



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

METAL/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY DİYOT YAPILARINDA
SERİ DİRENÇ ETKİSİ

GÖKHAN ÇEBİŞLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Antakya/HATAY

EYLÜL-2007

**MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAL/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY DİYOT YAPILARINDA
SERİ DİRENÇ ETKİSİ**

**GÖKHAN ÇEBİŞLİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Doç. Dr. Hüsnü Salih GÜDER danışmalığında hazırlanan bu tez 14/09/2007 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan Üye Üye
Doç.Dr. H. S. GÜDER Yrd.Doç.Dr. H. Ali ÇETİNKARA Yrd.Doç.Dr. Oğuz KILIÇOĞLU

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

Kod No:

Prof.Dr. Necat AĞCA
Enstitü Müdürü

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.

ÖZET

METAL/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY DİYOT YAPILARINDA SERİ DİRENÇ ETKİSİ

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 Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn 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.

Nötral bölge direncinin diyotların akım-gerilim karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemek için altı farklı metotla idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Verilerin incelenmesinden, tüm diyotlar için engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin birbiri ile iyi bir uyum içinde olduğu, ancak üçüncü, dördüncü ve beşinci metotlarda idealite faktörü değerlerinin diğerlerine göre oldukça düşük ya da yüksek olduğu görülmüştür.

2007, 67 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç.

ABSTRACT

SERIES RESISTANCE EFFECTS 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 Fe, Ni, Cd, Pb, Bi and Sn 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.

In order to investigate the effects of the neutral region series resistance on the current-voltage characteristics of the diodes, ideality factor, barrier height and series resistance values have been calculated using six different methods. From the investigation of the data, barrier heights and series resistance values have been found to be in agreement for all the diodes, but the ideality factors evaluated by the third, fourth and fifth methods are seen to have either very low or high values than the others.

2007, 67 Pages

Key Words: Schottky diode, ideality factor, barrier height, series resistance.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	5
3.1. Materyal.....	5
3.1.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	5
3.1.1.1. N-Tipi Yarıiletken/Metal Doğrultucu Kontak Oluşumu.....	6
3.1.1.2. N-tipi Yarıiletken/Metal Omik Kontak Oluşumu.....	8
3.1.1.3. Metal (Omik)/N-Tipi Yarıiletken/Metal (Doğrultucu) Yapısı.....	10
3.1.2. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon.....	11
3.1.2.1. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletim Mekanizmaları.....	11
3.1.2.2. Termiyonik Emisyon Teorisi.....	12
3.1.3. Schottky Diyot Yapılarında İdealden Sapmalar.....	16
3.1.3.1. Arayüzey Tabakası Etkisi.....	16
3.1.3.2. Seri Direnç Etkisi.....	17
3.2. Yöntem.....	32
3.2.1. Kristallerin Hazırlanması ve Temizlenmesi.....	32
3.2.2. Schottky Diyotların Hazırlanması.....	33
3.2.3. Akım-Gerilim Ölçümleri.....	34
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	64
KAYNAKLAR.....	65
TEŞEKKÜR.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	67

ÖZET

METAL/*n*-Si/Au-Sb SCHOTTKY DİYOT YAPILARINDA SERİ DİRENÇ ETKİSİ

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 Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn 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.

Nötral bölge direncinin diyotların akım-gerilim karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemek için altı farklı metotla idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Verilerin incelenmesinden, tüm diyotlar için engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin birbiri ile iyi bir uyum içinde olduğu, ancak üçüncü, dördüncü ve beşinci metotlarda idealite faktörü değerlerinin diğerlerine göre oldukça düşük ya da yüksek olduğu görülmüştür.

2007, 67 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç.

ABSTRACT

SERIES RESISTANCE EFFECTS 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 Fe, Ni, Cd, Pb, Bi and Sn 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.

In order to investigate the effects of the neutral region series resistance on the current-voltage characteristics of the diodes, ideality factor, barrier height and series resistance values have been calculated using six different methods. From the investigation of the data, barrier heights and series resistance values have been found to be in agreement for all the diodes, but the ideality factors evaluated by the third, fourth and fifth methods are seen to have either very low or high values than the others.

2007, 67 Pages

Key Words: Schottky diode, ideality factor, barrier height, series resistance.

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 Fe/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri.....	41
Çizelge 4.2 Ni/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri.....	41
Çizelge 4.3 Cd/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri.....	42
Çizelge 4.4 Pb/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri.....	42
Çizelge 4.5 Bi/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri.....	43
Çizelge 4.6 Sn/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri.....	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı.....	7
Şekil 3.2. Metal/ n -tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı.....	9
Şekil 3.3. Metal/ n -tipi yarıiletken Schottky diyotun ısısal dengede enerji-bant diyagramı.....	10
Şekil 3.4. Düz beslem altında Schottky engelinde iletim mekanizmaları.....	11
Şekil 3.5. İmaj-kuvvet etkisi sebebiyle engel yüksekliğinin azalması.....	15
Şekil 3.6. Omik kontak yapımında kullanılan tavlama fırını.....	33
Şekil 3.7. Akım-gerilim ölçümleri sisteminin devre şeması.....	34
Şekil 4.1. Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn/ n -Si Schottky diyotların ters ve düz beslem $\ln(I)$ - V grafikleri.....	36
Şekil 4.2. Fe/ n -Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	38
Şekil 4.3. Ni/ n -Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	38
Şekil 4.4. Cd/ n -Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	39
Şekil 4.5. Pb/ n -Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	39
Şekil 4.6. Bi/ n -Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	40
Şekil 4.7. Sn/ n -Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	40

		<u>Sayfa</u>
Şekil 4.8.	<i>Fe/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)$ - (I) grafiği.....	44
Şekil 4.9.	<i>Ni/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)$ - (I) grafiği.....	44
Şekil 4.10.	<i>Cd/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)$ - (I) grafiği.....	45
Şekil 4.11.	<i>Pb/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)$ - (I) grafiği.....	45
Şekil 4.12.	<i>Bi/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)$ - (I) grafiği.....	46
Şekil 4.13.	<i>Sn/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)$ - (I) grafiği.....	46
Şekil 4.14.	<i>Fe/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	48
Şekil 4.15.	<i>Ni/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	48
Şekil 4.16.	<i>Cd/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	49
Şekil 4.17.	<i>Pb/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	49
Şekil 4.18.	<i>Bi/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	50
Şekil 4.19.	<i>Sn/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	50
Şekil 4.20.	<i>Fe/n</i> -Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri	51

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.21. Ni/ <i>n</i> -Si Schottky diyotun için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri	52
Şekil 4.22. Cd/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri	53
Şekil 4.23. Pb/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri	54
Şekil 4.24. Bi/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri	55
Şekil 4.25. Sn/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri	56
Şekil 4.26. Fe/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	57
Şekil 4.27. Ni/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	57
Şekil 4.28. Cd/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	58
Şekil 4.29. Pb/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	58
Şekil 4.30. Bi/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	59
Şekil 4.31. Sn/ <i>n</i> -Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ - (V) grafiği.....	59

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.32. Fe/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin <i>I-V</i> grafiği.....	60
Şekil 4.33. Ni/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin <i>I-V</i> grafiği.....	60
Şekil 4.34. Cd/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin <i>I-V</i> grafiği.....	61
Şekil 4.35. Pb/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin <i>I-V</i> grafiği.....	61
Şekil 4.36. Bi/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin <i>I-V</i> grafiği.....	62
Şekil 4.37. Sn/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin <i>I-V</i> grafiği.....	62

1. GİRİŞ

Metal ve yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerinden faydalanma ve uygun kontaklar yaparak elektronik devrelerde kullanma için ilk ciddi çalışma Braun tarafından 1874'lü yıllarda yapılmıştır. Başlangıçta radyo dedektörü, daha sonraları da radar dedektörü ve mikrodalga diyotu olarak geliştirilen metal-yarıiletken yapılar günümüzde de başarıyla kullanılmaktadırlar (Braun, 1874; Rhoderick ve Williams, 1988).

Braun 1895'li yıllarda Marconi'nin telekomünikasyon deneylerini göz önüne alarak, nokta kontak metal-yarıiletken doğrultucularını dedektör olarak kullanmıştır.

1906'da Pickard, silisyum kullanarak nokta kontak dedektörün patentini aldı ve 1907 yılında Pierce, diyotların doğrultucu karakteristiğini inceleyerek yayınladı. Bu sırada kuantum mekaniği geliştirdi ve 1932'de Wilson engeldeki elektronların tünellemesini kuantum mekaniğine göre açıklamaya çalıştı, ancak bu yaklaşımın akım yönünü yanlış tahmin ettiği görüldü (Rhoderick ve Williams, 1988). 1930'larda ilk kabul edilebilir teori Walter Schottky tarafından geliştirildi (Schottky, 1938).

İkinci Dünya Savaşı sırasında, mikrodalga radarların gelişmesiyle nokta kontak diyotları tekrar önem kazandı. Nokta kontak diyotları, en çok frekans dönüştürücüsü ve mikrodalga dedektör diyotu olarak kullanıldı. Daha sonra yükseltmenin düşük olması nedeniyle metal-yarıiletken doğrultucular yerini vakum tüplerine terk etmişlerdir. Uzun müddet sadece mikrodalga ölçümlerinde kullanılmışlardır.

Metal-yarıiletken kontaklar üzerinde yapılan araştırmalar 1960'lı dönemlerde daha büyük bir ivme kazandı. 1964'te Baird, Schottky engelini silisyum transistörle birleştirerek, Schottky engel kapılı metal-yarıiletken alan etkili transistörü (MESFET) buldu (Büget ve Wright, 1967; Rhoderick ve Williams, 1988).

Genellikle metal-yarıiletken kontakların teorisi, teknolojik gelişmesinden çok sonra anlaşılabilmiştir. Bu teorik gelişmelerin birçoğu metal-vakum sistemleriyle çalışan araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Schottky'nin metal-vakum sistemlerinde uygulanan elektrik alandan dolayı imaj-kuvvet etkisiyle engel alçalması olayı, bu uygulamadan yaklaşık elli yıl sonra Sze ve arkadaşları tarafından metal-yarıiletken yapılarda doğrulanmıştır (Ziel, 1968).

