabit gibi birçok dağılım fonksiyonları ile ifade

edilmiştir. Gauss dağılım fonksiyonu, açık fiziksel anlamı, küçük engel homojensizlikleri için geçerliliği ve onun fiziksel basitliğinden dolayı yaygınca kullanılmaktadır. Ayrıca Gauss dağılım modeli, azalan sıcaklıklarda engel yüksekliklerinde görülen azalışları ve idealite faktörü değerlerinde oluşan artışları ve Richardson grafiğinde görülebilen anormal davranışları anlatabilen bir modeldir (Gülnahar 2008).

Paralel iletkenlik modeline göre, dağılım bölgesinde her biri farklı engel yüksekliğine sahip ve paralel konumda olan Schottky engel dağılımlarının her biri toplam akıma bağımsız olarak katkı yapabilmektedir. Bu modele göre Ohdomari and Tu (1980) tarafından öne sürülen ideal bir diyotun I - V denklemi olan denklem (2.35)'i

$$I = AA^* T^2 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \int_0^\infty A\phi_b \exp\left(\frac{q\phi_b}{kT}\right) d\phi_b \quad (2.47)$$

biçiminde ifade etmemiz mümkündür. Bu denklemde $A\phi_b$, diyodun Schottky engel homojensizliklerini anlatan dağılım parametresidir. Metal-yarıiletken kontaklarda, farklı ihtimallere sahip metal-yarıiletken arayüzeyinde farklı standart sapma ve ortalama değerleriyle sonsuz sayıda Gauss dağılımlarının olduğu düşünülse de homojen olmayan Schottky kontak yapıyı tasvir etmek için genelde keyfi bir dağılım fonksiyonunu da kullanılabilir (Yu-Long *et al.* 2002). Böylece $A\phi_b$ keyfi dağılım fonksiyonu,

$$A(\phi_b) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\phi_b - \phi_{bi})^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (2.48)$$

şeklinde belirtilir (Yu-Long *et al.* 2002). Bu denklemde A_i , σ_i , ve ϕ_{bi} sırasıyla her bir Gauss dağılımının nüfuzunu, standart sapmasını ve ortalama engel yüksekliğini ifade etmektedir. Normalizasyon şartından $A\phi_b$ keyfi dağılım fonksiyonunu,

$A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n = 1$ biçiminde yazmak mümkündür (Yu-Long *et al.* 2002).

Schottky engel yüksekliği değerlerinin dağılımından dolayı belirli sıcaklık aralıklarında bu dağılımların ortalama standart sapmasını hesaplayabilen yukarıda belirtilen sabit, log normal ve Gauss dağılımı gibi matematiksel dağılımları kullanmak mümkündür. Ancak ideal termoiyonik emisyon-difüzyon modelinde gözlenen ayrılışlar, daha kullanışlı olan Gauss dağılımıyla yorumlanabilir. Bu nedenle denklem (2.35) ve denklem (2.47) karşılıklı eşitlenerek engel yüksekliğini,

$$\phi_b = -\frac{kT}{q} \ln \sum_{i=1}^n A_i \exp \left(-\frac{q\phi_{bi}}{kT} + \frac{q^2 \sigma_i^2}{2k^2 T^2} \right) \quad (2.49)$$

şeklinde elde etmek mümkün olacaktır (Yu-Long *et al.* 2002). Bu denklem n'ye bağlı olarak birden çok Gauss dağılımına sahip kontak yapıların dağılımlarını açıklayabileceği gibi tekli ya da çift Gauss dağılımına sahip diyot yapıların dağılımlarını da tasvir edebilmektedir. Böylece engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığa karşı olan değişimi, çift Gauss dağılımı sergilediği bir deneysel ölçüm durumunda denklem (2.49)'dan Φ_b engel yüksekliği ve $A_1(\Phi_b)$, $A_2(\Phi_2)$ keyfi dağılım fonksiyonları,

$$\phi_b = -\frac{kT}{q} \ln \left[A_1 \exp \left(-\frac{q\phi_{b1}}{kT} + \frac{q^2 \sigma_1^2}{2k^2 T^2} \right) + A_2 \exp \left(-\frac{q\phi_{b2}}{kT} + \frac{q^2 \sigma_2^2}{2k^2 T^2} \right) \right] \quad (2.50)$$

ve dağılım katsayıları, $A_1 + A_2 = 1$

$$A(\phi_b) = A_1(\phi_b) + A_2(\phi_b) \quad (2.51)$$

$$A_1(\phi_b) = \frac{A_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\phi_b - \phi_{b1})^2}{2\sigma_1^2} \right] \quad (2.52)$$

$$A_2(\phi_b) = \frac{A_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\phi_b - \phi_{b2})^2}{2\sigma_2^2} \right] \quad (2.53)$$

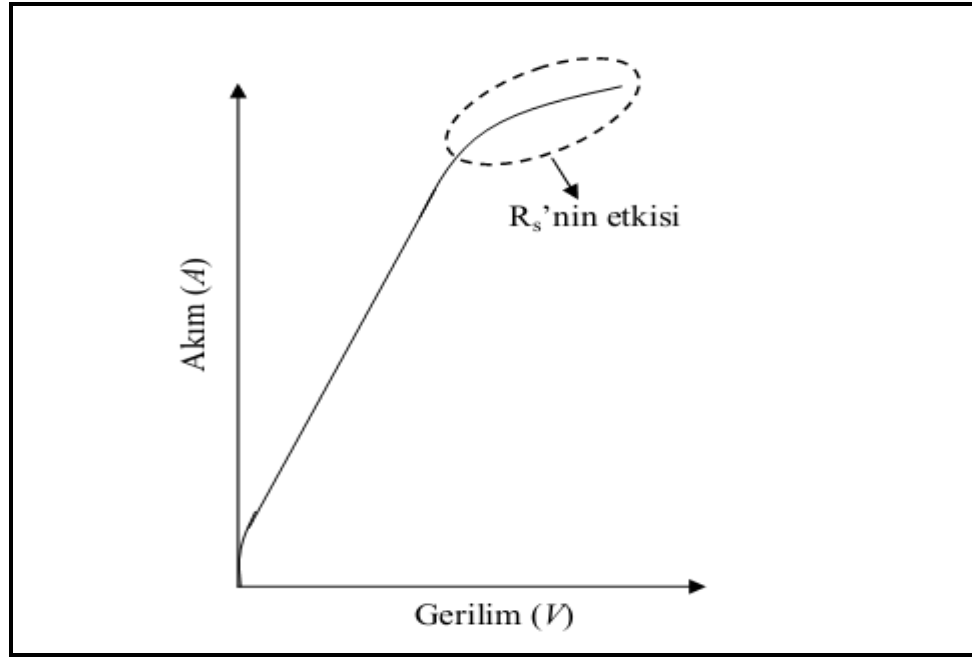
şeklindedir (Yu-Long *et al.* 2002). Ayrıca engel yüksekliği dağılımının tek Gauss dağılımıyla ifade edildiği bir durumda $A_2, A_3, \dots, A_n=0$ ve $A_1=1$ olacak $\phi_{b2}, \phi_{b3}, \dots, \phi_{bn}=0$ ve $\sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n=0$ olacağından denklem (2.49),

$$\phi_b = \phi_{b1} - \frac{q\sigma_1^2}{2kT} \quad (2.54)$$

şeklinde tek Gauss dağılımı için literatürde sıkça kullanılan Werner ve Güttler'in tekli Gauss denklemi (Werner and Güttler 1991) elde edilebilir. Böylece tek ve çift Gauss dağılımı için elde edilen bu denklemler üçlü ya da daha çok olan bir Gauss dağılımı için denk. (2.49)'dan aynı yol kullanılarak elde edilebilecektir ve bu durumda denklem (2.50), denklem (2.51) de bulunan Gauss parametreleri artacak şekilde olacaktır.

2.14. Seri Direnç Etkisi

Metal-yarıiletken yapılarda görülen homojensizliklere neden olan etkilerden biri seri direnç etkisidir. Seri direnç, metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan deplasyon bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir ve R_s ile gösterilir. Bu etki, büyük gerilim değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının düşmesine neden olur. Şekil 2.14 bir Schottky diyotta büyük gerilim değerlerinde seri direncin etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir (Güllü 2008).



Şekil 2.14. Metal/yarıiletken kontakta seri direncin etkisi

Seri direnç diyotlarda güç kaybına neden olmakta ve diyodun yapısına bağlılık göstermektedir. Aktif yarıiletken devre elemanlarında ortaya çıkan seri direnci kapsamlı olarak bipolar transistör yapısında görmek mümkündür. Bir bipolar tranzistörün sabit iki noktası arasındaki toplam direncini üçe ayırabiliriz:

1. Metalik iletkenin direnci, R_m
2. Kontak direnci, R_c
3. Yarıiletken direnci, R_s

Böylece bu noktalar arasında oluşan toplam direnç,

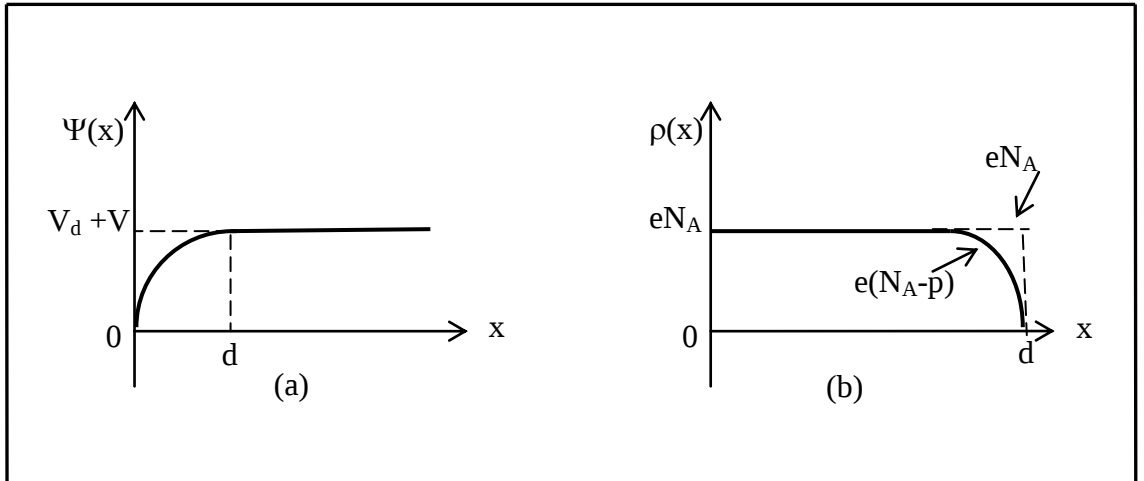
$$R_T = 2R_m + 2R_c + R_s$$

ifadesi biçimindedir.

Schottky diyotlar genelde yarıiletkenlerin az katkılı olmasını gerektirir. Ancak katkı oranı düşük bir tabakaya zayıf omik kontak oluşumu yüksek seri dirence neden olacağı için diyot fabrikasyonunda pratik olmaz. Pratikte diyotlar aşırı katkılı olan altlık üzerine ince film oluşturulması ile yapılırlar ve oluşan bu yapı seri direncin minimum olmasını sağlar. Böylece yüksek kaliteli bir omik kontak elde etmek için yüksek katkılı bir altlık kullanmak gerekir. Bir yüzeysel eklem diyotta katkılanmamış epitaksiyal tabaka, yeterince kalın olacağı için seri direnç değerinin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda alt tabakanın gövde direnci, omik kontak direnci ve katkılanmamış epitaksiyal tabakanın direnci seri direncin artmasında birer etken olmaktadır (Gülnahar 2008).

2.15. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi

Metal/Yarıiletken kontaklarda oluşan arınma bölgesi (dipol tabakası), yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ve metal tarafındaki yüzey yüklerinden dolayı bir kondansatör gibi davranır. Ters beslem durumunda uygulanan gerilim arttığı zaman arınma bölgesi genişleyecektir. Yarıiletkende metale yakın önemli bir hol yoğunluğu mevcutsa, yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesi ile çakışacağından hol yoğunluğu düşecektir.



Şekil 2.15. Metal p-tipi yarıiletken yapılarında doğrultucu kontağın; a) Potansiyel dağılımı, b) Yük dağılımı

Schottky bölgesinin kapasitesi, bu yük dağılımından dolayı değişecektir. Bu özelliklerinden dolayı Schottky diyotları, gerilim kontrollü değişken kapasitörler olarak kullanılabilirler. Schottky bölgesinin kapasitesini bulmak için, diyonun engel bölgesindeki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği;

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.55)$$

şeklinde ifade edilebilir (Ziel 1968).

Burada ϵ_s yarıiletkenin, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yükü yoğunluğudur. Uzay yükü yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_A - N_d) \quad (2.56)$$

olarak yazılabilir (Rhoderick 1988). Burada N_d , yarıiletkenindeki iyonize olmuş donör yoğunluğu, N_A , yarıiletkenindeki iyonize olmuş akseptör yoğunluğudur. $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile uzay yük yoğunluğu $\rho(x)$ 'in konuma bağlı değişimleri Şekil 2.15'de gösterilmiştir.

Engel tabakasının potansiyelini V_d ve kontağa uygulanan potansiyeli V ile temsil edelim. $e(V_d - V) \gg kT$ olduğunda $0 \leq x \leq d$ aralığında yük taşıyıcılar d uzunluğunda Debye difüzyon uzunluğu ile verilen bir bölgede kısmen bulunacaklardır. Dolayısı ile p-tipi yarıiletken için $N_A \gg N_d$ olduğundan uzay yükü yoğunluğu için

$$\rho(x) = eN_A \quad (2.57)$$

yazılabilir. (2.55) ve (2.57) eşitliklerinden

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_A}{\varepsilon_S \varepsilon_0} \quad (2.58)$$

elde edilir. (2.58) ifadesinin çözümü aşağıdaki sınır şartları altında aranabilir.

$$1) x = 0 \text{ için } \Psi(x) = 0$$

$$2) x \geq 0 \text{ için } \Psi(x) = V_d + V$$

$$3) x = d \text{ için } \frac{d\Psi(x)}{dx} = 0$$

(2.58) denklemi için üçüncü sınır şartını dikkate alarak integral alırsak, arınma bölgesi için elektrik alanı bulabiliriz.

$$E(x) = -\frac{d\Psi(x)}{dx} = -\frac{eN_A}{\varepsilon_S \varepsilon_0} (x - d) \quad (2.59)$$

yukarıdaki sınır şartlarından birincisini dikkate alarak (2.59) ifadesinin integrali alınacak olursa,

$$\Psi(x) = -\frac{eN_A}{\varepsilon_S \varepsilon_0} \left(\frac{1}{2} x^2 - xd \right) \quad (2.60)$$

elde edilir. (2.60) ifadesinin çözümü de ikinci sınır şartı dikkate alınarak çözülürse;

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_S \varepsilon_0}{eN_A} (V_d \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.61)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade, Schottky bölgesinin genişliğidir. Burada $V > 0$ için kontak doğru, $V < 0$ için kontak ters beslemededir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu;

$$Q = -eN_A d \quad (2.62)$$

ile verilir. (2.61) ve (2.62) eşitlikleri dikkate alındığında;

$$Q = -[2\epsilon_s \epsilon_0 e N_A (V_d \pm V)]^{1/2} \quad (2.63)$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca Schottky kapasitesi (2.63) eşitliğine sahip Q yükünün uygulanan gerilime göre değişimi olarak tanımlanır. Buna göre kapasite için,

$$C = \left| \frac{\partial Q}{\partial V} \right| \quad (2.64)$$

yazılarak (2.63) ve (2.64) eşitliklerinden,

$$C = \left[\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_A}{2(V_d + V)} \right]^{1/2} \quad (2.65)$$

veya

$$C = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{d} \quad (2.66)$$

olarak bulunur. Bu sonuca göre arınma bölgesinin kapasitesi, uygulanan gerilim ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters ve akseptör yoğunluğu ile doğru orantılıdır.

2.16. Arayüzey Tabakasının Kapasitansa Etkisi

Schottky diyotta arayüzey tabakasından kaynaklanan kapasitans, uygulanan gerilime bağlı olarak deplasyon bölgesinde farklılık göstermektedir ve deplasyon bölgesinin kapasitansı ile seri halde bulunmaktadır. Arayüzey tabakasının yeterince ince olması kapasitans analizi için kolaylıktır. Çünkü ince yapıya sahip arayüzey tabakası metal ve yarıiletken arasında tünelleme ihtimaliyetini artırmakta ve kapasitansı hesaplamak için dikkate alınmadığı gibi azınlık taşıyıcılarına doğrudan bir katkı yapmamaktadır. Fakat bu haller dolaylı olarak kapasitansı etkileyebilmekte ve uygulanan gerilimin ve telafi olmamış donörlerin etkisiyle yükler arasında bulunan ilişkiyi değiştirebilmektedir (Henisch 1989). Ayrıca arayüzey tabakasını işgal eden elektronlar metalden tünellemeyle geçmekte ve yapıya bir gerilim uygulandığında net negatif yük miktarı artmaktadır. Böylece toplam kapasitans homojen yapının kapasitansından farklı olacaktır (Blood and Orton 1992).

Bu nedenle arayüzey hallerinin olduğu durumda oluşan kapasitansı,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_{ox} + C_s} \quad (2.67)$$

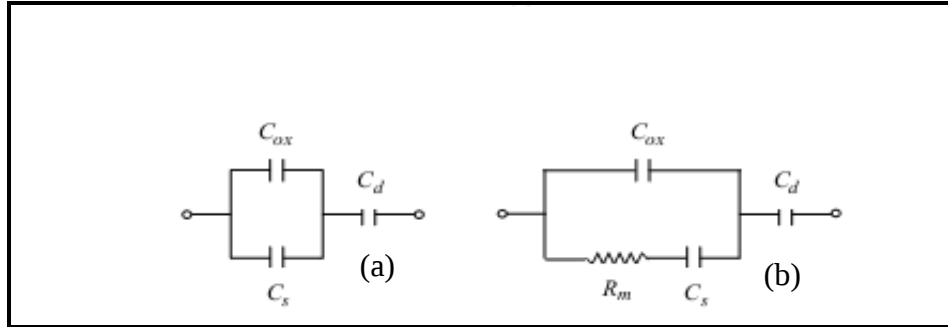
Şeklinde ifade edilir. Bu denklemde C_d , C_{ox} ve C_s

$$C_d = \left(\frac{\epsilon_s q N_d}{2} \right)^{1/2} \left(V_d - \frac{kT}{q} \right)^{-1/2} \quad (2.68)$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_i}{\delta_b} \quad (2.69)$$

$$C_s = q D_s \quad (2.70)$$

biçiminde olup C_d , V_d difüzyon sabitine sahip olan ideal Schottky engelinin kapasitansı ya da deplasyon kapasitansı olarak adlandırılmaktadır ve C_{ox} , ϵ_i dielektrik sabitine ve δ_b aralıklı olan paralel plakalı bir kapasitörün kapasitansına benzer olarak, oksit tabakasının kapasitansı olarak ifade edilmektedir.

