



T.C.  
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİMDALI

METAL/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY DİYOT YAPILARINDA  
I-V KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

BEKİR VARLIBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANTAKYA  
TEMMUZ-2006

**Mustafa Kemal Üniversitesi**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne;**

Doç. Dr. Hüsnü Salih GÜDER danışmanlığında, yüksek lisans öğrencisi Burhan KIZILDAĞ tarafından hazırlanan bu çalışma 14.07.2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, Fizik Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç.Dr. Hüsnü Salih GÜDER	İmza:
Üye : Yrd.Doç.Dr. Ahmet GÜMÜŞ	İmza:
Üye : Yrd.Doç.Dr. İsmail Hakkı KARAHAN	İmza:

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.  
Kod No:

İmza  
14.07.2006  
**Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü**  
Prof. Dr. Abdurrahman YİĞİT

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

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÖNSÖZ.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Metal-yarıiletken kontak yapılarının gelişimi.....	1
1.2. Çalışmanın amacı ve kapsamı.....	4
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1. Materyal.....	8
3.1.1. Giriş.....	8
3.1.2. P-Tipi Yarıiletken-Metal Doğrultucu Kontaklar.....	8
3.1.3. P-tipi yarıiletken-Metal Omik Kontaklar.....	11
3.1.4. N-tipi yarıiletken-Metal Doğrultucu Kontaklar.....	12
3.1.5. N-tipi yarıiletken-Metal Omik Kontaklar.....	14
3.1.6. Metal (Omik)/N-tipi Yarıiletken-Metal (Doğrultucu) Yapılar.....	16
3.1.7. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotların Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon Teorisi.....	17
3.1.7.1. Giriş.....	17
3.1.7.2. Termiyonik Emisyon Teorisi	18
3.1.7.3. Ara Yüzey Tabaka Etkisi	21
3.1.7.4. Düz Beslem $I-V$ Karakteristikleri ve Cheung Fonksiyonları.....	22
3.2. Yöntem.....	25
3.2.1. Kristallerin Hazırlanması ve Temizlenmesi.....	25

3.2.2. Schottky Diyotların Hazırlanması.....	26
3.2.3. Akım-Gerilim Ölçümleri.....	27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	28
4.1. Düz Beslem I-V Karakteristikleri: Engel Yüksekliği ve İdealite Faktörü..	28
4.2. Cheung Fonksiyonları ve Diyot Parametrelerinin Hesaplanması.....	42
4.3. Doğrultma Oranları.....	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	54
KAYNAKLAR.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	61

## ÖZET

### METAL/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY DİYOT YAPILARINDA I-V KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışmada [100] yönelimine sahip, fosfor katkılı,  $\rho = 5 \sim 10 \Omega\text{-cm}$  öz dirençli ve mobilitesi  $\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  olan *n*-tipi silisyum kristali kullanıldı. Isısal buharlaştırma yöntemiyle Bi, Ni, Fe, Sn, Cd ve Pb metalleri kullanılarak altı farklı Schottky diyot yapısı oluşturuldu. Diyotların elektriksel karakteristiğini incelemek için, oda sıcaklığında ve karanlıkta, -1V ile +1V gerilim aralığında akım-gerilim ölçümleri yapıldı.

Verilerin termiyonik emisyon teorisi ile incelenmesinden, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sırasıyla 1.087-1.284 ve 0.623-0.884 eV aralığında oldukları bulundu. Cheung fonksiyonlarından idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri ayrıca hesaplandı. İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin termiyonik emisyon teorisinden bulunan sonuçlarla uyum içinde olduğu belirlendi. Seri direnç değerlerinin diyottan diyota farklılık gösterdiği, Ni, Bi, Fe, Sn, Cd ve Pb metalleri için sırasıyla 1. Cheung fonksiyonundan 96.86, 166.73, 3086.72, 4501.81, 51104.20 ve 318447  $\Omega$  ve 2. Cheung fonksiyonundan 98.04, 170.34, 3146.06, 4526.10, 51299.30 ve 355003.00  $\Omega$  olduğu bulundu. Yarıiletkenin gövde direnci çok düşük olmasına rağmen, farklı metaller için seri direncin gövde direncine kıyasla çok büyük değerler alması, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabakasının etkisiyle açıklandı.

Doğrultma oranlarının incelenmesinden, en yüksek doğrultma oranına sahip olan diyotun Bi/*n*-Si olduğu bulundu. Çalışma sınırları içerisinde, Bi/*n*-Si Schottky diyot en düşük idealite faktörü, en düşük engel yüksekliği, en düşük seri direnç ve en yüksek doğrultma oranıyla en ideal diyot olarak belirlendi.

2006, 61 Sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Schottky diyot, idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç ve doğrultma oranı.

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE I-V CHARACTERISTICS IN THE METAL/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY DIODE STRUCTURES

In this work, [100] oriented, phosphorus doped, *n*-type silicon crystal with a resistivity of  $\rho = 5 \sim 10 \Omega\text{-cm}$  and mobility of  $\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  has been used. Six different Schottky diodes have been fabricated using Bi, Ni, Fe, Sn, Cd and Pb metals by resistive evaporation method. In order to investigate the electrical characteristics of the diodes, current-voltage measurements have been done between -1V and +1V potential interval, at room temperature and in the dark.

Ideality factors and barrier heights have been found to be in the interval of 1.087-1.284 and 0.623-0.884 eV from the investigation of the data with thermionic emission theory, respectively. Ideality factor, barrier height and series resistance values have also been calculated by Cheung's functions. Ideality factors and barrier heights have been found to be consistent with the results of thermionic emission theory. Series resistance values have been found to change from one diode to another and calculated by first Cheung's function as 96.86, 166.73, 3086.72, 4501.81, 51104.20 and 318447.00  $\Omega$ , and by second Cheung's function as 98.04, 170.34, 3146.06, 4526.10, 51299.30 and 355003.00  $\Omega$  for Ni, Bi, Fe, Sn, Cd and Pb metals, respectively. Although bulk resistivity of the semiconductor is very small, the fact that, very great values of the series resistance compare to bulk resistivity have been explained with the effect of interface states between metal and semiconductor.

The Bi/*n*-Si Schottky diode has been found to have the highest rectifying ratio from the rectifying ratio investigations. The Bi/*n*-Si Schottky diode has been determined as ideal diode with the least ideality factor, the least barrier height, the least series resistance and the highest rectifying ratio values, in the limits of this work.

2006, 61 Pages

**Key Words:** Schottky diode, ideality factor, barrier height, series resistance and rectifying ratio.

## ÖNSÖZ

Bir elektronik devre elemanının üretimi, işletimi ve kararlılığı için yarıiletken malzeme üzerine istenilen elektriksel davranışı sağlayacak yapıların oluşturulması ve elektriksel karakterizasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple, çalışmada Bi, Ni, Fe, Sn, Cd ve Pb Schottky diyotların karakteristik parametreleri akım-gerilim ölçümleriyle incelenmiştir.

Bu yüksek lisans tezi, M.K.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü Öğretim Üyesi sayın hocam Doç.Dr. H. Salih GÜDER' in yöneticiliğinde yapılmıştır. Böyle bir çalışma için bana yol gösteren ve destek olan çok kıymetli hocam Doç.Dr. H. Salih GÜDER'e teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Araştırmanın yürütülmesi için gereken numunelerin hazırlanması ve deneysel çalışmaların yapılmasındaki çok kıymetli yardımlarından dolayı sayın Yrd.Doç.Dr. Güven ÇANKAYA'ya (Gaziosmanpaşa Üniv., Fen-Edebiyat Fak., Fizik Bölümü) teşekkürü bir borç bilirim. Deney sistemlerinin sağlanmasındaki katkılarından dolayı sayın Prof.Dr. Nazım UÇAR'a (Süleyman Demirel Üniv., Fen-Edebiyat Fak., Fizik Böl.), kaynakların sağlanması ve hesaplamaların yapılmasındaki katkılarından dolayı sayın Dr. H. Ali ÇETİNKARA'ya (Kırıkkale Üniv., Fen-Edebiyat Fak., Fizik Böl.), sayın Yrd.Doç.Dr. Oğuz KILIÇOĞLU'na, ders aşamasında ve tez yazımı sırasında maddi-manevi destek olan Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencileri sayın Burhan KIZILDAĞ ve sayın Gökhan ÇEBİŞLİ'ye de teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmamı, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen babam Ahmet VARLIBAŞ'a, annem Makbule VARLIBAŞ'a, amcam Salih Zeki VARLIBAŞ'a ve eşim Nurtop VARLIBAŞ'a ithaf ediyorum.

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A$	: Diyot alanı
$\text{Å}$	: Angstrom
$d$	: Arınma bölgesi genişliği
$dn$	: Yüzey birim başına elektron yoğunluğu
$e$	: elektron yükü
$eV$	: elektronvolt
$E_C$	: İletkenlik bandının tabanının enerji seviyesi
$E_F$	: Kontakta sonraki Fermi enerji seviyesi
$E_V$	: Valans bandının tavanının enerji seviyesi
$E_{FS}$	: Kontakta önceki yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
$E_{FM}$	: Kontakta önceki metalin Fermi enerji seviyesi
$E_g$	: Yasak enerji aralığı
$h$	: Planck sabiti
$I_n$	: Net akım
$J_o$	: Doyma akım yoğunluğu
$J_n$	: Toplam akım yoğunluğu
$J_{s-m}$	: Yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğu
$k$	: Boltzman sabiti
$m_n^*$	: Elektronun etkin kütlesi
$n$	: İdealite faktörü
$N_c$	: İletkenlik bandı hâl yoğunluğu
$N_d$	: Donor konsantrasyonu
$R$	: Direnç
$R_n^*$	: Etkin Richardson sabiti
$R_s$	: Seri direnç
$T$	: Mutlak sıcaklık
$v_x$	: Taşıyıcıların hızları



- $v_{ox}$  : Elektronun  $eV_d$  engelini aşabilmesi için gerekli hız
- $V$  : Uygulanan gerilim
- $V_d$  : Difüzyon potansiyeli
- $V_{d,o}$  : Sıfır beslem difüzyon potansiyeli
- $V_i$  : Oksit tabakasındaki potansiyel düşmesi
- $V_F$  : Engel boyunca düşen potansiyel
- $\delta$  : Metal ile yarıiletken arasındaki uzaklık
- $\varepsilon$  : Elektrik alan kuvveti
- $\Phi_{Bn,0}$  : Sıfır beslem engel yüksekliği
- $\Phi_s$  : Yarıiletkenin iş fonksiyonu
- $\Phi_m$  : Metalin iş fonksiyonu
- $\chi_s$  : Yarıiletkenin elektron ilgisi
- $\mu_n$  : Yarıiletkenin mobilitesi
- $\Omega$  : Ohm
- $\rho$  : Yarıiletkenin öz direnci

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 4.1. Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotların karakteristik diyot parametreleri.	37
Çizelge 4.2. Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotları için diğer araştırmacılar tarafından bulunan engel yüksekliği değerleri.	39

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Metal $p$ -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı.	10
Şekil 3.2. Metal $p$ -tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı.	11
Şekil 3.3. Metal $n$ -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı.	13
Şekil 3.4. Metal $n$ -tipi yarıiletken omik kontağın enerji -bant diyagramı.	15
Şekil 3.5. Termal dengede $n$ -tipi Schottky diyodun enerji -bant diyagramı.	16
Şekil 3.6. Düz beslem altında Schottky engelinde iletim mekanizmaları.	17
Şekil 3.7. Kimyasal olarak hazırlanmış Schottky engel kontağın (MIS) enerji bant diyagramı.	22
Şekil 3.8. Omik kontak yapımında kullanılan tavlama fırını.	26
Şekil 3.9. Akım-Gerilim ölçümleri sisteminin devre şeması.	27
Şekil 4.1. Ni/ $n$ -Si, Bi/ $n$ -Si, Fe/ $n$ -Si, Sn/ $n$ -Si, Cd/ $n$ -Si ve Pb/ $n$ -Si Schottky diyotların ters ve düz beslem $\ln(I)$ - $V$ grafikleri.	29
Şekil 4.2. Ni/ $n$ -Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.	31
Şekil 4.3. Bi/ $n$ -Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.	32
Şekil 4.4. Fe/ $n$ -Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.	33
Şekil 4.5. Sn/ $n$ -Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.	34
Şekil 4.6. Cd/ $n$ -Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.	35
Şekil 4.7. Pb/ $n$ -Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.	36

Şekil 4.8.	Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotların deneysel akım-gerilim verilerine teorik eğrilerin uyumu.	38
Şekil 4.9.	Ni/n-Si Schottky diyotun Cheung fonksiyonları yardımıyla çizilen $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.	44
Şekil 4.10.	Bi/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.	45
Şekil 4.11.	Fe/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.	46
Şekil 4.12.	Sn/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.	47
Şekil 4.13.	Cd/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.	48
Şekil 4.14.	Pb/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.	49
Şekil 4.15.	Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotların doğrultma oranlarının uygulanan gerilimle değişimi.	53

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Metal-Yarıiletken Kontak Yapıların Gelişimi

Katıların elektriksel özelliklerinin incelenmesi ve elektronik devrelerde kullanılması hakkındaki ilk çalışma 1874 yılında BRAUN tarafından metal-yarıiletken yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu yapılar, ilk olarak radyo dedektörlerinde daha sonra da radar dedektöründe kullanılmış olup, günümüzde mikrodalga diyot ve transistörlerde başarıyla kullanılmaktadır.

Marconi'nin telekomünikasyon deneylerini dikkate alan Braun metal-yarıiletken doğrultucuları detektör olarak kullanmış, 1921 yılında ise RICHARDSON, metal-vakum sistemlerinde termiyonik emisyon olayını açıklamıştır.

SCHOTTKY ve BETHE, 1940 yılında metal-vakum sistemlerindeki iletkenlik ile metal-yarıiletken diyotlardaki iletkenlik arasındaki benzerlikleri ortaya koymuş, iki yıl sonra aynı olayın metal-yarıiletken doğrultuculara da uygulanabileceği BETHE tarafından gösterilmiştir (BETHE, 1942).

1947 yılında BARDEEN, metal ile yarıiletken arayüzeyinde yalıtkan bir tabaka var olduğunda, bu yalıtkan tabakanın metal ile yarıiletken yüzeylerindeki dipol tabakasının Fermi seviyesinin konumuna katkısını ortadan kaldırdığını ileri sürmüştür.

İkinci Dünya savaşı döneminde, mikrodalga radarların gelişmesiyle nokta kontak diyotlar tekrar önem kazanmış, daha çok frekans dönüştürücü ve mikrodalga dedektör diyotu olarak kullanılmıştır (TORREY ve WHITMER, 1948).

Aynı yıl yükseltmelerinin düşük olması nedeniyle, vakum tüpleri yerlerini metal-yarıiletken doğrultuculara bırakmışlardır. Bu yapılar uzun süre sadece mikrodalga ölçümlerinde kullanılmıştır (BARDEEN ve BRATTAIN, 1948).

1950 yılında nokta kontak germanyum transistörü yapılarak p-n eklemi yapmak için yeni teknikler geliştirilmiştir.

Schottky diyotlar Katihal elektroniğinde kullanılan en eski ve en sade devre elemanlarıdır. Metal ve yarıiletken malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulan bu yapıda bir eklem bölgesi meydana gelir. Elektron ve boşlukların kolayca geçemeyeceği bu bölge, yarıiletken yüzeyine yakın bölgede bir enerji engeli oluşturur. Bu engelin uygulanan gerilimle artması veya azalması ile akım taşıyıcılarının bir yönden diğerine

geçiş kontrol edilebilir (AZOROFF ve BROPHY, 1963).

1964 yılında Baird, Schottky engelini silisyum transistörle birleştirerek, Schottky engel kapılı metal-yarıiletken alan etkili transistörü (MESFET) bulmuştur (RIDEOUT, 1978). Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların teorik izahı, pratikteki uygulamalarından yıllar sonra anlaşılabilmiş, gelişmelerin birçoğu metal-vakum sistemleriyle çalışan araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Schottky etkisi olarak bilinen ve metal-vakum sistemlerinde uygulanan elektrik alandan doğan imaj-kuvvet etkisiyle engelin alçalması olayı, elli yıl kadar sonra SZE ve ark., (1964) tarafından metal-yarıiletken yapılarda doğrulanmıştır.

1966 yılında CROWELL ve SZE tarafından Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termiyonik emisyon teorileri birleştirilerek tek bir teori halinde ortaya konulmuştur. Crowell ve Sze tarafından birleştirilen termiyonik emisyon-difüzyon teorisi ideal Schottky diyotlardaki akım iletim olayında önemli bir yer tutmuştur.

TURNER ve RHODERICK (1968), kimyasal metotlarla hazırlanan yüzeyler için, engel yüksekliğinin yüzeyin hazırlanma şartlarına bağımlılığını araştırmış ve çok yüksek vakumda yarılmış silisyum üzerine metalin buharlaştırılmasıyla oluşan diyotlar için kullanılan metalin cinsinden bağımsız olarak, engel yüksekliğinin yaşlanmadan etkilenmediğini bulmuşlardır.

Schottky engel diyotları gibi cihazlar için pratikte ideal davranıştan sapmaya sebep olabilecek hata kaynakları, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabakası, uygulanan gerilimle yüzey yük yoğunluğu ya da arayüzey hallerinin değişimi, nötral bölge direnci, arınma bölgesi genişliği ile etkin kontak alanındaki değişimler, imaj-kuvvet etkisiyle engelin azalması ve arınma bölgesindeki tuzaklardır. Bunlar içinde, akım-voltaj karakteristiğini etkileyen en önemli iki sebep arayüzey tabakasının varlığı ve seri direnç etkisidir (ZIEL, 1968; SZE, 1981; RHODERICK ve WILLIAMS, 1988).

1971 yılında CARD ve RHODERICK, düz beslem  $I-V$  karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörünün sayısal değerine bağlı olarak, metalle ve yarıiletkenle dengede olan arayüzey durumlarını teorik ve deneysel olarak göstermişlerdir.

VARMA ve ark. (1977), metal-yarıiletken kontaklar üzerinde arayüzey kirliliklerinin etkisini araştırmışlar ve arayüzey kirliliklerinin metal ile yarıiletken arasındaki yapışmanın mekanik şiddetini azalttığını bildirmişlerdir.

1979 yılında NORDE, ideal bir Schottky diyotun seri direncinin hesaplanması

için minimum bir noktadan geçen gerilime bağlı bir  $F(V)$  fonksiyonu tanımlanmış, fonksiyonun minimum noktası yardımıyla seri direnç ve engel yüksekliğinin bulunmasını sağlayan bir metot geliştirmiştir.

LIEN ve ark., (1984) ideal olmayan diyotlar için, sabit  $a$  değerlerine bağlı olarak farklı minimum noktalardan geçen NORDE (1979) benzeri bir  $F_a(V)$  fonksiyonu tanımlamıştır. Bu modelde, keyfi  $a$  değerleri için bulunan minimum noktalar yardımıyla çizilen  $I(a)-a/\beta$  grafiğinden seri direnç ve idealite faktörü hesaplanmaktadır.

SATO ve YASHUMURA (1985), hem ideal hem de ideal olmayan durumları dikkate alan ve Norde (1979) tarafından önerilene benzer bir  $F(V)$  fonksiyonu tanımlamıştır. Bu modelde idealite faktörü, seri direnç ve engel yüksekliğinin belirlenmesi için iki farklı sıcaklıkta akım-gerilim ölçümü alınması gerekmektedir.

1985 yılında CIBILS ve BUITRAGO, idealite faktörü ve seri direnç değerini bulabilmek için,  $F(V) = V - V_a \ln(I)$  şeklinde yardımcı bir fonksiyon kullanan,  $V_a$  yardımcı geriliminin farklı değerleri için fonksiyonun sahip olduğu minimum noktaların bulunmasına dayanan yeni bir yaklaşım geliştirdiler.

BOHLIN (1986), keyfi  $\gamma$  sabitleri için farklı minimum değerlerden geçen LIEN (1984) tarafından önerilene benzer bir  $F(V,\gamma)$  fonksiyonu tanımlamış, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini iki farklı  $\gamma$  sabitinin değerlerine bağlı olarak bulunan  $F(V,\gamma)$  yardımcı fonksiyonlarını kullanarak hesaplamıştır.

1986 yılında CHEUNG ve CHEUNG tarafından akım yoğunluğunun lineer fonksiyonları yardımıyla çizilen grafiklerden hem ideal hem de ideal olmayan durumda diyot parametrelerinin elde edilmesini sağlayan farklı bir metot ileri sürüldü.

LEE ve ark., (1992)  $V_a$  yardımcı gerilimine bağlı olarak Cibils ve Buitrago tarafından önerilen  $F(V)$  fonksiyonunu kullandılar. Yardımcı fonksiyonda bağımsız değişkeni  $V$  değil  $I$  olarak akıma bağlı bir  $F(I)$  fonksiyonu elde ettiler. Doğrusal hale getirilen  $F(I)$  fonksiyonundaki katsayıları tespit ederek, seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini buldular.

## 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Elektronik devre elemanları, yarıiletken malzemeler üzerinde istenilen elektriksel davranışı sağlayacak yapıların oluşturulmasına dayanır. Bu yapılar diyot, transistör, işlemsel yükselteç, tümeleşik devre ve daha gelişmiş mikro işlemcilerden oluşmaktadır. Yarıiletken üzerine özel üretim teknikleri kullanılarak oluşturulan bu yapıların tümünde devre elemanının elektriksel bağlantılarının kurulabilmesi için metal elektrotlar kullanılır. Yarıiletkenle temas halinde olan metal elektrot ile yarıiletkenin oluşturduğu sistem, metal-yarıiletken kontak olarak adlandırılır ve bu kontak yapısının elektriksel özellikleri ile akım taşıyıcıları üzerindeki etkilerinin bilinmesi devre elemanının üretimi, işletimi ve kararlılığı için büyük önem taşımaktadır.

Bu sebeple, bu çalışmada Ni/*n*-Si, Bi/*n*-Si, Fe/*n*-Si, Sn/*n*-Si, Cd/*n*-Si ve Pb/*n*-Si Schottky diyotların üretimi ve *I-V* karakteristiklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla, [100] yönelimli ve fosfor katkılı *n*-tipi Si kristali kullanılarak metal/*n*-Si/Au-Sb yapısında Bi, Ni, Fe, Sn, Cd ve Pb metalleri kullanılarak altı farklı Schottky diyot üretildi. Üretilen diyotların oda sıcaklığında akım-gerilim ölçümleri yapıldı. Veriler ilgili teoriler ışığında değerlendirilerek, sonuçlar yorumlandı.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, metal-yarıiletken yapılarla ilgili tarihsel gelişim ve çalışmanın kapsamı yer alır. İkinci bölümde, konu ile ilgili diğer araştırmacılar tarafından yapılmış önceki çalışmalar verilmektedir. Üçüncü bölümde, çalışmanın temellendirildiği teorik bilgiler ile deneysel ayrıntıların verildiği materyal ve yöntem yer almaktadır. Dördüncü bölümde araştırma bulguları ve yorum, beşinci bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Silisyum üzerine yapılan metal-yarıiletken kontak çalışmaları ilk olarak vakumda yarılmış yüzeyler üzerine uygulanmıştır. Yarma işlemi yüzeye yakın bölgede kusurlar meydana getirdiği için, bu yüzeyler fiziksel olarak mükemmel değildir.