Schottky ve Spenke, enerji engelinden taşıyıcıların difüzyonuna dayanan doğrultma teorisini geliştirdiler. Wilson metal-yarıiletken diyotlar için kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirmiş ve doğrultma olayı için ters polariteyi açıklamıştır. 1940'da Schottky ve Bethe'nin çalışması metal-vakum sistemlerindeki iletkenlikle, metal-yarıiletken diyotlardaki iletkenlik arasında benzerlikleri ortaya koymuştur. Daha sonraki çalışmalarda Crowell ve Sze (1966) Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termiyonik emisyon teorilerini birleştirerek tek bir teori halinde ortaya koydular. İdeal Schottky diyotlarda akım iletim olayında termiyonik emisyon ile difüzyon teorisi ve iki teorinin kombinasyonu ile elde edilen termiyonik emisyon-difüzyon teorileri önemli yer tutar (Shuer, 1990)

Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda kimyasal olarak hazırlanan yarıiletken yüzeyleri kaçınılmaz olarak ince bir oksit tabakasıyla kaplanır. Bu tabaka yaklaşık 5-10 Å kalınlığındadır. Bu oksit kalınlığı, içinden elektronların tünelleyebileceği kadar incedir. Yarıiletkenin yüzeyinde, istenilmediği halde, oluşan bu doğal (native) oksit tabakası Schottky diyotların $I-V$ ve $C-V$ karakteristiklerinin ideal olmamasına sebep olur. Özellikle engel yüksekliğinin anlamlı bir şekilde beklenilenden farklı çıkmasına neden olur. Yine, bu doğal oksit tabakasından dolayı Schottky diyot karakteristikleri zamana bağlı olarak da (yaşlanma) değişim gösterebilir. Dolayısıyla, yarıiletken yüzeyleri üzerinde böyle doğal oksit filmlerinin varlığı devre elemanı fabrikasyon sürecinin kalite ve kontrol edilebilirliğini azaltır ve yarıiletken devre elemanlarının performans ve güvenilirliğini ciddi şekilde etkiler. Normal laboratuvar çalışma şartlarında yarıiletken yüzeyinde oluşan bu doğal oksit tabakasının karakteristikler üzerine etkisi birçok araştırmacı tarafından deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır.

Genel olarak ideal olmayan Schottky kontaklarda metal-yarıiletken arası her zaman ideal şartlarda olmaz. Bu sebeple karakteristiklerde idealite faktörü adı verilen bir çarpan ortaya çıkar. Akım-gerilim karakteristiklerinde ikinci bir etki de seri direnç etkisidir. Bu etki ideal akım-gerilim denklemlerinde değişikliklerin ortaya çıkmasına sebep olur (Norde, 1979). Metal-yarıiletken yapılarda kontak bölgesinin davranışlarını incelemek suretiyle yapının özellikleri hakkında bilgiler elde etmek mümkündür.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bir Schottky diyot yapısı metal ile yarıiletkenin kontağından oluşur. Metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları birbirinden farklı olduğu için, kontakta önce enerji-bant diyagramları farklı değerlere karşı gelirken, kontakta sonra, bir yük değişimini takiben, seviyeler karşı karşıya gelir. Bu sırada, yarıiletken gövdenin metale yakın tarafındaki enerji bantları bükülür, uzak tarafındakiler ise değişmeden kalır. Enerji bantlarının büküldüğü bölge arınma (deplasyon) bölgesi olarak adlandırılırken, bantların değişmeden kaldığı bölge nötral bölge olarak adlandırılır (Rhoderick ve Williams, 1988).

Metal-yarıiletken diyot yapılarında akım-gerilim karakteristiğini etkileyen önemli etkenlerden biri yarıiletken gövdenin nötral bölge direncidir. Bu direnç yüksek gerilim değerlerinde etkilidir ve seri direnç olarak adlandırılır. Böylece, bir metal-yarıiletken Schottky diyot'un direnci kontak direnci ile seri direncin kombinasyonu şeklinde düşünülür. Seri direnç diyotta geçen akımı sınırlayarak doyuma ulaşmasına sebep olur ve yüksek seri dirençli diyotlarda akım değeri çok küçük olmaktadır. Bu durum, üretilen diyotların yüksek akım gerektiren uygulamalarda kullanılmasını engeller.

Metal-yarıiletken Schottky diyotların akım-gerilim karakteristiği üzerine seri direncin etkileri son elli (50) yıldır teorik ve deneysel olarak çalışılmaktadır. 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. Bu 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 kullanılabilecek olan, sabit a değerleri için farklı minimum noktalardan geçen Norde tipi bir $F_a(V)$ fonksiyonu tanımlamıştır. Keyfi a değerleri için hesaplanan, fonksiyonun minimum noktaları yardımıyla çizilen $I(a)-a/\beta$ grafiğinin eğiminden seri direnç ve $I(a)$ eksenini kestiği noktadan da n idealite faktörü bulunur.

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 farklı minimum noktaların bulunmasına dayanmaktadır.

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.

Cheung ve Cheung (1986), akım yoğunluğunun lineer fonksiyonları yardımıyla çizilen grafiklerden diyot parametrelerinin çıkarılmasını sağlayan, farklı bir metod ileri sürmüşlerdir. Yalnızca akım-gerilim ölçümlerine dayanan bu metodun temel avantajı, fonksiyonların minimum değerlerinin bulunmasını gerektirmemesidir.

Bohlin (1986), keyfi γ sabitleri için farklı minimum değerlerden geçen $F(V, \gamma) = (1/\gamma - 1/n)V + \phi_{Bn} + IR/n$ şeklinde bir fonksiyon kullanmıştır. Engel yüksekliği ve seri direnç değerleri iki farklı γ sabitinin değerlerine bağlı olarak bulunan $F(V, \gamma)$ yardımcı fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır.

Ancak, bu metodların tümünde $F(V)$ fonksiyonunun 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, bu 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 yöntemiyle tespit ederek, seri direnç ve idealite faktörü değerlerini buldular.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Bu bölümde Schottky engel yapısının oluşumuyla ilgili genel teoriler, metal-yarıiletken Schottky diyotlarda akım iletimi teorileri, arayüzey tabakası ve seri direnç etkileri anlatılacaktır.

3.1.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Metal, yarıiletken ve yalıtkan maddelerin iletkenlik özelliklerinin incelenmesi, bu maddelere uygun kontakların yapılması ile mümkündür (Büget ve Wright, 1967). Kontak, genel anlamda iki maddenin en az dirençle (idealde sıfır) birbirine temas etmesi şeklinde düşünülür. Temas eden yüzeylerin temiz, pürüzsüz ve parlak olması ile ideal bir kontak elde edilir. İki madde kontak durumuna getirildiğinde aralarında yeni bir yük dağılımı olur. Böyle bir sistemde, ısısız bir dengenin sonucu olarak her iki maddenin Fermi enerji seviyeleri aynı hizaya gelir. Bu durum iki metal arasında olduğu gibi, metal ile n -tipi veya p -tipi yarıiletkenler arasındaki kontaklarda da geçerlidir.

Bir metal ile bir yarıiletken, aralarında başka bir madde olmaksızın kontak duruma getirildiklerinde meydana gelen yeni sistem metal-yarıiletken yapı olarak isimlendirilir. Metal-yarıiletken kontaklar, her iki maddenin iş fonksiyonuna bağlı olarak;

- a) Taşıyıcı hareketinin bir yönde diğerine göre çok büyük olduğu, doğrultucu kontak ve
- b) Taşıyıcıların bir maddeden diğer maddeye kolayca geçebildiği, omik kontak olmak üzere ikiye ayrılır (Ziel, 1968).

Omik ve doğrultucu kontakın yük ve potansiyel dağılımlarına bağlı fiziksel özellikleri ve akım iletim olayı katihal elektroniğinde önemli yer tutmaktadır. Bir katının özelliklerini belirleyen parametreleri şöyle tanımlayabiliriz.

Fermi Enerji Seviyesi (E_F): İletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına bağlı olarak yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviyeye denir.

İş Fonksiyonu (ϕ_s): Metal veya yarıiletkenin Fermi seviyesinden bir elektronu sıfır kinetik enerji ile yüzeye çıkarmak için gerekli olan enerji miktarına denir.

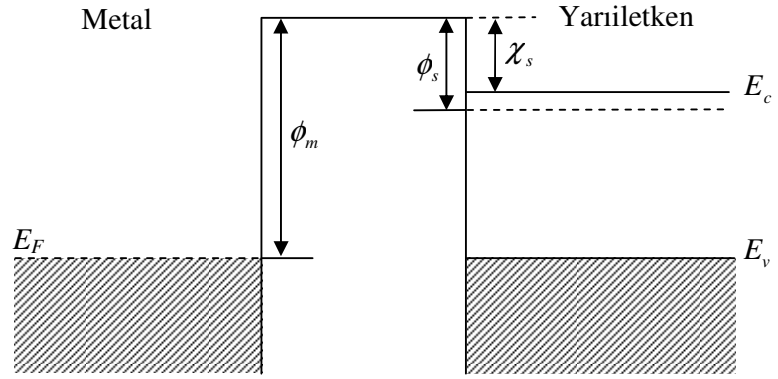
Yarıiletkenin Elektron Yakınlığı (χ_s): İletkenlik bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkına denir. Vakum seviyesi, metalin dışında hareketsiz duran bir elektronun enerjisini temsil eder (Ziel, 1968).

3.1.1.1. N-Tipi Yarıiletken/Metal Doğrultucu Kontak Oluşumu

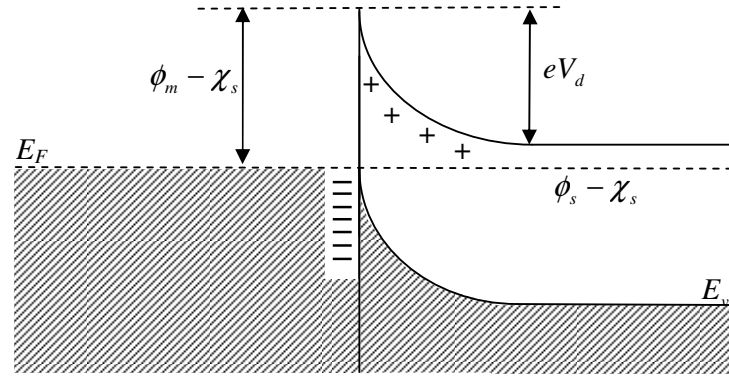
Akım taşıyıcılarını (boşluk ve elektron) bir doğrultuda diğerine göre daha kolay geçiren kontaklara doğrultucu kontak denir. n-tipi yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonuna bağlı olarak ($\phi_m > \phi_s$) ise metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak oluşur. Burada ϕ_m metalin iş fonksiyonu, ϕ_s ise yarıiletkenin iş fonksiyonudur. Oluşan bu kantağa Schottky kontak da denir.

Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\phi_m - \phi_s$) kadar yukarıdadır. Kontakta önceki enerji-bant diyagramı Şekil 3.1a'daki gibidir. Kontak yapıldıktan sonra denge hali oluşana kadar metal ile yarıiletken arasında yük alışverişi olur. Yarıiletkenin yüzey tabakasından elektronlar, geride iyonize olmuş donörler bırakarak metalin içine doğru geçerler. Bu yük alışverişi Fermi seviyeleri aynı oluncaya kadar devam eder (Ziel, 1968; Rhoderick ve Williams, 1988).

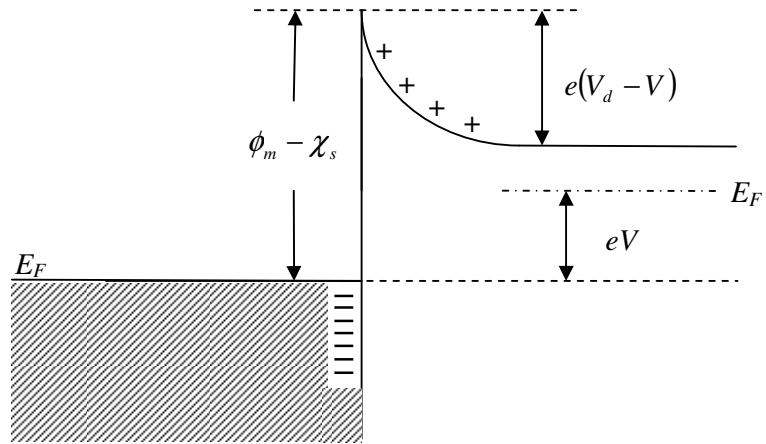
Yarıiletkenin Fermi seviyesi, aradaki enerji farkı kadar alçalır ve metalin Fermi seviyesiyle aynı düzeye gelir. Yarıiletken tarafındaki uzay yükleriyle (yarıiletkenin yüzey tabakasında kalan iyonize olmuş donörler) metal tarafındaki yüzey yüklerinin oluşturduğu dipol tabakası kontakta bir potansiyel engelinin oluşmasına sebep olur. Metal/n-tipi yarıiletkenin kontakta sonraki enerji bant diyagramı Şekil 3.1b'deki gibidir. Bu potansiyel engelinin yarıiletken tarafındaki değeri: $eV_d = \phi_m - \phi_s$ kadardır. Burada metal yüzeyine göre ölçülen V_d potansiyeline difüzyon potansiyeli denir. Potansiyel engelinin metal tarafındaki değeri ise $e\phi_{Bn} = \phi_m - \chi_s$ 'dir. Burada χ_s yarıiletkenin elektron yakınlığıdır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramı:
 a) Kontakтан önceki, b) kontakтан sonraki ve c) $V < 0$ olması durumları
 (Rhoderick ve Williams, 1988)

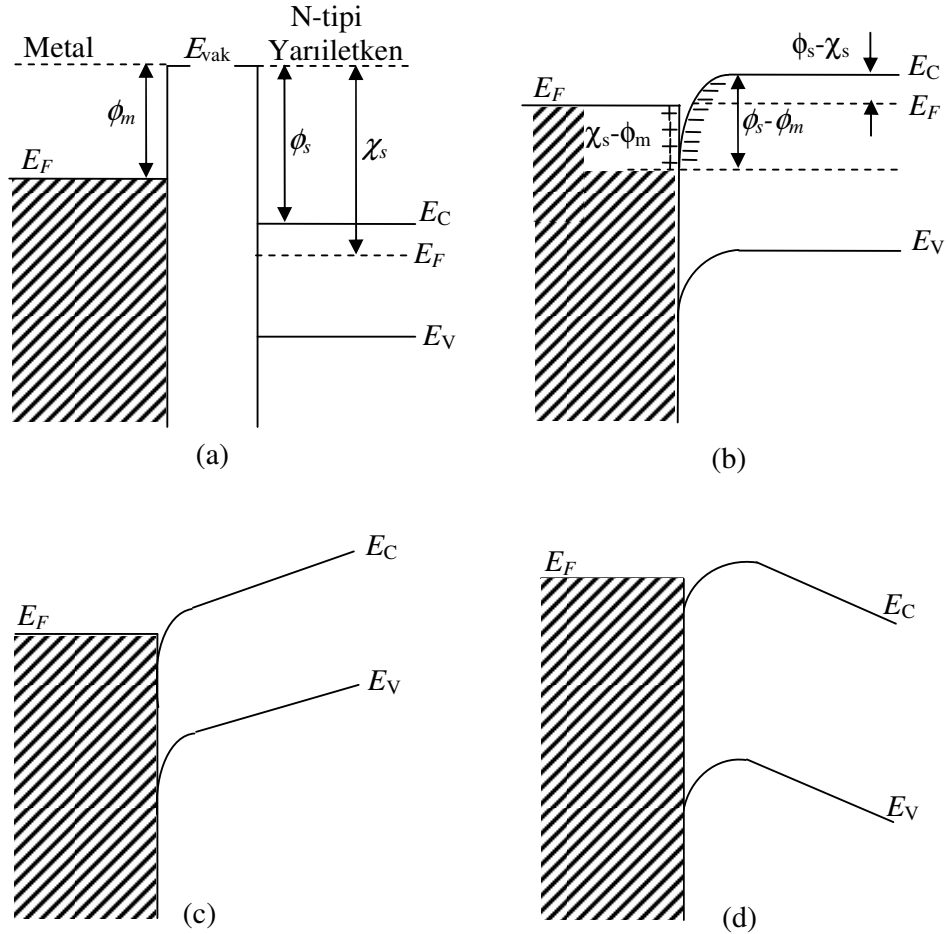
Potansiyel engeli, metal tarafında dik olarak yükselirken yarıiletken tarafında d genişliğine sahiptir. Böylece yarıiletken tarafında elektronlardan arınmış bir bölge oluşur. Bu d genişliğindeki bölgeye engel bölgesi (tabakası), uzay yükü bölgesi, geçiş bölgesi veya arınma bölgesi denir. Pozitif ve negatif yükler arasında kalan bu bölge kapasite özelliğine sahiptir ve Schottky kapasitesi veya kontak kapasitesi olarak adlandırılır. Schottky kapasitesi bu tabakanın kalınlığına, tabaka kalınlığı da iyonize olmuş donör yoğunluğuna ve dolayısıyla difüzyon potansiyelinin değerine bağlıdır (Rhoderick ve Williams, 1988). Isısal uyarılma sebebiyle yeteri kadar enerjiye sahip olan bazı elektronlar, potansiyel engelini aşıp yarıiletkenden metale ve bazıları da metalden yarıiletkene geçeceğinden, eşit ve zıt yönlü I_0 akımları oluşur. Şekil 3.1c'deki gibi yarıiletkene negatif bir potansiyel ($-V$) uygulandığında, metalden yarıiletkene giden elektronlar için engel değişmeyeceğinden, bu elektronların oluşturacağı akım da değişmeyecektir. Buna karşın iletkenlik bandındaki enerji seviyeleri eV kadar yükseldiğinden, yarıiletkenden metale doğru giden elektronlar için potansiyel engeli eV kadar alçalmış olur. Böylece, metalden yarıiletkene (yarıiletkenden metale geçen elektronlar için) olan akım geçişinde $\exp[eV/kT]$ çarpanı kadar bir değişme olur. Sonuç olarak, meydana gelen net akım $I = I_0[\exp(eV/kT) - 1]$ denklemiyle verilir. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarında yarıiletken tarafında uygulanan gerilim $V > 0$ ise kontak ters, $V < 0$ ise kontak doğru beslemedir.

3.1.1.2. N-Tipi Yarıiletken/Metal Omik Kontak Oluşumu

Omik kontak, elektronların iki doğrultuda da kolayca hareket edebildiği kontaklar olarak bilinir. Metal/n- tipi yarıiletken kontaklarda, yarıiletkenin iş fonksiyonu, metalin iş fonksiyonundan büyük ($\phi_s > \phi_m$) ise, oluşan kontağa omik kontak denir (Ziel, 1968; Rhoderick ve Williams, 1988). Kontakta önceki enerji-bant diyagramı Şekil 3.2a'daki gibidir. Metalin Fermi seviyesi, yarıiletkenin Fermi seviyesinden ($\phi_s - \phi_m$) kadar yukarıdadır. Kontakta sonra elektronlar metalden yarıiletkenin içine geride pozitif yüzey yükleri bırakarak akarlar. Dolayısıyla kontağın yarıiletken tarafında bir negatif yüzey yüküne sebep olurlar. Yük alışverişi bittikten sonra, yarıiletken gövdedeki Fermi

seviyesi ($\phi_s - \phi_m$) kadar yer değiştirir. Isısal dengeden sonra, kontakın her iki tarafında meydana gelen yüzey yüklerinden dolayı bir dipol tabakası oluşur. Böyle bir kontakta, taşıyıcılar metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale serbestçe geçerler. Bir V voltajı uygulanırsa bu potansiyel farkı doğrultucu kontakta olduğu gibi sadece kontak bölgesinde değil bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Kontak sonrası enerji bant diyagramı Şekil 3.2b'de görülmektedir (Rhoderick ve Williams, 1988; Kelvey, 1982).

Yarıiletkene pozitif ve metale negatif gerilim uygulandığında (Şekil-3.2c ve 3.2d), metaldeki elektronlar yarıiletken tarafına kolay bir şekilde geçerler ve bundan dolayı omik kontaklara enjeksiyon kontaktarı da denir (Shuer, 1990).