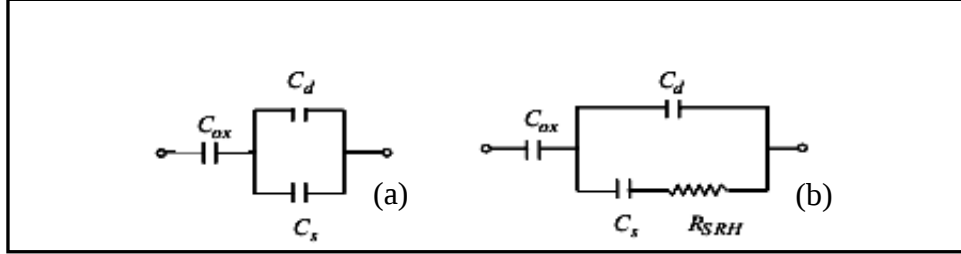


Şekil 2.16. Arayüzey tabakasının zayıf, düşük frekans durumunda (a) ve yüksek frekans durumunda (b) Schottky engeli için eşdeğer devre yapısı

Arayüzey tabakası yeterince ince olduğunda ara yüzey hallerin zaman sabiti çok kısa olacak ve yüksek bir ölçüm frekansını izleyebileceklerdir. Ancak arayüzey tabakasının kalınlığı arttığında ya da uygulanan frekans, yüksek frekans değerlerine kadar artırıldığında m olarak ifade edilen arayüzey hallerinin zaman sabiti, arayüzey hallerinin yoğunluğundan çok büyük olabilecektir. Bu durumda oluşan eşdeğer devre Şekil 2.16.b’de gösterilmektedir. Bu şekildeki R_m tünelleme direncini ifade etmektedir.

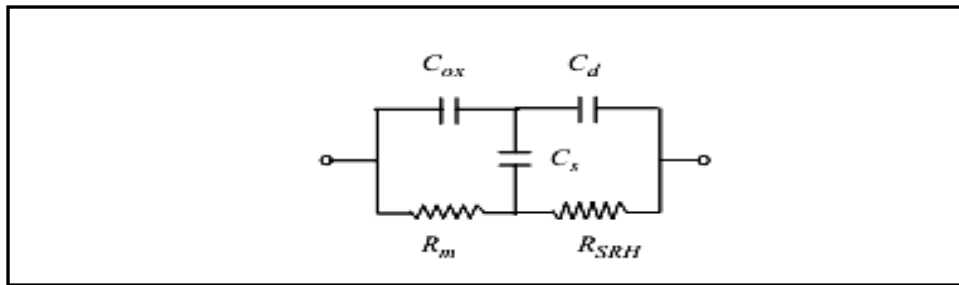
Metal ve arayüzey halleri arasında bulunan yalıtkan tabakanın elektronların tünelleymeyeceği kadar çok kalın olduğu düşünülürse, metalden valans bandına doğru boşlukların tünellemesi çok az olacak ve boşluk-quasi Fermi seviyesi yarıiletken Fermi seviyesi ile aynı olacaktır. Böylece arayüzey hallerinin yoğunluğu, Shockley-Read-Hall rekombinasyon mekanizmasına benzer olarak yarıiletkenin valans ve iletkenlik bantları arasında karşılıklı elektron alış-verişi ile belirlenebilecektir. Ayrıca bu durumda arayüzey hallerinin işgal etme ihtimali yarıiletken Fermi seviyesi ile belirlenmektedir. Ara yüzey hallerinin sürekli enerji seviyelerine sahip olduğu durumda kapasitans qD_s

değerine ya da ayırık enerji seviyelerine sahip olduğunda ise $q^2 N_s f_s - f_s / kT$ değerine eşittir ve arayüzey-hal kapasitansı deplasyon kapasitansı ile paraleldir.



Şekil 2.17. Arayüzey tabakasının kalın, düşük frekans durumunda (a) ve yüksek frekans durumunda (b) Schottky engeli için eşdeğer devre yapısı.

Böylece düşük ve yüksek frekans değerlerinde oluşan eşdeğer devre Şekil 2.17’de gösterilmektedir. Arayüzey tabakası ince yapıda olduğunda metalle, kalın olduğundaysa yarıiletkenle daha iyi bir iletim kurar. Ancak arayüzey tabakasının çok kalın ya da çok ince olmadığı ara durumda eşdeğer devre yapısı Şekil 2.18’de gösterilmektedir. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi arayüzey tabakası ince bir yapıda olduğunda C_s kapasitansı C_{ox} kapasitansı ile paralel, kalın bir yapıda olduğunda C_s kapasitansı C_d deplasyon kapasitansı ile paralel olacaktır.



Şekil 2.18. Yalıtkan arayüzey tabakasına sahip Schottky engeli için eşdeğer devre

Metal ve arayüzey halleri arasında elektronların tünelleme ihtimaliyeti zayıfsa, arayüzey hal yoğunluğunun E_f^s ile belirlenme ihtimaliyeti çok düşük olur. Ancak arayüzey hal yoğunluğu E_f^s ile belirlenmediğinde arayüzey hal enerjisi E_f^s ile aynı seviyede olacak

ve kapasitans değeri maksimuma ulaşamayacaktır. Arayüzey halleri valans bandıyla baskın olarak değiş tokuş yaparsa ve boşluk kuasi-Fermi seviyesi E_{fm} ile aynı hizadaysa ara yüzey hal yoğunluğu bu durumda E_{fm} ile belirlenebilecektir. Ancak arayüzey halleri iletkenlik bandında bulunan elektronlarla baskın olarak karşılıklı değiş tokuş yaparsa hal yoğunluğu ζ_n veya E_f^s ile belirlenebilecektir. Arayüzey tabakasında potansiyel, arayüzey hallerinin yük değişiminden dolayı uygulanan gerilimle ve arayüzey hallerinin enerjisiyle değişmektedir. Bunun sonucu olarak arayüzey yüklerinin değişmesiyle kapasitans değişmekte, difüzyon potansiyelinin değişmesiyle C_d deplasyon kapasitansı değişmekte ve difüzyon potansiyelinde oluşan değişim diyotta bir frekans değerinde termoiyonik emisyon akımını değiştirmektedir.

2.17. Derin Tuzakların Kapasitansa Etkisi

Deplasyon bölgesinde derin tuzak seviyesi Fermi seviyesiyle birlikte değiştiğinde tuzak seviyesi ve tuzakta bulunan yüklerin davranışı değişecektir. Çünkü bant bükülme miktarı uygulanan gerilime bağlı olduğundan dolayı tuzaktaki yüklerin durumu uygulanan gerilime bağlı olacak ve sonuçta kapasitans etkin olacaktır. Schottky kontaklarda tuzakların kapasitansa etkisini inceleyebilmek için düşük kusur konsantrasyonlarını karakterize ve dedekte edebilen uygun metotlar kullanılmalıdır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu bölüm, referans Au/*p*-Si/Al ve Au/Antrakininon/*p*-Si/Al diyotlarının yapımı için gerekli olan malzeme, numune hazırlanması, temizlenmesi ve diyotların üretimiyle ilgili bilgi ve prosedürleri kapsamaktadır. Ayrıca hazırlanan numunenin *I-V*, *C-V* karakteristik parametrelerinin ölçümünde kullanılan cihazlar ve teknikler bu bölümde yer almaktadır.

3.2. *p*-Si Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması

Yaptığımız bu çalışmada kullanılan *p*-Si kristali, (100) doğrultusuna, 400 µm kalınlığa, 1-10 Ω-cm öz dirence sahiptir. Kullanılan kristal tabaka olarak satın alındı ve numune yüzeyinde herhangi bir pürüz gözlenmedi. Ancak yapacağımız diyodun düşünülen kalitede olabilmesi için kristal yüzeyinin her türlü kirliliklerden arındırılması gerekmektedir. Bu yüzden numuneye kimyasal temizleme işlemi gerçekleştirildi. Kimyasal temizlemede sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulandı.

- 1-Aseton'da ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 2-Metanol'de ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 3-Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 4- RCA1 (H₂O:H₂O₂:NH₃; 6:1:1)'de 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 5-Seyreltik HF (H₂O:HF; 10:1) ile 30 saniye yıkandı.
- 6-RCA2 (H₂O:H₂O₂:HCl; 6:1:1)'de 60°C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 7-Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 8-Seyreltik HF (H₂O:HF;10:1) ile 30 saniye yıkandı.
- 9-20 dakika akan deiyonize su içerisine bekletildi.
- 10- El ile temas edilmemesine dikkat edilerek iyice kurutuldu.

Diyot fabrikasyonunda kirlilikler diyot parametrelerini olumsuz etkileyeceğinden, ortam şartları ve kullanılacak malzemelerin temiz olması da önem arz etmektedir. Buharlaştırılacak Al ve Au metalleri seyreltik HF ile ultrasonik olarak, omik kontağın fırında tavlama işlemi için kullanılacak quartz pota asetonla ve metanolle yaklaşık 5'er dakika ultrasonik olarak ve buharlaştırmada kullandığımız ısıtıcı %10'luk HCl ile ultrasonik olarak yıkanıp, deiyonize su ile iyice durulandıktan sonra kurutuldu.

Vakum cihazı ve çalışmada kullanılacak yardımcı ekipmanların temizliği yapıldıktan sonra buharlaştırma işleminde kullanılacak ısıtıcı vakum pompasındaki yerine yerleştirildi ve haznesine buharlaştırılacak Al metal bırakıldı. Buharlaştırma işlemi yapılmadan önce metali oksitlenme türü kirliliklerden arındırmak için metal vakum ortamda eritildi. Omik kontak yapmak üzere numunelerin mat tarafı (omik kontak yapılacak yüzey) aşağıdaki ısıtıcıya bakacak şekilde vakum sistemindeki tutucuya uygun yükseklikte yerleştirildi ve buharlaşan metalin bu yüzeyi kirliletmesini engellemek için kristalin üst yüzeyi üzerine cam lamel konuldu. Buharlaştırılacak metalin, yarıiletken malzeme ile etkileşimi açısından numunenin bırakılacağı yükseklik iyi ayarlanmalıdır. Omik kontaklarda numune ile buharlaştırılacak metal arasındaki uzaklık Schottky kontaklara göre daha az olmalıdır. Böylece buharlaşacak metalin yarıiletken yüzeyine atomik boyutta daha yoğun kaplanması sağlanabilir. Önceden çalıştırılarak işlem yapılmaya hazır hale getirilen vakum sisteminin içindeki basınç yaklaşık olarak 10^{-5} torr değerine düşüncü, kimyasal temizliği yapılmış ve ısıtıcı üzerine yerleştirilmiş olan Al metali yüksek akımda buharlaştırıldı. Kısa bir süre sonra vakum cihazına hava verildi, sistem dengeye ulaştıktan sonra numuneler vakum cihazından çıkartılarak kimyasal olarak temizlenmiş quartz pota içine yerleştirildi. Önceden yakılarak numune tavlama işlemi için hazır hale getirilen fırına yerleştirilip N_2 ortamında $580^{\circ}C$ 'de 3 dakika tavlandı. Bu işlemde sonra quartz pota tavlama numuneleri ile beraber fırının girişine çekilerek soğuması için biraz bekletildi. Böylece p-Si/Al omik kontak işlemleri tamamlanmış oldu. Buharlaştırma sistemi ve tavlama işleminde kullanılan fırın sistemi sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Buharlaştırma ünitesi



Şekil 3.2. Tavlama fırını

Omik kontak işlemi tamamlanan *p-Si* yarıiletken kristali elektrokimyasal kaplama işlemi için bakır kaplı numune tutucu üzerine gümüş pasta ile yapıştırılıp omik kontak ile elektrik bağlantısı sağlandıktan sonra etrafı su ve kimyasal çözücülerden etkilenmeyecek silikon malzemesi ile kaplatıldı. Elektrokimyasal işlemine başlamadan önce, tavlama süresinden sonraki işlemlerde yarıiletken yüzeylerinde oluşabilecek oksitlenme veya başka kirlilikleri temizlemek için, kristalin antrakinon büyütülecek

olan yüzeyi (parlak yüzey) %10'luk HF ve sonra deiyonize su ile tekrar yıkanıp iyice kurutulduktan sonra, elektrokimyasal kaplama işlemine geçildi. Daha sonra bu yüzey üzerine elektrokimyasal yöntem kullanılarak antrakinin organik filmi büyütüldü ve böylece organik/yarıiletken/metal yapısı elde edilmiş oldu.

3.3. Elektrokimyasal Kaplama İşlemi

3.3.1. Elektrokimyasal cihaz

Tüm elektrokimyasal ölçümler Bioanalytical Systems BAS-100B elektrokimyasal analizör ile gerçekleştirildi. Üç elektrotlu elektrokimyasal hücre kullanıldı. Çalışma elektrotu olarak omik kontak yapılmış p-Si tabakalar kullanıldı. Karşıt ve referans elektrot olarak sırasıyla Pt tel ve Ag/AgCl/KCl (doygun) kullanıldı. Elektrokimyasal analizler sırasında çözünmüş oksijeni uzaklaştırmak için çözeltiden azot gazı geçirildi.

3.3.2. Elektrot yüzeylerinin modifikasyonu

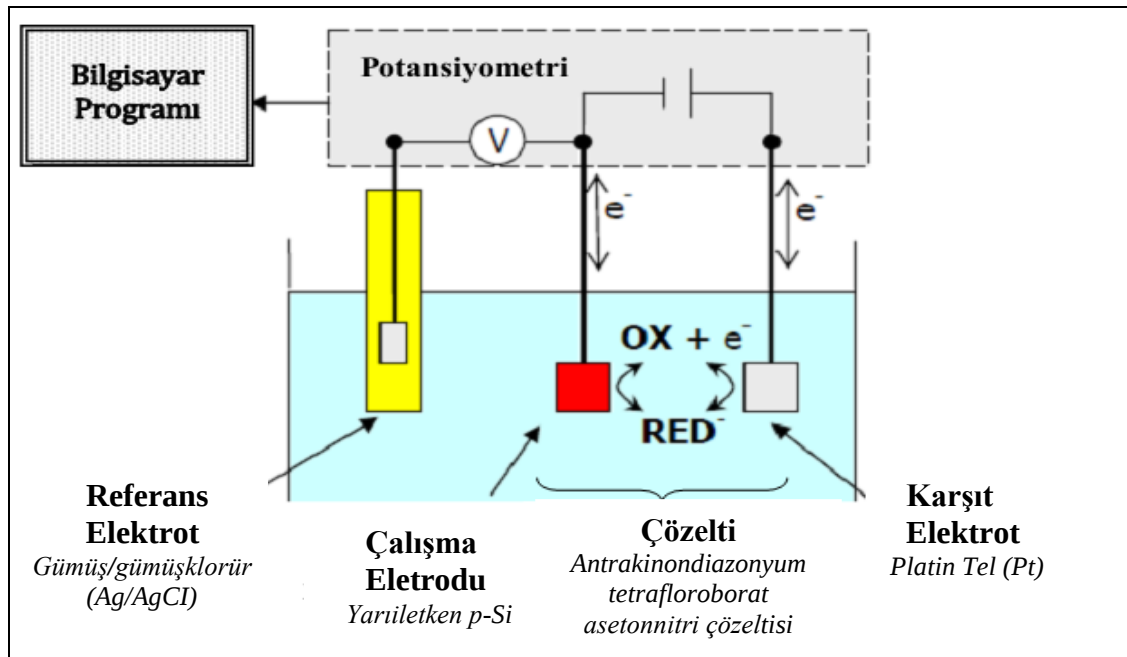
Modifikasyondan önce silisyum elektrotların temizlenmesi aşağıda verilen basamaklar izlenerek gerçekleştirildi.

- Sırasıyla asetonitril ve saf su içerisinde ultrasonik banyoda 10 dk yıkama,
- %2'lik HF içerisinde ultrasonik banyoda 5 dk yıkama,
- Yeniden su ve asetonitril çözeltisinde ultrasonik banyoda 10 dk yıkama,
- Azot atmosferinde kurutma,

Daha sonra bu elektrotlar klasik diazonyum sentez yöntemiyle sentezlenmiş antrakinin diazonyum tuzu (1 mM) ve tetrabutylamonyum tetrafloroborat (TBABF₄, 0.1 M) içeren asetonitril çözeltisine daldırıldı ve +0,8/-0,8 V arasında tarama yapıldı. Böylece diazonyum tuzlarının indirgenmesi ve oluşan radikallerin yüzeye kovalent bağlanması sonucunda yüzeyler üzerinde antrakinin filmleri elde edildi. Sonuç olarak modifiye

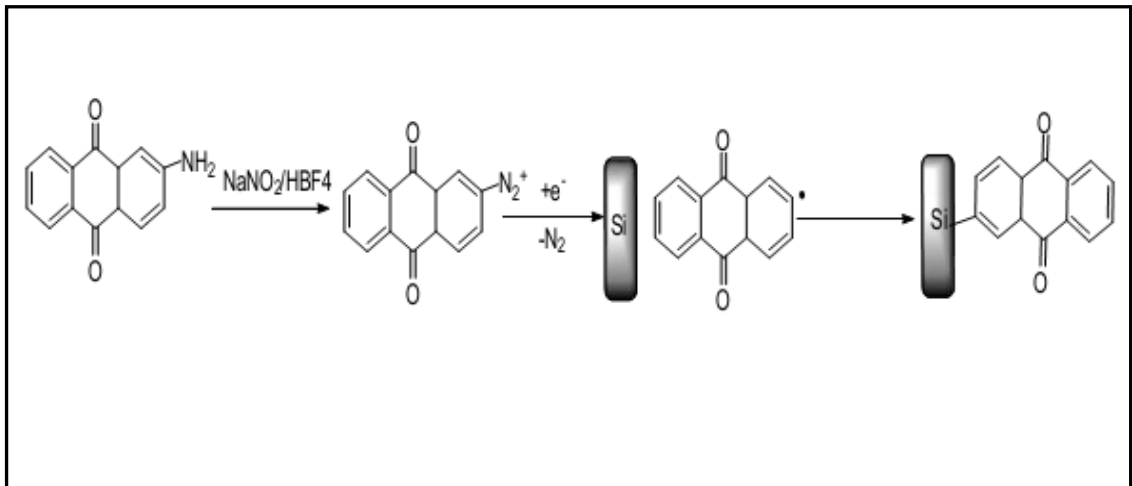
elektrotlar sırasıyla deiyonize su ve asetonitril ile yıkanarak yüzeye absorplanmış safsızlıklar uzaklaştırıldı.