Bu türden yüzeyler üzerinde ilk kapsamlı çalışma ARCHER ve ATALLA (1963) tarafından yapılmış,  $10^{-6}$  Torr basınçta yarılmış silisyum yüzeyi metal buharlaştırmadan önce birkaç saniye  $10^{-4}$  Torr basınçtaki oksijene maruz bırakıldıktan sonra başka kaynaklardan gelebilecek bulaşmayı önleyecek kadar hızlı şekilde Pt, Pd, Ni, Au, Cu, Ag ve Al metalleri buharlaştırılmış ve engel yükseklikleri kapasite-gerilim ölçümlerinden belirlenmiştir. Pt, Pd, Ni ve Au ile yapılan diyotlarda oksijene maruz kalmanın engel yüksekliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, ancak Cu, Ag ve Al ile yapılan diyotlarda engel yüksekliğinin 0.1 eV kadar azaldığı bulunmuştur.

TURNER ve RHODERICK (1968), çok yüksek vakumda ( $10^{-8}$  Torr) yarılmış ve kimyasal metotlarla hazırlanmış silisyum yüzeyleri için, engel yüksekliğinin yüzeyin hazırlanma şartlarına bağlılığını araştırmışlardır. Kapasite-gerilim ölçümlerinden vakumda yarılmış yüzeyler için elde ettikleri engel yüksekliklerinin Archer ve Atalla'nın sonuçları ile çok iyi uyum içinde olduğunu, Au ve Ni için vakumda yarılmış ve kimyasal temizlenmiş yüzeylerin engel yükseklikleri arasında fark olmadığını, ancak Cu, Ag ve Al için kimyasal temizlenmiş yüzey durumundaki engel yüksekliklerinin daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Kimyasal hazırlanmış yüzeyler üzerinde üretilen diyotların engel yüksekliklerinde yaşlanma ile yaklaşık 0.2 eV'luk bir değişme olduğunu gözlemişlerdir.

CROWEL ve ark., (1965) ile SZYDLO ve POIRIER (1973), vakumda yarılmış *n*-tipi Silisyum üzerine düşük iş fonksiyonuna sahip Mg, Ca, K ve Na metalleriyle ürettikleri Schottky diyot yapılarını incelediler. Akım-gerilim ölçümlerinden bu metallerle üretilen diyotların engel yüksekliklerinin çok düşük ve 0.40-0.85 eV aralığında iki grup halinde; birinci grubun 0.45 eV, ikinci grubun ise 0.70 eV civarında olduğunu buldular.

1971 yılında CARD ve RHODERICK, düz beslem *I-V* karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörünün sayısal değerine bağlı olarak, metalle ve yarıiletkenle dengede olan arayüzey durumlarını teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir.

THANAILAKIS (1974; 1975) ile THANAILAKIS ve RASUL (1976),  $5 \times 10^{-11}$  Torr vakumda yarılmış silisyum yüzeyleri üzerine oluşturdukları Schottky diyotların engel yüksekliklerini akım-gerilim, kapasite-gerilim ve fotoelektrik metotlarla incelediler. Her üç metottan bulunan engel yükseklikleri arasında  $\pm 0.01$  eV fark olduğunu gözlemlədiler.

Van OTTERLOO ve De GROOT (1976) ile Van OTTERLOO ve GERRITSEN (1978), ultra-yüksek vakumda yarılmış silisyum kristali üzerine birkaç farklı metal ile üretilmiş Schottky diyotların engel yüksekliklerini ölçtüler.

VARMA ve ark., (1977), temiz ve oksitlenmiş silisyum yüzeylerine Au ve Ag ile yapılan diyotlarda arayüzeydeki kirliliklerin etkisini araştırmışlar, arayüzey kirliliklerinin metal ile yarıiletken arasındaki yapışmanın mekanik şiddetini azalttığını ve akım-gerilim ile kapasite-gerilim ölçümlerinden bulunan engel yükseklikleri arasındaki farkın azalmasına sebep olduklarını bildirmişlerdir. Ayrıca, Au ve Ag için engel yüksekliklerinin yaşlanmayla arttığını bulmuşlardır.

MOTRAM (1979), oksitlenmiş silisyum yüzeyleri üzerinde Au ve Cu ile yapılmış diyotlarda yaşlanma etkisini incelemiş ve Cu ile yapılan kontaklar için yaşlanmayla engel yüksekliğinin arttığını ve sonunda engel yüksekliği değerinin temiz yüzeyler üzerindeki Cu kontak için bulunan değere vardığını bulmuşlardır.

Schottky engel diyotları gibi cihazlar için uygulamada akım-gerilim karakteristiklerinin ideal davranıştan sapmasına sebep olabilecek en önemli iki sebep arayüzey tabakasının varlığı ve seri direnç etkisi olarak bildirilmiştir (ZIEL, 1968).

1979 yılında NORDE, ideal bir Schottky diyotun seri direncinin hesaplanması için minimum bir noktadan geçen gerilime bağlı bir  $F(V)$  fonksiyonu tanımlanmış, fonksiyonun minimum noktası yardımıyla seri direnç ve engel yüksekliğinin bulunmasını sağlayan bir metot geliştirmiştir.

1980 yılında WU,  $n$  ve  $p$ -tipi yarıiletken Schottky diyotların yüzey yükünü ve arayüzeyde düşen gerilimi göz önünde bulundurarak, Cowley ve Sze'nin arayüzey tabaka teorisini geliştirmiş, sabitlemiş pozitif yüzey yük artışının potansiyel engelini düşürdüğünü ve arayüzey tabakasında düşen geriliminde doğru beslem  $I-V$  karakteristiklerinden bulunan idealite faktörünü arttırdığını bulmuşlardır.

CHATTOPADHYAY ve DAW (1986), ideal olmayan Schottky (MIS) diyotların akım-gerilim ve kapasite-gerilim karakteristiklerini inceleyip, engel yüksekliği ile oksit

tabakasının kalınlığı arasındaki ilişkinin Cowley ve Sze tarafından 1965 yılında ileri sürülen yüzey halleri ve engel yüksekliği modeline uyduğunu bulmuşlardır.

CHEUNG ve CHEUNG (1986), düz beslem akım-gerilim karakteristiklerinin doğrusal fonksiyonlar halinde düzenlenmesiyle Schottky diyot parametrelerinin belirlenebileceğini gösteren yeni bir metot bulmuşlardır. Bu metodun doğruluğu Bohlin (1986) tarafından deneysel verilerle ispatlanmıştır.

1992 yılında TÜRÜT ve ark., *Al/n-Si* ve *Al/p-Si* arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız Schottky diyotlarda arayüzey hallerini ve arayüzeydeki sabit yükleri dikkate alarak *I-V* ve *C-V* karakteristiklerinden, engel yüksekliği, idealite faktörü ve arayüzey hal yoğunluklarını incelemişlerdir.

SAĞLAM ve ark., (1996) *Au/n-GaAs* Schottky diyotların *I-V* karakteristiklerinden, arayüzey tabakası boyunca gerilim düşmesini de dikkate alarak, Cheung fonksiyonları yardımı ile seri direnç etkisini ve engel yüksekliğini hesaplamışlar, arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hallerinin enerji dağılımıyla değişimini incelemişlerdir.

1997 yılında GOMILA ve RUBI, yarıiletken eklem boyunca taşıyıcıların değiş-tokuşunu analiz ederek, arayüzey hal yoğunluğunun belirlenmesi için bir bağıntı elde etmişlerdir. Bu bağıntıya bağlı olarak, idealite faktörü için düz beslem durumunda tüm beslem üzerinde geçerli analitik bir ifade bulmuşlardır.

ÇETİNKARA ve ark., (1999) *Au/n-Si* Schottky diyotlarda, kontakta önce yüzeyde oluşan doğal oksit tabakasının diyot karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Omik kontakta sonra numuneyi parçalara bölerek, farklı sürelerde temiz oda havasına maruz bırakılmış Schottky diyotlar üretip, bu diyotların engel yüksekliklerini havaya maruz kalma süresi bakımından karşılaştırmışlardır.

2003 yılında AKKILIÇ ve ark., arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız *Sn/n-Si* Schottky diyot yapılarının *I-V* karakteristiklerini incelemişlerdir. İdealite faktörünün uygulanan gerilimle ve etkin engel yüksekliğinin de idealite faktörüyle değişimini teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır.

AYDIN ve ark., (2004) arayüzeyli ve arayüzeysiz *Pb/p-Si* Schottky diyotların düz beslem *I-V* grafiklerinden idealite faktörü, seri direnç ve engel yüksekliğinin uygulanan gerilimle, arayüzey hal yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimini incelemişlerdir.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. MATERYAL

##### 3.1.1. Giriş

Yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırabilmesi uygun kontakların kristale uygulanmasıyla sağlanır. Kontak, genel anlamda iki maddenin en az, idealde sıfır dirençle temas etmesi olarak düşünülür. İdeal kontak yüzeylerin temiz ve pürüzsüz olmasına bağlıdır (CARD ve RHODERICK, 1971; RHODERICK ve WILLIAMS, 1988; HOVARTH ve ark., 1988).

Kontak haline getirilen maddeler arasında, Fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar bir yük alışverişi olur. Metal–yarıiletken kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına ( $\phi_m, \phi_s$ ) bağlı olarak; taşıyıcı hareketinin bir yönde diğerine göre çok büyük olduğu doğrultucu kontak ve taşıyıcıların her iki yönde de aynı kolaylıkla geçebildiği omik kontak olmak üzere ikiye ayrılır (ZIEL, 1968).

##### 3.1.2. P-Tipi Yarıiletken/Metal Doğrultucu Kontaklar

P-tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonuna bağlı olarak,  $\phi_m$  metalin iş fonksiyonu ve  $\phi_s$  yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere,  $\phi_m < \phi_s$  durumunda metal/p-tipi doğrultucu kontak oluşur.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi  $\phi_m < \phi_s$  ve yarıiletkendeki akseptör atomlarının hepsi oda sıcaklığında iyonize olmuş olsun. Kontakta önce, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\phi_s - \phi_m$  kadar aşağıdadır. Kontakta sonra, elektronlar Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metalden yarıiletkene akarlar. Buna bağlı olarak, yarıiletkenin yüzey tabakası iyonize olmuş akseptörler tarafından negatif yüklerle yüklenir ve bu yükler  $d$  kalınlıklı bir uzay yükü tabakası boyunca dağılır.

Yarıiletken tarafındaki enerji seviyeleri  $\phi_s - \phi_m$  kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki boşluklar için yüzey engeli

$$\phi_s - \phi_m = eV_{dif} \quad (3.1)$$

eşitliğiyle verilir, burada  $V_{dif}$  difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içindeki potansiyel metalin yüzeyine göre alınır ve  $-V_{dif}$  değerine sahiptir. Kontakın metal tarafında boşluklar için potansiyel engeli

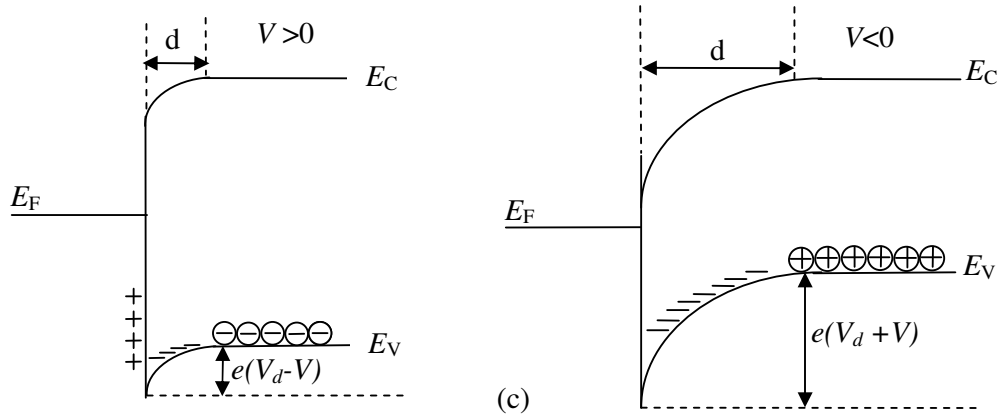
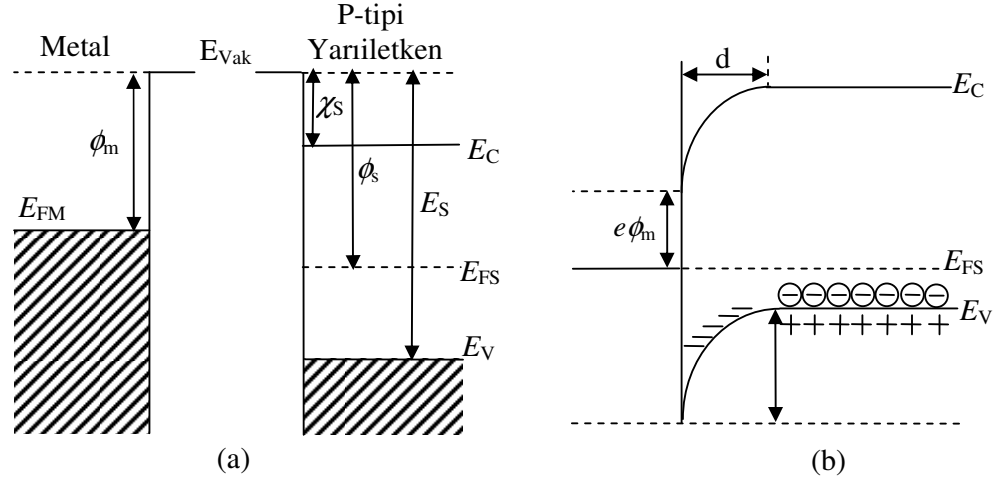
$$(\phi_s - \phi_m) + (E_s - \phi_s) = (E_s - \phi_m) \quad (3.2)$$

ile verilir. ısısal uyarılmadan dolayı, yarıiletkenin bazı boşlukları potansiyel engelini aşıp metalin içine geçecek kadar enerji kazanırlar ve metalin içinde ısısal olarak oluşan, bazı boşluklar da potansiyel engelini aşıp yarıiletkenin içine geçecek kadar enerji kazanırlar. Böylece, engeli geçen eşit ve zıt  $I_0$  akımları oluşur.

Yarıiletkene bir  $V$  gerilimi uygulanırsa, soldan sağa akan boşluk akımı değişmez, fakat sağdan sola akan boşluk akımı  $\exp(eV/kT)$  çarpanı kadar değişir. Bundan dolayı, yarıiletken içindeki enerji seviyelerinin hepsi ( $eV$ ) kadar düşer ve buna bağlı olarak, sağdan sola geçen boşluklar için engel ( $eV$ ) kadar azalır. Sonuç olarak, sağdan sola olan doğrultu pozitif akım doğrultusu olarak alınır, karakteristik diyot akımı

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

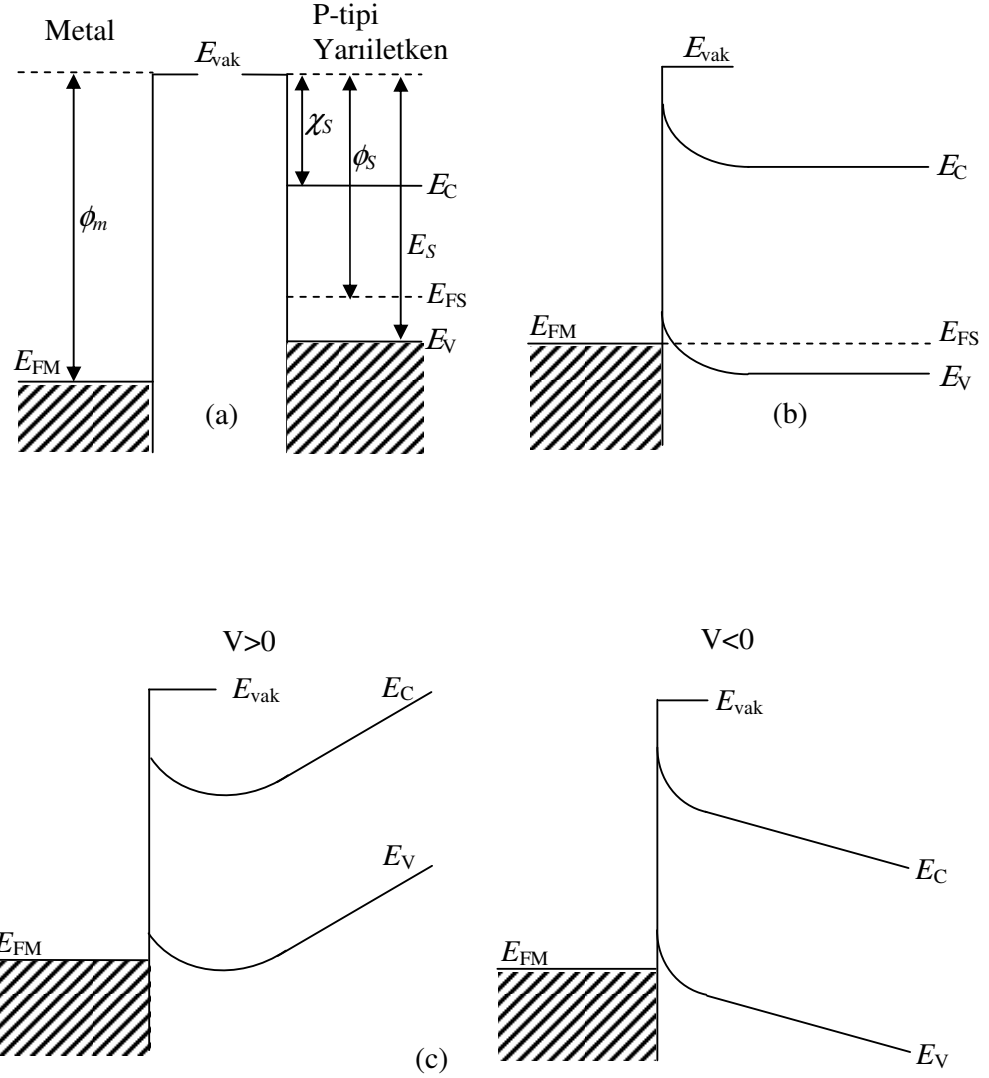
olacaktır. Bu bir doğrultucu kontaklıdır. Burada  $I_0$  doyma akımı,  $V$  uygulanan potansiyel,  $k$  Boltzman sabiti ve  $T$  mutlak sıcaklıktır.



Şekil 3.1. Metal/*p*-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı: a) kontakdan önce, b) kontakdan sonra ısısal dengede ve c)  $V \neq 0$  durumu.

### 3.1.3. P-tipi yarıiletken/Metal Omik Kontaklar

P-tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonuna bağlı olarak  $\phi_m > \phi_s$  durumunda metal/p-tipi omik kontak oluşur. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\phi_m - \phi_s$  kadar yukarıdadır.



Şekil 3.2. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontaktağın enerji-bant diyagramı: a) kontakta önce, b) kontakta sonra ısısal dengede ve c)  $V \neq 0$  durumunda.



Kontaktın sonras, elektronlar yarıiletken tarafında geride boşluklardan oluşın pozitif bir yüzey yükü bırakarak ve metal tarafı üzerinde negatif yüzey yükü oluşturarak yarıiletkendende metale akarlar. Bundan dolayı, yarıiletkendeki Fermi seviyesi  $\phi_m - \phi_s$  kadar aşağı düşer.

Boşluklar yarıiletkenin içinden metale kolay bir şekilde geçebilirler ve metaldeki yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı, hemen yüksüz hâle gelirler. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında ısıl olarak oluşın boşluklar da kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Bu şekilde, her iki doğrultuda da akımı kolayca geçirebilen kontaklar, omik kontak olarak bilinirler.

### 3.1.4. N-tipi yarıiletken/Metal Doğrultucu Kontaklar

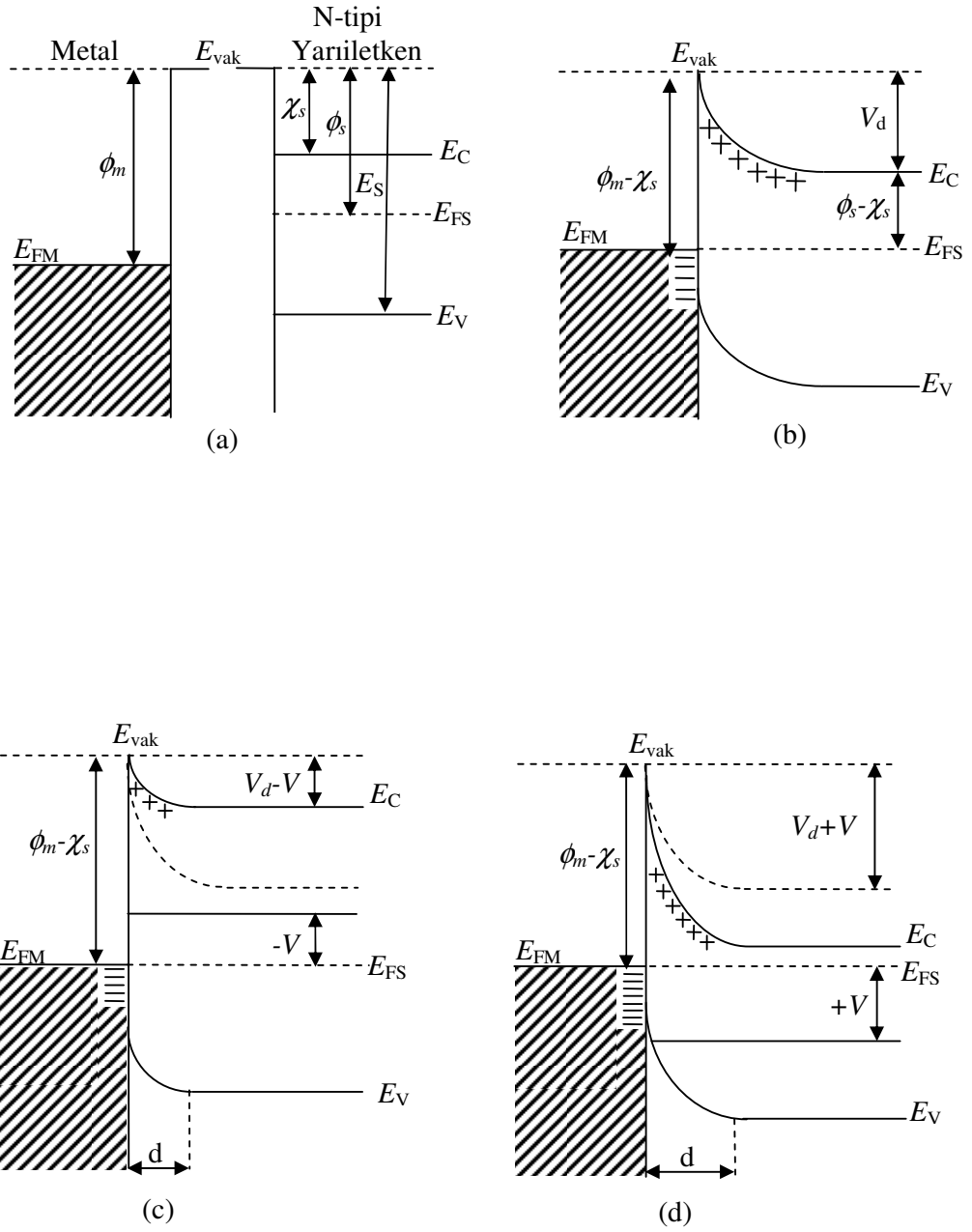
N-tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarına bağlı olarak,  $\phi_s < \phi_m$  durumunda, akım taşıyıcıları bir doğrultudan diğerine daha kolayca akarak metal/n-tipi doğrultucu kontağı ya da Schottky kontağını oluştururlar.