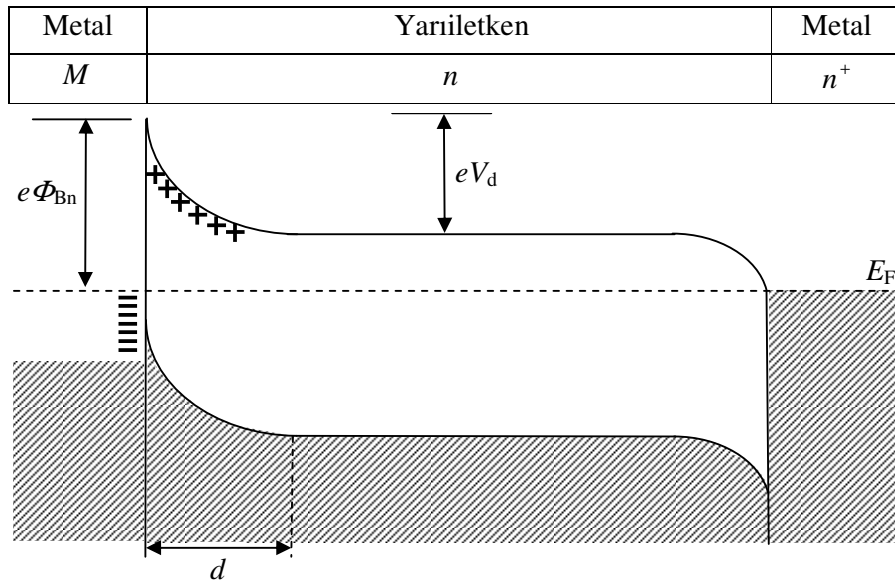


Şekil 3.2 Metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diyagramı: a) kontak öncesi, b) kontak sonrası ısısal dengede, c) $V < 0$ ve d) $V > 0$ durumunda (Rhoderick ve Williams, 1988)

Pratikte omik kontak elde edebilmek için n-tipi yarıiletkenin yüzeyine buharlaştırılan metal yarıiletkenle alaşım haline getirilir. Böylece, yarıiletkenin yüzeyinde bir n^+ tabakası oluşur. Bu tabaka yarıiletken gövdeye göre elektron bakımından daha zengindir.

3.1.1.3. Metal (Omik)/N-Tipi Yarıiletken/Metal (Doğrultucu) Yapısı

Metal/n-tipi yarıiletken/metal (n^+nM) yapısı; n-tipi yarıiletkenin bir yüzeyine elektron bakımından çok zengin n^+n omik kontağı ile diğer yüzeyine uygulanan nM doğrultucu kontağından ibarettir. Isısal dengede böyle bir yapının enerji-bant diyagramı Şekil 3.3'de görülmektedir. n^+ omik kontak tarafı $V < 0$ olacak şekilde beslendiğinde, yapı düz beslemde olur. n^+ tarafı $V > 0$ olacak şekilde beslendiğinde ise yapı ters beslemde olur. n^+nM yapısı diyot özelliğine sahip bir yapıdır. Böyle bir yapı kısaca yarıiletken diyot olarak adlandırılır (Rhoderick ve Williams, 1988).



Şekil 3.3. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotun ısısal dengede enerji-bant diyagramı

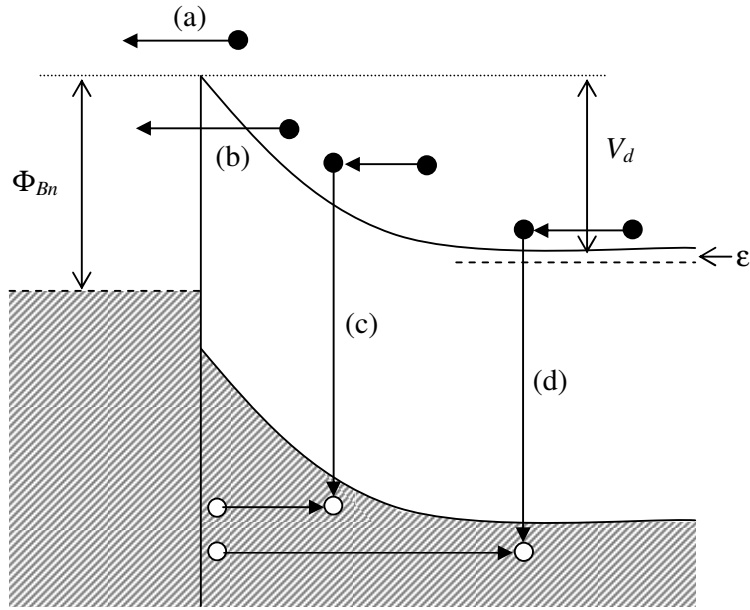
3.1.2. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon

3.1.2.1. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Akım İletim Mekanizmaları

Bu bölümde Schottky engellerinin iletim özelliklerini tanımlayan iletim mekanizmaları incelenecektir. Bu bölüm engelin, Kesim 3.1'de bahsedildiği gibi kurulduğunu kabul eder ve $I(V)$ bağıntılarını etkileyen faktörler hariç, bu engelin yüksekliğini tanımlayan faktörler hakkında hiçbir şey söylemez. Şekil 3.4'de düz beslem altında bir metal yarıiletken eklem boyunca elektronların taşınabileceği çeşitli yollar n -tipi bir yarıiletken için şematik olarak gösterilmiştir:

- Elektronların, yarıiletkendeki engelin üstünden aşarak metalin içine yayınlanmaları,
- Engelin bir tarafından diğer tarafına kuantum mekaniksel tünelleme,
- Uzay yükü bölgesinde rekombinasyon,
- Nötr bölgede rekombinasyon.

(a) durumunun çok önemli olduğu Schottky engel diyotları yapmak mümkündür. Böyle diyotlar genellikle hemen hemen ideal olarak görülürler. (b), (c), ve (d) işlemleri ise ideal durumdan uzaklaşmaya sebep olur.



Şekil 3.4. Düz beslem altında Schottky engelinde akım iletim mekanizmaları

3.1.2.2. Termiyonik Emisyon Teorisi

Termiyonik emisyon, taşıyıcıların sıcak bir yüzeyden salınması anlamına gelir. Metal yarıiletken doğrultucu kontaklarda bu olay, metal ya da yarıiletken tarafındaki taşıyıcıların potansiyel engelini ısısal enerjileri sebebiyle aşması olarak tanımlanır. Bu olay metal p-tipi yarıiletken yapılarda boşluklar tarafından sağlanır.

Bethe'nin termiyonik emisyon teorisi aşağıdaki kabuller altında türetilmiştir:

- i. Engel yüksekliği $q\phi_{Bn}$, kT 'den çok büyüktür,
- ii. Düzlemde emisyonu oluşturan ısısal denge kurulur,
- iii. Net akım hareketi bu dengeden etkilenmez.

Bu yaklaşımlara göre akım hareketi sadece engel yüksekliğine bağlıdır.

n^+nM yarıiletken diyot yapısının n^+ tarafı (omik) negatif olacak şekilde beslendiğinde, diyot ters beslemde olur ve n^+ tarafında yarıiletken gövdeye göre elektron yoğunluğu daha az olduğundan n^+ tarafından yapıya taşıyıcı giremez. Bu sebeple, ters beslem akımı sadece pozitif beslenen doğrultucu kontak (metal tarafından) yapıya giren boşluklar ile sağlanır.

Diyotun metal tarafı uygulanan gerilimden bağımsızdır. Bundan dolayı, ısısal enerjileri nedeniyle metal tarafında engeli aşan elektronların oluşturduğu bu akım yoğunluğu J_0 termiyonik emisyon akım yoğunluğudur.

Elektronların x doğrultusundaki hız bileşeni V_x olarak alınırsa (x yönü kontak yüzeyine diktir), hızları V_x ile $V_x + \Delta V_x$ arasında olan elektronların yoğunluğu,

$$\Delta P_x = N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{-m_n^* V_x^2}{2kT} \right) \Delta V_x \quad (3.1)$$

ifadesiyle verilir. Burada N_d donör yoğunluğu, m_n^* yarıiletkendeki elektronların etkin kütlesi, k Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. Toplam akım yoğunluğu

$$J_0 = \int_{V_{0,x}}^{\infty} e V_x dP \quad (3.2)$$

olarak yazılır. Bu ifade $V_{0,x}$ ile ∞ arasında integre edilirse,

$$\begin{aligned} J_0 &= eN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \int_{V_{0,x}}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* V_x^2}{2kT} \right) dV_x \\ &= eN_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{eV_d}{kT} \right) V_{0,x} = \left(\frac{2eV_d}{m_n^*} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

bulunur. Burada $V_{0,x}$ taşıyıcıların yüzeyi terk etmesi (eV_d engelini aşması) için gerekli olan eşik hızıdır. Ters beslem durumunda metalden yarıiletkene geçen boşluklara sağlanan J_0 akımı uygulanan gerilimden bağımsız olduğundan (Schottky engeli hariç) potansiyel engeli ile $V_{0,x}$ hızı arasındaki bağıntı,

$$\frac{m_n^* V_{0,x}^2}{2} \geq eV_d \quad (3.4)$$

ile verilir. Donor yoğunluğu ise,

$$N_d = N_c \exp\left(-\frac{E_f}{kT} \right) = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_f}{kT} \right) \quad (3.5)$$

olur. Denklem (3.4) ve (3.5) kullanılarak, (3.3) denkleminde akım yoğunluğu

$$J_0 = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{eV_d + E_f}{kT} \right) \quad (3.6)$$

şeklinde yazılabilir. Engel yüksekliğinin $e\phi_{Bn} = eV_d + E_f$ olarak verilebileceğini dikkate alırsak, yarıiletken metale olan akım yoğunluğu için $J_0 = J_{s \rightarrow m}$ alınabilir. Böylece, yarıiletken metale olan akım yoğunluğu

$$J_{s \rightarrow m} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.7)$$

şeklinde elde edilir. Burada R_n^* Richardson sabiti olup, n-tipi silisyum kristali için

$$R_n^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} = 112 \text{ A/cm}^2 \text{K}^2 \quad (3.8)$$

olarak verilmektedir. Kontak düz beslemde olduğu zaman engel yüksekliği azalacağından akım yoğunluğu $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar artar ve

$$J_{s \rightarrow m} = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.9)$$