Yüzeylerin elektrokimyasal olarak kaplanması uygun bir güç kaynağı kullanılarak ya potansiyometrik olarak (yani sabit voltaj durumunda) ya da galvanometrik olarak (yani sabit akım durumunda) gerçekleştirilir. İnce filmler elde etmek için potansiyometrik şartlar tavsiye edilir. Bu çalışmada ince filmler elde etme hedeflendiğinden potansiyometrik olarak Si elektrot yüzeyleri kaplandı. Elektrot yüzeylerinin elektrokimyasal olarak kaplanma işlemi Şekil 3.3'te görüldüğü gibi üç elektrotlu elektrolitik bir hücre de çalışma elektrotu olarak bir metal veya yarıiletken kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada kullanılan yarıiletken (p-tipi Si) güç kaynağının pozitif terminaline anot olarak bağlanmış olup çalışma elektrotu olarak adlandırılmaktadır. Güç kaynağının negatif terminaline ise bir metal olan platin tel (Pt) katot olarak bağlanmış olup karşıt elektrot olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca çalışma elektrotunun potansiyelini sabit tutmak için gümüş/gümüşklorür (Ag/AgCl) referans elektrot olarak kullanılmaktadır.

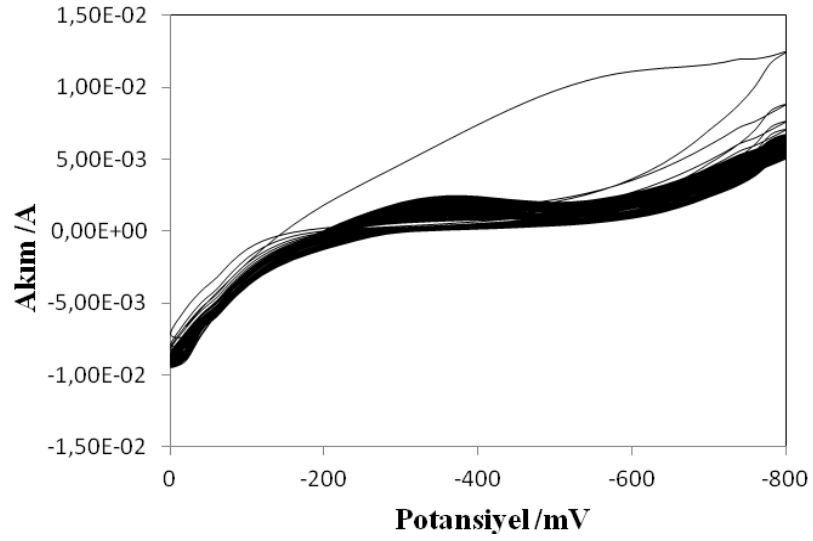


Şekil 3.3. Si elektrot yüzeylerinin antrakinon ile kaplama işleminin devre şeması

Yapılan çalışmada Si yüzeylerini elektrokimyasal kaplama işlemi için kullanılan antrakinontetrafloraborat diazonyum çözeltisi susuz asetonitril çözücüsünde hazırlandı. Ayrıca Si elektrot yüzeylerinin kaplanma işleminden önce antrakinon diazonyum tuzu kimyasal sentez yöntemi ile elde edildi. Antrakinondiazone tuz sentezi literatürde verilen prosedüre göre gerçekleştirildi. İlk aşamada 2-aminoantrakinon molekülü (0,01 mol) 6 ml HBF_4 içerisinde çözününceye kadar karıştırıldı ve bu esnada sıcaklık tuz-buz banyosuyla -4°C 'ye ayarlandı. Karıştırılan çözeltiye 0,01 mol tert-butilnitritin (tBuNO_2) 3 ml asetonitril içerisindeki çözeltisinden damla damla ilave edildi. tBuNO_2 ilavesinden sonra çözelti, 45 dakika karıştırıldı ve antrakinondiazone tuzlarının çökmesi için $+4^\circ\text{C}$ 'de bekletildi. Reaksiyon sonucunda antrakinon molekülü için antrakinon diazone katıların oluşumu çok kısa bir süre sonra elde edildi. Söz konusu çökelek eter ile yıkandıktan sonra modifikasyon işlemi için 0,1 M Bu_4NBF_4 içeren asetonitril içerisinde çözüldü. Bu çözelti kullanılarak voltametri tekniği ile diazone tuzunun indirgenme potansiyel aralığı belirlendi. Belirlenen potansiyel aralığında (başlangıç potansiyeli $+0,8\text{ V}$ ve dönüşüm potansiyeli $-0,8\text{ V}$) düşük tarama yapılarak Si yüzeyinin modifikasyonu elektrokimyasal indirgenme ile Şekil 3.4'deki gibi gerçekleştirildi.



Şekil 3.4 Antrakinondiazone tuzunun kimyasal sentezi ve Si elektrot yüzeylerinin antrakinon molekülü ile elektrokimyasal olarak kaplanmasını gösteren basamaklar



Şekil 3.5. Si elektrot yüzeylerinin antrakinin molekülü ile elektrokimyasal olarak kaplanmasını gösteren voltamogram

Si elektrot yüzeylerine kovalent bağ ile bağlanan antrakinin ve sonuç filmlerin uygulama alanlarını şöyle sıralayabiliriz:

1.grup;

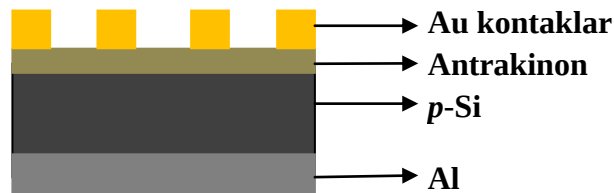
- Elektrostatik malzemeler,
- İletken yapıştırıcılar,
- Elektrokimyasal kılıflama,
- Baskı devre bordları,
- Antistatik kaplama,
- Aktif elektronik (diyot ve transistör),...v.b.

2.grup;

- Moleküler elektronik,
- Elektriksel göstergeler,
- Kimyasal, biyokimyasal ve termal sensörler,
- Şarjlı batarya, katı elektrolitler ve optik bilgisayarlar, ...v.b.

Sonuç olarak bir yüzeyine Al buharlaştırılmış Si elektrotları kaplamak için iki adım kullandı 1. adım kimyasal sentez 2. adım ise elektrokimyasal kaplama (Şekil 3.4.). Elektrokimyasal yöntem polimerleştirme yöntemi değildir ancak tarama sayısına bağlı olarak çoklu tabakalar elde edilebilir. Düşük taramada antrakinonun tek tabaka olarak (ince film) Si elektrot yüzeyine bağlanır, yüksek taramada ise çoklu tabaka oluşur ve bu durum polimerleşme gibi düşünülebilir (Dunker *et al.* 1936; Delamar *et al.* 1992).

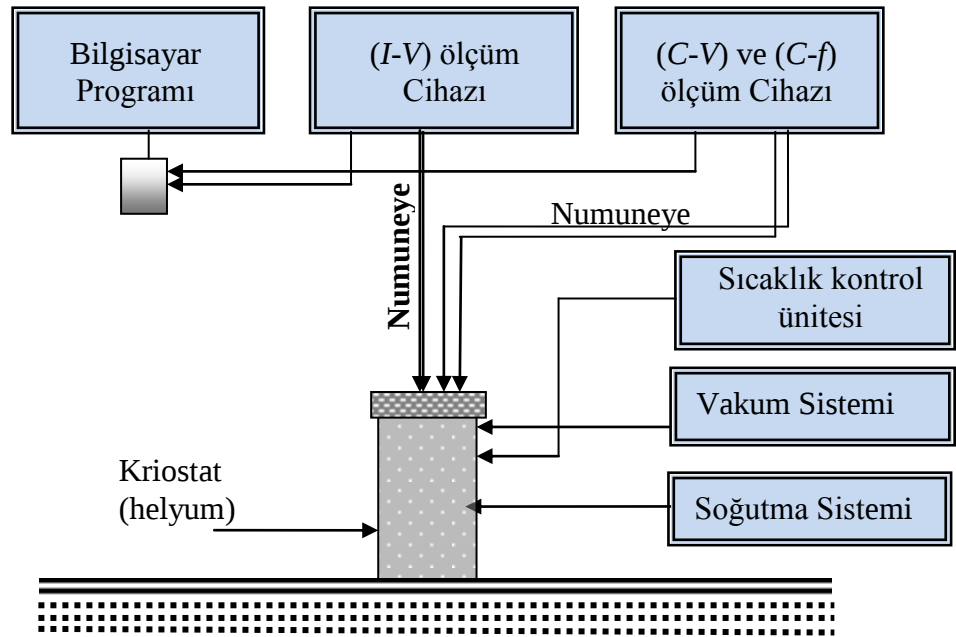
p-Si kristalin parlak yüzeylerine antrakinon büyütüldükten sonra elde edilen Antrakinon/*p* Si/Al diyonu laboratuvar sıcaklığında 10 dakika asetonitril ile yıkandı ve azot gazı ile kurutuldu. Daha sonra referans Au/*p*-Si/Al ve Au/Antrakinon/*p*-Si/Al Schottky yapıların imaline başlandı. Üzerine antrakinon kaplanmış ve omik kontağı yapılmış numuneler, 1 mm çapındaki deliklere sahip molibden gölge maske üzerine, omik kontak için kaplanan yüzleri yukarı bakacak şekilde yerleştirilerek üzeri cam lamel ile kapatıldı. Laboratuvarımızdaki omik kontak işleminde kullandığımız kaplama ünitesinin cam fanusu kapatılarak vakuma alındı. Kaplama ünitesinin içerisinde basınç $\approx 10^{-5}$ torr değerine ulaşınca, sisteme akım verildi. Antrakinon kaplanmış yüzey üzerine Au metali buharlaştırılarak Şekil 3.6'teki gibi nokta şeklinde doğrultucu (Schottky) kontaklar elde edildi. Elde edilen referans Au/*p*-Si/Al ve Au/Antrakinon/*p*-Si/Al diyotların laboratuvar sıcaklığında *I*-*V* ölçümleri alındı ve temel diyet parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği gibi) hesaplandı. Bu hesaplamalar sonucunda, Au/Antrakinon/*p*-Si/Al yapısında ideal değerlere yakın diyet seçildi ve kesit görüntüsü Şekil 3.6'te verilen numune, tutucuya yerleştirilerek sıcaklığa bağlı *I*-*V*, *C*-*V* ölçümleri laboratuvar sıcaklığından (300 K) başlanılarak 20 K adımlarla 80 K sıcaklığına kadar alındı. Bu diyodun *I*-*V* ve *C*-*V*, karakteristikleri sıcaklığa bağlı olarak değerlendirildi.



Şekil 3.6. Au/Antrakinon/*p*-Si/Al diyodunun kesit görüntüsü

3.4. Deney ve Ölçüm Sistemi

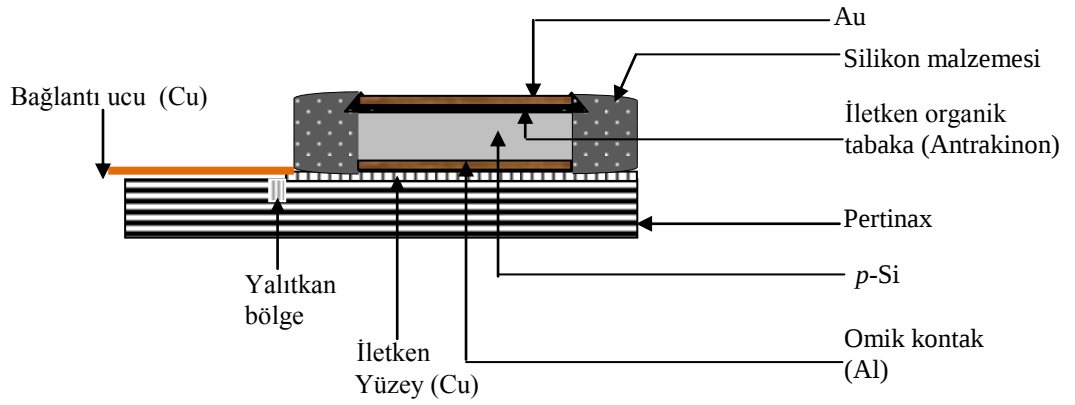
Fabrikasyonunu yaptığımız referans Au/p-Si/Al diyodunun sadece laboratuvar sıcaklığında I - V ölçümleri alındı ve Au/Antrakininon/p-Si/Al diyotlarının değişen sıcaklıklardaki karakterizasyonu belirlemek için Şekil 3.6’da gösterilen ölçüm düzeneği kuruldu. Au/Antrakininon/p-Si/Al yapısının “KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source” cihazı ile akım-voltaj (I - V) ve HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER” cihazı ile de kapasite-voltaj (C - V) ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak alındı. Numune sıcaklığı LakeShore 340 sıcaklık kontrol ünitesi yardımıyla $\pm 0,1$ K hassasiyetle kontrol edildi. Sıcaklığa bağlı ölçümler için kullanılan kriostat düzeneği Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Sıcaklığa bağlı ölçümler için kullanılan kriyostat düzeneği



Şekil 3.8. Akım-voltaj ve kapasite-voltaj ölçüm sistemi



Şekil 3.9. Au/Antrakinon/p-Si/Al numunesinin ölçüm sırasındaki kesit görüntüsü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

Bu bölümde, bir önceki bölümde ayrıntıları verilen işlem basamakları takip edilerek fabrikasyonu tamamlanan Au/p-Si/Al diyodunun laboratuvar şartlarında I - V (Akım-Voltaj) ölçümleri ve Au/Antrakinon/p-Si/Al diyodunun I - V (Akım-Voltaj) ve C - V (Kapasite-Voltaj) ölçümlerinden sıcaklığa bağlı olarak elde edilen değişimler, bu değişimlerin değerlendirilmesinde kullanılan metotlar ve değişimlerin değerlendirilmesi sonucu elde edilen temel diyot parametrelerinin bazıları yer almaktadır.

4.2. I - V (Akım-Voltaj) Ölçümleri ve Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması

Yukarıda anlatılan fabrikasyon aşamaları tamamlanan Au/Antrakinon/p-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı I - V ve C - V ölçümleri için deney düzeneği kuruldu. Sıcaklık kontrol ünitesi 300 K'e ayarlanıp sıcaklık dengesi sağlandıktan sonra bu sıcaklıktan başlayarak 20 K'lik adımlarla 80 K'e kadar (80-300 K aralığında) I - V ve C - V ölçümleri alındı.

I - V ölçümleri yardımıyla diyodun, lineer davranış sergilediği düz beslem tarafındaki değişiminden idealite faktörü, engel yüksekliği ve yüksek akım değerlerine karşılık gelen ve lineerliğin bozulduğu bölge yardımıyla da seri direnç değerleri hesaplandı. Ayrıca referans Au/p-Si/Al yapısının laboratuvar sıcaklığındaki I - V ölçümlerinden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı.

Termoiyonik Emisyon (TE) teorisine göre, bir Schottky diyodun doğru beslem akımı uygulanan potansiyele bağlı olarak;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadede $eV \gg nkT$ olması durumunda üstel terim yanında ‘1’ ihmal edilebilir. Bu durumda ifadenin yeni hali;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (4.2)$$

olur. (4.2) ifadesinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp, sonra da V 'ye göre türevi alınırsa; idealite faktörü için (4.3) ifadesi elde edilir.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.3)$$

İdealite faktörü; diyodun karakteristiğini belirleyen önemli bir parametredir. “n” simgesi ile gösterilir ve birimsiz bir parametredir. İdeal bir diyot için $n=1$ 'dir ve n değeri 1'den uzaklaştıkça, yani değeri büyüdükçe diyot ideal olmayan bir davranış sergiler.

$\ln I$ - V grafiği çizildiğinde, düz beslem kısmındaki lineer bölgeye doğru bir fit çizilerek bu doğrunun eğiminden $dV/d(\ln I)$ elde edilir. Bu değerle birlikte e , (elektronun yükü $=1,6 \times 10^{-19}$ C), k (Boltzmann sabiti $=8,625 \times 10^{-5}$ eV/K) ve T (mutlak sıcaklık (K)) değerleri (4.3) ifadesinde yerine yazılarak idealite faktörü değerleri her bir sıcaklık için hesaplandı. Fit edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akım yoğunluğunu verir. (4.2)'deki I_0 doyma akım yoğunluğu,

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.4)$$

ile verilmektedir. (4.4) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp Φ_b 'ye göre çözümlerse, (4.5) ile verilen engel yüksekliği ifadesi elde edilir.

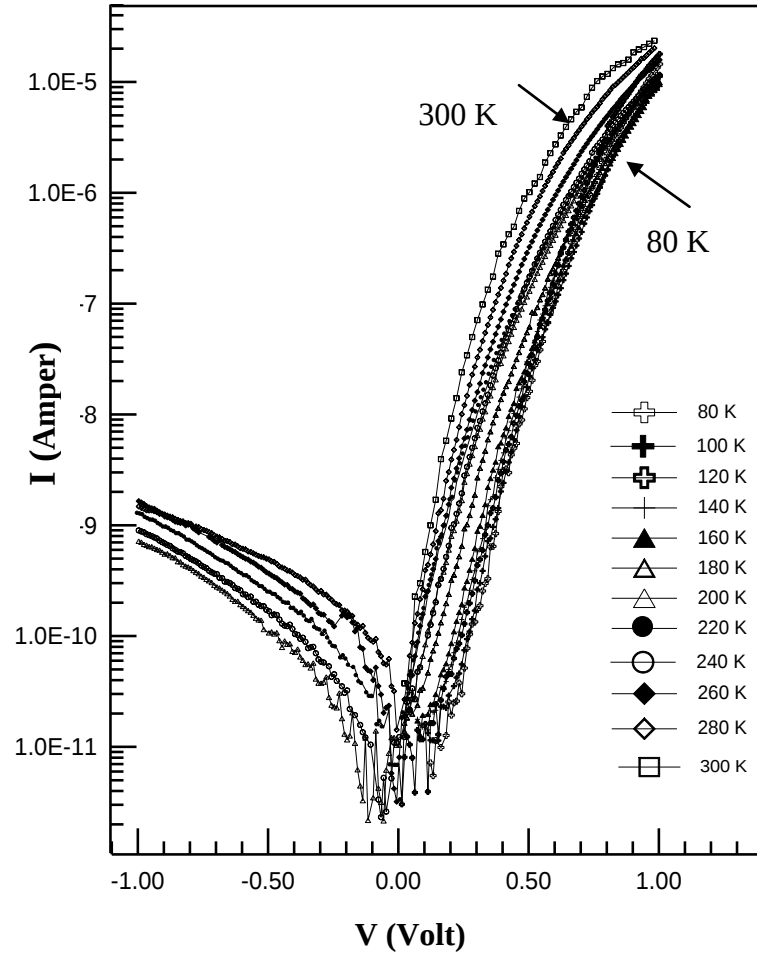
$$e\Phi_b = kT \ln(AA^*T^2 / I_0) \quad (4.5)$$

Burada, A, diyodun etkin alanı ($A=0,00785 \text{ cm}^2$) A^* , Richardson sabiti olup p-Si için $32 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ dir.