Şekil 3.3'te gösterildiğı gibi, kontakın önce, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\phi_m - \phi_s$  kadar yukarıdadır. Kontakın sonras, elektronlar yarıiletkenin yüzey tabakasından geride iyonize olmuş donörler bırakarak metalin içine geçerler. Yük mübadelesi bittikten sonras, her iki maddenin Fermi seviyesi aynı yüksekliğe gelir. Bu durum, yarıiletken gövdedeki enerji seviyelerinin  $\phi_m - \phi_s$  kadar aşağı kaydığını ifade eder. Sonuç olarak, yüzeyde bir potansiyel engeli oluşur ve yarıiletken tarafında bu engelin yüksekliği

$$eV_{dif} = (\phi_m - \phi_s) \quad (3.4)$$

ifadesiyle verilir. Burada  $V_{dif}$  niceliğı difüzyon potansiyeli olarak bilinir ve metalin yüzeyine göre alınır. Metal tarafında ise engel yüksekliği

$$(\phi_m - \phi_s) + (\phi_s - \chi_s) = (\phi_m - \chi_s) \quad (3.5)$$



Şekil 3.3. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı:  
 a) kontakten önce, b) kontakten sonra ısısal dengede, c)  $V < 0$  durumunda ve  
 d)  $V > 0$  durumunda.

olacaktır. Kontaktaki elektrik dipol tabakası tarafından oluşan potansiyel engeli korunur. Kontakın yarıiletken tarafında bulunan pozitif yüklere, bir metaldeki iyonize olmuş atomların yoğunluğundan daha küçük olan, iyonize olmuş donörler sebep olurlar. Zira bu donörler sabitleşmiş konumlara bağlıdır ve pozitif yük bir yüzey yükünden ziyade bir yük dağılımı olarak ortaya çıkar. Bundan dolayı, kontakın yüzey tabakası uzay yükü tabakası olarak adlandırılır ve potansiyel engelinden dolayı, yüzey tabakası engel tabakası olarak bilinir. Bu tabakanın kalınlığı ( $d$ ) iyonize olan donörlerin konsantrasyonuna ve difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır.

Isısal uyarılmadan dolayı, metalin bazı elektronları potansiyel engelini aşır yarıiletkenin içine geçmek için yeterli enerjiye sahip olacaklar ve aynı şekilde yarıiletkenin bazı elektronları da potansiyel engelini aşır metalin içine geçeceklerdir. Denge durumunda bu durum eşit ve zıt  $I_0$  akımlarına sebep olacaktır.

Yarıiletkene bir  $-V$  gerilimi uygulanırsa, metalden yarıiletkene giden elektronlar için engel değişmeyeceğinden, bu elektronların oluşturacağı akım da değişmeyecektir. Ancak, yarıiletkenin enerji seviyeleri  $eV$  kadar yükselecektir. Bundan dolayı, yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği ( $eV$ ) kadar azalır. Dolayısıyla, metalden yarıiletkene akan akım  $\exp(eV/kT)$  çarpanı kadar artmış olacaktır. Sonuç olarak, karakteristik diyot akımı

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (3.6)$$

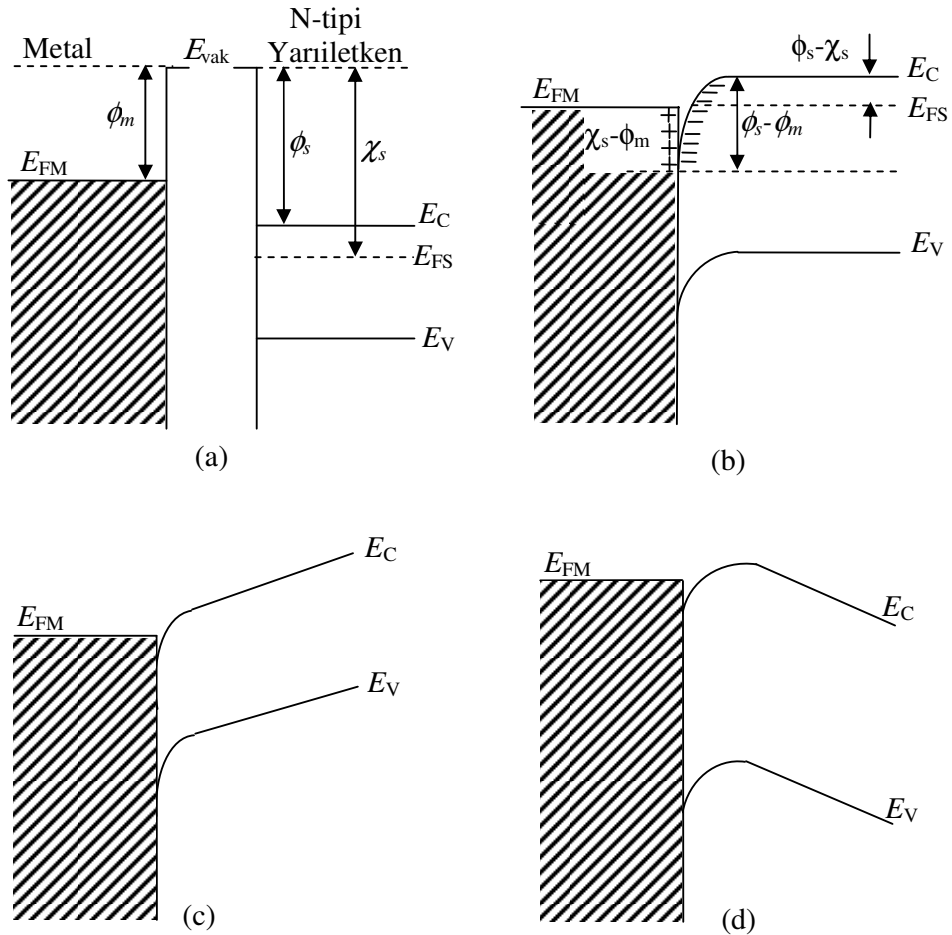
olacaktır. Bu kontakta,  $V \gg kT$  için akım büyük ve pozitif iken,  $V \ll kT$  için akım küçük ve negatif, hemen hemen  $-I_0$  'a eşittir.

### 3.1.5. N-tipi yarıiletken/Metal Omik Kontaklar

$\phi_m < \phi_s$  durumunda metal/ $n$ -tipi omik kontak oluşur. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\phi_m - \phi_s$  kadar aşağıdadır. Kontakta sonra, elektronlar kontakın metal tarafında geride bir pozitif yüzey yükü bırakarak metalden yarıiletkene akarlar ve kontakın yarıiletken

tarafında bir negatif yüzey yüküne sebep olurlar. Bu yükler bir dipol tabakası oluştururlar ve yük mübadelesi bittikten sonra, yarıiletken tarafındaki Fermi seviyesi  $\phi_s - \phi_m$  kadar yükselir.

Kontak haline getirilmiş ve dengedeki metal-yarıiletken omik kontakta metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale kolayca yük akışı olur. Omik kontakta bir  $V$  gerilimi uygulanırsa, oluşan potansiyel doğrultucu kontakta olduğu gibi sadece Schottky bölgesinde değil, bütün yarıiletken boyunca dağılacaktır. Omik kontak elde edebilmek için  $n$ -tipi yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırılan metal, yarıiletkenle alaşım haline getirilir. Daha sonra, yarıiletkenin yüzeyinde bir  $n^+$  tabakası oluşturmak için belirli bir sıcaklıkta tavlama yapılır. Tavlama ile metalin difüze olduğu tabaka, yarıiletken gövdeye göre elektron bakımından daha zengindir (SZE, 1981).

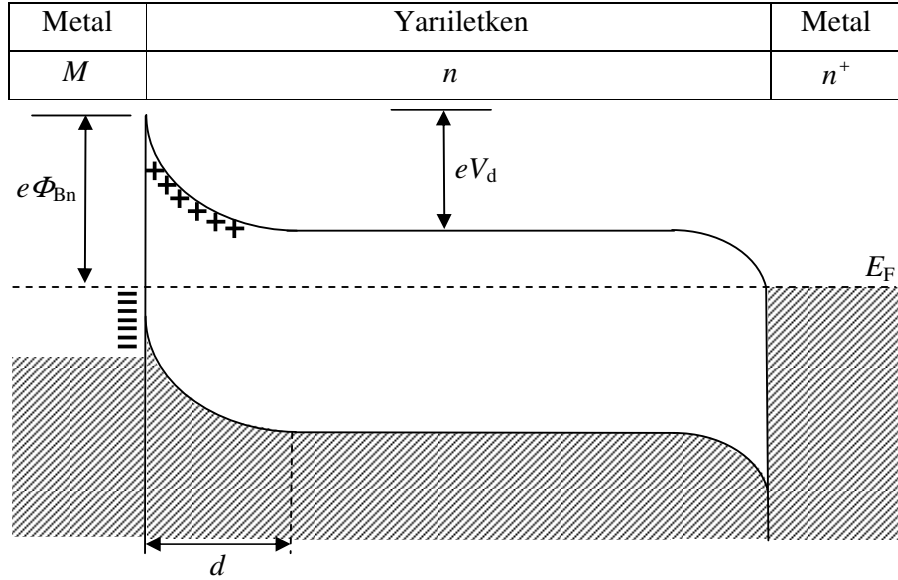


Şekil 3.4. Metal/ $n$ -tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diyagramı: a) kontak öncesi, b) kontak sonrası ısısal dengede, c)  $V < 0$  ve d)  $V > 0$  durumunda.

### 3.1.6. Metal (Omik)/N-tipi Yarıiletken/Metal (Doğrultucu) Yapılar

Metal (omik)/ $n$ -tipi yarıiletken/metal (doğrultucu) yapısı  $n^+nM$  ile gösterilir.  $n^+$  ile gösterilen elektron bakımından zengin bölge yarıiletken yüzeyine omik kontak yapısı oluşturacak bir metal,  $M$  ile gösterilen Schottky bölgesi ise doğrultucu kontak yapısı verecek başka bir metal buharlaştırarak elde edilir.

Şekil 3.5'de  $n^+nM$  yapısının ısısal denge durumundaki enerji-bant diyagramı gösterilmektedir. Bu yapı akım-gerilim karakteristiği bakımından diyot özelliği gösterir ve Schottky diyot olarak isimlendirilir. Omik kontak tarafına düz beslem için negatif ( $V < 0$ ), ters beslem içinse pozitif ( $V > 0$ ) bir gerilim uygulanır.



Şekil 3.5. Metal/ $n$ -tipi yarıiletken Schottky diyodun ısısal dengede enerji-bant diyagramı.

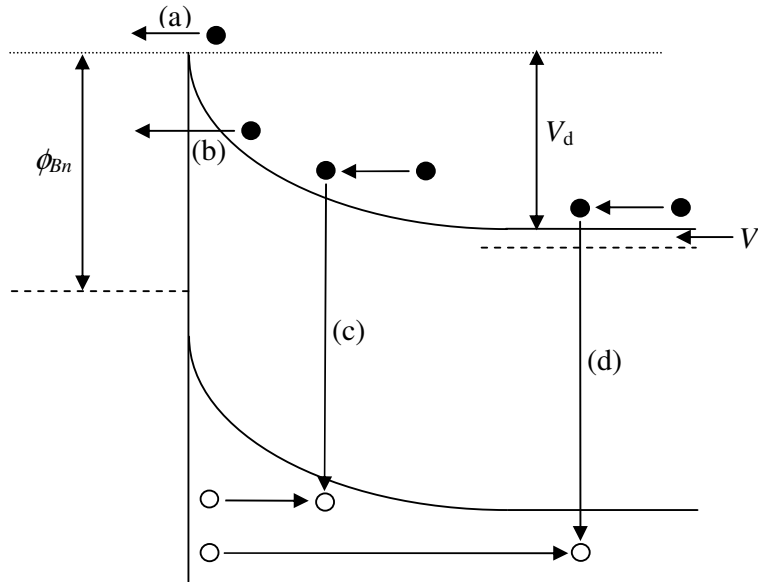
### 3.1.7. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon

#### 3.1.7.1. Giriş

Bu bölümde Schottky engellerinin iletim özelliklerini tanımlayan iletim mekanizmaları incelenecektir. N-tipi bir yarıiletken için, düz beslem altında metal-yarıiletken eklem boyunca elektronların taşınabileceği çeşitli yollar Şekil 3.6'da gösterilmiştir:

- Elektronların yarıiletkendeki engeli aşarak metalin içine geçmeleri
- Elektronların yarıiletkendeki engelin içinden metale kuantum mekaniksel tünelleme ile geçmeleri
- Elektron ve boşluğun uzay yükü bölgesinde yeniden birleşmesi
- Elektron ve boşluğun nötr bölgede yeniden birleşmesi.

Bu dört iletim mekanizmasından (a) ile verilen ve Termiyonik Emisyon teorisi ile izah edilen durumun diğerlerine göre daha baskın olduğu Schottky engel diyotları yapmak mümkündür. Böyle diyotlar hemen hemen ideal olarak görülürken, (b), (c) ve (d) ile verilen durumların baskın olduğu diyotlar ideal durumdan uzaklaşmaya sebep olurlar (RHODERICK ve WILLIAMS, 1988).



Şekil 3.6. Düz beslem altında metal/n-tipi yarıiletken Schottky engelinde akım iletim mekanizmaları.

### 3.1.7.2. Termiyonik Emisyon Teorisi

Sıcak bir yüzeyden elektron veya boşluk salınması olayı Termiyonik emisyon olarak bilinir (ZIEL, 1968; RHODERICK ve WILLIAMS, 1988). Bu olay, Schottky diyotlarda taşıyıcıların (elektron ve boşluklar) ısısal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak metalden yarıiletken veya yarıiletkenden metale geçmeleri şeklinde görülür.

Termiyonik emisyon, metal/*n*-tipi yarıiletken yapılarda elektronlar, metal/*p*-tipi yarıiletken yapılarda ise boşluklar; yani her iki yapıda da çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Bu teori, doğrultucu kontağın potansiyel engelini  $kT$  ısısal enerjiden büyük ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarını ise çok küçük olarak kabul eder.

Yarıiletkenden metale doğru termiyonik emisyon akım yoğunluğu  $J_{s-m}$  ve kontağın yüzeyi de  $x$  eksenine dik kabul edildiğinde, taşıyıcı hızları  $v_x$  ile  $v_x + dv_x$  arasında olan elektronların yüzey birimi başına yoğunlukları

$$dn = N_D \left( \frac{m_n^*}{2kT} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \quad (3.7)$$

denklemleri ile verilir. Burada  $N_D$  donör yoğunluğu,  $m_n^*$  elektron etkin kütlesi,  $k$  Boltzman sabiti ve  $T$  mutlak sıcaklıktır. Akım yoğunluğu ifadesi

$$J_{s-m} = e \int v_x dn \quad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir. (3.7) ifadesini (3.8)'de yerine yazarsak, akım yoğunluğu

$$\begin{aligned} J_{s-m} &= e N_D \left( \frac{m_n^*}{2kT} \right)^{1/2} \int_{v_{ox}}^{\infty} v_x \exp\left( -\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \\ &= e N_D \left( \frac{kT}{2m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right) dv_x \end{aligned} \quad (3.9)$$

olur. Enerji korunumundan

$$\frac{1}{2} m_n^* v_x^2 \geq eV_d \quad (3.10)$$

olduğu göz önüne alındığında, akım yoğunluğu

$$J_{s-m} = eN_D \left( \frac{kT}{2m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{eV_d}{kT} \right) \quad (3.11)$$

şeklini alır. (3.10) denkleminde bir elektronun  $eV_d$  engelini aşabilmesi için sahip olması gereken limit hız

$$v_{0x} = \left( \frac{2eV_d}{m_n^*} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

şeklinde tanımlanabilir. İletkenlik bandı tabanı enerjisinin sıfır seviyesi olarak alınırsa, yarıiletkendeki donör atomları yoğunluğu

$$N_D = N_c \exp\left( -\frac{E_F}{kT} \right) = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{E_F}{kT} \right) \quad (3.13)$$

ifadesi ile verilir. Bu ifade (3.11) eşitliğinde yerine yazılırsa, akım yoğunluğu

$$J_{s-m} = \frac{4\pi m_n^* k^2 T^2}{h^3} \exp\left( -\frac{eV_d + E_F}{kT} \right) \quad (3.14)$$

olarak bulunur. İletkenlik bandının alt sınırına göre, elektronlar için metal tarafındaki potansiyel engelinin yüksekliği

$$e\phi_{Bn} = eV_d + E_F \quad (3.15)$$

olur. Bu ifade (3.14) eşitliğinde yerine yazılırsa, akım yoğunluğu için



$$J_{s-m} = \frac{4\pi n_n^* k^2 T^2}{h^3} \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.16)$$

eşitliği elde edilir. (3.16) denklemindeki sabit terimler

$$R_n^* = \frac{4\pi n_n^* k^2}{h^3} \quad (3.17)$$

şeklinde gösterilir ve Richardson sabiti olarak bilinir. Bu gösterimle akım yoğunluğu yeniden yazıldığında,

$$J_{s-m} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.18)$$

olur. Metal/*n*-tipi yarıiletken Schottky diyotu düz beslem altındayken (omik tarafa  $-V$  uygulanırsa), engel yüksekliği azalır ve bu nedenle diyot akımı uygulanan gerilime bağlı olarak  $\exp(eV/kT)$  çarpanı katar artar. Böylece, akım yoğunluğu denklemi

$$J_{s-m} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.19)$$

şeklinde yazılabilir. Sıfır beslem ( $V=0$ ) durumunda, metalden yarıiletkeneye doğru olan akım yoğunluğu yarıiletkenden metale doğru olan doyma akım yoğunluğuna ( $J_0$ ) eşit olur. Sonuç olarak, toplam net akım yoğunluğu

$$J_{s-m} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

halini alır. Bu eşitlikte

$$J_0 = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.21)$$

terimi doyma akım yoğunluğu olarak bilinir. Böylece, diyottan geçen akım yoğunluğu

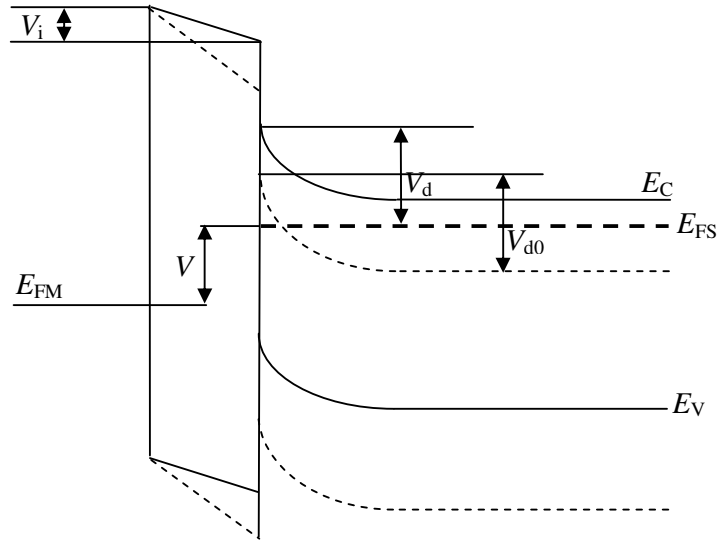
$$J_n = J_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.22)$$

ifadesine dönüşür.

### 3.1.7.3. Arayüzey Tabakası Etkisi

Bir yarıiletken çok yüksek bir vakumda yarılmadıkça, bu yarıiletken kullanılarak üretilen Schottky diyotlarda metal ile yarıiletken arasında genellikle kalınlığı 5~10 Å olan doğal bir oksit tabakası oluşur. Bu arayüzey tabakası, kalın bir oksidin bant yapısı karakteristiklerine sahip olmayacak kadar ince olsa bile, bir yalıtkan olarak göz önüne alınabilir ve oluşan yapı bir metal-yarıiletken (MS) yapısından ziyade metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) şeklinde olacaktır. Bu durumda üretilen Schottky diyot ideal değildir ve böyle bir Schottky engeli için enerji-bant diyagramı Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Arayüzeyde oluşan yalıtkan tabaka diyot özellikleri üzerinde üç farklı etkiye sahiptir:

1. Yalıtkan tabaka boyunca potansiyel düşmesi yüzünden, sıfır beslem engel yüksekliği ( $\phi_{Bn,0}$ ) ideal bir diyottakinden daha düşüktür.
2. Uygulanan bir düz beslem gerilimi için, akım  $R_n^*$  değerindeki azalmaya denk olacak şekilde azalır; bu durumda elektronlar yalıtkan tarafından oluşturulan engelin içinden tünelleme yaparak geçmek zorundadırlar.
3. Uygulanan düz beslem geriliminin bir kısmı metal ile yarıiletken arasında oluşan arayüzey tabakasında düşer. Bu durumda,  $\phi_{Bn}$  engel yüksekliği düz beslem geriliminin bir fonksiyonu olur. Engel yüksekliğinin bu beslem bağımlılığı, etkisi  $n$  idealite faktörü cinsinden tanımlanacak bir tarzda akım-gerilim karakteristiğinin şeklini değiştirmektedir (RHODERICK ve WILLIAMS, 1988).