şeklini alır. Isısal denge durumunda ($V = 0$), metalden yarıiletkeneye doğru olan akım yoğunluğu yarıiletkenden metale doğru olan akım yoğunluğuna eşittir ve böylece toplam akım yoğunluğu

$$J_n = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.10)$$

olur. Burada

$$J_0 = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.11)$$

doyma akım yoğunluğudur. Böylece toplam akım yoğunluğu yeniden

$$J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.12)$$

olarak yazılır. (3.11) denkleminde verilen doyma akım yoğunluğu, bu ifadeye göre

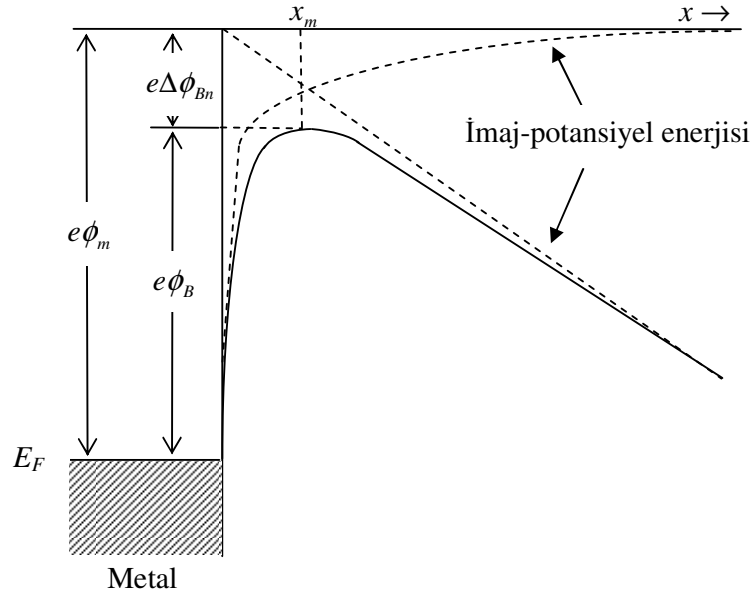
uygulanan gerilimden bağımsız olması gerekir. Ancak, kontağa uygulanan elektrik alan ve imaj-kuvvet etkisi sebebiyle engel yüksekliği Şekil 3.5'de gösterildiği gibi $e\Delta\phi_{Bn}$ kadar azalır. Buna Schottky etkisi denir. Bu etkiden dolayı akım yoğunluğu uygulanan gerilime bağlı olarak bir miktar artış göstermektedir. Engel yüksekliğindeki azalmanın değeri,

$$e\Delta\phi_{Bn} = \alpha_0 (V_d + V)^{1/4} \quad (3.13)$$

bağıntısı ile verilir. Denklem 3.7'de $e\phi_{Bn}$ yerine $e(\phi_{Bn,0} - \Delta\phi_{Bn})$ konulursa akım yoğunluğu ifadesi,

$$J_0 = R_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn,0}}{kT}\right) \exp\left[\frac{\alpha_0}{V_d + V}\right]^{1/4} \quad (3.14)$$

şeklini alır. Bu ifadeye göre akım yoğunluğu gerilime bağlıdır. Burada $\phi_{Bn,0}$ sıfır beslem durumunda Schottky etkisi olmaksızın engel yüksekliğidir ve α_0 sabiti ise



Şekil 3.5. İmaj-kuvvet etkisi sebebiyle engel yüksekliğinin azalması (Schottky etkisi) (Ferendeci, 1991)

$$\alpha_0 = \left[\frac{e^7 N_d}{8(\epsilon_s \epsilon_0)^3 \pi^2 (kT)^4} \right]^{1/4} \quad (3.15)$$

eşitliğiyle verilir. Burada ϵ_s ve ϵ_0 , sırasıyla yarıiletkenin ve boşluğun dielektrik sabitleridir.

3.1.3. Schottky Diyot Yapılarında İdealden Sapmalar

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 etkisi ve seri direnç etkisidir.

3.1.3.1. Arayüzey Tabakası Etkisi

Yarıiletken çok yüksek bir vakumda yarılarak üretilmedikçe, Schottky diyotlarda hemen hemen her zaman metal ve yarıiletken arasında ince bir oksit tabakası bulunur. Bu arayüzey tabakası ince olsa bile, bir yalıtkan olarak göz önüne alınabilir. Yalıtkan tabaka üç 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, ϕ_{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).

3.1.3.2. Seri Direnç Etkisi

Büyük seri dirençli ve ideal olmayan Schottky diyotların direncini hesaplamak için farklı araştırmacılar tarafından çok çeşitli metotlar ileri sürülmüştür. Bu kesimde seri direnç değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için geliştirilen metotlar incelenecektir.

I. Metot (Norde, 1979)

a) İdeal Schottky Diyot Karakteristiği

Daha önce termiyonik emisyonunda çıkartılan akım yoğunluğu denklemi (3.10) diyotun etkin alanı A ile çarpıldığında, toplam I_n akımı aşağıdaki gibi bulunur ($eV_F \gg 3kT$):

$$I_n = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_F}{kT}\right). \quad (3.17)$$

İdeal bir Schottky diyot için termiyonik emisyon etkili akım ifadesi

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.18)$$

ile verilir. Burada V_d difüzyon potansiyeli, $\beta = e/kT$ ve I_0 , doyma akımı olup

$$I_0 = AR_n^* T^2 \exp(-\beta\phi_{Bn}) \quad (3.19)$$

ifadesine sahiptir. $(eV_d / kT) \gg 1$ için

$$I \cong I_0 \exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \quad (3.20)$$

elde edilir. Burada $\ln(I)$ 'nin V 'ye karşı grafiği $(e\phi_{Bn})$ engel yüksekliğinin tayini için farklı bir imkan sağlar. Bu durum yarıiletken diyotta bir seri dirence neden olur. Akım-voltaj karakteristiği, $kT/e \ll V \ll IR$ aralığındaki gerilimler için doğru şekilde iken, R çok büyük ise doğru kısım oldukça dar olur. Bu seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için $F(V)$ fonksiyonu kullanılır:

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I}{AR_n^* T^2}\right) \quad (3.21)$$

Seri dirençli bir diyot için akım; $V_d = V - IR$ alınır,

$$I = I_0 [\exp(\beta V_d) - 1] \quad \Rightarrow \quad I = I_0 \{\exp[\beta(V - IR)] - 1\} \quad (3.22)$$

bağıntısı ile verilir. $V_d \gg kT/e$ olduğu kabul edilip denklem (3.22), denklem (3.21)'de yerine yazılırsa

$$F(V) = \phi_{Bn} + IR - \frac{V}{2} \quad (3.23)$$

elde edilir. İdeal halde $R = 0$ olur. Bu durumda $F(V)$ yeniden yazılırsa

$$F(V) = \phi_{Bn} - \frac{V}{2} \quad (3.24)$$

ifadesi bulunur. Bu fonksiyonun grafiği eğimi $(-1/2)$ olan bir doğrudur. Halbuki, denklem (3.21)'de ohm yasası gereğince $I = V/R$ 'dir. Bu ifade denklem (3.21)'de yerine yazılırsa

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V}{RAR_n^* T^2}\right) \quad (3.25)$$

elde edilir. Çok büyük voltajlar için bu ifade eğimi $1/2$ olan bir doğruya ulaşacaktır. Burada $F(V)$ 'nin küçük akımlar için ideal hale, büyük akımlar için $F_R(V)$ eğrisine yaklaşacağı sonucuna varılır. $F(V)$ fonksiyonu bu iki nokta arasında bir minimum değere sahiptir. (3.23) eşitliğinin V 'ye göre türevi alındığında,

$$\frac{dF(V)}{dV} = R\left(\frac{dI}{dV}\right) - \frac{1}{2} \quad (3.26)$$

bağıntısı elde edilir.

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[1 + R\left(\frac{dI}{dV_d}\right)\right]^{-1} \quad (3.27)$$

ve

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{d}{dV_d} [I_{\min} \exp(\beta V_d)] = \beta I \quad (3.28)$$

olduğundan, fonksiyonun türevi

$$\frac{dF(V)}{dV} = \frac{\beta RI}{1 + \beta RI} - \frac{1}{2} \quad (3.29)$$

olarak elde edilir. $dF(V)/dV = 0$ değeri $F(V)$ 'nin minimum noktasındaki I_{\min} akımını

verecektir. Buna göre (3.29)'dan I_{\min} akımı

$$I_{\min} = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{qR} \quad (3.30)$$

olarak bulunur. I_{\min} akımına karşılık gelen voltaj da

$$V_{\min} = I_{\min} R + V_d(I_{\min}) \quad (3.31)$$

$$V_{\min} = \frac{1}{\beta} + \ln\left(\frac{I_{\min}}{AR_n^* T^2}\right) \quad (3.32)$$

şeklinde elde edilir. Buna göre $F(V)$ 'nin minimum değeri

$$F(V_{\min}) = \frac{V_{\min}}{2} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{I_{\min}}{AR_n^* T^2}\right) \quad (3.33)$$

olur. I_{\min} ve V_{\min} 'nin ölçülen değerleri kullanılarak

$$R = \frac{kT}{qI_{\min}} \quad (3.34)$$

$$\phi_{Bn} = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{2} - \frac{kT}{q} \quad (3.35)$$

ifadeleri elde edilir.

b) İdeal Olmayan Schottky Diyot Karakteristiği

İdeal Schottky diyot yapısının akım-voltaj karakteristiği (3.18) ifadesi ile verilir. Doğru beslem $I - V$ karakteristiğinden sapmalar idealite çarpanı n ile gösterilir ve doğru

beslem altında $I - V$ karakteristiği de $\exp(eV/nkT)$ olur. Buna göre doyma akımı (3.19)'da verilmiştir. Şimdi n , ϕ_{Bn} ve R 'yi belirleyebilmek için yeni bir yöntem ortaya konulacaktır. Doğru gerilim uygulanan Schottky diyotta akım;

$$I = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_d}{nkT}\right) \quad (3.36)$$

şeklindedir. Burada n idealite faktörü olup $1 < n < 2$ dir. n , sıcaklık ve uygulama gerilimden bağımsız bir sabittir. Denklem (3.21)'de (3.20) bağıntısını yerine yazarsak $F(V)$ için;

$$F(V) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)V + \phi_{Bn} + \frac{IR}{n} \quad (3.37)$$

ifadesi elde edilir. $R = 0$ ideal hali için $F(V)$ fonksiyonu $(n-2)/2n (< 0)$ eğimli bir doğru olacaktır. $n = 1$ iken eğim $(-1/2)$ 'ye eşittir. O halde $n = 1$ durumu ideal Schottky diyot durumudur. Denklem (3.37)'nin V 'ye göre diferansiyeli alındığında

$$\frac{dF(V)}{dV} = \frac{1}{2} - \frac{1}{n} + \left(\frac{R}{n}\right)\left(\frac{dI}{dV}\right) \quad (3.38)$$

elde edilir. (3.36) eşitliğinin V_d 'ye göre diferansiyeli ise

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{\beta I}{n} \quad (3.39)$$

eşitliğini verir. Diyot boyunca voltaj V_d ise,

$$V_d = V - IR \quad (3.40)$$

olur. Bu eşitliğin I 'ya göre diferansiyeli alınırsa,

$$\frac{dV_d}{dI} = \frac{dV}{dI} - R \quad (3.41)$$

elde edilir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI/dV_d}{1 + R dI/dV_d} \quad (3.42)$$

bağıntısı bulunur. Denklem (3.42)'yi (3.38) eşitliğinde yerine yazarsak

$$\frac{dF(V)}{dV} = \frac{n-2 + \beta RI}{2(n + \beta RI)} \quad (3.43)$$

elde edilir. $dF(V)/dV = 0$ durumu $F(V)$ 'nin minimum noktasındaki akımı verecektir.