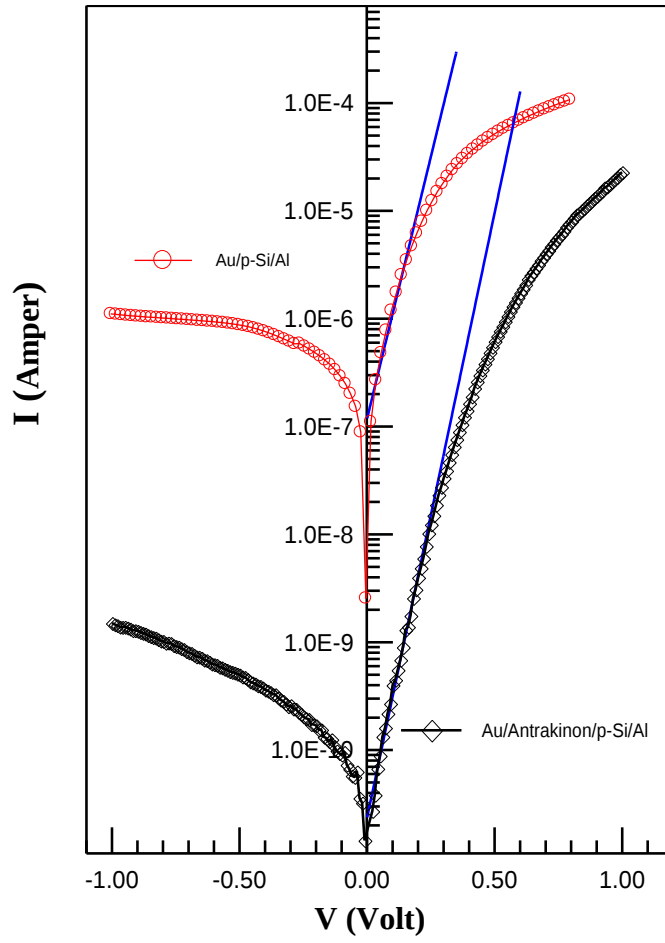
Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı akım-voltaj grafikleri Şekil 4.1.a'da verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen idealite faktörleri ve engel yükseklikleri değerleri Çizelge 4.2'de görülmektedir. Aynı şartlarda elde edilen referans Au/p-Si/Al ve Au/Antrakininon/p-Si/Al diyotlarının akım-voltaj grafikleri Şekil 4.1.b'de verilmiştir. Çizelge 4.1'de referans Au/p-Si/Al diyoduna ait geleneksel metot kullanılarak hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri ile Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri verilmektedir. Çizelge 4.2'deki veriler incelendiğinde, yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe idealite faktörü değerleri azalırken engel yüksekliği değerlerin arttığı görülmektedir. Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi, oda sıcaklığından daha düşük sıcaklıklara doğru gidildikçe aynı akım değerine ulaşabilmek için gerekli olan uygulama gerilimi artmaktadır. (4.3) ve (4.4) eşitliği kullanılarak elde edilen değerlerin sıcaklık ile değişimini gösteren Şekil 4.2'de idealite faktörü artan sıcaklıkla azalmakta iken engel yüksekliği artan sıcaklıkla artmaktadır.

Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodunun I - V değişimleri $\pm 1 \text{ V}$ aralığında, $0,02 \text{ Volt}$ luk adımlarla alındı. (2.28) ve (2.30) (Cheung fonksiyonları) eşitlikleri kullanılarak, diyodun engel yükseklikleri ve idealite faktörleri bu ifadeler yardımıyla da hesaplandı. (2.28) ifadesinde verilen $dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya karşı çizilen grafiği bir doğru vermektedir. Bu doğrunun $I=0$ 'da düşey ekseni kestiği noktadan idealite faktörü, doğrunun eğiminden de seri direnç değerleri elde edildi. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodunun sıcaklığa bağlı, Cheung fonksiyonlarına ait $dV/d(\ln I)$ - I grafiği şekil 4.3.a'da verilmiştir.

Bu grafikten elde edilen idealite faktörü ve seri direnç değerleri Çizelge 4.2’de görülmektedir. Burada hem idealite faktörü değerleri hemde seri direnç değerleri artan sıcaklık ile azalmıştır. (2.30) denklemi yardımıyla elde edilen $H(I)$ - I grafiğinde, $I=0$ iken doğrunun düşey ekseni kestiği noktadan, engel yüksekliği ve doğrunun eğiminden de seri direnç (R_s) elde edilmektedir. Bu işlemler yukarıda belirtilen her bir sıcaklık için tekrarlandı. $H(I)$ - I grafiği sıcaklığa bağlı olarak şekil 4.3.b’de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri de Çizelge 4.2’de görülmektedir. Burada da engel yüksekliği değerleri artan sıcaklıkla düzenli artarken, $dV/d(\ln I)$ - I grafiğinde olduğu gibi seri direnç değerlerinde de artış gözlenmiştir.



Şekil 4.1.a Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiği



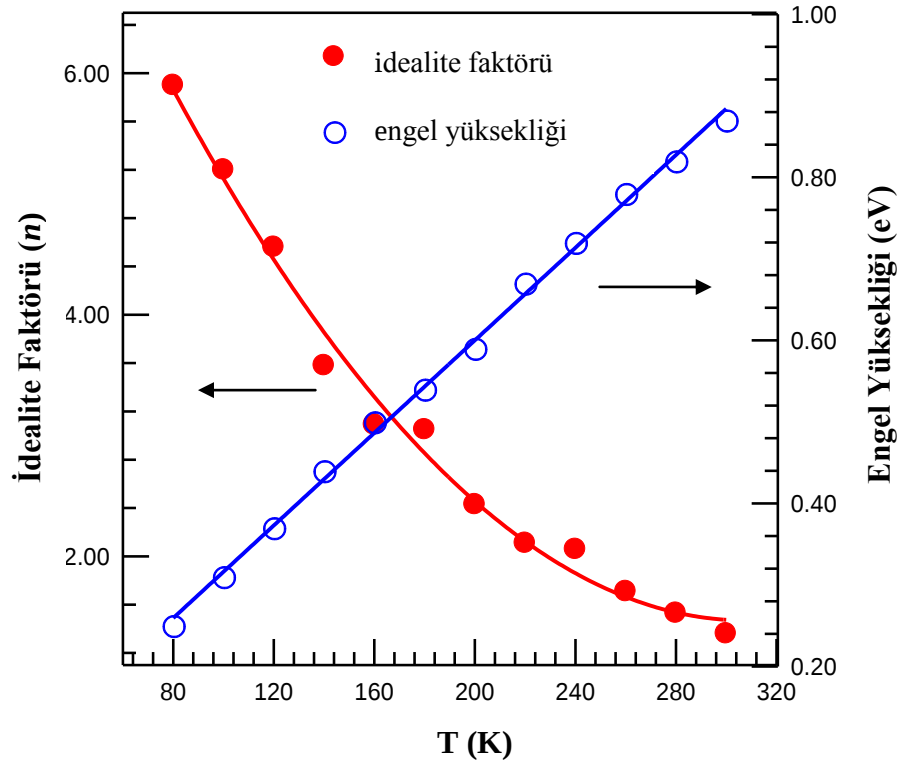
Şekil 4.1.b. Referans Au/p-Si/Al ve Au/Antrakinon/p-Si/Al diyotlarına ait I - V grafiği

Çizelge 4.1. Referans Au/p-Si/Al diyoduna ait I - V grafiğinden elde edilen temel diyot parametreleri

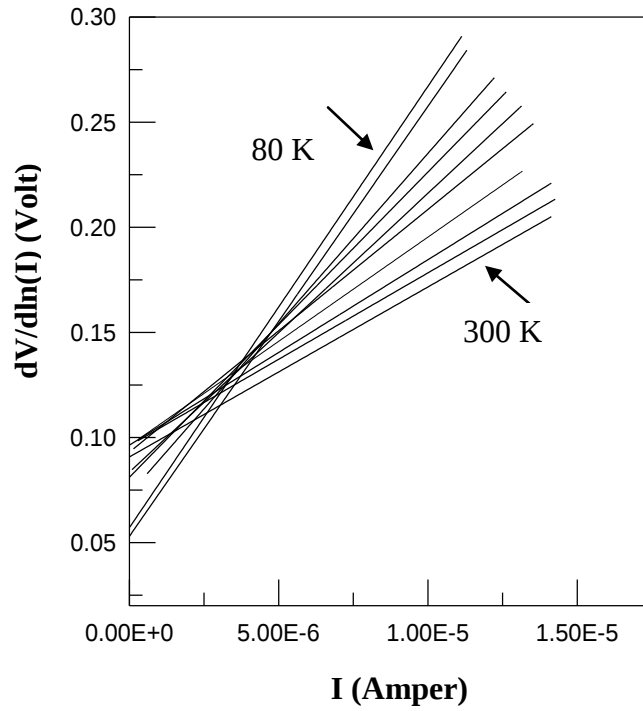
Sıcaklık	I - V		$dV/d(\ln I)$		$H(I)$ - I	
	n	$\Phi_b(\text{eV})$	n	$R_s(\Omega)$	$\Phi_b(\text{eV})$	$R_s(\Omega)$
Laboratuvar Sıcaklığı	1,55	0,67	2,50	8552	0,65	8585

Çizelge 4.2. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiğinden elde edilen temel diyot parametreleri

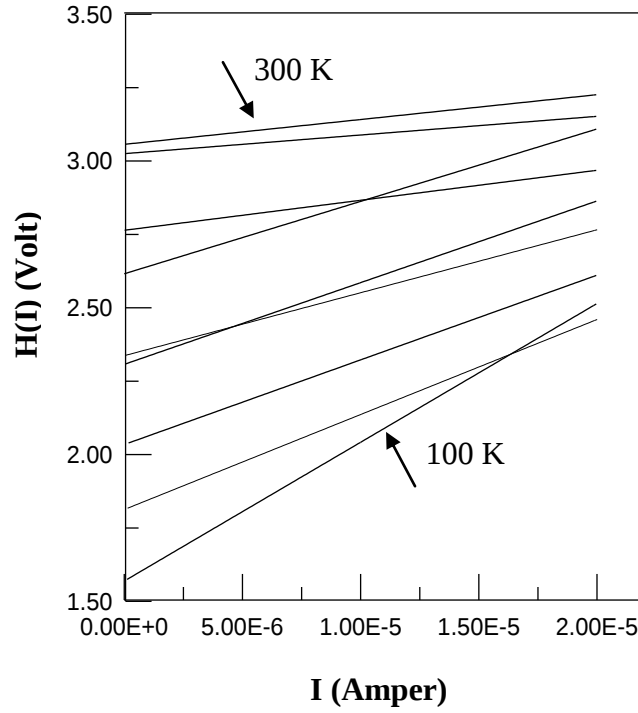
<i>Sıcaklık</i> (K)	<i>I-V</i>		<i>dV/d(lnI)</i>		<i>H(I)-I</i>	
	<i>n</i>	Φ_b (eV)	<i>n</i>	$R_s(\Omega)$	Φ_b (eV)	$R_s(\Omega)$
80	5,90	0,25	8,40	20246	0,23	20230
100	5,20	0,31	8,23	18336	0,28	17400
120	4,56	0,37	6,85	17553	0,32	16964
140	3,58	0,44	6,30	16125	0,38	13150
160	3,09	0,50	5,94	12100	0,43	15300
180	3,05	0,54	5,80	14522	0,48	14148
200	2,43	0,59	5,69	13260	0,51	12906
220	2,11	0,67	5,13	11540	0,57	11720
240	2,06	0,72	4,98	9915	0,61	9857
260	1,71	0,78	4,37	8817	0,66	8656
280	1,53	0,82	4,35	8219	0,70	8015
300	1,36	0,87	3,99	8086	0,80	7700



Şekil 4.2. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı I - V grafiğinden elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklıkla değişimi

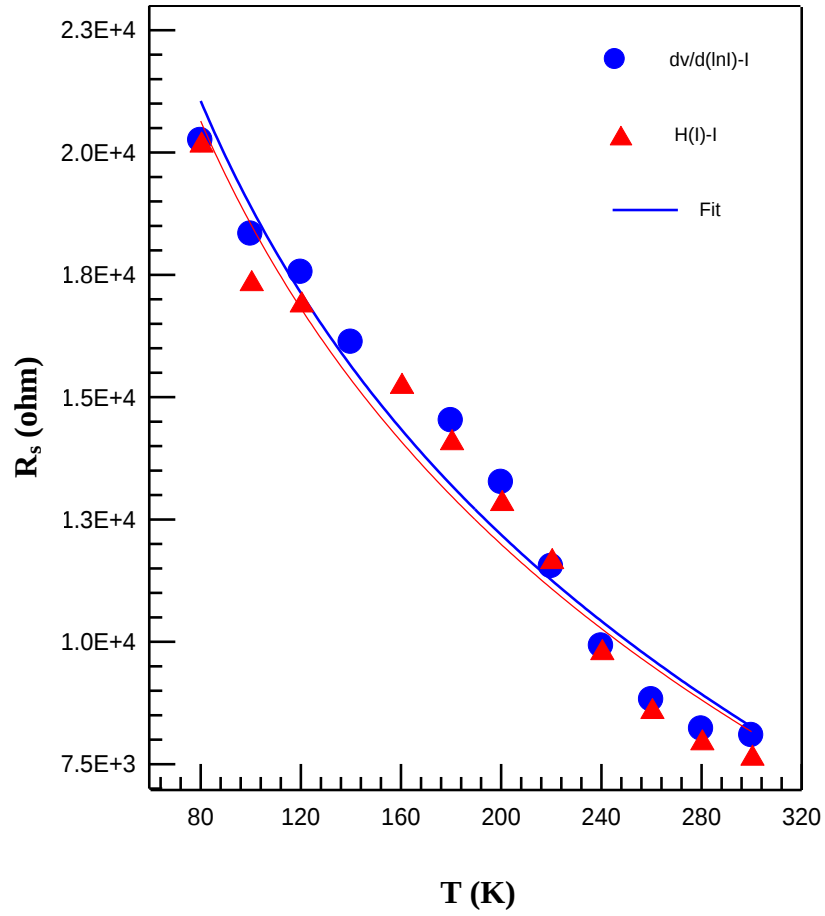


Şekil 4.3.a. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $dV/d(\ln I)$ - I grafiği



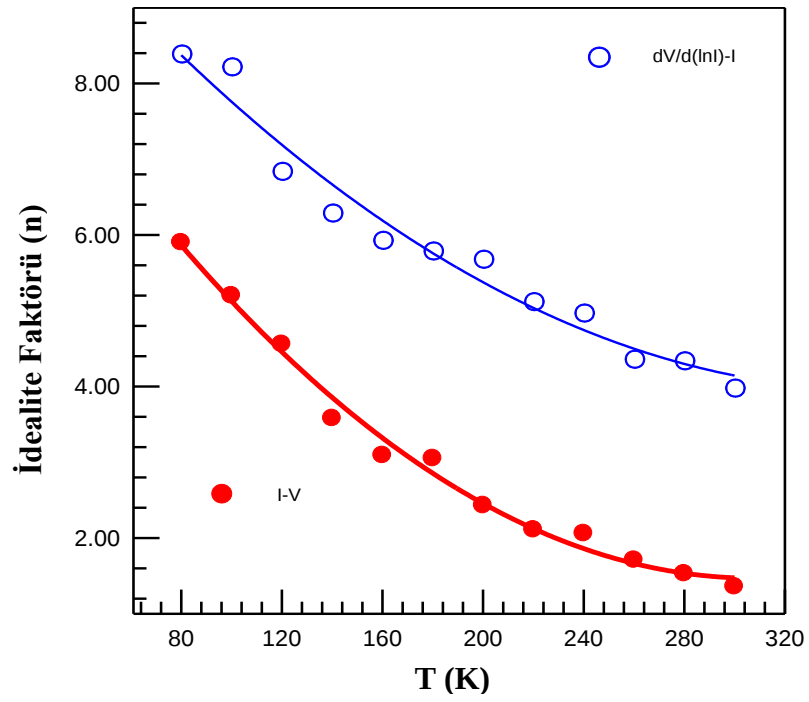
Şekil 4.3.b. Au/Antrakınon/p-Si/Al diyoduna ait sıcaklığa bağlı $H(I)$ – I grafiği

Şekil 4.3.c. Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Au/Antrakınon/p-Si/Al diodu için oda sıcaklığından düşük sıcaklıklara doğru inildikçe seri direncin arttığı ve yüksek sıcaklık bölgesinde (300 K-240 K) daha kararlı bir değişim sergilediği görülmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak seri dirençteki bu değişim sıcaklık arttıkça diyottan daha fazla akım geçmesi ile açıklanabilir. Ayrıca Sıcaklığın artmasıyla seri direnç değerlerinin düşmesi; düşük sıcaklıklarda serbest taşıyıcı yoğunluğunun azalmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir (Chand and Kumar 1996; Soylu 2007; Aydoğan *et al.* 2009). Yine Şekil 4.3.c’de de görüldüğü gibi Cheung fonksiyonlarına ait $dV/d(\ln I)$ – I ve $H(I)$ – I grafikleri kullanılarak ((2.28) ve (2.30) eşitlikleri) elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişiminin yaklaşık olarak aynı olduğu söylenebilir.

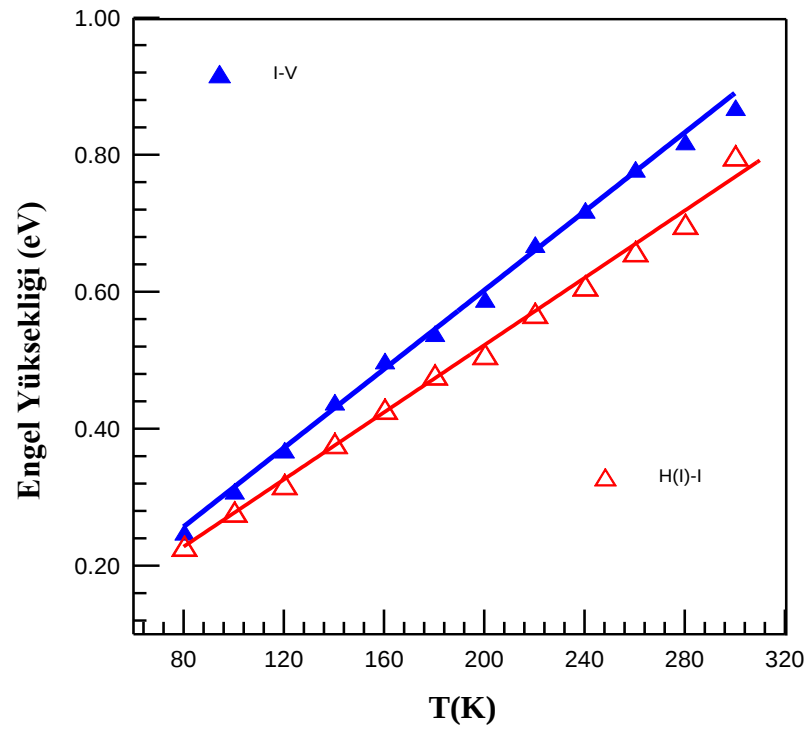


Şekil 4.3.c. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait I - V grafiğinden, Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan idealite faktörü ve engel yükseklikleri değerleri ile geleneksel I - V ölçümlerinden elde edilen idealite faktörü ve engel yükseklikleri değerlerinin sıcaklık ile değişimini göstermektedir. Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi geleneksel I - V karakterizasyonundan elde edilen değişime paralel bir davranışa sahiptir. Bu durum, değişik değerlendirme metotları arasındaki uyumu gösterir.