Şekil 3.7. Kimyasal olarak hazırlanmış Schottky engel kontağın (MIS) enerji-bant diyagramı: (---) Sıfır beslem ve (—) düz beslem altında.

#### 3.1.7.4. Düz Beslem I-V Karakteristikleri ve Cheung Fonksiyonları

Schottky diyot parametrelerinin düz beslem  $I$ - $V$  karakteristikleri kullanılarak hesaplanması için CHEUNG ve CHEUNG (1986) tarafından farklı bir model ileri sürüldü. Termiyonik emisyon teorisinde akım yoğunluğu için bulunan (3.20) denklemini etkin diyot alanı ( $A$ ) ile çarptığımızda, diyottan geçen toplam akım için

$$I_n = AJ_n = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV_F}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.23)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $eV_F \gg 3kT$  olduğunda kare parantez içindeki 1 terimi ihmal edilebilir. Bu ifade ideal diyotlar için geçerlidir, ancak uygulamada beslem potansiyelinin tamamı arınma bölgesinde düşmediğinden, idealden sapmalar olacaktır. Bu sapmalar, denkleme ilave edilen, boyutsuz bir sabit olan  $n$  idealite faktörü ile temsil edilir. Bu durumda, akım denklemi

$$I_n = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_F}{nkT}\right) \quad (3.24)$$

ifadesine dönüşür. Bu denklemde, (3.21) yaklaşımı kullanılarak, akım ifadesi

$$I_n = I_0 \exp\left(\frac{eV_F}{nkT}\right) \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $I_0$  doyma akımı olup,

$$I_0 = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.26)$$

eşitliğiyle verilir. (3.25) denklemindeki  $V_F$  terimi diyot bölgesinde düşen potansiyeldir. Bu potansiyelin uygulanan  $V$  potansiyeli ile seri dirençten dolayı düşen  $IR_s$  potansiyelinin farkı olduğu dikkate alınır,  $V_F = V - IR_s$  şeklinde yazılabilir. Dolayısıyla, akım denklemi

$$I_n = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left\{\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right\} \quad (3.27)$$

şekline girer. Bu ifadenin logaritması alınarak, potansiyel terimi yalnız bırakılırsa,

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I_n}{AR_n^* T^2}\right) + n\phi_{Bn} + IR_s \quad (3.28)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemin  $(\ln I)$  'ya göre diferansiyeli alınır,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (3.29)$$

olur. (3.29) denkleminde  $dV/d(\ln I)$  teriminin  $I$ 'ya karşı grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi seri direnci ( $R_s$ ) ve  $I = 0$  için düşey ekseni kestiği noktanın  $kT/e$ 'ye oranı ise idealite faktörünü ( $n$ ) verecektir. (3.28) denkleminde son iki terim yalnız bırakılıp, denklem yeniden düzenlenirse

$$H(I) = V - \left( \frac{nkT}{e} \right) \ln \left( \frac{I}{AR_n^* T^2} \right) \quad (3.30)$$

eşitliği elde edilir. Bu ifadedeki  $H(I)$  fonksiyonu

$$H(I) = n\phi_{Bn} + IR_s \quad (3.31)$$

ile verilir. (3.31) denkleminde çizilecek olan  $H(I) - I$  grafiği yine bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi, nötral bölge direnci  $R_s$  ve  $I = 0$  değeri için düşey ekseni kestiği nokta ise  $e\phi_{Bn}$  değerini verecektir.

Düz beslem  $I-V$  karakteristiklerini kullanarak Schottky diyot parametrelerinin hesaplanması için ileri sürülen (3.29) ve (3.31) denklemleri Cheung fonksiyonları olarak bilinirler (CHEUNG ve CHEUNG, 1986).

### 3.2. YÖNTEM

Bu bölümde Ni, Bi, Fe, Sn, Cd ve Pb/*n*-Si/Au-Sb Schottky diyotların akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesi için, kristal hazırlama ve temizleme süreçleri ile diyot üretimi ve diyotlar üzerinde alınan ölçümler anlatılacaktır.

#### 3.2.1. Kristallerin Hazırlanması ve Temizlenmesi

Bu çalışmada, [100] doğrultusuna sahip,  $N_D \cong 4.31 \sim 8.61 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  konsantrasyonda *P* (fosfor) katkılanmış, öz direnci  $\rho = 5 \sim 10 \Omega\text{-cm}$  ve mobilitesi  $\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/Vs$  olan *n*-tipi silisyum kristali kullanılmıştır.

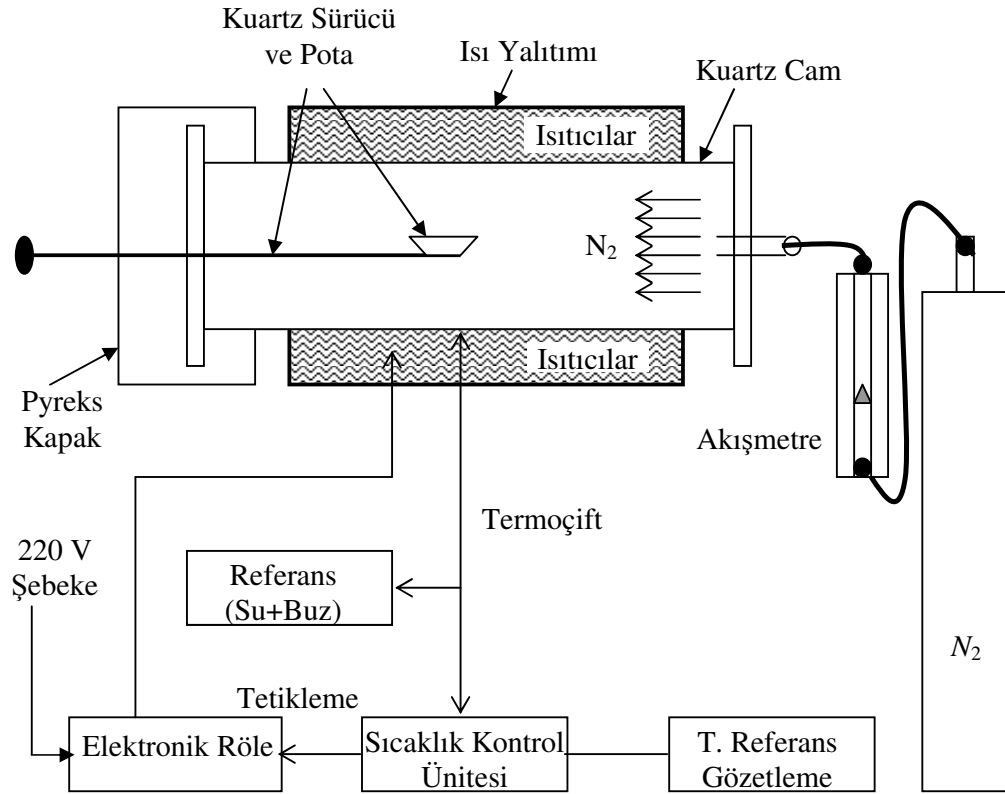
Yapılacak diyotlarda kontak kalitesinin iyi düzeyde olması için genellikle mekanik ve kimyasal temizleme yapılır. Ancak, bu çalışmada kullanılan *n*-tipi silisyum kristalleri mekanik olarak önceden parlatılmış olduğundan mekanik temizleme yapılmadı. Kristal üzerindeki organik ve anorganik kirlilikleri temizlemek ve yüzeyde olması muhtemel pürüzleri gidermek için basamakları aşağıda verilen kimyasal temizleme yöntemi izlendi:

- a) Aseton'da ultrasonik olarak 10 dakika yıkama,
- b) Metanol'de ultrasonik olarak 10 dakika yıkama,
- c) De-iyonize su ile yıkama,
- d) RCA1 (H<sub>2</sub>O: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: NH<sub>3</sub>; 6:1:1) içinde 50–60 °C'de 10 dakika yıkama,
- e) Seyreltilmiş HF (H<sub>2</sub>O: HF; 10:1) çözeltisinde 30 sn yıkama,
- f) RCA2 (H<sub>2</sub>O: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: HCl; 6:1:1) içinde 50–60 °C'de 10 dakika yıkama,
- g) De-iyonize su ile yıkama,
- h) Seyreltilmiş HF (H<sub>2</sub>O: HF; 10:1) çözeltisinde 30 sn yıkama,
- i) Akan de-iyonize su içerisinde 15–20 dakika bekletme,
- j) Azot gazı (N<sub>2</sub>) ile kurutma.

### 3.2.2. Schottky Diyotların Hazırlanması

Kimyasal olarak temizlenen kristal yüzeyinde oksit birikmesinin engellenmesi için, kristal kimyasal temizlik bitir bitmez kaplama ünitesine yerleştirildi. Kristalin mat olan yüzeyine omik kontak uygulayabilmek için, yüzeyi seyreltilmiş HCl asit içerisinde (HCl :H<sub>2</sub>O; 1:10) temizlenmiş olan %99.98 saflıkta Au-Sb alaşımı kaplama ünitesinin ısıtıcısına yerleştirilerek 10<sup>-6</sup> Torr basınçta numunenin bütün yüzeyi kaplandı.

Buharlaştırma işlemini takiben, omik kontak oluşumunu daha iyi hale getirebilmek için, kristal kimyasal olarak temizlenmiş kuartz potanın içerisine yerleştirilerek Şekil 3.8'de gösterilen tavlama fırınında N<sub>2</sub> atmosferinde 420 °C'de 3 dakika tavlandı. Böylece, numunelere omik kontak yapılmış oldu. Omik kontak işleminden sonra kristal 5×5 mm<sup>2</sup>'lik 6 parçaya bölündü ve bu parçaların üzerlerine sırasıyla %99.99 saflıkta Ni, Bi, Fe, Sn, Cd ve Pb metalleri buharlaştırılarak, yarıçapı

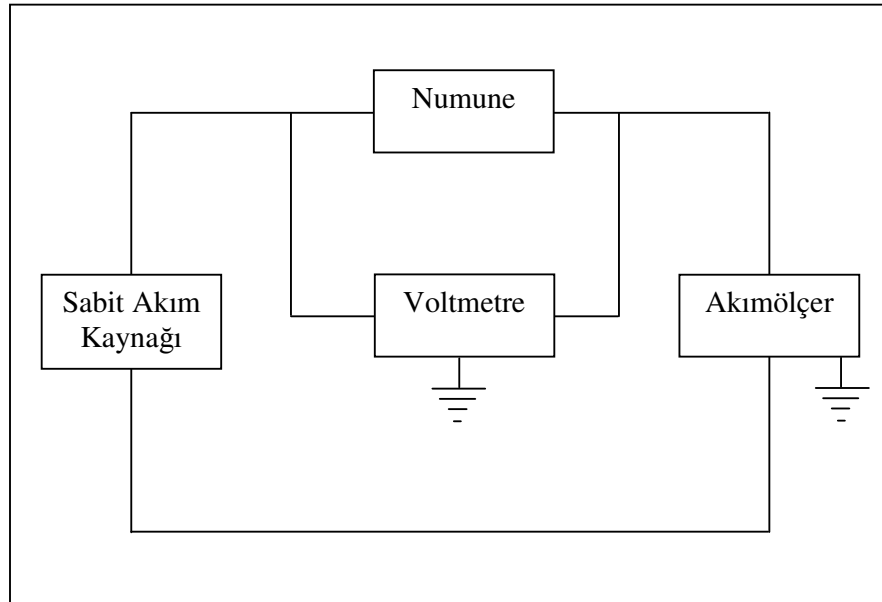


Şekil 3.8. Omik kontak yapımında kullanılan tavlama fırını (ÇETİNKARA, 2002).

1 mm olan noktasal doğrultucu kontaklar yapıldı. Böylece, Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyot yapıları elde edildi.

### 3.2.3. Akım-Gerilim Ölçümleri

Hazırlanan Schottky diyotların akım-gerilim ölçümleri için, akım okuma aralığı  $\mp 10 \text{ fA}$  ile  $\mp 21 \text{ mA}$  ve çıkış voltaj aralığı  $\mp 200 \text{ } \mu\text{V}$  ile  $\mp 505 \text{ V}$  olan KEITHLEY 6487 Picoammeter/Voltage Source cihazı kullanıldı. Ölçümler, Şekil 3.9’da diyagramı verilen devre kullanılarak, oda sıcaklığında ve karanlık ortamda alındı.  $I$ - $V$  karakteristiklerinin belirlenebilmesi için, diyotlara  $-1\text{V}$  ile  $+1\text{V}$  aralığında  $0.025\text{V}$  adımlarla gerilim uygulanarak, diyotlardan geçen akım değerleri okundu. Veriler Kesim 3.1’de verilen ilgili teorik bağıntılar ve Mathsoft Inc. tarafından hazırlanan MATHCAD7 matematik programı kullanılarak analiz edildi, sonuçlar Golden Software Inc. tarafından hazırlanan GRAPHER V1.28 grafik programı kullanılarak grafik hale getirildi.



Şekil 3.9. Akım-Gerilim ölçümleri sisteminin devre şeması (ÇETİNKARA, 1996).



## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

### 4.1. Düz Beslem I-V Karakteristikleri: Engel Yüksekliği ve İdealite Faktörü

Bu çalışmada kullanılan silisyum kristali  $N_D \cong 4.31 \sim 8.61 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  donör ( $P$ ) konsantrasyonuna,  $\rho = 5 \sim 10 \Omega\text{-cm}$  özdirence ve  $\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  mobiliteye sahiptir.  $T = 300 \text{ K}$  değeri için iletkenlik bandı hâl yoğunluğu  $N_C = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  olarak hesaplanmış olup, bu değerler kullanılarak

$$N_D = N_C \exp(-E_F / kT) \quad (4.1)$$

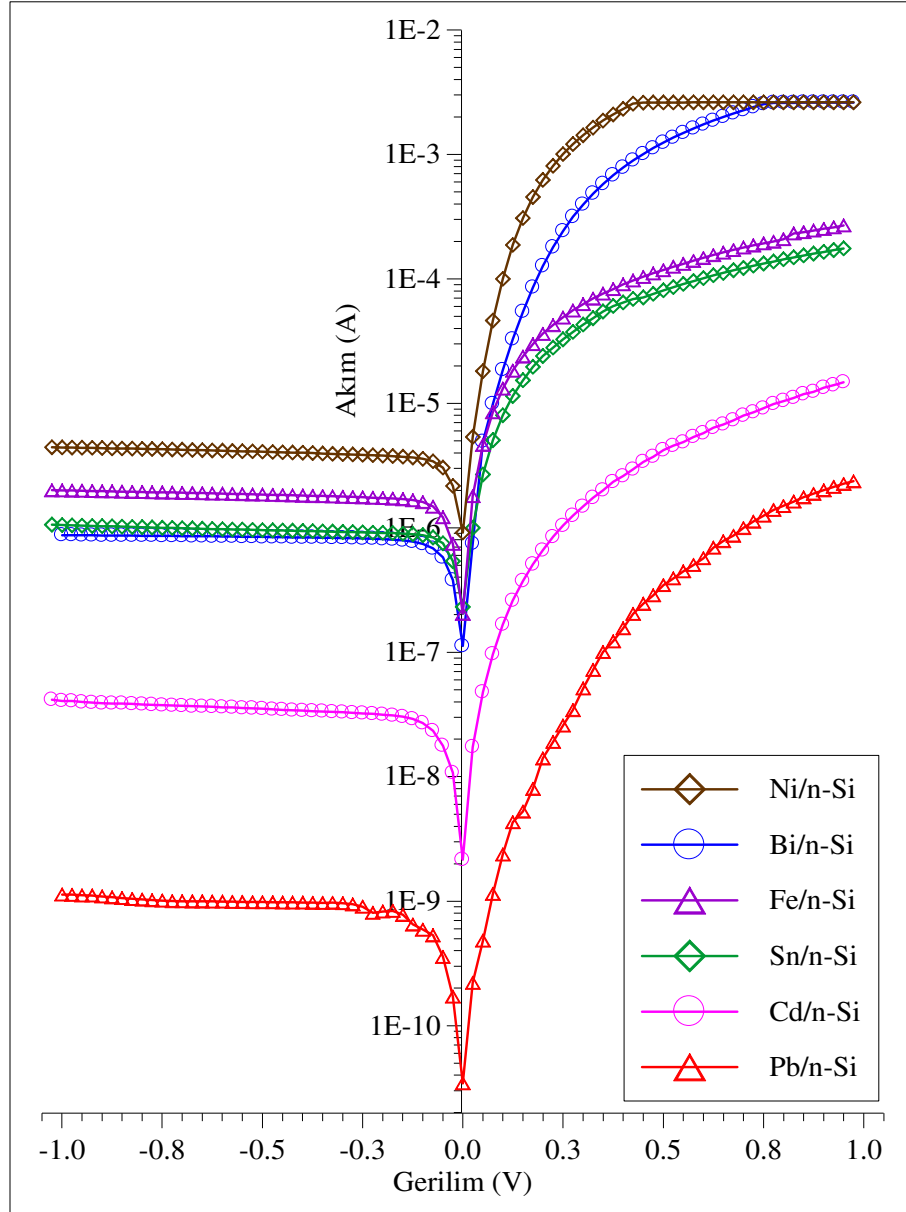
denklemleri yardımıyla Fermi enerjisi  $E_F = 0.287 \text{ eV}$  olarak bulundu.

Kesim 3.1.7.4'te denklem (3.25) ile verilen bağıntının her iki tarafının logaritması alındıktan sonra,  $V$ 'ye göre türev alınırsa, idealite faktörü ifadesi

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

şeklinde elde edilir. (3.26) ve (4.2) denklemlerinden  $I_0$  akımı ve  $n$  idealite faktörünün belirlenebilmesi için, her bir diyota ait akım-gerilim ölçümlerinin  $\ln(I)$ - $V$  grafikleri çizildi. Ni/ $n$ -Si, Bi/ $n$ -Si, Fe/ $n$ -Si, Sn/ $n$ -Si, Cd/ $n$ -Si ve Pb/ $n$ -Si diyotların ters beslem ve düz beslem akım-gerilim ( $I$ - $V$ ) grafikleri Şekil 4.1.'de toplu olarak verilmiştir. Şekilden, düz beslem bölgesinde en yüksek akım değeri Ni/ $n$ -Si ile yapılan Schottky diyot yapısında, en düşük akım değeri de Pb/ $n$ -Si Schottky diyot yapısında gözlenmektedir. Düz beslem geriliminin 0.45 ve 0.7 V'tan daha büyük değerleri için sırasıyla Ni/ $n$ -Si ve Bi/ $n$ -Si Schottky diyotlarında akım doyuma ulaşırken, diğer diyotlarda 1 V değerine kadar doyum durumu görülmemektedir.

Çizilen grafikler düz beslem bölgesinde, her bir diyot için, birkaç mertebelik akım aralığında doğrusal bir yapı sergilemekte olup, bu doğrusal bölgenin akım eksenine kesiştiği nokta  $I_0$  değerini vermektedir. Ni/ $n$ -Si, Bi/ $n$ -Si, Fe/ $n$ -Si, Sn/ $n$ -Si,



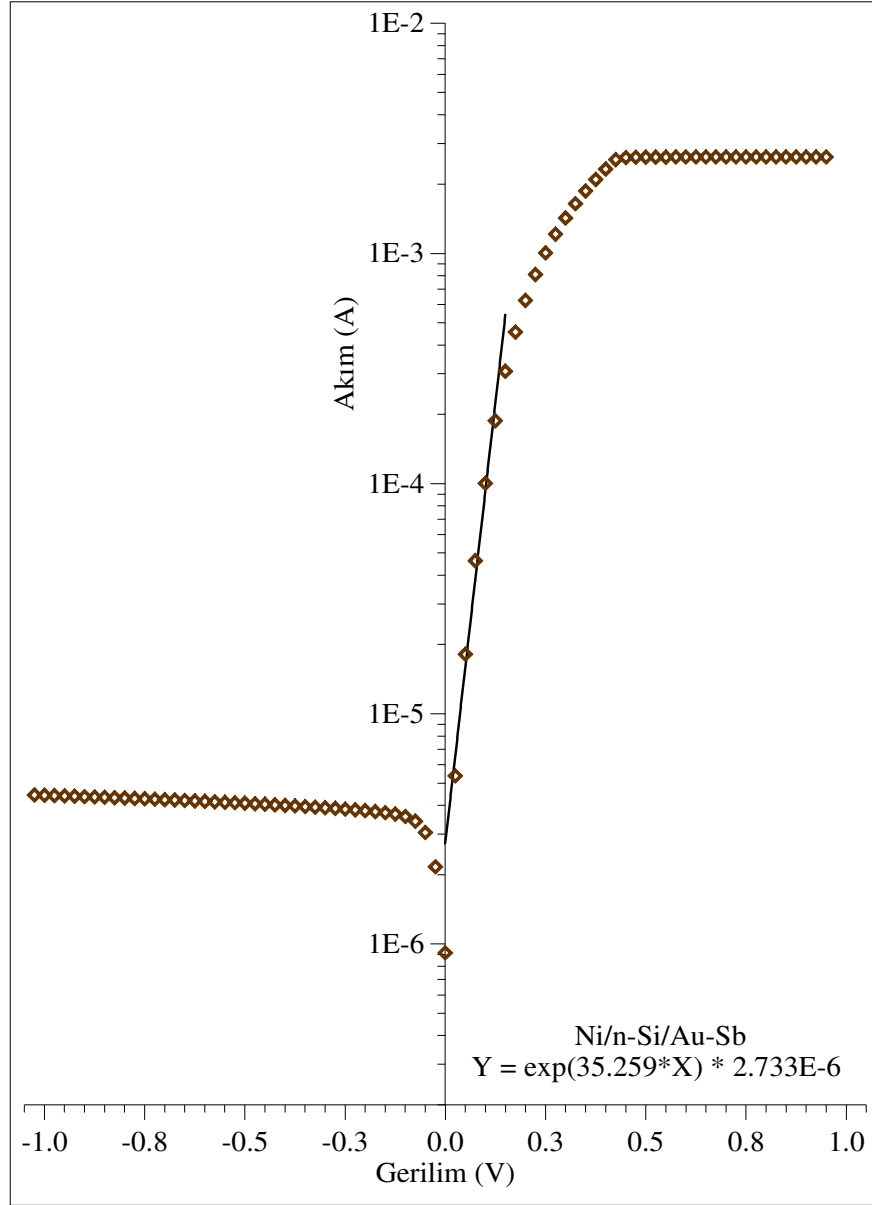
Şekil 4.1. Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotların ters ve düz beslem  $\ln(I)$ - $V$  grafikleri.

Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotları için, bu değerleri bulabilmek amacıyla, düz beslem bölgesinin doğrusal kısmına uygulanan uyum eğrilerinin (fit) grafikleri Şekil 4.2-7'de ayrı ayrı gösterilmiştir. *n*-tipi Si kristali için etkin Richardson sabitinin  $R_n^* = 112 A/cm^2K^2$  (WERNER ve RAU, 1994) değerine sahip olduğu göz önüne alındığında, bu doğrulardan bulunan  $I_0$  değerleri ve (3.26) denklemi kullanılarak, her bir diyot için hesaplanan sıfır beslem engel yüksekliği ( $\Phi_{Bn}$ ) ve (4.4) denklemi kullanılarak hesaplanan idealite faktörü (*n*) değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

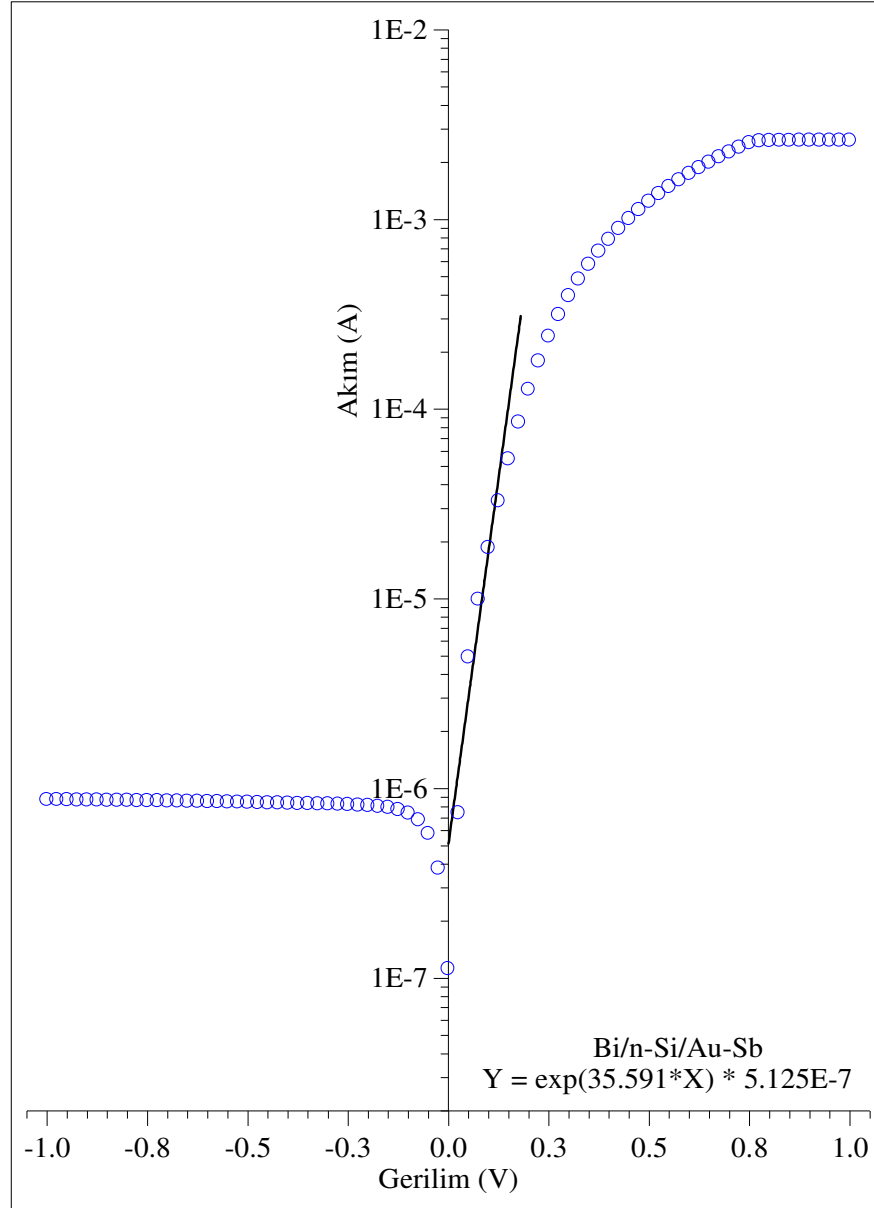
Diyotlar için gözlenen akım-gerilim eğrilerinin saf termiyonik emisyon teorisine uyumluluğunu incelemek için çizelge 4.1'de verilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri kullanılarak diyotlara ait düz beslem akım-gerilim karakteristikleri (3.25) denklemi kullanılarak teorik olarak yeniden üretildi. Teorik ve deneysel akım-gerilim eğrilerinin düz beslem bölgesi için uyumu Şekil 4.8'de toplu olarak verilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, teorik olarak üretilen eğriler deneysel verilerle iyi bir uyum içindedir. Bu durum, Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotları için ölçülen akım-gerilim verilerinin termiyonik emisyon teorisi kullanılarak temsil edilebileceğini göstermektedir.

İdealite faktörü, bir diyotun saf termiyonik emisyon teorisine uyumunun bir ölçüsüdür ve ideal bir diyot için  $n = 1$  olmalıdır. Ancak, nötral bölge seri direncinden farklı olarak, metal ile yarıiletken arasında arayüzey tabakasının varlığı, yarıiletken yüzey yük yoğunluğunun ya da arayüzey hallerinin uygulanan gerilimle değişimi gibi çok çeşitli sebeplerle idealite faktörü uygulamada 1'den büyük olur (RHODERICK ve WILLIAMS, 1988; ÇETİNKARA ve ark., 2003).

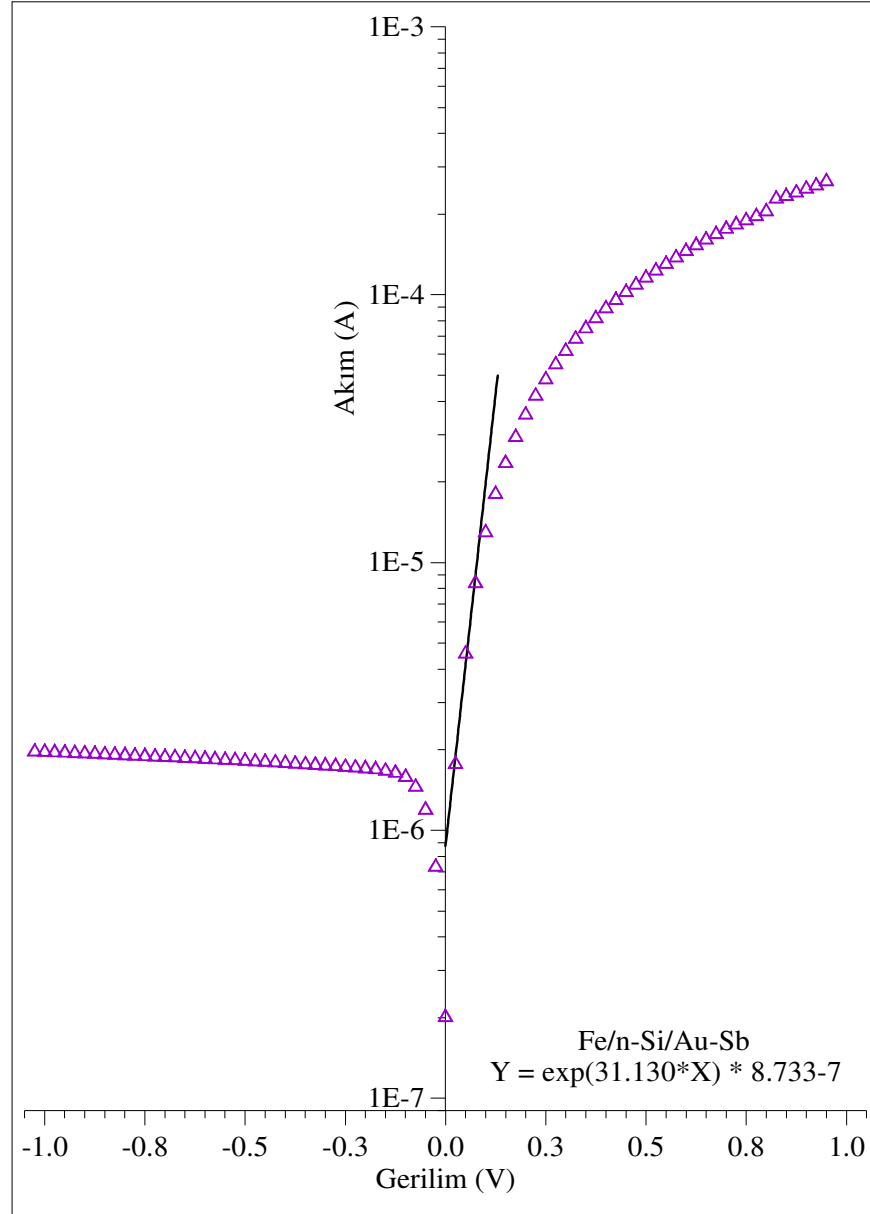
Schottky diyotlar üzerindeki çalışmalarda bir diyot için termiyonik emisyon akımı mekanizmasının geçerlilik sınırı  $n \leq 1.10$  olarak verilmektedir. Bu durumda, idealite faktörü 1.10'dan daha büyük olan diyotlar için, diyot akımı mekanizması yalnızca termiyonik emisyon teorisi kullanılarak modellenemez. Bu sebeple, yalnızca termiyonik emisyon teorisinin dikkate alındığı durumda, engel yüksekliği daha çok bir eğri uydurma işleminin uyum parametresi durumunda olup, gerçek engel yüksekliği gibi düşünülemez (ÖZDEMİR ve ark., 2002). Çizelge 4.1'de verilen *n* değerleri incelendiğinde, Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotları için sırasıyla 1.097, 1.087, 1.243, 1.194, 1.124 ve 1.284 değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda, Ni ve Bi metalleri ile üretilen diyotlar için bulunan *n*



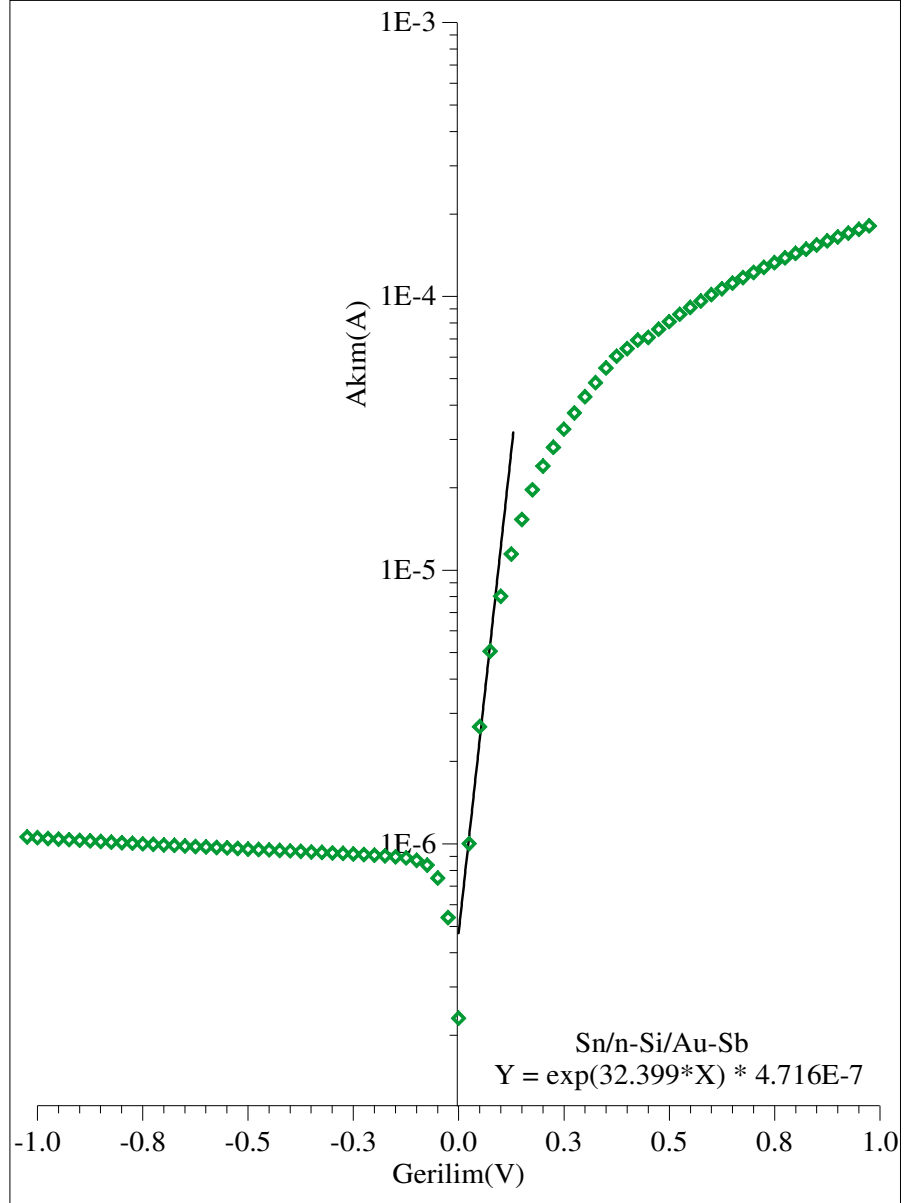
Şekil 4.2. Ni/n-Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.



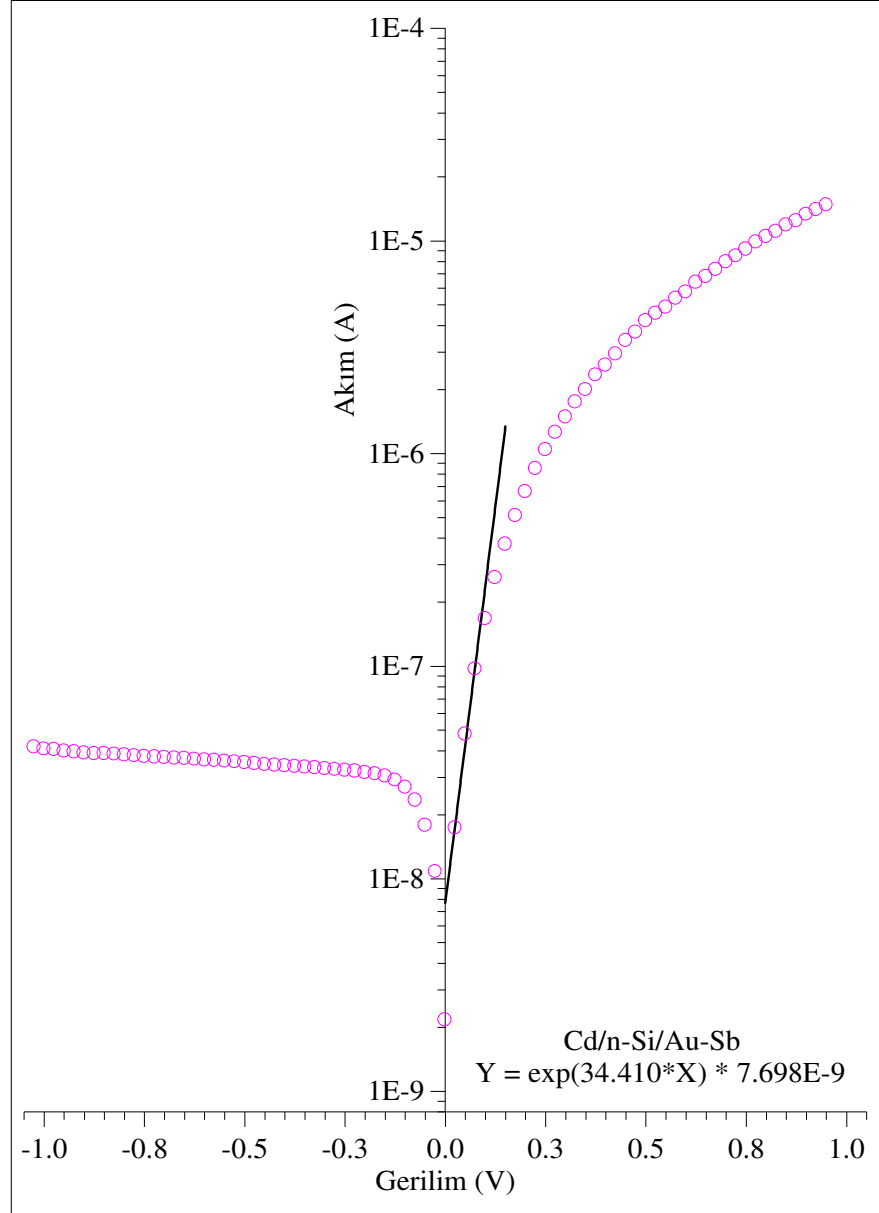
Şekil 4.3. Bi/n-Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.



Şekil 4.4. Fe/n-Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.

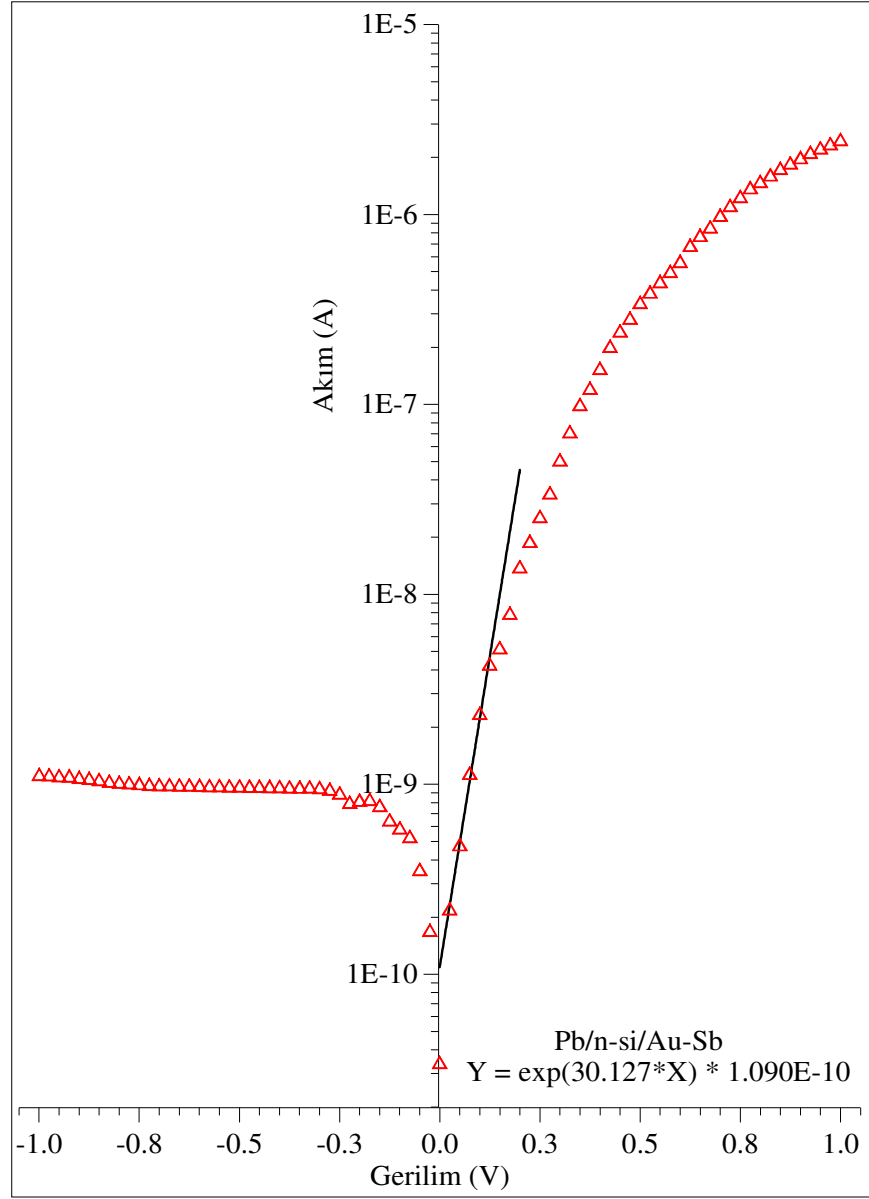


Şekil 4.5. Sn/n-Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.



Şekil 4.6. Cd/n-Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.





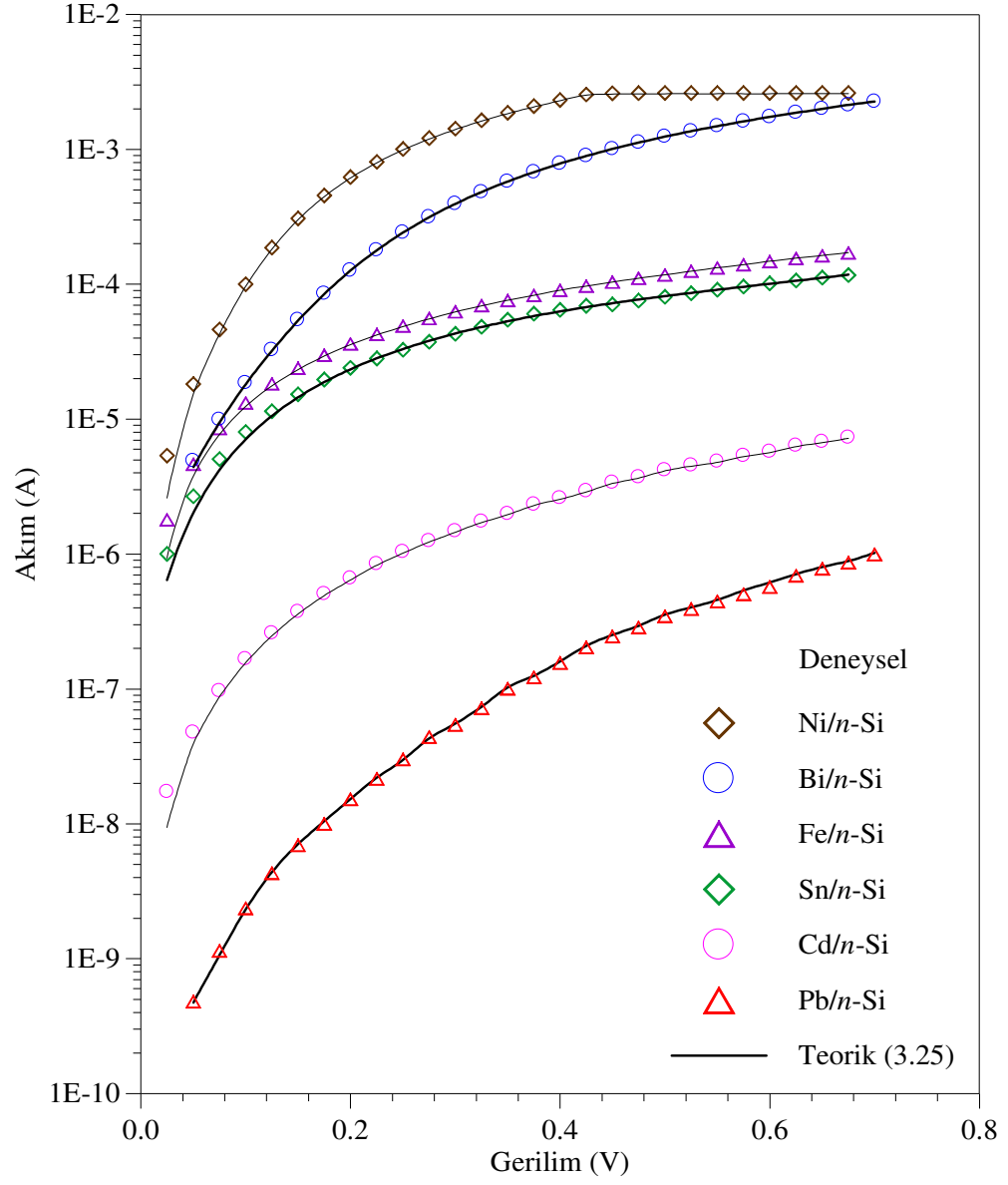
Şekil 4.7. Pb/n-Si Schottky diyot için ters ve düz beslem akım-gerilim karakteristiği.