Buna göre, $\frac{dF(V)}{dV} = \frac{n-2 + \beta RI}{2(n + \beta RI)} = 0$ ifadesinden

$$R = \frac{2-n}{\beta I_{\min}} \quad (3.44)$$

elde edilir. Buna karşı gelen gerilim denklemi (3.39)'dan

$$V_{\min} = V_d(I_{\min}) + RI_{\min} \quad (3.45)$$

şeklinde yazılır. Denklem (3.37)'de V yerine V_{\min} , I yerine I_{\min} ve R 'nin değerini yerine koymak suretiyle

$$F(V_{\min}) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n} \right) V_{\min} + \phi_{Bn} - \frac{2-n}{\beta n} \quad (3.46)$$

ifadesi bulunur. $n=1$ için R ve ϕ_{Bn} hesaplanırsa, $[R = (2-n)/\beta I_{\min} \Rightarrow$

$R = (kT/e)I_{\min}$] için

$$F(V_{\min}) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n} \right) V_{\min} + \phi_n + \frac{I_{\min} R}{n} \quad (3.47)$$

ifadesinde yerine konup $n = 1$ yazılarak ϕ_{Bn} çözümlürse,

$$\phi_{Bn} = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{2} - \frac{kT}{q} \quad (3.48)$$

elde edilir.

II. Metot (Lien, So ve Nicolet, 1984)

Difüzyon gerilimi V_d , uygulama gerilimi V ile diyot seri direnci R 'ye $V_d = V - IR$ şeklinde bağlıdır. Engel yüksekliği ϕ_{Bn} ve idealite faktörü n değerlerini belirlemenin oldukça geçerli bir yöntemi $\ln(I) - V$ grafiklerini çizmektir. Birkaç kT/e değerinden daha büyük gerilimler ve küçük seri direnç değerleri için bu grafik bir doğru şeklinde olacaktır. Grafiğin doğrusal kısmının eğiminden idealite faktörü ve doğrusal kısmın sıfır gerilimde akım eksenine arakesim noktasından da engel yüksekliği hesaplanır. Ancak, seri direnç artarken $\ln(I) - V$ grafiğindeki doğrusal bölge daralır ve idealite faktörü n ile engel yüksekliği ϕ_{Bn} 'nin ölçümü belirsizleşir.

Bu problemin üstesinden gelmek için Norde (1979) tarafından ideal ($n = 1$) bir Schottky diyot için (3.21) fonksiyonunun minimum değerinin bulunmasına dayanan yeni bir metod ileri sürülmüştür. Bu metodun dezavantajları:

- I. İdealite faktörü $n = 1$ olarak kabul edilmiştir, ancak gerçek bir diyot için bu durum her zaman gerçekleşmez ve
- II. Engel yüksekliğini hesaplamak için kullanılan $F(V)$ fonksiyonunun minimumu civarında az sayıda nokta veri noktası olması şeklinde sıralanabilir.

II. durum sonuçlar üzerindeki istatistiksel hataları artırmaya eğilimlidir. Bu sebeple II. metod verilecektir. Seri direnci elde etmek için verilen bu metotta

$$F_a(V) = \frac{V}{a} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I(V)}{I_{\min}}\right) \quad (3.49)$$

şeklinde birkaç tane Norde tipi fonksiyonun akıma karşı ($\beta V_d \gg 1$ için) grafiği çizilir ve her bir a değeri için F_a fonksiyonlarının minimum noktaları bulunur. V , akımın (I) yavaş değişen bir fonksiyonu olduğu için, bu fonksiyon $F_a(V) = G_a(I)$ şeklinde akımın bir fonksiyonu olarak düşünülebilir. Bu durumda $F_a(V)$ fonksiyonunun yerine $G_a(I)$ fonksiyonunu dikkate almak daha uygun olacaktır. Bu durumda $dG_a(I)/dI = 0$ türev şartını sağlayan her bir a değeri için $G_a(I)$ fonksiyonu bir minimum değere sahip olur ve

$$\frac{dG_a(I_a)}{dI_a} = \frac{1}{a} \frac{dV_a}{dI_a} - \frac{1}{\beta I_a} = 0 \quad (3.50)$$

eşitliği yazılır. Bu eşitlik (3.18) denklemi ile beraber kullanıldığında,

$$I_a = \frac{1}{R\beta} a - \frac{n}{R\beta} \quad (3.51)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadedeki I_a 'nın a 'ya karşı grafiği doğru bir çizgi şeklinde olup, eğiminden diyodun seri direnci ve $I_a = 0$ noktasındaki arakesim değerinden de n değeri bulunur. Pratikte I_a ile a arasında doğrusal bir ilişki tespit edildiğinde, bu grafik R_s değerini elde etmek için en iyi durumu verir, ancak n değeri R_s 'yi dikkate alarak düzeltilen $I-V$ grafiklerinden daha doğru bir şekilde bulunabilir. n değerini bu yolla bulabilmek için, II. metotla bulunan R_s değeri her bir deneysel veri noktasında $V_d = V - IR$ eşitliği dikkate alınarak uygulama geriliminden çıkartılır. Elde edilen yeni V_d değerlerine göre çizilen $\ln(I) - V_d$ grafiği deneysel hata sınırları içerisinde doğru şeklinde olacaktır. Bu doğrunun eğiminden ve akım eksenine göre arakesim noktasından geleneksel yöntemle n ve ϕ_{Bn} bulunur.

III. Metot (Cibils ve Buitrago, 1985)

Norde (1979) tarafından ideal diyotların seri direncini bulmak üzere önerilen (3.21) fonksiyonu yerine ideal olmayan durumları da göz önüne almak için

$$F(V) = V - V_A \ln I \quad (3.52)$$

şeklinde bir fonksiyonu dikkate alalım. Burada V_A , V ve I dan bağımsız keyfi bir gerilimdir. $V_d = V - IR$ olduğu dikkate alınarak yazılan (3.18) denklemi (3.52)'de yerine yazılırsa

$$F(V) = V \left(1 - \frac{\beta V_A}{n} \right) - V_A \ln I_0 + \frac{\beta V_A}{n} IR \quad (3.53)$$

bulunur. Gerilimin küçük değerleri için bu ifadede ilk terim baskın iken, artan V değerlerinde son terim daha önemli hale gelir.

Böylece, $F(V)$ fonksiyonunun yalnızca ilk terimin negatif olduğu $1 - (\beta V_A/n) < 0$ şartı için bir minimum noktaya sahip olacağı açıktır. Bu durum yalnızca $V_A > n/\beta$ olması halinde doğrudur. $dF/dV = 0$ şartı için fonksiyonun minimum noktasındaki akım değeri

$$I_{\min} = \frac{V_A}{R} - \frac{n}{\beta R} \quad (3.54)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifade bize I_{\min} değerinin V_A 'ya doğrusal bağlı olduğunu gösterir. Farklı V_A gerilimleri için fonksiyonun minimum noktasına karşı gelen farklı I_{\min} değerleri tespit edildiğinde, (3.54) denklemine göre $I_{\min} - V_A$ grafiği çizilebilir. Bu grafiğin eğiminden seri direnç R ve ara kesim noktasından da idealite faktörü n bulunur.

IV. Metot (Cheung ve Cheung, 1986)

Cheung ve Cheung (1986) tarafından, düz beslem I - V karakteristikleri yardımıyla Schottky diyot parametrelerinin hesaplanması için yeni bir metot ileri sürüldü.

Termiyonik emisyonunda çıkarılan akım yoğunluğu denklemi (3.10)'u diyotun etkin alanı A ile çarpılarak elde edilen toplam I_n akımı (3.18)'de verilmişti. $eV_F \gg 3kT$ olduğundan, denklem (3.10)'daki 1 ihmal edilmiştir. Uygulamalarda, I - V karakteristiklerinde ideal durumdan sapmalar olabilir. Bu ideal olmayan durum, idealite faktörü denilen boyutsuz bir sabit ile tanımlanır. Nötral bölge direnci R_s ile gösterilirse ve $V_d = V - IR_s$ alınırsa (3.18) denklemi

$$I_n = A.R_n^*T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (3.55)$$

şekline dönüşür. Denklem (3.55)'in logaritması alınır ve V çekilirse,

$$V = +\left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AR_n^*T^2}\right) + n\phi_{Bn} + IR_s \quad (3.56)$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin $\ln(I)$ 'ya göre türevi alınırsa,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (3.57)$$

elde edilir. Bu son denkleme dikkat edildiğinde, $dV/d(\ln I)$ 'nın I 'ya göre grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi ise seri direnç R_s 'yi verir. Yine bu doğrunun $I = 0$ değeri için doğrunun düşey eksenini kestiği değer kT/e 'ye bölüldüğünde idealite faktörü n bulunabilir.