Şekil 4.4. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyodunun geleneksel metot ve Cheung fonksiyonları ile hesaplanan idealite faktörünün sıcaklığa karşı değişimi



Şekil 4.5. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyodunun geleneksel metot ve Cheung fonksiyonları ile hesaplanan engel yüksekliğinin sıcaklığa karşı değişimi

Deneysel çalışmalarda elde edilen engel yüksekliği dağılımının standart sapmasını ve $V=0$ 'da ortalama engel yüksekliği değerlerini elde etmek için tekli Gauss denklemi olan (2.54) denklemi kullanılmaktadır. Bu denkleme göre Φ_b engel yüksekliğinin $1/T$ 'ye ya da $q/2kT$ 'ye karşı olan değişiminin eğimi dağılımın σ_i standart sapmasını ve y-eksenini kesen nokta ise $V=0$ 'da $\bar{\Phi}_b$ ortalama engel yüksekliği değerini verecektir. Fiziksel olarak bir dağılımın σ_i standart sapması, dağılımın büyüklüğünü belirlemekle birlikte kontakta mevcut olan Schottky engel homojensizliklerinin etkisini ve büyüklüğünü göstermekte ve $\bar{\Phi}_b$ dağılımının $V=0$ 'da ortalama engel yüksekliği değerini temsil etmektedir. Mevcut bir dağılımda σ_i standart sapmasının ve $\bar{\Phi}_b$ ortalama engel yüksekliği değerinin küçük olması dağılımda mevcut homojensizliklerinin yeterince küçük olduğunu $\bar{\Phi}_b$ ve σ_i nin büyük değerlere sahip olması kontak yapıda bu anormalliklerin büyük ve etkili olduğunu ifade etmektedir.

İdealite faktörü değerlerinin voltaj katsayılarını hesaplamak ve Gauss dağılımlarını elde etmek için her dağılım bölgesinin voltaj katsayısı tekli Gauss denklemi olan (4.6) denklemi kullanılarak elde edilir. Bu denkleme göre $(1/n)-1$ 'in $1/T$ 'ye ya da $q / 2kT$ 'ye karşı olan değişiminin eğimi dağılımın ρ_3 katsayısını ve y-eksenini kesen nokta ise ρ_2 katsayısını verir. Bir dağılımda ρ_3 katsayısı idealite faktörü dağılımının standart sapmasını ve ρ_2 katsayısı ters idealite faktörünün $V=0$ 'da değerini vermektedir. Engel yüksekliğinin dağılımlarına benzer olarak ρ_3 ve ρ_2 katsayılarının küçük olması Schottky engel homojensizliklerinin yeterince küçük ve bu katsayıların büyük olması ise engel homojensizliklerinin büyük olacağını göstermektedir.

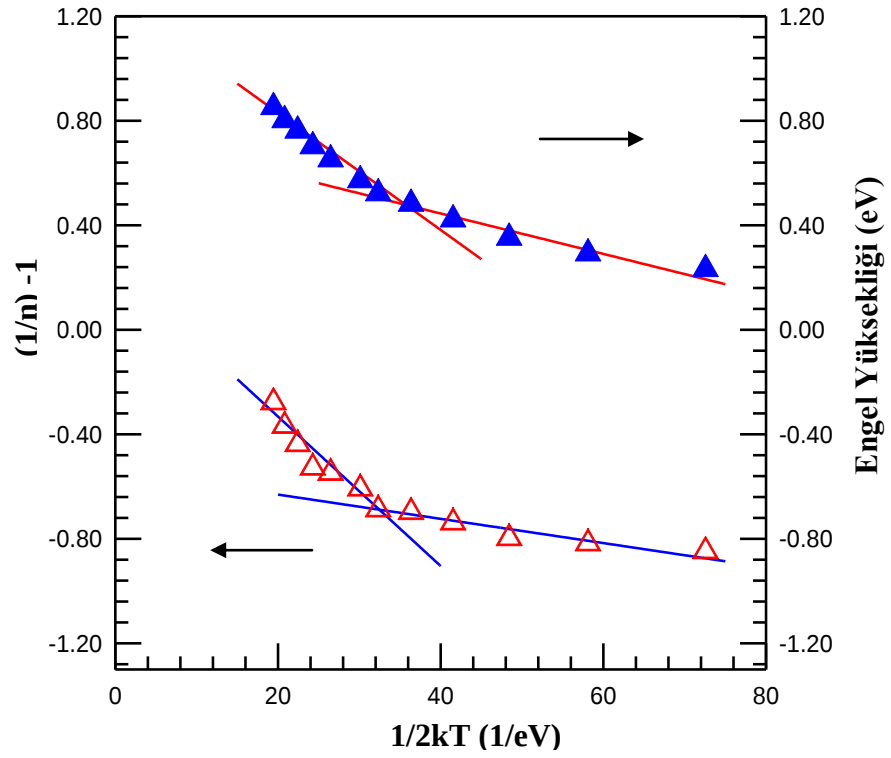
Şekil 4.6'da Au/Antrakınon/p-Si/Al Schottky diyodunun engel yüksekliği değerlerinin $q/2kT$ 'ye karşı olan değişimi verilmektedir ve bu değişimin ikili Gauss dağılımına uydukları görülmektedir. Au/Antrakınon/p-Si/Al diyodunun engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine lineer fit uygulanarak ortalama engel yüksekliği değerleri 1,28 eV ile 0,75 eV ve standart sapma değerleri 0,022 V ile 0,008 V olarak hesaplanmıştır.

Ayrıca Şekil 4.6’da Au/Antrakininon/p-Si/Al Schottky diyodun ters idealite faktörü değerlerinin $q/2kT$ ’ye karşı değişimi gösterilmektedir. İdealite faktörü değerleri yüksek sıcaklıklarda daha küçük değerlere sahiptir düşük sıcaklıklarda ise idealite faktörü değerlerindeki artışın birbirine yakın olmasından dolayı ters idealite faktörü değerlerinin daha yavaş azaldığı görülmektedir. Bu yüzden engel yüksekliği değerinin $q/2kT$ ’ye karşı olan değişiminde olduğu gibi bu grafikte de idealite faktörü değerlerinin ikili Gauss dağılımına uydukları görülmektedir.

İdealite faktörü değerlerinin voltaj katsayılarını hesaplamak ve Gauss dağılımlarını elde etmek için her dağılım bölgesinin voltaj katsayısı tekli Gauss denklemi olan

$$\left(\frac{1}{n_{ap}} - 1 \right) = -\rho_2 + \frac{e\rho_3}{2kT} \quad (4.6)$$

Werner ve Güttler eşitliği (Werner and Güttler 1991) kullanılarak elde edilir. Şekil 4.6’da gösterilen $[(1/n)-1]$ ’in $1/2kT$ ’ye karşı çizilen grafiğinden voltaj katsayıları $\rho_2 = -0,029$ ve $\rho_2 = -0,239$ V $\rho_3 = -0,005$ ve $\rho_3 = -0,538$ V olarak bulundu.



Şekil 4.6. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait $[(1/n)-1]$ ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye karşı değişimi

Literatürde çok iyi bilinen tekli dağılımları açıklayabilen modifiye edilmiş Richardson denklemini

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{ap}}{kT}\right) \quad (4.7)$$

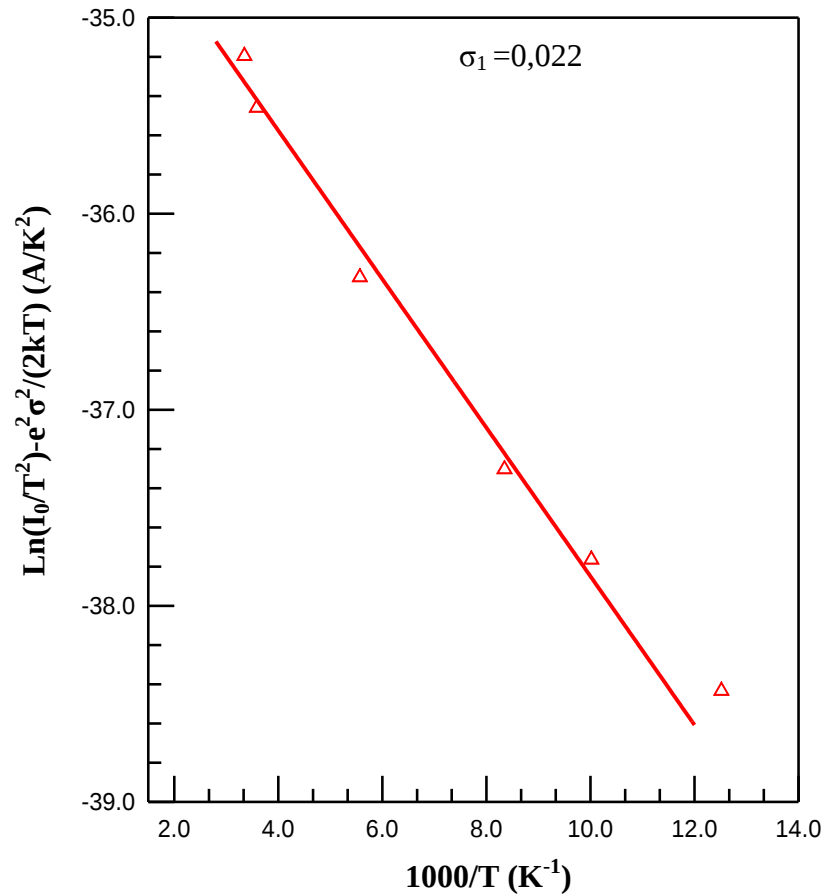
$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_b - \frac{e\sigma_0^2}{2kT} \quad (4.8)$$

denklemlerinin birleştirilmesi ile

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{e^2\sigma_0^2}{2kT^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\bar{\Phi}_b}{kT} \quad (4.9)$$

şeklinde verilmektedir.

Şekil 4.7. Au/Antrakininon/p-Si/Al Schottky diyodunun $\ln(I_0/T^2) - e^2\sigma^2/(2kT)$ 'nin $1/T$ veya $1000/T$ 'ye karşın çizilen modifiye edilmiş Richardson grafiğidir. Bu grafikte σ değeri, engel yüksekliğinin $q/2kT$ 'ye değişiminden elde edilerek kullanılır. Modifiye edilmiş Richardson grafiğinde yapılan lineer fitin y-eksenini kesen noktası modifiye edilmiş Richardson sabitini, grafiğin eğimi ise ortalama engel yüksekliğini ya da aktivasyon enerjisini vermektedir. Doğrunun eğiminden (4.9) eşitliği kullanılarak elde edilen engel yüksekliği ve Richardson sabiti değerleri sırasıyla $\Phi_b=0,46$ eV ve $A^*=34$ A/K²cm² bulundu.



Şekil 4.7. $\sigma_1=0,022$ V'ye göre, modifiye edilmiş $\ln(I_0/T^2) - e^2\sigma^2/(2kT)$ 'nin $1000/T$ 'ye karşı değişimi

4.3. C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümleri ve Yapılan Hesaplamalar

Schottky kontaklar üzerine yapılan I - V ölçümleri diyot karakteristiklerini yorumlamak için tek başına yeterli değildir. Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda uzay yükü bölgesi bir kondansatör gibi davranmaktadır ve bu bölgesinin kapasitesi, metal/yarıiletken arayüzeyin oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir. C - V ölçümlerinden elde edilen kapasitenin ters beslem durumunda gerilime bağlı değişiminden, doğrultucu kontağın engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi gibi parametreler tayin edilebilir.

Au/Antrakınon/p-Si/Al diyonu için C - V ölçümleri, 300 K ile 80 K aralığında değişen sıcaklıklarda 500 kHz sabit frekans değerinde ve -1V ile +2V gerilim aralığında, HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı ile yapıldı. Yapılan bu ölçümler (4.10) eşitliği düzenlenerek değerlendirildi.

$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_A}{2} \right)^{1/2} \left(V_d - \frac{kT}{e} \right)^{1/2} \quad (4.10)$$

(4.10) eşitliği düzenlenecek olursa,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_A} \quad (4.11)$$

elde edilir. Burada V uygulama gerilimi, ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti (Si için $\epsilon_s=11,8$), $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-12}$ F/m olup, boşluğun dielektrik sabiti, e , elektronun yükü, V_d difüzyon potansiyeli, $k= 8,625 \times 10^{-5}$ eV/K (Boltzmann sabiti), N_A iyonize olmuş akseptör konsantrasyonu ve T , Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

$(C^{-2} - V)$ grafiği çizildiğinde yapılacak uygun lineer fit ile $C^{-2}=0$ için $V_d=V$ olur. Dolayısı ile difüzyon potansiyeli elde edilmiş olur. Bu grafiklerden yararlanılarak farklı sıcaklıklarda bulunan difüzyon potansiyelleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

(4.8) ifadesinin V 'ye göre türevi alınırsa,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_A} \quad (4.12)$$

elde edilir. Bu ifadeden N_A çekilirse,

$$N_A = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.13)$$

bağıntısı elde edilir. Yine $(C^{-2}-V)$ grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonları, Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Termal dengede p -tipi bir yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu,

$$p_0 = N_v \exp\left(\frac{E_f - E_v}{kT}\right) \quad (4.14)$$

ile verilmektedir. Burada, N_v

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (4.15)$$

ifadesi ile verilir. Bu ifade termal dengede valans bandındaki hal yoğunluğudur. Si için $N_v=2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ’tür. p -tipi bir yarıiletken için $N_A \gg p_i$ olduğundan $p_o \cong N_A$ olur (Neamen 1992). Burada p_i , asal taşıyıcı konsantrasyonudur. Bu durum dikkate alındığında, (4.14) ifadesi,

$$N_A = N_v \exp\left(\frac{E_f - E_v}{kT}\right) \quad (4.16)$$

olarak elde edilir. Son ifadenin tabii logaritması alınacak olursa ve iletkenlik bandı referans seviye olarak ($E_v=0$) kabul edilirse,

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_A}{N_v}\right) \quad (4.17)$$

Fermi enerji seviyesi elde edilmiş olur. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait Fermi enerji seviyesi değerleri Çizelge 4.3’te verilmiştir. Ayrıca C - V grafiğinden engel yükseklikleri,

$$\Phi_b = E_f + V_d \quad (4.18)$$

ile verilmektedir (Neamen 1992). Bu ideal diyot içindir. İdeal olmayan durum için bu ifade,

$$\Phi_b = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (4.19)$$

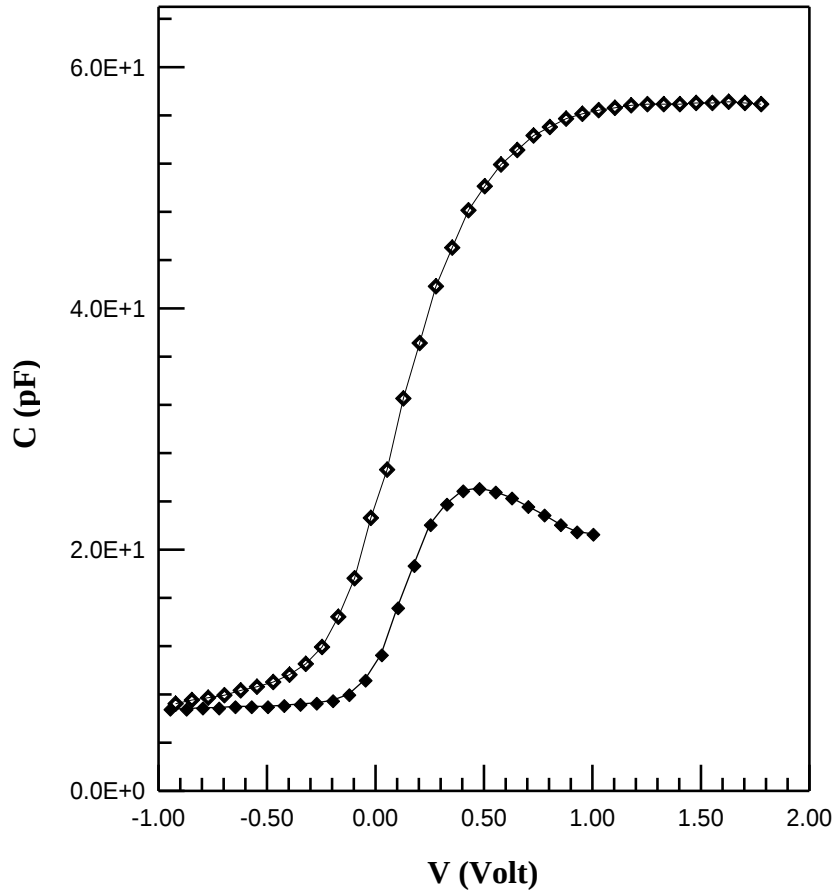
ile verilir. Bu ifadeden elde edilen engel yüksekliği değerleri düzeltilmiş engel yükseklikleri olarak adlandırılmaktadır.

Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait C - V ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Buradaki n değeri, I - V grafiklerinden elde edilen idealite faktörüdür.