Çizelge 4.1. Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotların karakteristik diyot parametreleri.

Metal	$I_0(A)$	$I-V$		$dV/d(\ln I)-I$		$H(I)-I$	
		$n$	$\phi_{Bn} (eV)$	$n$	$R_s (\Omega)$	$\phi_{Bn} (eV)$	$R_s (\Omega)$
<b>Ni</b>	$2.733 \times 10^{-6}$	1.097	0.623	1.019	96.86	0.617	98.04
<b>Bi</b>	$5.124 \times 10^{-7}$	1.087	0.666	1.874	166.73	0.619	170.34
<b>Fe</b>	$8.733 \times 10^{-7}$	1.243	0.652	1.276	3086.72	0.624	3146.06
<b>Sn</b>	$4.716 \times 10^{-7}$	1.194	0.668	1.190	4501.81	0.567	4526.10
<b>Cd</b>	$7.698 \times 10^{-9}$	1.124	0.775	2.416	51104.20	0.730	51299.30
<b>Pb</b>	$1.090 \times 10^{-10}$	1.284	0.884	2.168	318447.00	0.783	355003.00

değerleri 1.10'dan daha küçük olduğu için, bu diyotlar ideal olarak kabul edilebilir. Ancak Fe, Sn, Cd ve Pb metalleri ile yapılan Schottky diyotların ideal diyot (MS) yapısından uzak, daha ziyade metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu diyotlar için, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey halleri yarıiletkenle dengededirler (COWLEY ve SZE, 1965) ve  $I-V$  karakteristiğinin idealden sapmasına sebep olan arayüzey tabakasının kalınlığı arttıkça idealite faktörünün değeri de artmaktadır (ÖZDEMİR ve ark., 2002).

Bu çalışmada üretilen Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotlar için bulunan engel yüksekliği değerleri Çizelge 4.1'de sırasıyla 0.623, 0.666, 0.652, 0.668, 0.775 ve 0.884 eV olarak verilmiştir. Bu sonuçların değerlendirilebilmesi için  $n$ -tipi Si kristali üzerine aynı metaller kullanılarak üretilmiş Schottky diyotların engel yüksekliği değerleri için diğer araştırmacılar tarafından bulunan veriler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu çizelgenin incelenmesinden [111] doğrultusunda büyütülmüş kristaller üzerine yapılan Schottky diyotların engel yüksekliği değerlerinin [100] yönelimliler için bulunan değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotların deneysel akım-gerilim verilerine teorik eğrilerin uyumu.

Çizelge 4.2. Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotları için diğer araştırmacılar tarafından bulunan engel yüksekliği değerleri.

<b>Metal</b>	<b>Kaynak</b>	<b>Ölçüm Metodu</b>	<b><math>\phi_{Bn}</math> (eV)</b>
<b>Ni</b>	ARCHER ve ATALLA (1963)	<i>C-V</i>	0.68
	TURNER ve RHODERICK (1968)	<i>I-V, C-V</i>	0.70
	ULAŞ (1989)	<i>I-V</i>	0.69, 0.66, 0.74
<b>Bi</b>	HRICOVINI ve ark. (1992)	Fotoemisyon	0.73 [100] 0.87 [111]
<b>Fe</b>	VAN OTTERLOO (1981)	<i>C-V</i>	0.71
<b>Sn</b>	HAMDI (1997)	<i>I-V</i>	0.84
	AKKILIÇ ve ark. (2003)	<i>I-V</i>	0.60-0.67 [100]
	AYDOĞAN ve ark. (2005)	<i>I-V</i>	0.71 [100]
<b>Cd</b>	MITRA ve ark. (1980)	<i>I-V, C-V</i>	0.77, 0.78
	AKKILIÇ ve ark. (2003)	<i>I-V, C-V</i>	0.67, 0.68
<b>Pb</b>	HRICOVINI ve ark. (1992)	Fotoemisyon	0.82 [100] 0.87 [111]
	HESLINGA ve ark. (1990)	Fotoelek. Spek.	0.70, 0.93 [111]
	WEITERING ve ark. (1991)	Fotoelek. Spek.	0.94, 1.04 [111]
	SCHMITSDORF ve MÖNCH (1999)	<i>I-V</i>	0.62 [111]
	TURNER ve RHODERICK (1968)	<i>I-V, C-V</i>	0.79 [111]
	SCHMITSDORF ve MÖNCH (1999)	<i>I-V</i>	0.61

Ni metali ile yapılan Schottky diyotun engel yüksekliğini kapasite-gerilim ölçümlerinden ARCHER ve ATALLA (1963) 0.68 eV, TURNER ve RHODERICK (1968) 0.70 eV, yüksek seri dirençli Schottky diyotlar için NORDE (1979), LIEN ve ark., (1984), SATO ve YASUMURA (1985), CHEUNG ve CHEUNG (1986) tarafından geliştirilen dört farklı teoriye göre ULAŞ (1989) sırasıyla 0.696, 0.667 ve 0.745 olarak bulmuşlardır. Bu değerlerle kıyaslandığında, Ni/n-Si için bu çalışmada bulunan 0.650 eV'luk engel yüksekliği değeri uyum içindedir.

HRICOVINI ve ark., (1992) tarafından [100] ve [111] yönelimlerine sahip Si kristali üzerine Bi metali ile yapılan Schottky engel yüksekliklerinin tavlama ile değişimleri fotoemisyon ölçümleri yoluyla incelenmiştir. [100] yönelimi için engel yüksekliği 0.73 eV ve [111] yönelimi için 0.87 eV olarak bulunmuştur. Bu çalışmada bulunan 0.666 eV engel yüksekliği değeri, her iki değerden de daha küçüktür.

VAN OTTERLOO (1981) 80 °K'de vakumda yarılmış (111) yönelimli Si kristali üzerine Fe kullanarak yapılan Schottky diyotlarda kapasite-voltaj ölçümlerinden engel yüksekliği değerini 0.710 eV olarak bulmuşlardır. Bu çalışmada ise Fe metaliyle yapılan diyotun engel yüksekliği 0.652 eV olarak bulunmuş olup, bu sonuç VAN OTTERLOO tarafından bulunan değerden daha küçüktür.

HAMDI (1997) tarafından Sn ile yapılan Schottky diyotun engel yüksekliği akım-gerilim ölçümlerinden 0.84 eV, AKKILIÇ ve ark., (2003a) tarafından Bor katkılı, [100] doğrultusuna sahip *n*-tipi Si kristali üzerine yapılan 19 farklı Sn/*n*-Si Schottky diyot için  $\Phi_{Bn} = 0.600 - 0.670$  eV aralıklarında bulunmuştur. AYDOĞAN ve ark. (2005) *n*-tipi Si [100] üzerine oluşturdukları Sn/polypyrrole/*n*-Si yapılarının akım-gerilim karakteristiklerini sıcaklığa bağlı olarak incelemişler ve 300K'de engel yüksekliği değerini  $\Phi_{Bn} = 0.71$  eV olarak bulmuşlardır. Engel yüksekliği için bulunan  $\Phi_{Bn} = 0.668$  eV değeri AKKILIÇ ve ark., (2003a) tarafından bulunan değerler ile uyum içinde olup, HAMDI (1997) ve AYDOĞAN ve ark. (2005) tarafından bulunan değerden daha düşüktür.

AKKILIÇ ve ark., (2003b) Cd ile yapılan Schottky diyotlarda engel yüksekliği değerini akım-gerilim ölçümlerinden 0.677 eV ve kapasite-gerilim ölçümlerinden 0.680 eV olarak bulmuşlardır. Ayrıca MITRA ve ark., (1980) engel yüksekliğini hem akım-gerilim hem de kapasite-gerilim ölçümlerinden 0.780 eV olarak bulmuşlardır. Cd için bulunan 0.775 eV değeri MITRA ve ark., (1980) tarafından bulunan değerle iyi bir uyum içinde olup, AKKILIÇ ve ark., (2003b) tarafından verilen değerlerden oldukça büyüktür.

TURNER RHODERICK (1968) tarafından [111] doğrultusuna sahip silisyum üzerine Pb ile yapılan Schottky diyotun engel yüksekliği 0.79 eV olarak bulunmuştur. WEITERING ve ark. (1991) tarafından [111] yönelimine sahip epitaksiyel Si kristali üzerine oluşturulan kararlı ve yarı-kararlı arayüzey yapıların fotoelektron spektroskopisiyle incelenmesinden Pb için engel yükseklikleri 0.940 ve 1.040 eV olarak

bulunmuştur. HESLINGA ve ark., (1990) iki farklı epitaksiyel  $n$ -tipi Si [111] üzerine Pb ile yapılan Schottky diyotların engel yüksekliklerini 0.70 ve 0.93 eV olarak hesapladılar. HRICOVINI ve ark., (1992) tarafından [100] ve [111] doğrultusuna sahip silisyumun üzerine yapılan Pb Schottky kontağın engel yükseklikleri sırasıyla 0.820 ve 0.870 eV olarak bulunmuştur. SCHMITSDORF ve MÖNCH (1999) As katkılı [111] doğrultusuna sahip  $n$ -tipi Si kristali üzerine yapılan 68 farklı Pb/ $n$ -Si Schottky diyot için engel yüksekliği değerlerini  $\Phi_{Bn} = 0.623 \pm 0.04$  eV aralıklarında bulmuştur. Bu çalışmada üretilen Pb/ $n$ -Si Schottky diyotun engel yüksekliği değeri (0.884 eV) TURNER ve RHODERICK (1968), SCHMITSDORF ve MÖNCH (1999) tarafından verilen değerlerden daha büyük, WEITERING ve ark., (1991) tarafından verilen değerlerden oldukça küçük, HESLINGA ve ark., (1990) ile HRICOVINI ve ark., (1992) tarafından verilen değerlerle uyum içindedir.

Çizelge 4.1 ve 4.2'nin incelenmesinden, bu çalışmada bulunan ve literatürde verilen bazı engel yüksekliği değerlerinin birbiriyle uyumlu olmadığı ve değerlerin bir dağılım gösterdiği gözlenmektedir. Bu durum, i. diyotların farklı yönelime ve farklı kristalografik yapıya sahip ve ii. farklı mekanik ve kimyasal temizleme yöntemleriyle hazırlanmış kristal yüzeyleri üzerine imal edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

#### 4.2. Cheung Fonksiyonları ve Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Schottky engel diyotları gibi cihazlar için pratikte ideal davranıştan sapmaya sebep olabilecek hata kaynakları, metal ile yarıiletken arasında arayüzey tabakasının varlığı, yarıiletken yüzey yük yoğunluğu ya da arayüzey hallerinin uygulanan gerilimle değişimi, yarıiletken külçenin nötral bölge direnci, arınma bölgesi genişliği ile etkin kontak alanındaki değişimler ve engel yüksekliğinin gerilime bağlı imaj-kuvvet etkisiyle azalmasından başka arınma bölgesindeki tuzaklar şeklinde bildirilmiştir (ZIEL, 1968; SZE, 1981; RHODERICK ve WILLIAMS, 1988). Bunlar içinde düz beslem akım-voltaj karakteristiklerini etkileyen en önemli iki sebep, arayüzey tabakasının varlığı ve seri direnç etkisidir.

Büyük seri dirençli ve ideal olmayan Schottky diyotların direncini hesaplamak için farklı araştırmacılar tarafından çok çeşitli teknikler ileri sürülmüştür. NORDE (1979) tarafından ideal Schottky diyotların ( $n = 1$ ) seri direncinin hesaplanması için minimum bir noktadan geçen gerilime bağlı bir  $F(V)$  fonksiyonu tanımlanmıştır. Fonksiyonun minimum noktası yardımıyla diyota ait seri direnç ve engel yüksekliği değeri bulunmaktadır.

LIEN ve ark., (1984) idealite faktörü 1'den büyük olan diyotlar için de kullanılabilir olan, sabit  $a$  değerleri için farklı minimum noktalardan geçen NORDE (1979) tipi bir  $F_a(V)$  fonksiyonu tanımlamıştır. Keyfi  $a$  değerleri için bulunan, fonksiyonun minimum noktaları yardımıyla çizilen  $I(a)-a/\beta$  grafiğinin eğiminden seri direnç ve  $I(a)$  eksenini kestiği noktadan da  $n$  idealite faktörü bulunur.

SATO ve YASHUMURA (1985)  $n > 1$  olan durumları da dikkate alan ve NORDE (1979) tarafından önerilen fonksiyona benzer bir  $F(V)$  fonksiyonu tanımlamıştır. Bu modelde idealite faktörü, seri direnç ve engel yüksekliğinin belirlenmesi için iki farklı sıcaklıkta akım-gerilim ölçümü alınması gerekmektedir.

CIBILS ve BUITRAGO (1985) idealite faktörü ve seri direnç değerini bulabilmek için,  $F(V) = V - V_a \ln(I)$  şeklinde yardımcı bir fonksiyon kullanan yeni bir yaklaşımda bulundular. Bu yaklaşım da  $V_a$  yardımcı geriliminin farklı değerleri için fonksiyonun sahip olduğu minimum noktaların bulunmasına dayanmaktadır.

BOHLIN (1986), keyfi  $\gamma$  sabitleri için farklı minimum değerlerden geçen LIEN (1984) tarafından önerilene benzer  $F(V, \gamma) = (1/\gamma - 1/n)V + \phi_{Bn} + IR/n$  şeklinde bir

fonksiyon kullanmıştır. Engel yüksekliği ve seri direnç değerleri iki farklı  $\gamma$  sabitinin değerlerine bağlı olarak bulunan  $F(V, \gamma)$  yardımcı fonksiyonları kullanılarak hesaplamıştır.

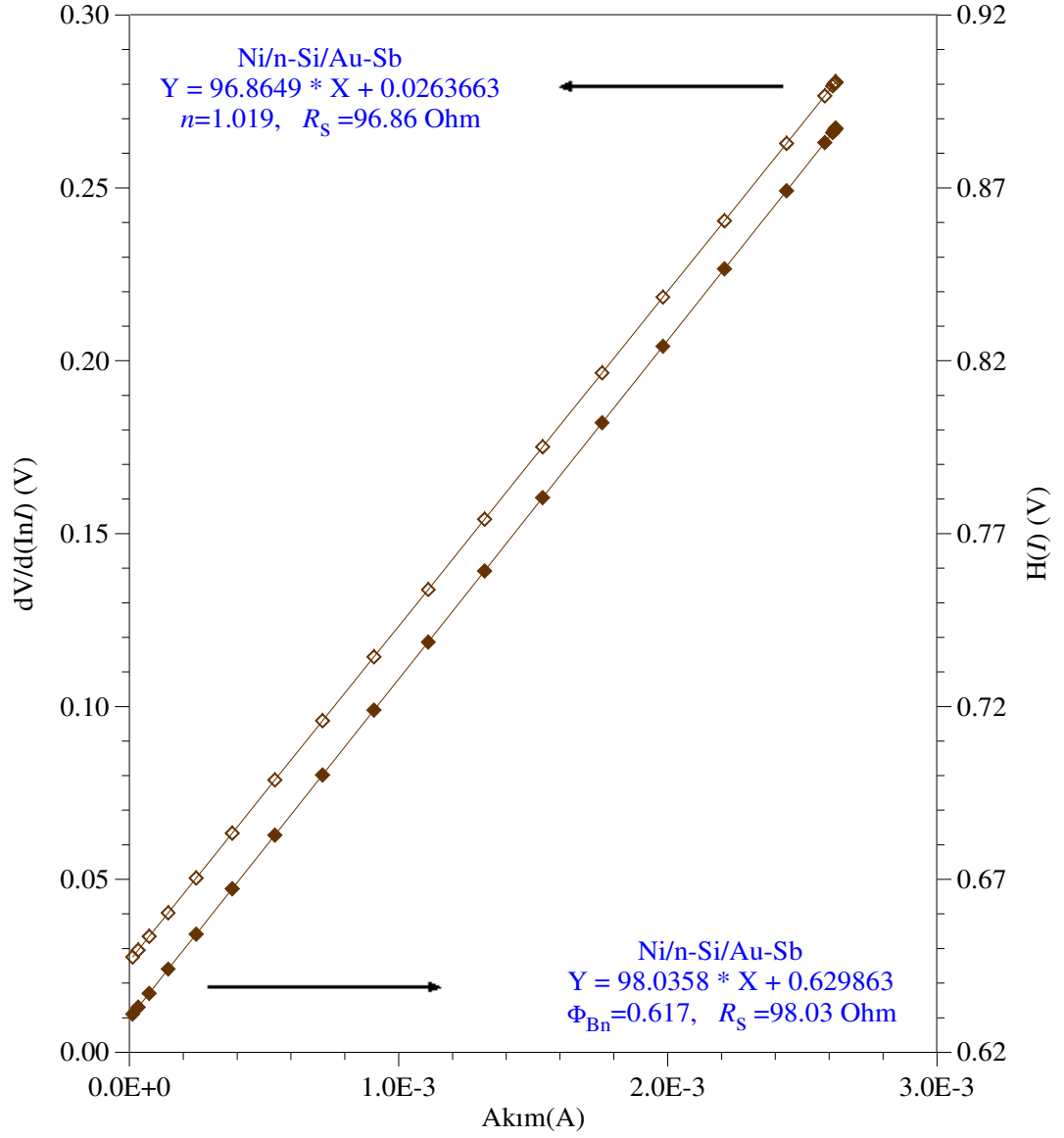
Ancak, bu metotların tümünde  $F(V)$  fonksiyonun minimum noktasının grafikten bulunmasında büyük bir belirsizlik mevcuttur ve bu belirsizliğin ortadan kaldırılması için minimum nokta civarında çok sayıda ölçüm almak gereklidir. Bu belirsizlik sebebiyle, önerilen modeller diyotların seri dirençlerinin hesaplanmasında araştırmacılar tarafından yeterince yaygın olarak kullanılmamıştır.

LEE ve ark., (1992)  $V_a$  yardımcı gerilimine bağlı olarak CIBILS ve BUITRAGO (1985) tarafından önerilen  $F(V) = V - V_a \ln(I)$  fonksiyonunu kullandılar. Yardımcı fonksiyonda bağımsız değişkeni  $V$  değil  $I$  olarak akıma bağlı ve farklı  $V_a$  değerleri için farklı  $I_{\min}$  değerlerinden geçen bir  $F(I)$  fonksiyonu elde ettiler. Doğrusal hale getirilen  $F(I) = aI + b \ln(I) + c$  fonksiyonundaki  $a$ ,  $b$  ve  $c$  katsayılarını en-küçük kareler uyumu yöntemiyle tespit ederek, seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini buldular.

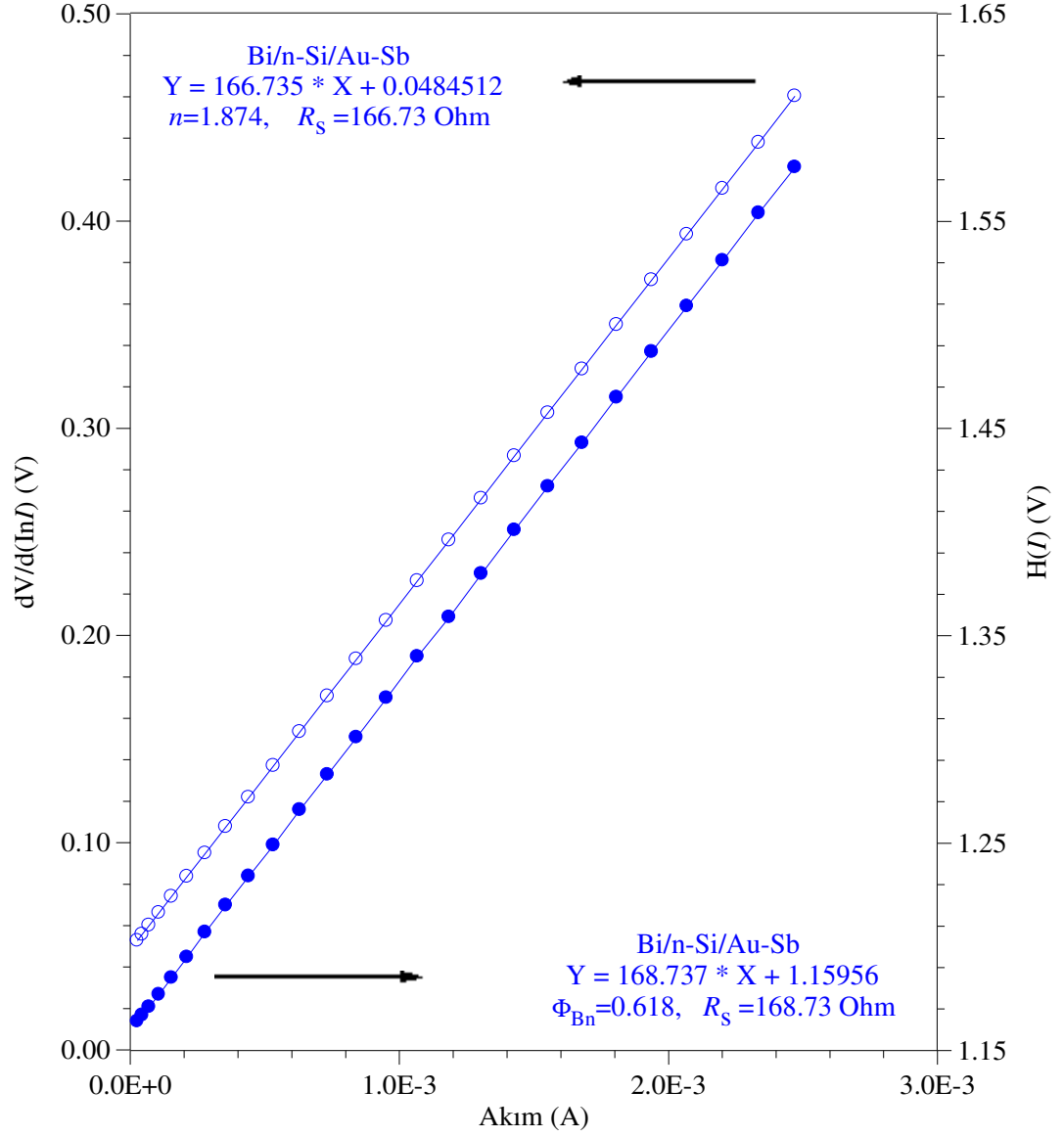
CHEUNG ve CHEUNG (1986) akım yoğunluğunun lineer fonksiyonları yardımıyla çizilen grafiklerden diyot parametrelerinin çıkarılmasını sağlayan, (3.29) ve (3.31) denklemleriyle verilen farklı bir metot ileri sürdüler. Yalnızca akım-gerilim ölçümlerine dayanan bu metodun temel avantajı NORDE (1979) benzeri fonksiyonların minimum değerlerinin bulunmasını gerektirmemesidir. Bu sebeple, çalışmamızda üretilen Schottky diyotların akım-gerilim karakteristiklerinden seri direnç değerlerinin hesaplanması için bu model kullanılmıştır.