Ayrıca potansiyel engeli değerini bulmak için (3.56) denklemindeki son iki terime $H(I)$ dersek

$$H(I) = n\phi_{Bn} + IR_s \quad (3.58)$$

elde edilir. Bununla beraber (3.56) denklemini şu şekilde düzenleyebiliriz:

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{I}{AR_n^* T^2} \right). \quad (3.59)$$

Açıkça görülebilir ki; (3.58) denklemine göre çizilecek olan $H(I)$ - I grafiğinden elde edilecek doğrunun eğimi, nötral bölge direnci R_s ve $I=0$ değeri için, yani doğrunun düşey ekseni kestiği noktadan $e\phi_{Bn}$ engel yüksekliği bulunabilir. (3.57) ve (3.58) denklemleri Cheung fonksiyonları olarak bilinir (Cheung ve Cheung, 1986).

V. Metot (Bohlin, 1986)

Schottky engel diyotlarına ait düz beslem I - V karakteristiği (3.36) denklemi ile verilir. Burada n idealite faktörü V ise uygulama gerilimini göstermektedir. γ ($>n$) keyfi bir sabit olmak üzere, bu denklemden Norde (1979) benzeri bir seri

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta [\ln(I / AR_n^* T^2)]} \quad (3.60)$$

fonksiyonu tanımlanabilir. (3.36) ve (3.60) denklemleri birleştirildiğinde,

$$F(V, \gamma) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \phi_{Bn} + \frac{IR}{n} \quad (3.61)$$

elde edilir. İdeal bir diyot için seri direnç sıfır olduğundan, $F(V, \gamma)$ fonksiyonunun eğimi $(n - \gamma) / \gamma n$ olan doğru bir çizgi verecektir. Ancak, seri direncin sıfırdan büyük olduğu durumda (3.61) denklemi

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta[\ln(V / RAR_n^* T^2)]} \quad (3.62)$$

şeklini alacaktır. Gerilimin büyük değerleri için bu fonksiyon eğimi $1/\gamma$ olan bir doğru verecektir. γ 'nın değeri n 'den büyük oldukça, fonksiyon bir minimum değere sahip olacaktır. (3.61) denkleminin gerilime göre türevi alınırsa

$$\frac{dF}{dV} = \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} + \frac{R}{n} \left(\frac{dI}{dV} \right) \quad (3.63)$$

elde edilir. Denklem (3.27)'den

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\beta I}{n} - \frac{\beta R I (dI/dV)}{n} \quad (3.64)$$

yazılır. Böylece,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\beta I/n}{\left(1 + \frac{\beta R I}{n}\right)} \quad (3.65)$$

olur. (3.63) ve (3.65) denklemleri birleştirilince

$$\frac{dF}{dV} = \frac{n - \gamma + \beta R I}{[\gamma(n + \beta R I)]} \quad (3.66)$$

elde edilir. Minimum noktada $dF/dV = 0$ olacağından, bu noktadaki akım değeri

$$I_{\min} = \frac{(\gamma - n)}{(\beta R)} \quad (3.67)$$

şeklinde elde edilir. I_{\min} ve V_{\min} minimum noktadaki akım ve gerilimi göstermek üzere,

fonksiyonun minimum noktadaki değeri (3.61) ve (3.67) denklemlerinden

$$F(V_{\min}, \gamma) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right)V_{\min} + \phi_{Bn} + \frac{(\gamma - n)}{(\beta n)} \quad (3.68)$$

olarak tanımlanır. Bu denklemden engel yüksekliği ve seri direnç için

$$\phi_{Bn} = F(V_{\min}, \gamma) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma}\right)V_{\min} - \frac{(\gamma - n)}{(\beta n)}$$

$$R = \frac{(\gamma - n)}{(\beta I_{\min})} \quad (3.69)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklem sistemini çözmek için iki farklı γ değeri kullanılarak engel yüksekliği ve seri direnç için

$$\phi_{Bn} = F(V_{\min 1}, \gamma_1) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma_1}\right)V_{\min 1} - \frac{(\gamma_1 - n)}{(n\beta)} \quad (3.70)$$

$$\phi_{Bn} = F(V_{\min 2}, \gamma_2) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma_2}\right)V_{\min 2} - \frac{(\gamma_2 - n)}{(n\beta)} \quad (3.71)$$

ve

$$R = \frac{(\gamma_1 - n)}{(\beta I_{\min 1})} \quad (3.72)$$

$$R = \frac{(\gamma_2 - n)}{(\beta I_{\min 2})} \quad (3.73)$$

şeklinde ikişer farklı denklem yazılır. Böylece, idealite faktörü (3.70) ve (3.71) ile verilen iki denklemden

$$n = \frac{\left(V_{\min 1} - V_{\min 2} + \frac{\gamma_2}{\beta} - \frac{\gamma_1}{\beta} \right)}{\left[F(V_{\min 2}, \gamma_2) - F(V_{\min 1}, \gamma_1) - \frac{V_{\min 2}}{\gamma_2} + \frac{V_{\min 1}}{\gamma_1} \right]} \quad (3.74)$$

ya da (3.72) ve (3.73) ile verilen diğer iki denklemden

$$n = \frac{(\gamma_1 I_{\min 2} - \gamma_2 I_{\min 1})}{(I_{\min 2} - I_{\min 1})} \quad (3.75)$$

ifadeleri ile bulunur. Daha sonra (3.70-73) denklemlerinden engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplanır.

VI. Metot (Lee, Fung, Beling ve Au, 1992)

İdeate faktörü n ve seri direnç R_s değerlerini bulabilmek için Cibils ve Buitrago (1985) tarafından öne sürülen (3.52) fonksiyonunu dikkate alalım. $V > 3kT/e$ değerleri için, Schottky diyotların I - V karakteristiklerini seri direnci de dikkate alarak (3.36) ifadesi ile temsil edebiliriz. Eğer (3.52) denklemini ile verilen fonksiyonda V bağımsız değişkeni yerine I kullanılır ve (3.36) denklemini (3.52)'de yerine yazılırsa $F(I)$ fonksiyonu

$$F(I) = IR_s + \left[\left(\frac{nkT}{e} \right) - V_A \right] \ln I - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln I_0 \quad (3.76)$$

şeklinde elde edilir. Burada V_A değeri V 'den bağımsız olan keyfi bir gerilimdir. Bu denklem daha basit bir biçimde

$$F(I) = aI + b \ln I + c \quad (3.77)$$

olarak yazılabilir. Burada a , b ve c sabitleri

$$a = R_s, \quad b = \frac{nkT}{e} - V_A, \quad \text{ve} \quad c = \frac{nkT}{e} \ln I_s \quad (3.78)$$

ile verilir. Böylece sabit bir sıcaklıkta verilen bir V_A değeri için a , b ve c katsayıları sabit olacaktır. Fonksiyonun minimum noktası için $dF/dI = 0$ olduğundan

$$\frac{dF}{dI} = a + \frac{b}{I} \quad (3.79)$$

elde edilir. Böylece, minimum noktada akım değeri

$$I_{\min} = -\frac{b}{a} = \left(\frac{V_A}{R_s} \right) - \left(\frac{nkT}{eR_s} \right) \quad (3.80)$$

olarak bulunur. Bu sonuç Cibils ve Buitrago (1985) tarafından önerilen $F(V)$ - V fonksiyonundan bulunan sonuçla aynıdır.

(3.77) denkleminde en küçük kareler yöntemi uygulanarak a , b ve c katsayıları bulunabilir. Farklı V_A gerilimleri için fonksiyonun minimum noktasına karşı gelen farklı I_{\min} değerleri tespit edildiğinde, (3.80) denkleminde göre $I_{\min} - V_A$ grafiği çizilebilir. Bu grafiğin eğiminden seri direnç R_s ve ara kesim noktasından da idealite faktörü n bulunur.

3.2. YÖNTEM

Bu bölümde Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn/*n*-Si/Au-Sb Schottky diyotlarının akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesi için, izlenen 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, $N_d \cong 4.74 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ konsantrasyonda *P* (fosfor) katkılanmış, özdirenci $\rho = 5 \sim 10 \Omega\text{-cm}$, mobilitesi $\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olan *n*-tipi silisyum kristali kullanılmıştır.

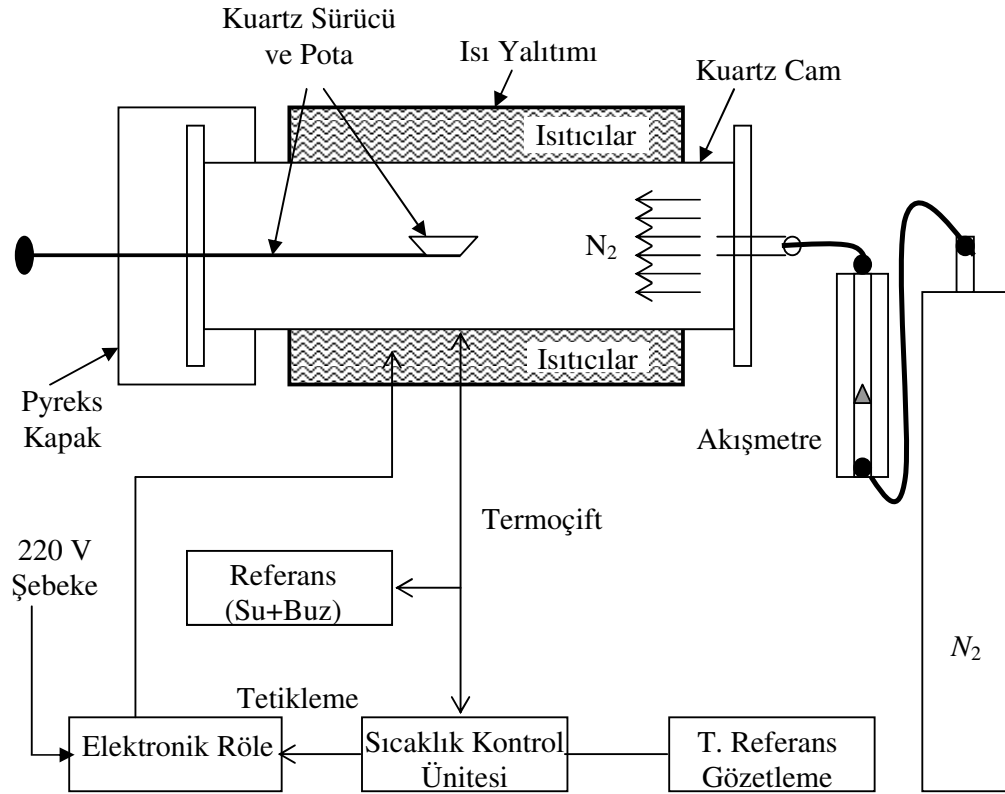
Yapılacak diyotlarda kontak kalitesinin iyi düzeyde olması için genellikle mekanik ve kimyasal temizleme yapılır. Ancak, bu çalışmada kullanılan *n*-tipi silisyum kristalleri mekanik olarak önceden parlatılmış olduğundan mekanik temizleme yapılmadı. Kristal üzerindeki organik ve anorganik kirlilikleri 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 (H₂O: H₂O₂: NH₃; 6:1:1) içinde 50–60 °C'de 10 dakika yıkama,
- e) Seyreltilmiş HF (H₂O: HF; 10:1) çözeltisinde 30 sn yıkama,
- f) RCA2 (H₂O: H₂O₂: NH₃; 6:1:1) içinde 50–60 °C'de 10 dakika yıkama,
- g) De-iyonize su ile yıkama,
- h) Seyreltilmiş HF (H₂O: HF; 10:1) çözeltisinde 30 sn yıkama,
- i) Akan de-iyonize su içerisinde 15–20 dakika bekletme,
- j) Azot gazı (N₂) ile kurutma.