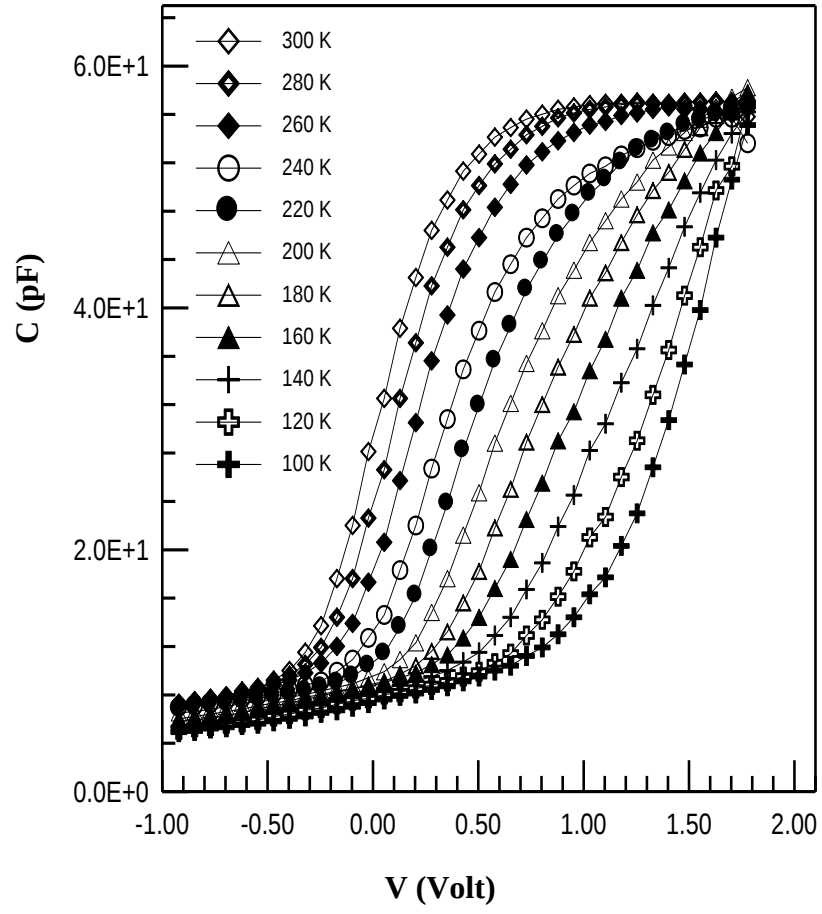
Şekil 4.8.a'da referans Au /p-Si/Al ve Au/Antrakininon/p-Si/Al diyotlarına ait laboratuvar sıcaklığında $f=500$ kHz sabit frekansta kapasite-voltaj grafikleri gösterilmektedir. Grafikler incelendiğinde organik antrakininon arayüzeyine sahip Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodunun aynı gerilim değerinde referans Au /p-Si/Al diyodundan daha büyük kapasiteye sahip olduğu söylenebilir. Şekil 4.8.b'de Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodunun 500 kHz sabit frekans altında sıcaklığa bağlı C - V değişimini göstermektedir. Bu grafikten görüldüğü gibi, gerek düz beslem ve gerekse ters beslem bölgesi için düşük sıcaklıklarda kapasite düşük iken, yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe kapasite artmaktadır. Aynı zamanda uygulama gerilimi sıfıra doğru yaklaştıkça düz beslemdeki kapasite değerleri de gittikçe küçülmektedirler. Bu değişimin sebebi; engel yüksekliğinin azalması ve yarıiletken ile metal yüzeyindeki deplasyon bölgesine olan etkisi olabilir. Şekil 4.9 Au/Antrakininon/p-Si/Al diyodunun farklı sıcaklığındaki ters beslem C - V grafiğini göstermektedir. Bu grafikte de düz beslem C - V grafiğinde olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda kapasite büyük iken, düşük sıcaklıklara doğru gidildikçe ters beslem durumundaki kapasitenin azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda uygulama gerilimi sıfıra doğru gittikçe ters beslemdeki kapasite değerleri de artmaktadır. Ters beslem altında deplasyon bölgesinin genişleyeceği ve azalan gerilim ile akseptör konsantrasyonu azalacağı için eşitlik (4.11) kapasitenin artması beklenir. Çünkü akseptör konsantrasyonu ile kapasite ters orantılıdır.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de, 500 kHz sabit frekans değerinde sıcaklığa bağlı olarak verilen ters beslem C - V grafiğinden elde edilen $1/C^2$ - V değişimini göstermektedir. Düşük sıcaklıkta kapasitenin küçük, yüksek sıcaklıklarda ise büyük olmasından dolayı $1/C^2$ değerleri, aynı uygulama gerilimlerinde düşük sıcaklıklarda büyük iken, artan sıcaklıkla azalmaktadır.

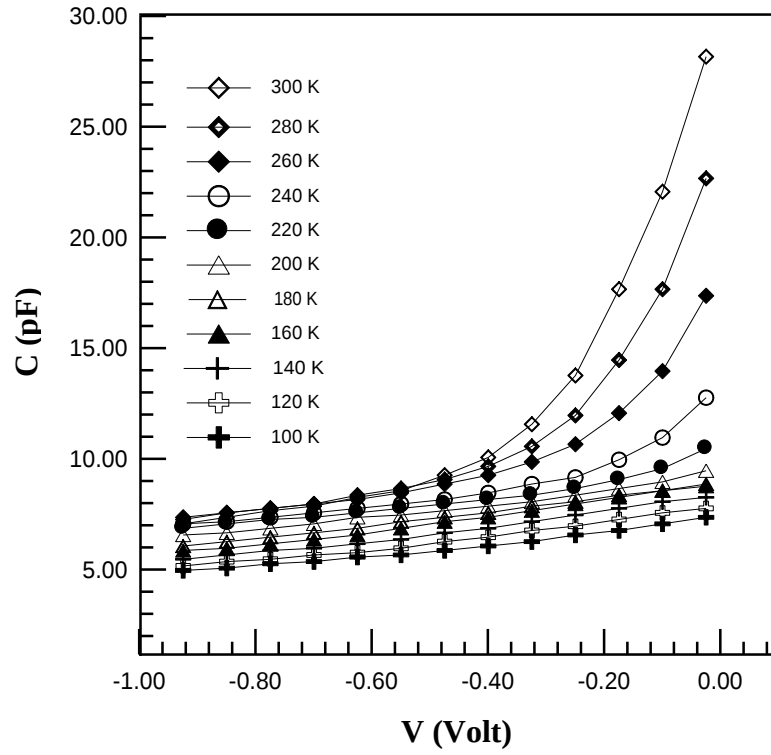
Şekil 4.12’de ise $f=500$ kHz sabit frekansta ters beslem $1/C^2$ - V grafiğinden (4.14) eşitliği yardımıyla bulunan Fermi enerji seviyesinin (E_f) sıcaklıkla değişimleri görülmektedir. Literatür çalışmalarında fermi enerji seviyesinin sıcaklıkla değişimi hemen hemen frekanstan bağımsız olduğu anlaşılmıştır. Ancak bu çalışmada sabit frekans değerinde ve sıcaklığa bağlı C - V değişimlerinin ters beslem bölgesine ait $1/C^2$ - V grafiklerinden her sıcaklık değeri için lineer bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Lineer olmayan değişimler arayüzeydeki hal yoğunluğunun varlığı ile ortaya çıkan artık kapasite ile açıklanmaktadır. Genellikle yüksek frekanslarda ($f \gg 500$ kHz) arayüzey halleri yarıiletkenle dengede bulunduğundan kapasiteye katkıda bulunmazlar (Türüt *et al.* 1992).



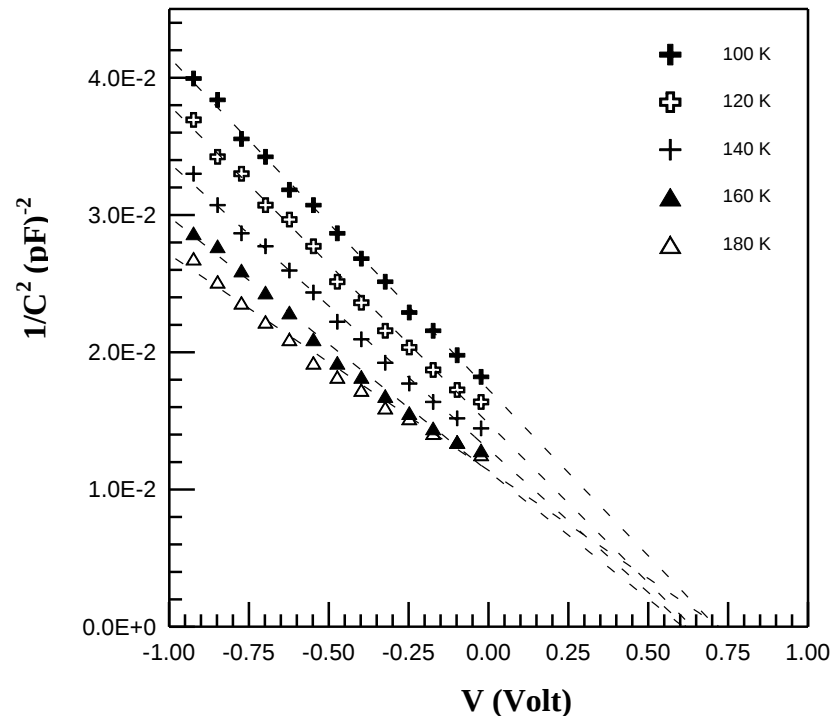
Şekil 4.8.a. Au/p-Si/Al ve Au/Antrakinon/p-Si/Al diyotlarının laboratuvar sıcaklığında $f=500$ kHz sabit frekansta düz ve ters beslem durumunda C - V grafiği



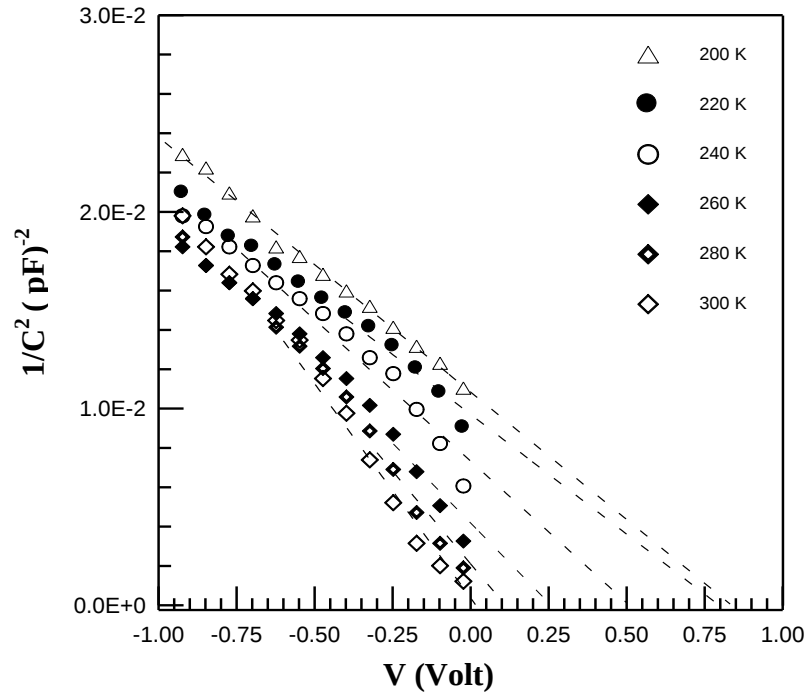
Şekil 4.8.b. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı düz ve ters beslem durumunda C-V grafiği



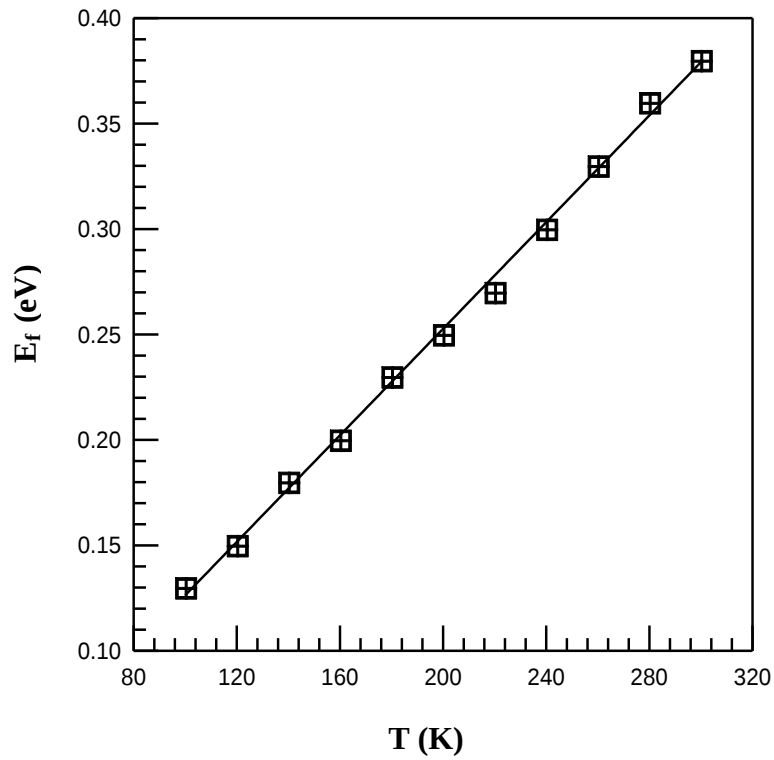
Şekil 4.9. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı ters beslem durumunda C - V grafiği



Şekil 4.10. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta farklı sıcaklıklarda $1/C^2$ - V grafiği



Şekil 4.11. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta farklı sıcaklıklarda $1/C^2$ - V grafiği



Şekil 4.12. Au/Antrakinon/p-Si/Al diyoduna ait $(1/C^2 - V)$ karakteristiğinden $f=500$ kHz sabit frekansta Fermi enerji seviyesinin sıcaklıkla değişimi

Çizelge 4.3. Au/Antrakininon/p-Si/Al diyoduna ait $f=500$ kHz sabit frekansta sıcaklığa bağlı $(1/C^2-V)$ değişimlerinden elde edilen temel diyot parametreleri

$Sıcaklık(K)$	$V_d(V)$	$E_f(eV)$	$N_A(cm^{-3}) \times 10^{13}$	$\Phi_b(eV)$	$V_d + E_f$
100	0,71	0,13	0,80	0,27	0,98
120	0,63	0,15	0,84	0,29	0,78
140	0,62	0,18	0,93	0,35	0,80
160	0,61	0,20	1,04	0,40	0,81
180	0,72	0,23	1,23	0,47	0,95
200	0,96	0,25	1,49	0,64	1,21
220	0,80	0,27	1,60	0,65	1,07
240	0,51	0,30	1,35	0,55	0,81
260	0,26	0,33	1,20	0,48	0,59
280	0,11	0,36	1,03	0,43	0,47
300	0,03	0,38	0,90	0,39	0,40

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Arayüzey tabakasının kontak parametrelerini önemli derecede etkilediği ve farklı sıcaklıklarda Schottky diyotlardan yapılan ölçümlerin diyot parametreleri hakkında pek çok bilgi verdiği bilinmektedir. Bu amaçla, [100] doğrultusunda büyütülmüş, 400 μm kalınlığında, 1-10 $\Omega\text{-cm}$ öz direncine sahip $p\text{-Si}$ yarıiletken kristali kullanılarak elde edilen Au/Antrakininon/ $p\text{-Si}$ /Al diyodun temel karakteristiklerinden $I\text{-V}$ (akım-voltaj) ve $C\text{-V}$ (kapasite-voltaj) karakteristikleri ve bu karakteristikler üzerine arayüzey malzemesinin ve sıcaklığın etkisi araştırıldı.

5.1. Sıcaklığa Bağlı $I\text{-V}$ Ölçümleri

Bölüm 3'te ayrıntılı olarak bahsedildiği gibi $p\text{-Si}$ yarıiletkeninin kimyasal temizleme işlemi yapıldı. Kristalin mat tarafına araştırma laboratuvarımızdaki buharlaştırma ünitesi ile Al buharlaştırıldı ve 580°C 'de tavlanarak omik kontak işlemi gerçekleştirildi. Daha sonra numunenin diğer yüzeyine ayrıntıları Bölüm 3'te verilen elektrokimyasal işlem ile antrakininon molekülü ince film olarak kaplandı ve Antrakininon/ $p\text{-Si}$ /Al yapısı elde edildi. Kaplanan film üzerine Au metali buharlaştırılarak nokta diyot elde edildi. Yapılan bu diyodun $I\text{-V}$ grafiğinden iyi bir doğrultucu karakteristik sergilediği görüldü.

Elde edilen bu diyodun, 300 K'den başlayarak, 20 K'lik adımlarla 80 K'ye kadar her sıcaklıkta $I\text{-V}$ ve $C\text{-V}$ ölçümleri alındı. Sıcaklığa bağlı ölçüler için kapalı devre helyum kryostatı kullanıldı. Sıcaklığa bağlı ölçülerin alındığı deney sistemi şeması Şekil 3.7'de verilmiştir.

Diyodun $I\text{-V}$ ölçümleri, "KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source" cihazı ile (+1)V - (-1) V aralığında 0,02 Volt adımlarla alındı. Ölçüm sistemi verilerinden elde edilen sıcaklığa bağlı $I\text{-V}$ karakteristikleri Şekil 4.1.a'da verilmiştir.

Bu karakteristiklerden elde edilen idealite faktörü değerleri 300 K-80 K aralığında 1,36-5,90 ve engel yüksekliği değerleri ise 0,87-0,25 eV aralığında değişmektedir. Bu sonuçlar dikkate alındığında yüksek sıcaklığa doğru gidildikçe diyodun ideale yaklaştığı söylenebilir. *I-V* karakteristiklerinden de görülebileceği gibi, düşük gerilimlerde diyodun akım iletimi termoiyonik davranış göstermiş, oda sıcaklığında idealite faktörü 1,36 olarak bulunmuştur. Azalan sıcaklıkla engel yüksekliği azalması metal-yarıiletken kontakların inhomojenliğine atfedilmiştir. İdeal veya homojen engel yüksekli metal-yarıiletken kontaklarda, $nT \sim T$ grafiklerinin eğimi tüm sıcaklık aralığı üzerinden bir'e eşittir ve engel yüksekliği sıcaklıktan bağımsızdır. İnhomojen engel yüksekliğine sahip bir Schottky diyot iyileştirilebilir ve bazı işlemlerle onun inhomojenliği azaltılabilir. Çok dikkatli bir şekilde hazırlanan diyotlarda bile engel yüksekliğindeki inhomojenlik ve bazı istenilmeyen durumların ortaya çıkması kaçınılmazdır (Aboelfotoh and Tu 1986). Düşük gerilim değerlerinde (0,0 V- 0,5 V) düz beslem akımının lineer davranış sergilediği fakat yaklaşık olarak 0,6 Volt'luk bir kırılma voltajından sonra, düşük sıcaklıklara gidildikçe daha büyük bir kırılma voltajından sonra (80 K'de yaklaşık olarak 0,9 V) akım sature olmaya başlamıştır. Sıcaklığa bağlı *I-V* karakteristiklerinden bulunan idealite faktörleri, engel yükseklikleri, Cheung fonksiyonları yardımıyla bulunan idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.2'den de görüldüğü gibi, Cheung fonksiyonlarından elde edilen parametreler geleneksel *I-V* karakteristiğinden elde edilen parametrelerden farklıdır ancak değerlerin sıcaklık ile değişimi uyumludur. Bu durum yüksek akım ve yüksek gerilim değerlerine karşılık gelen bölgelerde seri direncin etkisine atfedilebilir (Aydoğan 2003; Duman 2012).

Şekil 4.2'de *I-V* karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişim karakteristiğini göstermektedir. Bu karakteristikten görüldüğü gibi, artan sıcaklıkla engel yüksekliği artarken, idealite faktörü azalmaktadır. Bu tarzdaki bir değişim polimer/yarıiletken arasındaki atomik homojen olmayan engelle açıklanabilir. Bu homojensizliğin nedeni, farklı atomik fazlar, yüzey kusurları veya arayüzeyin etkisine atfedilebilir (Soylu 2007).