Bu modellerle Ni/ $n$ -Si, Bi/ $n$ -Si, Fe/ $n$ -Si, Sn/ $n$ -Si, Cd/ $n$ -Si ve Pb/ $n$ -Si Schottky diyotların  $n$  idealite faktörleri ve seri dirençlerinin bulunması için, (3.29) denklemi ile verilen Cheung fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 4.2-7’te verilen  $\ln(I) - V$  grafiklerinin  $eV > 3kT$  olan aşağı içbükey bölgesinde her bir veriden geçen teğetin eğiminden  $dV/d(\ln I)$  değerleri hesaplanarak Şekil 4.9-14’te verilen  $[dV/d(\ln I)] - I$  grafikleri çizildi. Bu grafikler lineer doğrular şeklinde olup,  $I = 0$  için doğrunun düşey eksenini kestiği noktanın değeri  $kT/e$ ’ye bölünerek hesaplanan  $n$  idealite faktörü değerleri ve doğrunun eğiminden hesaplanan  $R_s$  değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

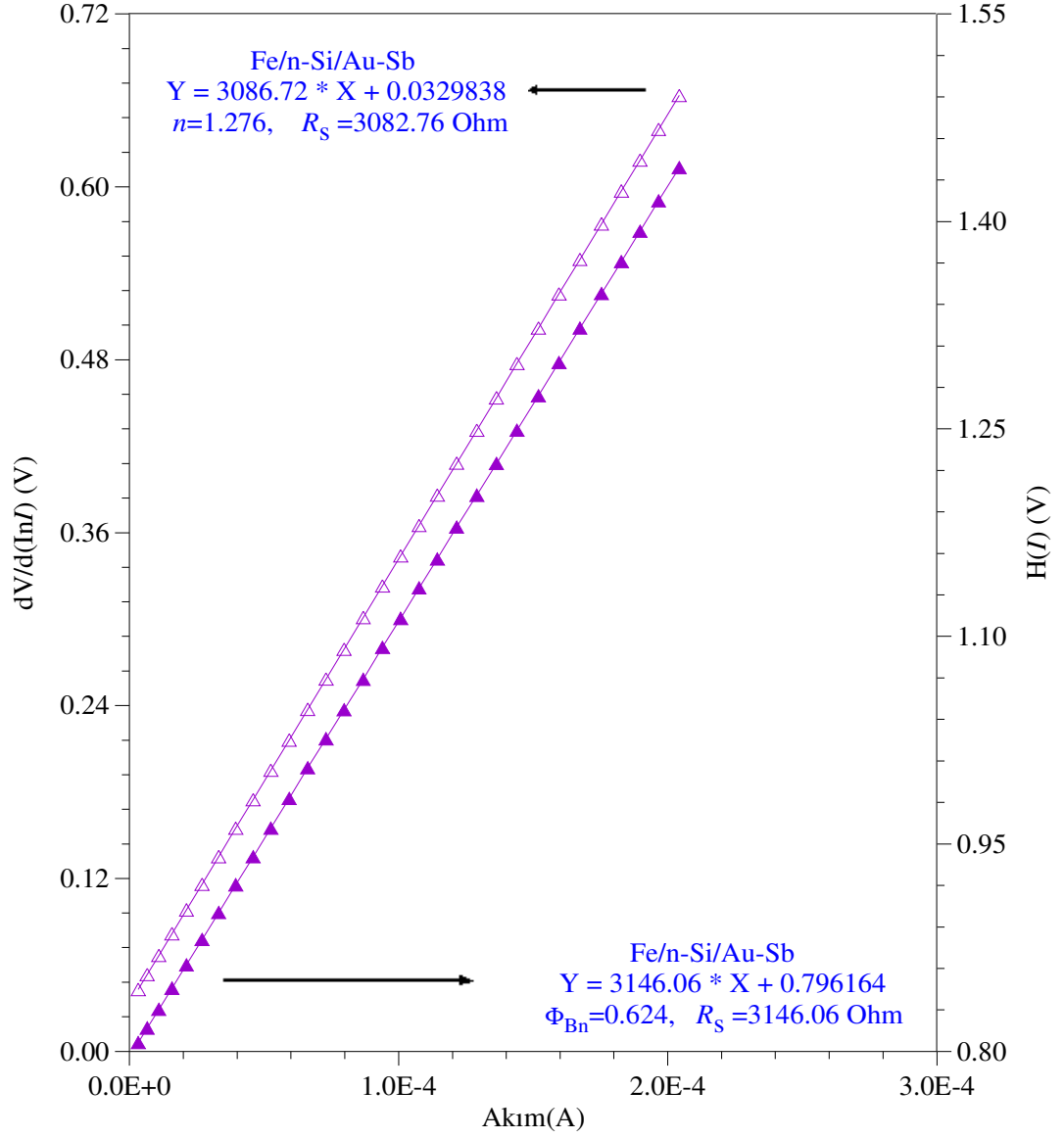




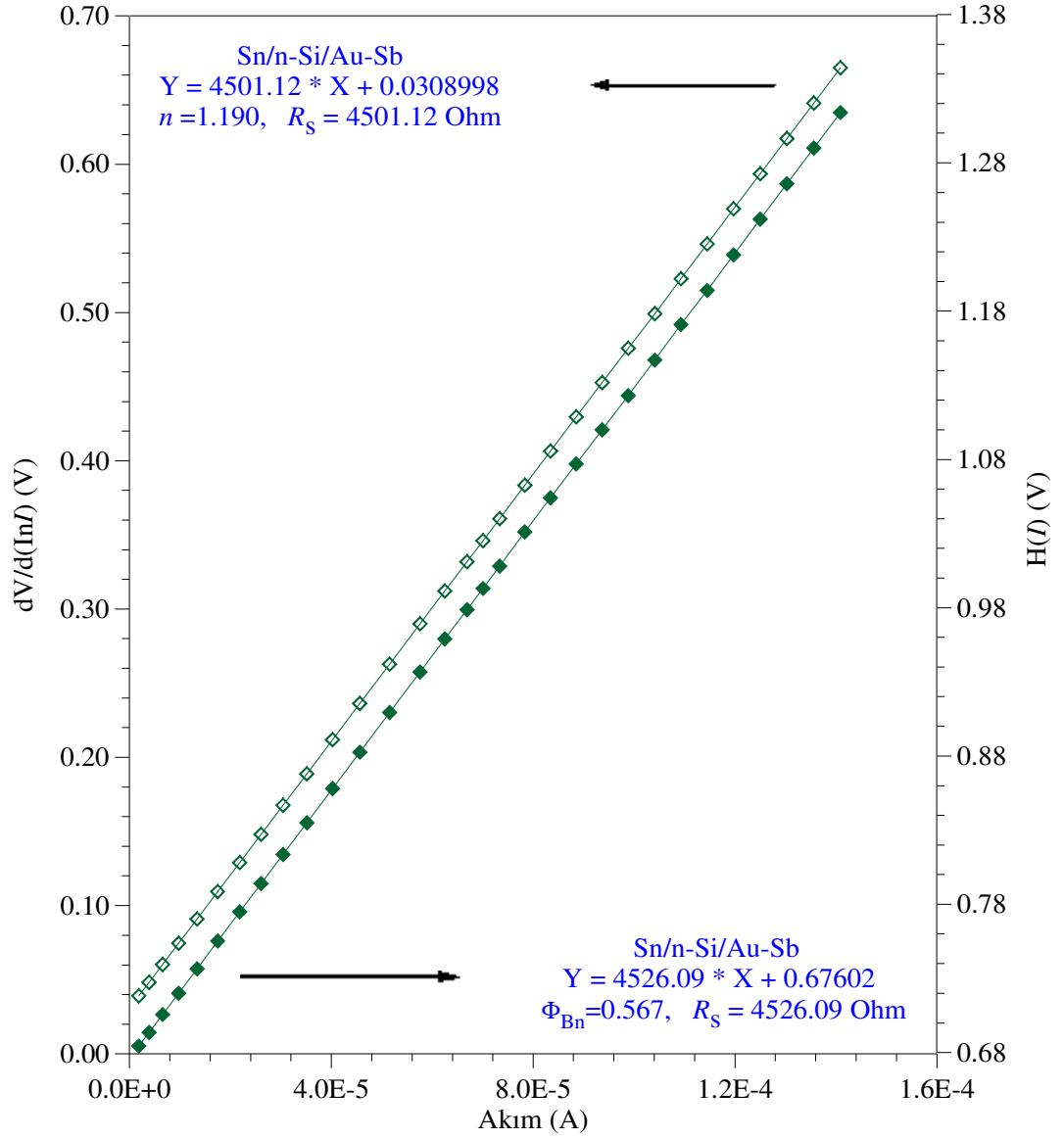
Şekil 4.9. Ni/n-Si Schottky diyotun Cheung fonksiyonları yardımıyla çizilen  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri.



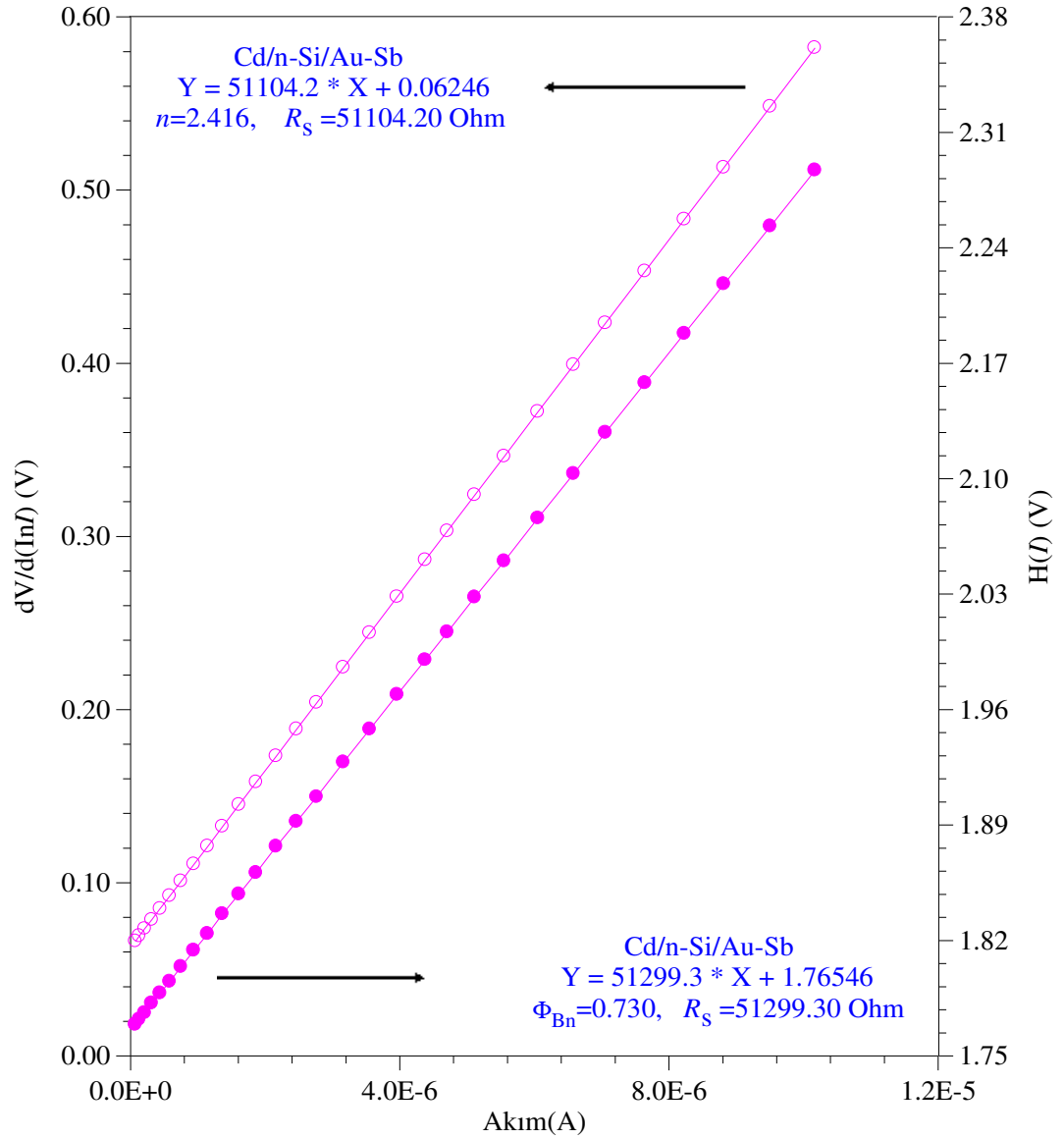
Şekil 4.10. Bi/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen  $dV/d(\ln I)-I$  ve  $H(I)-I$  grafikleri.



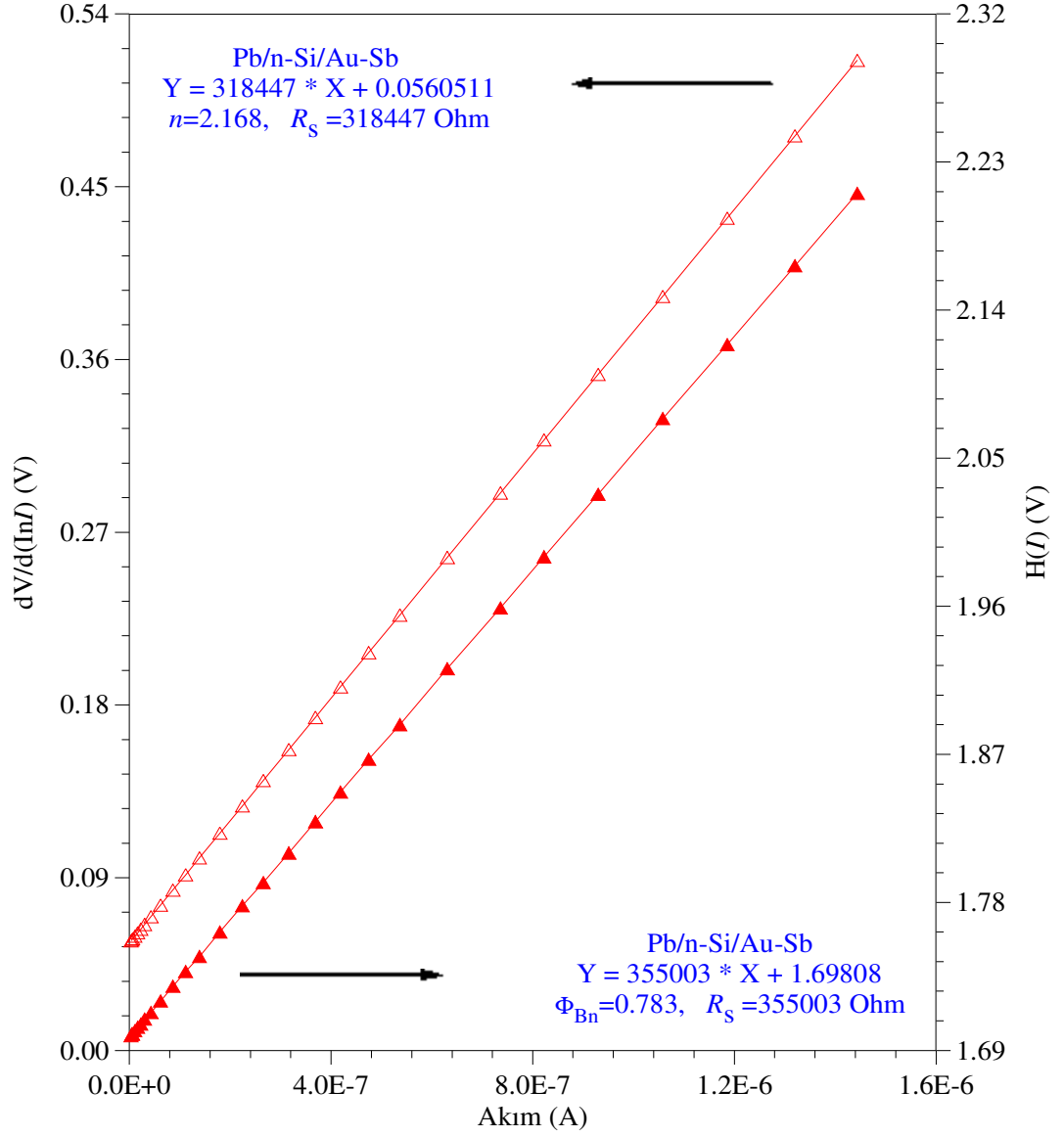
Şekil 4.11. Fe/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen  $dV/d(\ln I)$ -I ve  $H(I)$ -I grafikleri.



Şekil 4.12. Sn/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen  $dV/d(\ln I)-I$  ve  $H(I)-I$  grafikleri.



Şekil 4.13. Cd/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri.



Şekil 4.14. Pb/n-Si Schottky diyotu için Cheung fonksiyonlarından çizilen  $dV/d(\ln I)$ -I ve  $H(I)$ -I grafikleri.

Bu çizelgenin incelenmesinden, Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotları için çizilen akım-gerilim eğrilerinin aşağı içbükey bölgesinde (3.29) denklemiyle verilen Cheung fonksiyonuyla hesaplanan  $n$  idealite faktörü değerlerinin (sırasıyla 1.019, 1.874, 1.276, 1.190, 2.416 ve 2.168) aynı eğrilerin doğrusal kısmından bulunan  $n$  değerlerine (sırasıyla 1.097, 1.087, 1.243, 1.194, 1.124 ve 1.284) yakın olduğu görülmektedir. Ni, Fe ve Sn ile yapılan numuneler için her iki yöntemle bulunan idealite faktörleri arasında çok iyi bir uyum varken, Bi, Cd ve Pb için Cheung fonksiyonundan hesaplanan idealite faktörü değerleri akım-gerilim eğrisinin doğrusal kısmından hesaplanan değerlerden oldukça yüksektir. Bu durum, idealite faktörünün eğrinin lineer bölgesinde yalnızca arayüzey halleri tarafından kontrol edilirken, aşağı içbükey bölgesinde hem arayüzey halleri hem de seri direnç tarafından kontrol edilmesiyle izah edilmektedir (ÇETİNKARA ve ark., 2003).

Diyotların  $\Phi_{Bn}$  engel yüksekliği ve  $R_s$  seri dirençlerinin bulunması için, (3.31) denklemi ile verilen Cheung fonksiyonu kullanılmıştır. Ölçülen akım ve gerilim değerleri ile Çizelge 4.1'de verilen  $n$  idealite faktörü değerleri denklem (3.30)'da yerine yazılarak  $H(I)$  değerleri hesaplandı. Bu değerler kullanılarak denklem (3.31) ile verilen Cheung fonksiyonu yardımıyla çizilen ve Şekil 4.9-14'te karşılaştırmalı olarak gösterilen  $H(I) - I$  grafikleri yine doğrular şeklinde olup,  $I = 0$  için doğrunun düşey ekseni kestiği noktanın değeri  $n$ 'ye bölünerek hesaplanan  $\Phi_{Bn}$  ve doğrunun eğiminden hesaplanan  $R_s$  değerleri de Çizelge 4.1'de ayrıca verilmiştir.

Bu çizelgenin incelenmesinden, Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotları için (3.29) denklemiyle verilen Cheung fonksiyonuyla hesaplanan  $\Phi_{Bn}$  engel yüksekliği değerlerinin (sırasıyla 0.617, 0.619, 0.624, 0.567, 0.730 ve 0.783 eV) eğrilerin lineer kısmından bulunan doyma akım değerlerinden hesaplanan  $\Phi_{Bn}$  değerlerinden (sırasıyla 0.623, 0.666, 0.652, 0.668, 0.775 ve 0.884 eV) daha küçük olduğu görülmektedir. (3.29) denklemi ile verilen Cheung fonksiyonu parametre ihmaline dayanmakta olduğundan, bu denklem kullanılarak hesaplanan  $n$  değerleri genellikle akım-gerilim eğrisinin lineer kısmından hesaplanan  $n$  değerinden daha büyük çıkmakta ve diğer araştırmalarda bulunan sonuçlar da bu durumu desteklemektedirler. Bir Schottky diyotun idealite faktörü değeri arttığında engel yüksekliği değeri düşmektedir. (3.31) denklemiyle hesaplanan engel yüksekliği

değerlerinin akım-gerilim eğrisinin doğrusal kısmından bulunan değerlerden daha küçük olması bu denklemde kullanılan idealite faktörü verilerinin (3.29) denklemi ile hesaplanmış olmasından kaynaklanmaktadır.

Yine Çizelge 4.1'in incelenmesinden Ni/*n*-Si, Bi/*n*-Si, Fe/*n*-Si, Sn/*n*-Si, Cd/*n*-Si ve Pb/*n*-Si Schottky diyotların seri dirençlerinin sırasıyla (3.29) denklemiyle verilen 1. Cheung fonksiyonundan 96.86, 166.73, 3086.72, 4501.81, 51104.20 ve 318447 Ω ve (3.31) denklemiyle verilen 2. Cheung fonksiyonundan da 98.04, 170.34, 3146.06, 4526.10, 51299.30 ve 355003.00 Ω olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan her iki Cheung fonksiyonuyla hesaplanan seri direnç değerlerinin birbiri ile iyi bir uyum içinde oldukları, yaklaşık olarak, Ni ve Bi ile yapılan diyotlarda seri direncin 10<sup>2</sup> mertebesinde, Fe ve Sn ile yapılan diyotlarda seri direncin 10<sup>3</sup> mertebesinde, Cd ile yapılan diyotta seri direncin 10<sup>4</sup> mertebesinde ve Pb ile yapılan diyotta ise seri direncin 10<sup>5</sup> mertebesinde olduğu söylenebilir.