Polimer/yarıiletken arayüzeyi boyunca akım iletimi sıcaklıkla aktive edilmiş bir işlem olduğundan dolayı, düşük sıcaklıklarda elektronlar daha düşük engelleri aşabilirler ve bu yüzden akım daha düşük Schottky engel yüksekliğine sahip bölgelerden geçen akım akışıyla belirlenir. Bu durum büyük bir idealite faktörüne sebep olur. Sıcaklık arttığında daha fazla elektron yüksek engelleri aşmak için yeterli enerjiye sahip olur. Bunun sonucu olarak da baskın olan engel yüksekliği sıcaklıkla ve beslem voltajıyla artarken idealite faktörü azalır. Au/Antrakınon/p-Si/Al diyodu için I - V karakteristiklerinden elde edilen temel diyot parametrelerinden, artan sıcaklıkla idealite faktörünün azalması ve artan sıcaklıkla engel yüksekliğinin artması literatürde yapılan çoğu çalışmalarla (Hardikar 1999; Biber 2003; Coşkun *et al.* 2003) uyum içinde olduğu görülmüştür.

Au/Antrakınon/p-Si/Al diyodu için Cheung fonksiyonları yardımıyla bulunan seri direnç değerlerinin artan sıcaklıkla değiştiği Şekil 4.3.c'de görülmektedir. $dV/d\ln(I)$ - I grafiğinden hesaplanan seri direnç değerleri 300 K'de 8086 Ω , 80 K'de 20246 Ω dur. $H(I)$ - I grafiğinden hesaplanan seri direnç değerleri ise 300 K'de 7700 Ω , 80 K'de 20230 Ω dur. Yine Şekil 4.3.c'de oda sıcaklığından düşük sıcaklıklara doğru inildikçe seri direncin arttığı ve yüksek sıcaklık bölgesinde (300 K-240 K) daha kararlı bir değişim sergilediği görülmektedir. Artan sıcaklığa bağlı olarak seri dirençteki bu artış yüksek sıcaklıklarda serbest taşıyıcı yoğunluğunun artmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir. Sıcaklığın artması ile yarıiletkendeki genleşmeden dolayı yasak enerji aralığı azalacak ve aynı zamanda taşıyıcılar da daha yüksek termal hıza kavuşacaktır. Dolayısıyla iletkenlik bandındaki taşıyıcı sayısı artacak, buna bağlı olarak seri direnç değeri azalacaktır. (Chand and Kumar 1996; Soylu 2007; Aydoğan 2009; Taşer 2013).

I - V karakteristikleri yardımıyla türetilen grafikler kullanılarak voltaj katsayıları, ortalama engel yüksekliği, standart sapma (σ_0) ve Richardson eğrilerinden de Richardson sabiti ile engel yüksekliği değerleri bulunmuştur. Şekil 4.6'da $[(1/n)-1]$ 'in $1/2kT$ 'ye karşı çizilen grafiğin eğiminden voltaj katsayıları $\rho_2 = -0,029$ ve $\rho_2 = -0,239$ V, $\rho_3 = -0,005$ ve $\rho_3 = -0,538$ V olarak bulunmuştur. Aynı grafikte engel yüksekliğine karşı $1/2kT$ grafiğinin eğimlerinden engel yüksekliği değerlerinin iki farklı dağılım bölgesine

lineer fit uygulanarak ortalama engel yüksekliği değerleri ($\bar{\Phi}_b$) 1,28 eV ile 0,75 eV ve standart sapma değerleri (σ_i) 0,022 V ile 0,008 V olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.7 $\ln(I_0/T^2) - e^2\sigma^2/(2kT)$ 'nin $1000/T$ 'ye karşı çizilen modifiye olmuş Richardson grafiğidir. Modifiye olmuş Richardson grafiğinde yapılan lineer fitin y-eksenini kestiği nokta modifiye Richardson sabitini, grafiğin eğimi ise ortalama engel yüksekliğini ya da aktivasyon enerjisini vermektedir. Doğrunun eğiminden elde edilen engel yüksekliği ve Richardson sabiti değerleri sırasıyla $\Phi_b=0,46$ eV ve $A^*=34$ A/K²cm² hesaplandı.

Schottky diyotlarda asıl akım iletim mekanizması TE (Termoiyonik Emisyon) modeli ile açıklanmaktadır. İdeal bir diyot için idealite faktörü (n) 1'dir. Ancak ideal durumdan sapmalar, idealite faktörünün 1'den büyük değerler almasına neden olabilir. Bu durumda n değeri 1'den uzaklaştıkça diyodun ideallikten uzaklaştığı söylenebilir. İdealite faktörünün 1'den büyük olması farklı nedenlere atfedilmektedir. Bunlar: 1) metal ve yarıiletken arasında ince bir oksit tabakasındaki arayüzey halleri, 2) Yüksek katkılı yarıiletkenlerde tünelleme akımı, 3) Arayüzeyde, elektrik alan etkisiyle imaj kuvvetinin düşmesi, 4) Uzay yükü bölgesinde jenerasyon/rekombinasyon akımları olabilir (Aydoğan 2003).

5.2. Sıcaklığa Bağlı C-V Ölçümleri

Au/Antrakınon/p-Si/Al diyodunun C-V (kapasite-voltaj) ölçümleri "HEWLET PACKART 4192 A, (50 Hz-13 MHz) LF IMPEDENCE ANALYZER" cihazı ile +2 V-(-1)V aralığında, 500 kHz sabit frekans değerinde, 300 K ile 100 K sıcaklık aralığında kadar 20 K'lık adımlarla alındı. Au/Antrakınon/p-Si/Al diyodunun C-V karakteristiğinin sıcaklık ile değişimini görmek için, tek frekansta bütün sıcaklıklarda C-V karakteristikleri çizildi. Şekil 4.8.b'de sıcaklığa bağlı olarak elde edilen C-V karakteristiklerinden de görüleceği gibi sabit frekansta artan sıcaklıkla kapasitenin arttığı görülmektedir. $1/C^2$ -V karakteristikleri özellikle düşük sıcaklıklarda iyi derecede lineer bir karakteristik gösterdiği söylenebilir. Farklı sıcaklıklarda elde edilen $1/C^2$ -V

eğrileri oldukça birbirine yakın değerler vermektedir ve belirlenen herhangi bir gerilim değeri için, $1/C^2$ değeri artan sıcaklıkla azalmaktadır.

Bir Schottky diyodun ters beslem C - V karakteristiğinden yararlanarak diyodun difüzyon potansiyeli, akseptör konsantrasyonu, Fermi enerji seviyesi ve dolayısı ile de (4.18) eşitliğinden engel yüksekliği hesaplanabilir. Ters beslem $1/C^2$ - V karakteristiklerinden, V_d (difüzyon potansiyeli), E_f (fermi enerji seviyesi), engel yüksekliği ve N_a (akseptör konsantrasyonu) değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Farklı sıcaklık değerlerinde Çizelge 4.3'deki C - V karakteristiklerinden bulunan engel yükseklikleri, I - V karakteristiklerinden elde edilen ve Çizelge 4.2'de verilen engel yükseklikleri ile karşılaştırıldığında I - V ve C - V karakteristiklerinden bulunan engel yüksekliklerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu durum bir arayüzey tabakasının varlığı ve yarıiletkendeki tuzak seviyeleri ile açıklanabileceği gibi, engelin inhomojenliğine de atfedilebilir (Rhoderick *et al.* 1988; Özdemir *et al.* 2003; Korucu 2012).

I - V ve C - V ölçümleri birbirinden farklı ölçüm teknikleri olmasından dolayı çıkan sonuçlar da birbirinden farklıdır. C - V ölçümleri diyottaki empedans ölçümlerine dayanır. Devre elemanının kapasitesi uygulama geriliminin fonksiyonu olarak hesaplanır. I - V karakteristiği ile engel yüksekliği, akım akışı için bir aktivasyon potansiyeli olarak tanımlanabilen niceliği ifade eder. C - V karakteristiğinden elde edilen engel yüksekliği aslında, deplasyon bölgesinin büyüklüğünün bir ölçümüdür. Şayet engeller homojen ve ideal iseler, her iki ölçüm tekniğinden elde edilecek olan ölçümlerin aynı sonuçları vermeleri gerekir. Homojenlik ve ideallik söz konusu olmadığı durumda, her iki ölçüm tekniğinden elde edilecek ölçümler farklı olacaktır.

Dolayısı ile Au/Antrakınon/p-Si/Al diyonu homojen ve ideal olmadığı kabul edildiği için, her iki ölçüm tekniğinden elde edilen engel yüksekliği değerleri farklı olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda daha fazla akım daha yüksek engel bölgelerinden akacağı için I - V engel yüksekliği daha yüksek olacaktır. Daha düşük sıcaklıklara gidildikçe, akımın çoğu düşük engelli bölgelerden ayrıca Termoiyonik emisyon modelinden farklı olarak

difüzyon yoluyla da aktığı kabul edilebilir. Bu durumda (düşük sıcaklıklarda) da I - V engel yüksekliği daha düşük olacaktır. Özetle farklı tekniklerle tayin edilen engel yüksekliklerinin farklı oluşunun arayüzeydeki yüzey kontaminasyonu, derin kirlilik seviyeleri, arayüzeyde yalıtkan tabakanın varlığı, kuantum mekaniksel tünelleme, imaj kuvveti ile engelin azalması ve kenar sızıntı akımları gibi sebeplerden kaynaklandığına dair literatürde çeşitli yorumlar mevcuttur (Soylu 2007).

Sonuç olarak, kendi laboratuvarımızda imal ettiğimiz Au/Antrakininon/ p -Si/Al diyoduna ait I - V (akım-gerilim), C - V (kapasite-voltaj) ölçümleri ve ölçümlerden elde edilen diyot parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimleri incelenmiştir. Artan sıcaklıkla idealite faktörünün azaldığı, engel yüksekliğinin arttığı gözlenmiştir. Yine Cheung fonksiyonları yardımıyla hesaplanan seri direncin sıcaklıkla azaldığı görülmüştür. Richardson eğrileri yardımıyla Richardson sabiti hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerin p -Si için verilen $32 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ değerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Yine sıcaklığa bağlı olarak elde edilen C - V karakteristiklerinden de görüleceği gibi artan sıcaklıkla kapasitenin arttığı görülmektedir. $1/C^2$ - V karakteristiklerinin özellikle düşük sıcaklıklarda iyi derecede lineer bir karakteristik gösterdiği görülmüştür.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen veriler dikkate alınarak, iletken organik malzemelerin Schottky diyot yapımında kullanılabilecekleri söylenebilir. Referans Au/ p -Si/Al diyoduna ait veriler dikkate alındığında arayüzey malzemesinin Schottky diyotlarda doğrultma sağladığını, diyodun engel yüksekliğini arttırdığını ve diyotların kapasitesini yükselttiği söylenebilir. Bunun yanı sıra farklı sıcaklıklarda Schottky diyotlardan yapılan ölçümlerin temel diyot parametreleri hakkında pek çok bilgi verdiği söylenebilir. Genel olarak Schottky diyot parametrelerinin tayin edilmesi için geniş bir sıcaklık aralığında çalışmak gerekmektedir. Çünkü özellikle düşük sıcaklıklarda TE (Termoionik Emisyon) modelinden sapmalar görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abay, B., Çankaya, G., Güder, H. S., Efeoğlu, H. and Yoğurtçu, Y. K., 2003. Barrier characteristics of Cd/p-GaTe Schottky diodes based on I-V-T measurements. *Semiconductor Science and Technology*, 18, 75-81.
- Aboelfotoh, M. O., Tu, K. N., 1986. *Phys. Rev. B* **34**, 2311 (1986)
- Andrews, J. M., 1974. The role of metal semiconductor interface in silicon integrated circuit technology, *J. Vac. Sci. Technol.* 11, 972-984.
- Anthoniads, H., Hsiah, B. R., Abknowitz, M. A., Jenekha, S. A. and Soike, M., 1994. Invited Review Recent Developments in Conjugated Polymer Based Plastic Solar Cells, *Synth. Met.*, 62, 265.
- Arnold, D., Hess, K., 1987. Barrier height fluctuations in very small devices due to the discreteness of dopants, *J. Appl. Phys.* 61 (11), 5178.
- Aydoğan, S., 2003. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Erzurum.
- Aydoğan, S., Sağlam, M., Turut, A., 2005a. The effects of the temperature on the some parameters obtained from current-voltage and capacitance-voltage characteristics of polypyrrole/n-Si structure. *Polymer* 46 (2005) 563-568.
- Aydoğan, S., Sağlam, M., Turut, A., 2005b. On The Barrier Inhomogeneities Of Polyaniline/P-Si/Al Structure At Low Temperature. *App. Surf. Sci.*, 250 (1-4), 43-49.
- Aydoğan, S., Sağlam, M., Turut, A., 2006. The Temperature Dependence of Current-Voltage Characteristics of the Au/Polypyrrole/p-Si/Al Heterojunctions. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 18 (9), 2665.
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., Turut, A., Onganer, Y., 2009. Series resistance determination of Au/Polypyrrole/p-Si/Al structure by current -voltage measurements at low temperatures, *Materials Science and Engineering C* 29 1486- 1490.
- Aydoğan, Ş., İncekara, Ü., Deniz, AR., Turut, A., 2010. Extraction of electronic parameters of Schottky diode based on an organic Orcein. *Microelectronic Engineering*, 87 (2010) 2525-2530.
- Aziz, H., Xu, G., 1997. Electric-field-induced degradation of poly (p-phenylene vinylene) electroluminescent devices, *J. Phys. Chem. B*, 101, 4004.
- Bandyopadhyay, S., Bhattacharyya, A. and Sen, S. K., 1999. Measurements and modelling of the barrier heights and ideality factors in the metal/conducting polymer composite Schottky device, *J. Appl. Phys.*, 85, 7, 3671.
- Bethe, H. A., 1942. Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers. MIT. Radiation Lab. Rep., 43, 12.
- Biber, M., 2003. Low-temperature current-voltage characteristics of MIS Cu/n-GaAs and inhomogeneous Cu/n-GaAs Schottky diodes, *Physica B*, 325, 138-148.
- Blood, P. and Orton, J. W., 1992. The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States. Academic Press, 734, London.
- Braun, F., 1874. On the current conduction through metal sulphides (in German), *Ann. Phys. Chem.*, 153, 556.
- Brillson, L. J., 1982. *Sur. Sci. Reports.* 2, 123.

- Brillson, L. J., 1993. *Contacts To Semiconductors*, Noyes Publications, New Jersey.
- Brors, D. L., Monnig, K. A., Fair, J. A., Coney, W. and Saraswat, K. C., 1984. CVD Tungsten-A Solution for the Poor Step Coverage and High Contact Resistance of Al, *Solid-St. Technol.* 27 (4), 313.
- Camaioni, N., Casalbore-Miceli, G., Beggiato, G., Geri, A., 1999. Optimisation of the dark and photovoltaic properties of Schottky junctions between aluminium and conjugated polymers, *Synth. Met.*, 102, 869.
- Camaioni, N., Casalbore-Miceli, G., Beggiato, G., Cristani, M., Summonte, C., 2000. Photoelectrical characterization of Schottky junctions between poly(4h-cyclopenta[2,1-b:3,4-b']dithiophene) and aluminium: effect of hexadecyl groups in 4 position, *Thin Films* 366, 211.
- Campos, M., Camaioni, N., Casalbore-Miceli, G., Geri, A., Giro, G., Zini, Q., 1995. Properties of the heterojunction between poly(dithienopyrrole)-poly(vinylchloride) composite and n-doped silicon, *Synth. Met.*, 75, 61.
- Campos, M., Bulhões, L. O. S., Cleber A., 2000. Gas-sensitive characteristics of metal/semiconductor polymer Schottky device. *Lindino, Sensors and Actuators*, 87, 67-71.
- Chand, S. and Kumar, J., 1996. Current transport in Pd₂Si/N-Si(100) Schottky barrier diodes at low temperatures, *Appl. Phys. A* 63, 171-178.
- Chand, S. and Kumar, J., 1997. Electron transport and barrier inhomogeneities in palladium silicide Schottky diodes. *Applied Physics A*, 65, 497-503.
- Chand, S. 2002. An accurate approach for analysing an inhomogeneous Schottky diode with a Gaussian distribution of barrier heights, *Semicond. Sci. Tech.* 17 (7): L36-L40.
- Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Şahin Y., Metin, Ö., Meral, K. And Aydoğan, Ş., 2013a. The electrical characteristics of the Fe₃O₄/Si junctions, *Journal of Alloys and Compounds*, 552 (2013) 437–442.
- Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Aydoğan, Ş., Yesildag, A., Ekinci, D. 2013b. The Barrier height enhancement of the Au/n-Si/Al Schottky barrier diode by electrochemically formed an organic Anthracene layer on n-Si, *Superlattices and Microstructures*, 56 (2013) 45–54
- Chattopadhyay, P. and RayChaudhuri, B., 1993. Frequency dependence of forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes, *Solid-St. Electron*, 36, 605-610.
- Cheung S. K., and Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 58, 382.
- Coşkun, C., Biber, M., Efeoğlu, H., 2003. Temperature dependence of current-voltage characteristics of Sn/p-GaTe Schottky diodes. *Applied Surface Science*, 211, 360-366.
- Crowel, C. R., Sarace, J. C. and Sze, S. M., 1965. Tungsten-semiconductor Schottky barrier diode, *Trans. Metall. Soc. AIME* 233, 478-481.
- Davydov, B., 1939. *J. Phys. USSR*, 1. 167. and 1941. *J. Phys. USSR*, 4, 335.
- Delamar, M., Hitmi, R., Pinson, J., Saveant, J.M., 1992. Covalent Modification of Carbon Surfaces By Grafting of Functionalized Aryl Radicals Produced From Electrochemical Reduction of Diazonium Salts, *J. Am. Chem. Soc.*, 114, 5883-5884.