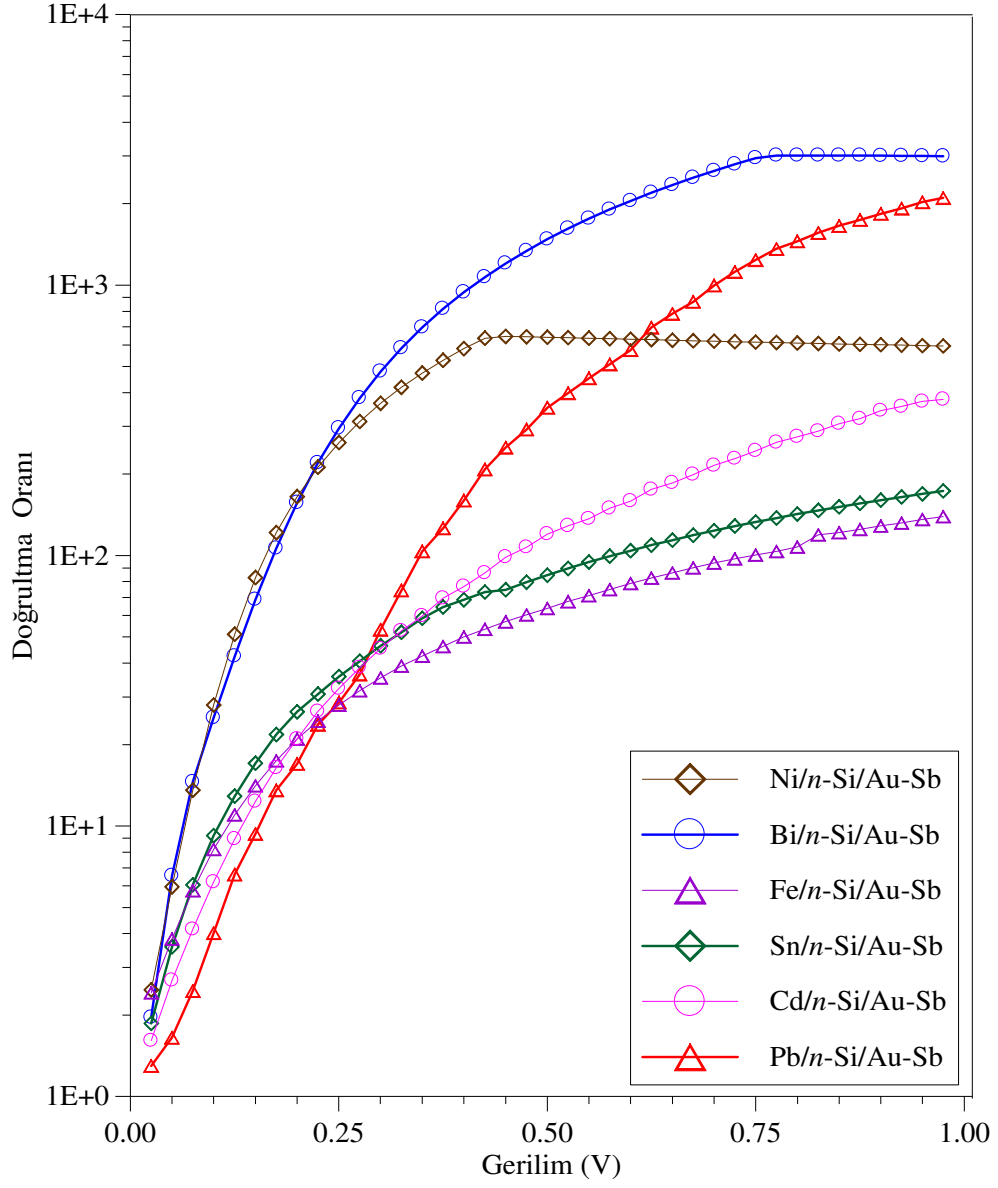
Diyotların üretilmesi için kullanılan Si kristalinin oda sıcaklığındaki öz direnci 5~10 Ω-cm olmasına rağmen, diyot hazırlandıktan sonra direncin oldukça yükseldiği görülmektedir. KEFFOUS ve ark, (2003) tarafından idealite faktörü  $n = 1$  olduğunda seri direncin yarıiletkenin gövde direnci mertebesinde olduğu,  $n > 1$  olan durumlarda ise yarıiletken gövde direncinin 20~30 katına çıktığı bildirilmiştir. Ayrıca, arayüzey tabakasının kalınlığı ile seri direnç arasında bir ilişki olduğu, arayüzey tabakasının kalınlığı arttıkça engel yüksekliğinin azaldığı ve seri direncin de arttığı aynı çalışmada bulunmuştur. Bu durum, aynı kristal üzerine farklı metallerle imal edilen diyotların seri dirençleri arasındaki son derece yüksek farkları izah edebilir.



### 4.3. Doğrultma Oranları

Bir Schottky diyotun doğrultma oranı, verilen bir potansiyel değerinde düz beslem akımı değerinin ters beslem akımına oranı şeklinde tanımlanır. Bu çalışmada tanıma uygun olarak, üretilen her bir Schottky diyotun doğrultma oranının bulunabilmesi için ölçüm yapılan -1V ile +1V aralığındaki her bir ölçüm adımında düz beslem akımı değeri ters beslem akımına oranlanmıştır. Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotları için hesaplanan doğrultma oranlarının uygulanan gerilime karşı grafikleri Şekil 4.15’de toplu olarak verilmiştir. Bu şeklin incelenmesinden, Bi ile yapılan Schottky diyotun tüm gerilim aralığında en yüksek doğrultma oranına ve Fe ile yapılan Schottky diyotun ise en düşük doğrultma oranına sahip olduğu görülmektedir.

Doğrultma oranı bir diyotun elektronik teknolojisinde kullanılabilmesi bakımından önemli karakteristiklerden biridir. Bu sebeple, üretilecek bir diyotun çok iyi derecede bir doğrultucu davranış göstermesi istenir. En düşük idealite, en düşük engel yüksekliği, en düşük seri direnç ve en yüksek doğrultma oranı Bi ile yapılan Schottky diyotta elde edildi. Bu özellikler elektronik devre elemanlarında istenilen karakteristiklerdir. Bu çalışmada üretilen diyotlar için elde edilen doğrultma oranı değerleri göz önüne alındığında, elektronik devreler için en ideal diyotun Bi metali ile yapılan Schottky diyot olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15. Ni/n-Si, Bi/n-Si, Fe/n-Si, Sn/n-Si, Cd/n-Si ve Pb/n-Si Schottky diyotların doğrultma oranlarının uygulanan gerilimle değişimi.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuç

Bu çalışmada [100] yönelimine sahip, fosfor katkılı, öz direnci  $\rho = 5 \sim 10 \Omega\text{-cm}$  ve mobilitesi  $\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/Vs$  olan *n*-tipi silisyum kristali kullanıldı. Kesim 3.2.1’de verilen kimyasal temizleme işlemlerini takiben yarıiletkenin bir yüzeyi ısısal buharlaştırma yöntemiyle Au-Sb alaşımıyla kaplanarak omik kontak yapısı oluşturulduktan sonra, kristal altı eşit parçaya bölünerek diğer yüzeye Ni, Bi, Fe, Sn, Cd ve Pb metalleri buharlaştırıldı. Böylece, altı farklı metal kullanılarak altı farklı Schottky diyot yapısı oluşturuldu. Üretilen diyotların elektriksel karakteristiklerini incelemek için, oda sıcaklığında -1V ile +1V gerilim aralığında, ters ve düz beslem akım-gerilim ölçümleri yapıldı.

Düz beslem akım-gerilim karakteristiklerinin termiyonik emisyon teorisi ile incelemesinden doyma akımı, idealite faktörü ve engel yükseklikleri belirlendi. İdealite faktörü değerleri Ni/*n*-Si, Bi/*n*-Si, Fe/*n*-Si, Sn/*n*-Si, Cd/*n*-Si ve Pb/*n*-Si Schottky diyotları için sırasıyla 1.097, 1.087, 1.243, 1.194, 1.124 ve 1.284 olarak bulundu. Ayrıca engel yüksekliği değerleri de sırasıyla 0.623, 0.666, 0.652, 0.668, 0.775 ve 0.884 eV olarak hesaplandı. Bu değerler, farklı araştırmacılar tarafından verilen Çizelge 4.2’deki sonuçlarla karşılaştırıldığında, Ni ve Bi ile üretilen diyotların ideale yakın, Fe, Sn, Cd ve Pb ile üretilenlerin ise MIS yapısında oldukları sonucuna varıldı.

Cheung fonksiyonları yardımıyla idealite faktörü, seri direnç ve engel yüksekliği değerleri ayrıca hesaplandı. İdealite faktörü değerleri ve engel yüksekliği değerlerinin termiyonik emisyon teorisiyle bulunan değerlerle uyum içinde oldukları görüldü. Aşağı bükümlü eğrisel bölgede Cheung fonksiyonlarından hesaplanan idealite faktörü değerlerinin, akım-gerilim eğrisinin doğrusal kısmından hesaplanan değerlerden daha büyük olması, bu bölgede hem arayüzey hallerinin hem de seri direnç etkisinin varlığıyla açıklandı. Seri direnç değerlerinin metalden metale farklılık gösterdiği, Ni, Bi, Fe, Sn, Cd ve Pb metalleri için sırasıyla (3.29) denklemiyle 96.86, 166.73, 3086.72, 4501.81, 51104.20 ve 318447  $\Omega$  ve (3.31) denklemiyle 98.04, 170.34, 3146.06, 4526.10, 51299.30 ve 355003.00  $\Omega$  olduğu bulundu. Bu değerlerden, yarıiletken gövde direnci çok düşük olmasına rağmen, farklı Schottky metalleri için seri direncin gövde

direncine kıyasla çok büyük değerler alabildiği görüldü. Bu durum, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey tabakasının engel yüksekliği ve seri direnç üzerindeki etkisiyle açıklandı.

En düşük idealite, en düşük engel yüksekliği, en düşük seri direnç ve en yüksek doğrultma oranı Bi ile yapılan Schottky diyotta elde edildi. Bu sonuç, elektronik devre elemanı üretimi için en ideal metalin çalışılan şartlar altında Bi olacağı şeklinde yorumlandı.

## 5.2. Öneriler

Bu çalışma, Ni/*n*-Si, Bi/*n*-Si, Fe/*n*-Si, Sn/*n*-Si, Cd/*n*-Si ve Pb/*n*-Si Schottky diyotlarının üretilmesi ve oda sıcaklığındaki düz beslem akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesiyle sınırlıdır.

Çalışmada kullanılan metallere ilave olarak, periyodik cetvelde yer alan diğer gruplardaki metallerin de sistematik bir şekilde incelenmesi, daha ideal Schottky diyotların üretilmesi için faydalı olacaktır. Böylece, kullanılan metallerin iş fonksiyonları dışında, elektronegativite ya da diğer fiziksel/kimyasal özelliklerine bağlı olarak, üretilen Schottky engel yapıları daha kapsamlı biçimde incelenebilecek ve yeni bilgiler ortaya çıkarılabilecektir.

Ayrıca, akım-gerilim karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi ile başta Richardson sabiti olmak üzere, idealite faktörü ve engel yüksekliğinin sıcaklık bağımlılığı gibi faydalı bilgiler literatüre kazandırılacaktır.

## KAYNAKLAR

- AKKILIÇ, K., KILIÇOĞLU, T., TÜRÜT, A., 2003. Linear Correlation Between Barrier Heights and Ideality Factors of Sn/n-Si Schottky Diodes With and Without the Interfacial Native Oxide Layer. **Physica B**, 337: 388-393.
- ARCHER, R.J. ve ATALLA, M.M., 1963. **Am. Acad. Sci.**, NY, 101: 697.
- AYDIN M.E., AKKILIÇ K. ve KILIÇOĞLU T., 2004. The Importance of the Neutral Region Resistance for the Calculation of the Interface State in Pb/p-Si Schottky Contacts. **Physica B**, 352: 312-317.
- AYDOĞAN, Ş., SAĞLAM, M., TÜRÜT, A. ve ONGANER, Y., 2005. The Effect on the Temperature on Current-Voltage Characteristics of Sn/Polypyrrole/n-Si Structures. **Synthetic Metals**, 150: 15-20.
- AZOROFF, L.V. ve BROPHY, J.J., 1963. **Electronic Processes in Materials**, McGraw-Hill, New York.
- BARDEEN, J., 1947. Surface States and Rectification at a Metal-Semiconductor Contact. **Phys. Rev.**, 71: 717-727.
- ve BRATTAIN, W.H., 1948. **Physical Rev.**, 74: 231.
- BETHE, H.A., 1942. Theory of The Boundry Layer of Crystal Rectifiers. **Mass. Inst. Techol. Radiat. Lap. Rep**, 43
- BOHLIN, K.H., 1986. Genaralized Norde Plot Including Determination of The Ideality Factor. **J. Appl. Phys.**, 3, 60: 1223-1224.
- BRAUN, K.F., 1874. **Physical Chemistry**, 153: 556.
- CARD, H.C. ve RHODERICK, E.H., 1971. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 4: 1589-1601.
- CHANDRA, M.M. ve PRASAD, M., 1983. **J. Solid State Phys.**, A: 77.
- CHATTOPADHYAY, P. ve DAW, A.N., 1986. On the Current Transport Mechanism in a Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) diode. **Solid State Elect.**, 29: 555-560.
- CHEUNG, S.K. ve CHEUNG, N.W., 1986. Extraction of Schotky Diode Parameters from *I-V* Characteristics. **Appl. Phys. Lett.**, 49 (2): 85-87.
- CIBILS, R.M. ve BUITRAGO, R.H., 1985. Forward *I-V* Plot for Nonideal Schottky Diodes with High Series Resistance. **J. Appl. Phys.**, 58: 1075-1077.

- CROWELL, C.R, SARACE, J.C. ve SZE, S.M., 1965. Surface State and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. **Trans. Metal. Soc. AIME**, 233: 478.
- ve SZE, S.M., 1966. Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers. **Solid State Elect.**, 9: 1035-1048.
- COWLEY A.M. ve SZE S.M., 1965. Surface State and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. **J. Appl. Phys.**, 36, 3212-3220.
- ÇETİNKARA H.A., 1996. **Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü**, (yayınlanmamış).
- SAĞLAM M., TÜRÜT A. ve YALÇIN N., 1999. The Effects of the Time – Dependent and Exposure Time to Air on Au/Epilayer n-Si Schottky Diodes. **Eur. J. Appl. Phy.**, 6: 89-94.
- TÜRÜT A., ZENGİN D.M. ve EREL Ş., 2003. The Energy Distribution of the Interface State Density of Pb/p-Si Schottky Contacts Exposed to Clean Room Air. **Appl. Sur. Sci.**, 207: 190-199.
- GOMILA G. ve RUBI M., 1997. Relation for the Nonequilibrium Population of the Interface States: Effects on the Bias Dependence of the Ideality Factor. **J. Appl. Phys.**, 81: 2674-2681.
- HAMDİ W.I., 1997. Analysis of Au-, Al-, and Sn/Si Semiconductor Devices with Thin Oxide Layer by Photocurrent Measurements. **Thin Solid Films**, 310: 177-183.
- HESLINGA, D.R., WEITERING, H.H., VAN DER WERF., KLAPWIJK, T.M. ve HIBMA, T., 1990. Atomic-Structure-Dependent Schottky Barrier at Apitaxial Pb/Si(111) Interfaces. **Phys. Rev. Lett.**, 64: 1589-1592.
- HORVATH, Z.J., ADAM, M., DUCSÓ, C.S., VAN TUYEN, V., BARSONY, I., GOMBI, E., MOSCA, R. ve MAKARO, Z., 1988. Electrical Characterization of Al/n-Si. **Solid State Electron**, 42: 221-228.
- HRICOVINI, K., LE LAY, G., KAHN, A., TALEB- IBRAHIMI, A. ve ONNET, J.E., 1992. **Appl.Surface Science**, 56-58: 259-263.
- KEFFOUS, A., SIAD, M., MAMA, S., BELKACEM, Y., LAKHDAR CHAOUCH, C., MENARI, H., DAHMANI, A. ve CHERGUI, W., 2003. Effect of Series Resistance on the Performance of High Resistivity Silicon Schottky Diode. **Appl. Surface Science**, 218: 336–342.

- LEE, T.C., FUNG, S., BELING, C.D. ve AU, H.L., 1992. A Systematic Approach to the Measurement of Ideality Factor, Series Resistance and Barrier Height for Schottky Diodes. **J. Appl. Phys.**, 72: 4739-4742.
- LIEN, C.D., SO, F.C.T. ve NICOLET M.A., 1984. An Improved Forward *I-V* Method for Nonideal Schottky Diodes with High Series Resistance. **IEEE Trans-Electron Devices**, 31: 1502-1053.
- MITRA, R.N., ROY, S.B., GHOSH K. ve DAW A.N., 1980. **Solid State Elect.**, 23: 793-795.
- MOTTRAM, J.D., NORTHROP, D.C., REED, C.M. ve THANAILAKIS, A., 1979. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 12: 773.
- NORDE, H. A., 1979. A Modified Forward *I-V* Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance, **J. Appl. Phys.**, 50: 5052-5053.
- ÖZDEMİR A.F., KÖKÇE, A. ve TÜRÜT, A., 2002. The Effects of the Time - Dependent and Exposure Time to Air on Au/n-GaAs Schottky Barrier Diodes. **Appl. Sur. Sci.**, 191: 188-195.
- RHODERICK, E.H. ve WILLIAMS, R.H., 1988. **Metal-Semiconductor Contacts**, Clarendon Pres., Oxford.
- RIDEOUT, V.L., 1978. A Review of The Theory, Technology and Application of Metal-Semiconductor Rectifiers. **Thin Solid Films**, 48: 261-266.
- SAĞLAM, M., AYYILDIZ, E., GÜMÜŞ, A., EFEOĞLU, H. ve TÜZEMEN, S., 1996. Series Resistance Calculation for the Metal-Insulator-Semiconductor Schottky Barrier Diodes. **Appl. Phys. A**, 62: 269-273.
- SATO, K. ve YASUMURA, Y., 1985. Study of Forward *I-V* Plot for Schottky Diodes with Series Resistance. **J. Appl. Phys.**, 58 (9): 3655-3657.
- SCHMITSDORF, R.F. ve MÖNCH, W., 1999. Influence of the Interface Structure on the Barrier Height of Homogeneous Pb/n-Si(111) Schottky Contacts., **Eur. Phys. J. B**, 7: 457-466.
- SZE, S.M., CROWELL, C.R. ve KHANG, D., 1964. Photoelectric Determination of Image Force Dielectric Constant for Hot Electrons in Schottky Barriers. **J. Appl. Phys.**, 35: 2534-2536.
- 1981. **Physics of Semiconductor Devices**, John-Wiley and Sons Inc., New York.

- SYZDLO, N. ve POIRIER R., 1973. Alkaline-Metals-Silicon Schottky Barriers. **J. Appl. Phys.**, 44: 1386-1387.
- THANAILAKIS, A., 1974. **Proc. Manchester Conf. Metal-Semiconductor Contacts**, p. 59. **Institute of Physics**, London.
- 1975. Contacts between Simple Metals and Atomically Clean Silicon. **J. Phys. C: Solid-State Phys.**, 8: 655-668.
- ve RASUL, A., 1976. **J. Phys. C: Solid-State Phys.**, 9: 337.
- TORREY, H.C. ve WHITMER C.A., 1948. **Crystal Rectifiers, Mc Graw Hill Inc.**, New York
- TURNER, M.J. ve RHODERICK, E.H., 1968. Metal-Silicon Schottky Barriers. **Solid-State Elect.**, 11: 291-300.
- TÜRÜT, A. ve SAĞLAM, M., 1992. Determination of the Density of Si-Metal Interface States and Excess Capacitance Caused by Them. **Physica B**, 179: 285-294.
- YALÇIN, N. ve SAĞLAM, M., 1992. Parameter Extraction from Non-ideal C-V Characteristics of a Schottky Diode With and Without Interfacial Layer. **Solid State Electron**, 35: 835-841.
- ULAŞ M., 1989. **Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü**, (yayınlanmamış).
- VAN OTTERLOO, J.D. ve GROOT, J.G., 1976. Relation between Interface States and Temperature Behavior of the Barrier Height of Silver Contact on Clean Cleaved n-Type Silicon. **Surf. Sci.**, 57: 93-108.
- ve GERRITSEN, L.J., 1978. **J. Appl. Phys.**, 49: 723-729.
- 1981. Schottky Barriers on Clean-Cleaved Silicon. **Surface Sci. Lett.**, 104: 205-209.
- VARMA, R.R., MCKINLEY, A., WILLIAMS, R.H. ve HIGGINBOTHAM, I.G., 1977. Interface State and The Nature of Metal-Silicon Contacts. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, 10: 171-174.
- WEITERING, H.H., HIBMA, T., HESLINGA, D.R. ve KLAPWIJK, T.M., 1990. **Surface Science**, 251-252: 616-620.
- WERNER, J.H. ve RAU, U., 1994. **Springer Series in Electronics and Photonics. Vol. 32, Edited by Luy J.F. and Russer P.**, Berlin.



- WU, C.Y., 1980. Interfacial Layer Theory of the Schottky Diodes. **J. Appl. Phys.**, 51: 3786-3789.
- JAIN, S.C. ve RADHAKRISNA S., 1985. **Physics of Semiconductor Devices World Scientific.**, Madras
- ZIEL, A., 1968. **Solid-State Physical. Electronics, Prentice-Hall Inc.**, New Jersey.

## ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Hatay-Kırıkhan'da doğdum. İlköğrenimimi Cemal Gürsel ilkokulunda, orta ve lise öğrenimini Gazi lisesinde tamamladım. 1992 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik bölümüne girdim. 1997 yılında mezun olarak Fizik lisans diplomasını aldım.

Mart 1998'de Milli Eğitim Bakanlığına bağlı olarak Hatay'da öğretmenlik görevine başladım. Mart 1999 -Temmuz 2000 arasında askerlik hizmetini yaptım.

Eylül 2004'de Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansa başladım ve Temmuz-2006'da mezun olarak, Fizik Bilim Dalı'nda "Bilim Uzmanı" ünvanını aldım. Halen Milli Eğitim Bakanlığı'na bağlı olarak öğretmenlik görevini sürdürmekteyim.