- Donoval, D., Barus, M. and Zdimal, M., 1991. Analysis of I-V measurements on PtSi-Si Schottky structures in a wide temperature range, *Solid-St. Electr.* 34, 12, 1365-1373.
- Dunker, M. F. W. Starkey, E. B., Jenkins, G. L., 1936. The Preparation of Some Organic Mercurials from Diazonium Borofluorides, *J. Am. Chem. Soc.*, 58, 2308–2309.
- Duman S, K. Ejderha, Ö. Yiğit, A. Türüt, 2012. Determination of contact parameters of Ni/n-GaP Schottky contacts *Microelectronics Reliability*, 52, 6, 1005-1011
- and Nara, S., 1983. Electrical Properties of Polyacetylene/Polysiloxane Interface, *J. Appl. Phys.* 54, 3255.
- Ellis, D. L., Zakin, M. R., Bernstein, L. S., Rubner, M. F., 1996. Conductive polymer films as ultrasensitive chemical sensors for hydrazine and monomethylhydrazine vapor *Anal. Chem.*, 68, 817.
- Fonash, S. J., Ashok, S. and Singh, R., 1981. Effect of ion-beam sputter damage on Schottky barrier formation in silicon, *Appl. Phys. Lett.* 39, 423.
- Forrest, S. R., 2003. Organic-inorganic semiconductor devices and 3, 4, 9, 10 perylenetetracarboxylic dianhydride: an early history of organic electronics. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 15, S2599-S2610.
- Forrest, S. R., Schmidt, P. H., 1986. Semiconductor analysis using organic-on inorganic contact barriers. 1. Theory of the effects of surface state on diode potential and admittance, *J. Appl. Phys.*, 59(2), 5130-525.
- Freeouf, J. L., Jackson, T. N., Laux, S. E. and Woodall, J. M., 1982. Effective barrier heights of mixed phase contacts: Size effects, *Appl. Phys. Lett.* 40, 634.
- Gutknecht, P., and Strutt, M. J. O., 1971. Surface State and Barrier Heights of metal/Semiconductor Systems, *Electron Lett.* 7, 298.
- Gülnahar, M., 2008. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.
- Gülnahar, M. and Efeoğlu, H., 2008. I-V- characteristics of Al/p-GaTe Schottky contact structure. *Balkan Physics Letters, Special Issue*, 542-550.
- Güllü, Ö., 2008 Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.
- Güllü, Ö., Aydoğan, Ş., Türüt, A., 2011. High barrier Schottky diode with organic interlayer. *Solid State Communications*.
- Güzel T, 2006. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hardikar, S., Hudait, M. K., Modak, P., Krupanidhi, S. B. and Padha, N., 1999. Anomalous current transport in Au/low-doped n-GaAs Schottky barrier diodes at low temperatures, *Applied Physics A: Mat. Sci. & Proc.* 68, 49-55.
- Hastas, N. A., Tassis, D. H., Dimitriadis, C. A., Dozsa, L., Franchi, S. and Frigeri, P., 2004. Electrical transport and low frequency noise characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes containing InAs quantum dots. *Semiconductor Science and Technology*, 19, 461-467.
- Henisch, H. K., 1989. *Semiconductor Contacts, An approach to ideas and models*, Clarendon Press, Oxford.
- Hiraki, A., Lugujjo, E., Nicolet, M. A. and Mayer, J.W. 1971. *Phys. Status Solidi*, A7, 401.
- Jane M. G. Laranjeira, Helen J. Khoury, Walter M. de Azevedo, Eronides F. da Silva Jr. and Elder A. de Vasconcelos, 2002. Fabrication of high quality silicon-polyaniline heterojunctions, *Appl. Surf. Sci.*, 190, 390-394.

- Jones F. E, Daniels-Hafer C, Wood B. P, Danner R. G, Lonergan M. C., 2001. Current transport at the p-InP vertical bar poly(pyrrole) interface, J. Appl. Phys., 90 (2): 1001-1010.
- Karataş Ş., 2003. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Kaneto, K. and Takashima, W., 2001. Effects of regioregularity on carrier transport in poly(alkylthiophene) films with various alkyl chain lengths Curr. Appl. Phys., 1, 355.
- Kano, G., Inoue, M., Matsuno, I. and Takayanagi, S. 1966. Molybdenum-Silicon Schottky Barrier, J. Appl. Phys. 37, 2985.
- Kinbara, E., Kunugi, Y., Harima, Y., Yamashita, K., 2000. Electronic structures of poly(3-arylthiophene) films and their interfaces with metals in air, Synth. Met., 114, 295-303.
- Koopal, C. G. J., Deruiter, B. D., and Nottle, R. J. M. 1991. Amperometric Biosensor on Direct Communuciation Between Glucose Oxidase and a Conductive Polymer inside pores of a Filtration Membrane, J. Chem. Soc. Commun., 182, 169.
- Korkut, H., 2009 Doktora Tezi , Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.
- Korucu D, A. Turut, R. Turan, Ş. Altındal, 2012. Origin of forward bias capacitance peak and intersection behavior of C and G/w of Ag/p-InP Schottky barrier diodes. Materials Science in Semiconductor Processing, Available online 5 November 2012,
- Kotan, Z., 2008 Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Isparta.
- Köleli, F., Sağlam, M., Türüt, A. and Efeoğlu, H., 1994. Polyindole-based Schottky diode, Tr. J. of Chem., 18, 22.
- Maeda, K., 2001. Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Si Schottky barriers, Surf. Sci. 493, 644-652.
- Maeda, K., 2002. Identity of Defect Causing Nonideality in Nearly Ideal Au/n-Si Schottky Barriers, Appl. Surf. Sci. 190, 445-449.
- McCafferty, P.G., Sellai, A., Dawson, A., Elabd, H., 1996. Barrier characteristics of PtSi/p-Si diodes as determined from *I-V-T* measurements, Solid-St. Electron, 39, 583.
- Mc Caldin, J. O., 1974. Effective barrier heights of mixed phase contacts, J. Vac. Sci. Technol. 11, 990.
- Mead, C. A. and Spitzer, W. G., 1964. Fe rmi level position at metal-semiconductor interfaces, Phys. Rev. A 134, 713-716.
- Mott, N. F., 1938. Note On The Contact Between A Metal and An Insulator or Semiconductor, Proc. Cambridge Philos. Soc., 34, 568.
- Mönch, W., 1995. Semic. Surfaces and Interfaces, Springer Series on Surface Science, 26 (Springer, Berlin), 2 nd. ed. 348.
- Mullins, F. H. and Brunnschweiler, A. 1976. The effects of sputtering damage on the characteristics of molybdenum-silicon Schottky barrier diodes, Solid-St. Electron. 19, 47.
- Musa, I., Eccleston, W., 1999. Electrical properties of polymer Si heterojunctions, Thin Solid Films, 344, 469.
- Neamen, D. A., 1992. Semiconductors Physics and Devices, R. R. Donnelley & Sons Company, Sydney.

- Newman, N., Schilfgaarde, M., Kendelewicz, T., Williams, M. D. and Spicer, W. E. 1986. Electrical study of Schottky barriers on atomically clean GaAs(110) surfaces Phys. Rev. B33, 1146-1159.
- Neamen, D. A., 1992. Semiconductor Physics and Devices; Basic Principles, Irwin, Inc., 144.
- Nguyen, N. D., Germain, M., Schmeits, M., Schineller, B. and Heuken, M., 2001. Thermal admittance spectroscopy of Mg-doped GaN Schottky diodes, J. Appl. Phys. 90, 958-993.
- Nguyen, Van.C., Potje-Kamloth, K.,1999. Electrical and chemical sensing properties of doped polypyrrole/gold Schottky barrier diodes, Thin Solid Films, 338, 142-148.
- Nguyen Van, C., Potje-Kamloth, K., 2000. The Influence of thickness and preparation temperature of doped polypyrrole films on the electrical and chemical sensing properties of polypyrrole/gold Schottky barrier diodes. J. Phys. D: Appl. Phys., 33, 2230-2238.
- Nguyen, Van, C., Potje-Kamloth, K., 2001. Electrical and NO_x gas sensing properties of metallophthalocyanine-doped polypyrrole/silicon heterojunctions. Thin Solid Films, 392, 113-121.
- Nicollian, E. H. and Goetzberger, A., 1967. Bell. Sys. Tech., 46, 1055.
- Nixon, J. A., Davies, J. H., 1990. Barrier height fluctuations in heterostructure devices, Phys. Rev. B. 41, 7929.
- Ohdomari, I. and Tu, K. N., 1980. Parallel Silicide Contacts., J. Appl. Phys. 51, 3735.
- Onganer, Y., Sağlam, M., Türüt, A., Efeoglu, H. and Tüzemen, S. (1996). High barrier-metallic polymer/p-type Silicon Schottky diodes, Solid-State Electronics Vol. 39, No. 5, 677.
- Özdemir, A. F., Türüt, A. and Kökçe, A., 2003. The interface state energy distribution from capacitance-frequency characteristics of gold/n-type Gallium arsenide Schottky barrier diodes, Thin Solid Films, 425, 210-215.
- Özdemir, A. F., Gök, A., Türüt, A., 2007. The electrical measurements in poly(2-chloroaniline) based thin film sandwich devices, Thin Solid Films. 515, 7253-7258.
- Padovani, F. A., 1968. Thermoionic emission in Au-GaAs Schottky barriers. Solid State Electronics, 11, 193-200.
- Pandey, S. S., Ram, M.K., Srivastava, V.K. and Malhotra, B.D., 1997. Electrical properties of metal (indium)/polyaniline Schottky devices. Journal of Appl. Pol. Sci. 65, 2745-2748.
- Pickard, G.W., 1906, US patent no.836531.
- Pierce, G. W., 1907. Understanding Metal and Semiconductor Structures, Phys. Rev. 25, 31.
- Quan, D. T. and Hbib, H., 1993. High barrier height Au/n-type InP Schottky contacts with a PO_xN_yH_z interfacial layer, Solid-St. Electr. 36, 339-344.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R.H., 1988. Metal-Semiconductor Contacts, 2nd ed.(Clerendon, Oxford). 1-225.
- Robinson G .Y., 1985. Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces ed C Wilmsen (New York: Plenum).

- Sağlam, M., Biber, M., Çakar, M., Türüt, A., 2004. The effects of the ageing on the characteristic parameters of polyaniline/p-type Si/Al structure, *Applied Surface Science* 230 (2004) 404–410.
- Sah, C., Noyce, R. N., Shockley, W., 1957. *Proc. IRE.*, 45, 1228.
- Saxena, V. and Prakash R., 2000. Effect of steric hinderance on junction properties of poly (3-alkylthiophene)s based schottky diyotes, *Polymer Bulletin*, 45, 267.
- Saxena, V. and Malhotra, B.D., 2003. Prospects of conducting polymers in molecular electronics *Curr. Appl. Phys.*, 3, 293-305.
- Schottky, W., 1938. The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers, *Z. Phys.* 113, 367-414.
- Scott, J. C., Kaufman, J., Brock, P. J., DiPietro, P.J., Salem, Goitia, J. A., 1996. Hole limited recombination in polymer light-emitting diodes *J. Appl. Phys.*, 79, 2745.
- Schroeder, D., Avellan, A., 2003. Physical explanation of the barrier height temperature dependence in metal-oxide-semiconductor leakage current models, *Appl. Phys. Lett.*, 82, (25), 4510-4512.
- Sharma, G. D., Sandogaker, S. C., Roy, M. S., 1995. Electrical and photoelectrical properties of poly(phenyl azomethine furane) thin films devices. *Thin Solid Films*, 278, 129-134.
- Shaw, J. M. and Amick, J. A., 1970. *RCA Rev.* 31, 306.
- Shirakawa, H., MacDiarmid, A.G., Heeger, A.J., 2000. *The Royal Swedish Academy of Sciences, (Nobel Prices).*
- Shockley, W., Read, W. T., 1950. Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons, *Phys. Rev.*, 87, 835.
- Sinha, A. K. and Poate, J. M., 1973. *Appl. Phys. Lett.* 23, 666.
- Song, Y. P., Meirhaeghe, R. L. Van, 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, 633-638.
- Soylu, M., 2007 *Doktora Tezi , Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.*
- Subhash, C., Kumar, J., 1996. Current-Voltage characteristics and barrier parameters of Pd₂Si/p-Si(111) Schottky diodes in a wide temperature range, *Semic. Sci. and Technol.* 10, 1680-1688.
- Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M.R. and Graham, W. R., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barrier: A numerical study, *J. Appl. Phys.* 70, (12), 7403-7423.
- Sze, S. M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*, Second Edition, John Wiley and Sons.
- Taşer, A., 2013. *Yüksek Lisans Tezi , Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum (Yayımlanmamış).*
- Tagmouti, S., Outzourhit, A., Oueriagli, A., Khaidar, M., Elyacoubi, M., Evrard, R. and Ameziane, E. L., 2002. Electronic Properties of poly(3-methylthiophene), *Sol. En. Mat. and Sol. Cells.* 71, 9-18.
- Taylor. D. M., Gomes, H. L., Underhill, A. E., Edge, S., Clemenson, P. I., 1991. Effect of Oxygen on the Electrical Characteristics of Field Effect Transistors, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 24, 2023.
- Temirci, C., 2000. *Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum*

- Tokito, S., Kanaka, T., Noda, K., Okada, A., Taga, Y., 1997. Doped organic electroluminescent devices with improved stability, *Appl. Phys. Lett.*, 70, 2067.
- Tominaga, T., Hayashi, K., Toshima, N., 1997. Accelerated hole transfer by double-layered metallophthalocyanine thin film for effective electroluminescence, *Appl. Phys. Lett.*, 70, 762.
- Tomozowa, H., Braun, D., Philips, S., Heger, A. J. and Kroemer, H., 1987. Metal-Polymer Schottky Barriers on Processible Polymers, *Synth. Met.*, 22, 63.
- Tung, R. T., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers, *Appl. Phys. Lett.* 58, 2822.
- Tung, R. T., 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory, *Phys. Rev. B.* 45, 1359.
- Tung, R. T., 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts, *Materials Science and Engineering R* 35, 1-138.
- Turner, M. J. and Rhoderick, E. H., 1968. Metal-Silicon Schottky Barriers. *Solid State Electronics*, 11, 291-300.
- Tuy, T. O. and Mojzes, I., 1990. Theoretical explanation of the control of the Schottky barrier height using an ultrathin interface metal layer, *Appl. Phys. Lett.*, 56, 652.
- Tuyen, L. T. T., Kamloth, K. P., Liess, H. D., 1997. Electrical properties of doped polypyrrole/silicon heterojunction diodes and their response to NO_x gas, *Thin Solid Films*. 292.
- Türüt, A., Tüzemen, S., Yıldırım, M., Abay, B. and Sağlam, M., 1992. Barrier height enhancement by annealing Cr-Ni-Co alloy Schottky contacts on LEC GaAs, *Solid-St. Electron.* 35, 1423.
- Türüt and T. Köleli, F., 1992. Semiconductive polymer-based Schottky diode, *J. Appl. Phys.* 72, 818.
- Türüt, A. and Sağlam, M., 1992. The determination of the density of Si-metal interface states and excess capacitance caused by them. *Physica B*, 179, 285.
- van Otterloo, J. D. and Gerritsen, L. J. 1978. *J. Appl. Phys.* 49, 723.
- Wang X. J., He, L., 1998. Electrical characteristics of high performance Au/n-GaN Schottky diodes, *J. Elect. Mat.* 27 (11), 1272-1276.
- Werner, J. H., 1985. *Metalisation and Metal-Semiconductor Interfaces*, Plenum, New York, 235.
- Werner, J. H. and Gütter, H. H., 1991. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts, *J. Appl. Phys.* 69, (3), 1522-1532.
- Wilmsen C. W ., 1995. *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces*, Edited by Wilmsen C. W. Plenum Pres, New York.
- Yasuhiko S., 2000. Organic materials for electronic and optoelectronic devices, *J. Mater. Chem.*, 10, 1.
- Yu. A. Y. C., Snow, E. H., 1968. Surface Effects on Metal-Silicon Contacts, *J. Appl. Phys.* 39, 3008.
- Yu-Long, J., Guo-Ping, R. U., Fang, L. U., Xin-Ping, Q. U., Bing-Zong, L. I., Wei, L. I. and Ai-Zhen, L. I., 2002. Schottky Barrier Height Inhomogeneity of Ti/n-GaAs Contact Studied by the I-V-T Technique, *Chin. Phys. Lett.*, 19, 4, 553-556.
- Ziel, A., 1968. *Solid State Physical Electronics*, Prentice-Hall International Inc., Minnesota, 108-144.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Horasan’da doğdu. İlköğrenimini Horasan, ortaöğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisansı kazandı. 2009 yılının sonunda Yabancı Dil Hazırlık sınıfını başarıyla geçerek bilimsel araştırma çalışmalarına başladı.

Ocak 2012 de TS EN ISO/IEC 17025 standartlarında kurulan Atatürk Üniversitesi Araştırma Hastanesi Kalibrasyon Laboratuvarında kalibrasyon personeli olarak çalışmaya başladı ve halen bu işine devam etmektedir.

Projeler:

Metal/Organik/Yarıiletken Yapıların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi-Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), Proje No: 99/2011.

GaAs, InP ve Si Gibi Yarıiletkenlerle Yapılan Kontakların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi-Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), Proje No: 177/2012.

Termo Luminesans Dozimetri ile Hedef Dışı Kritik Organların Radyolojik ve Radyoterapi Dozlarının Tespit Edilmesi ve Optimum Doz Ayarının Sağlanması-Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), Proje No: 77/2011.

Makale ve Bildiriler:

Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Şahin Y., Metin, Ö., Meral, K. And Aydoğan, Ş., 2013. The electrical characteristics of the Fe₃O₄/Si junctions, Journal of Alloys and Compounds, 552 (2013) 437–442.

Çaldıran, Z., Deniz, A.R., Aydoğan, Ş., Yesildag, A., Ekinci, D. 2013. The Barrier height enhancement of the Au/n-Si/Al Schottky barrier diode by electrochemically formed an organic Anthracene layer on n-Si, Superlattices and Microstructures, 56 (2013) 45–54.

Au/ Anthraquinone /p-Si/Al Schottky Diyodun Sıcaklığa Bağlı *I-V* (Akım-Voltaj) Karakteristiğinin İncelenmesi (Sözlü Sunum) , 28. Uluslararası Fizik Kongresi, 2011-Bodrum.

Au/ Anthraquinone /n-Si/Al Schottky Diyodun Sıcaklığa Bağlı *I-V* (Akım-Voltaj) Karakteristiğinin İncelenmesi (Poster Sunumu), 28. Uluslararası Fizik Kongresi, 2011-Bodrum.

Parafin ve PMMA Malzemlerinin Farklı Enerji Dağılımlarındaki Lineer X-Işını Azaltma Katsayılarının Belirlenmesi, 23. Ulusal Biyofizik Kongresi, 2011-Edirne.

Kardiyak Multi Detektör Bilgisayarlı Tomografide Kritik Organların ve Görüntülenen Alanların Termoluminesans Dozimetri İle Radyasyon Dozunun Belirlenmesi, 23. Ulusal Biyofizik Kongresi, 2011-Edirne.

Toraks Multi Detektör Bilgisayarlı Tomografide Kritik Organların ve Görüntülenen Alanların Termoluminesans Dozimetri ile Radyasyon Dozunun Belirlenmesi, 32.Ulusal Radyoloji Kongresi, 2011-Antalya

Kardiyak Multi Dedektör Bilgisayarlı Tomografide Kritik Organların ve Görüntülenen Alanların Termoluminesans Dozimetri İle Radyasyon Dozunun Belirlenmesi- 13. Ulusal Medikal Fizik Kongresi, 2011-İzmir

Au/Antrakinon/p-Si/Al Schottky Diyodun X Işını Radyasyonuna Bağlı *I-V* (Akım-Voltaj) Karakteristiğinin İncelenmesi (Poster sunumu) 29. Uluslararası Fizik Kongresi, 2012-Bodrum

Arayüzey Tabakası Kalınlığının Schottky Kontak Karakterizasyonuna Etkisi (Poster sunumu), 29. Uluslararası Fizik Kongresi, 2012-Bodrum