3.2.2. Schottky Diyotların Hazırlanması

Kimyasal olarak temizlenen kristal yüzeyinde oksit birikmesinin engellenmesi için, kimyasal temizlik biter bitmez kristal kaplama ünitesine yerleştirildi. Kristalin mat olan yüzeyine omik kontak uygulayabilmek için, yüzeyi seyreltilmiş HCl asit içerisinde (HCl :H₂O; 1:10) temizlenmiş olan %99.98 saflıkta Au-Sb alaşımı kaplama ünitesinin ısıtıcısına yerleştirilerek 10⁻⁶ 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 3.6'da gösterilen tavlama fırınında N₂ atmosferinde 580 °C'de 3 dakika tavlandı. Böylece, numunelere omik kontak yapılmış oldu. Omik kontak işleminden sonra kristal 5×5 mm²'lik 6 parçaya bölündü ve bu parçaların üzerlerine sırasıyla %99.99 saflıkta Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn metalleri buharlaştırılarak,

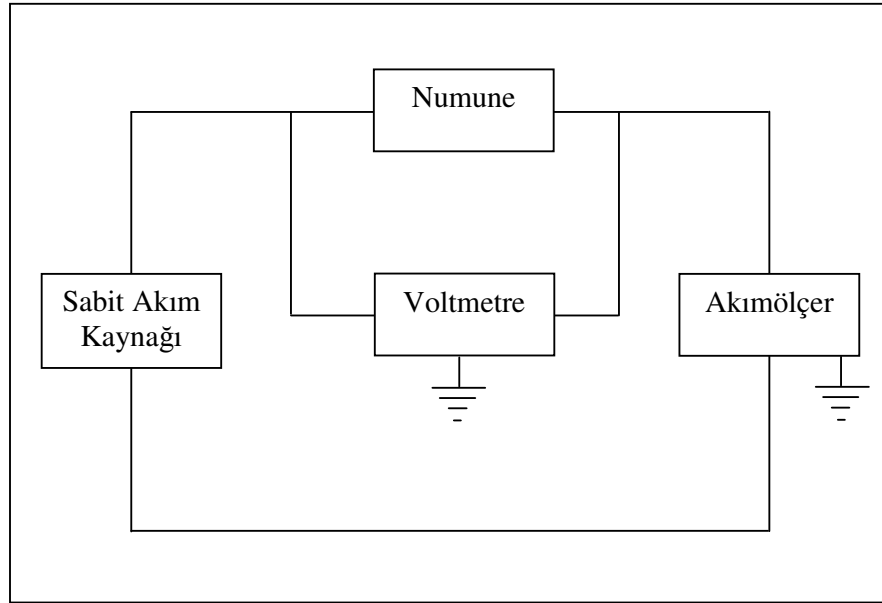


Şekil 3.6. Omik kontak yapımında kullanılan tavlama fırını (Çetinkara, 2002)

yarıçapı 1 mm olan noktasal doğrultucu kontaklar yapıldı. Böylece, Fe/n-Si, Ni/n-Si, Cd/n-Si, Pb/n-Si, Bi/n-Si ve Sn/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 $\mp 21 \text{ mA}$, çıkış voltaj aralığı $\mp 200 \text{ } \mu\text{V}$ ile $\mp 505 \text{ V}$ olan KEITHLEY 6487 Picoammeter/Voltage Source cihazı kullanıldı. Ölçümler, Şekil 3.7’de diyagramı verilen devre kullanılarak, oda sıcaklığında ve karanlık ortamda alındı. I - V karakteristiklerinin belirlenebilmesi için, diyotlara -1V ile $+1\text{V}$ aralığında 0.025V adımlarla gerilim uygulanarak, diyotlardan geçen akım değerleri okundu. Veriler Kesim 3.1’de verilen ilgili teorik bağıntılar ve Mathsoft Inc. tarafından hazırlanan MATHCAD7 bilgisayar programı kullanılarak analiz edildi, sonuçlar Golden Software Inc. tarafından hazırlanan GRAPHER V1.28 bilgisayar programı kullanılarak grafik hale getirildi.



Şekil 3.7. Akım-gerilim ölçümleri sisteminin devre şeması (Çetinkara, 1996)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada kullanılan silisyum kristali $N_d \cong 4.74 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ donör [P (fosfor)] konsantrasyonuna, $\rho = 5 \sim 10 \Omega \text{ cm}$ öz dirence ve $\mu_n = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobiliteye sahiptir. $T = 300 \text{ K}$ değeri için iletkenlik bandı hâl yoğunluğu $N_c = 3.22 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 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'de ideal bir diyottan geçen akım ifadesini veren (3.18) eşitliğine, ideal olmayan Schottky diyotların akım-gerilim karakteristiklerini temsil etmek üzere, boyutsuz bir n idealite faktörü ilave edilirse, denklem

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.2)$$

şekline girer. Bu ifadede $eV \gg 3kT$ ise, ifadedeki 1 terimi üstel terim yanında ihmal edilebilir ve (4.2) eşitliğinden

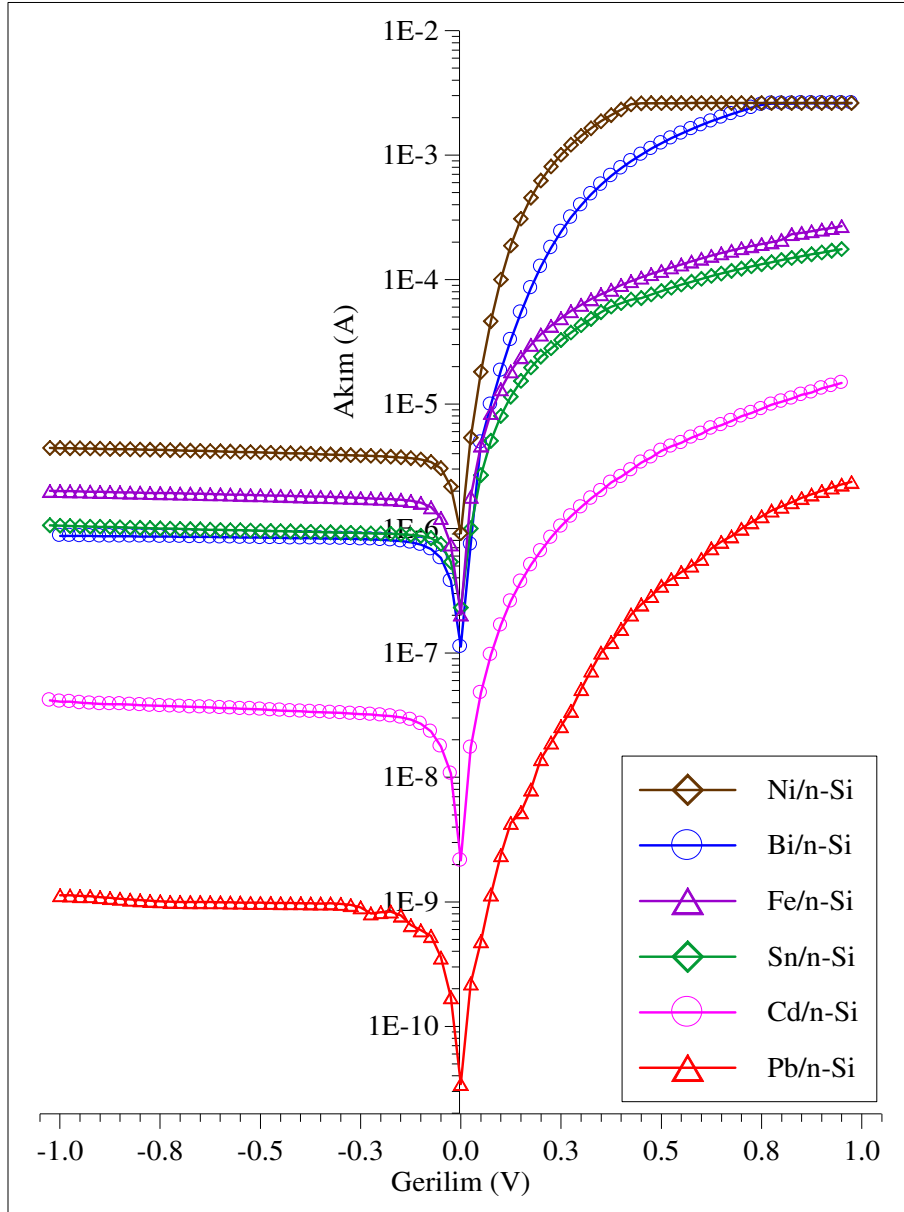
$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (4.3)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntının her iki tarafında logaritma alındıktan sonra, V 'ye göre türev alınırsa, idealite faktörü n

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

olarak elde edilir. Üretilen diyotlara ait fiziksel parametrelerin belirlenebilmesi için her bir diyota ait akım-gerilim ölçümlerinin $\ln(I)$ - V grafikleri çizildi. Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve

$\text{Sn}/n\text{-Si}$ Schottky diyotların ters ve düz beslem $\ln(I)\text{-}V$ grafikleri toplu olarak Şekil 4.1’de verilmektedir.



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

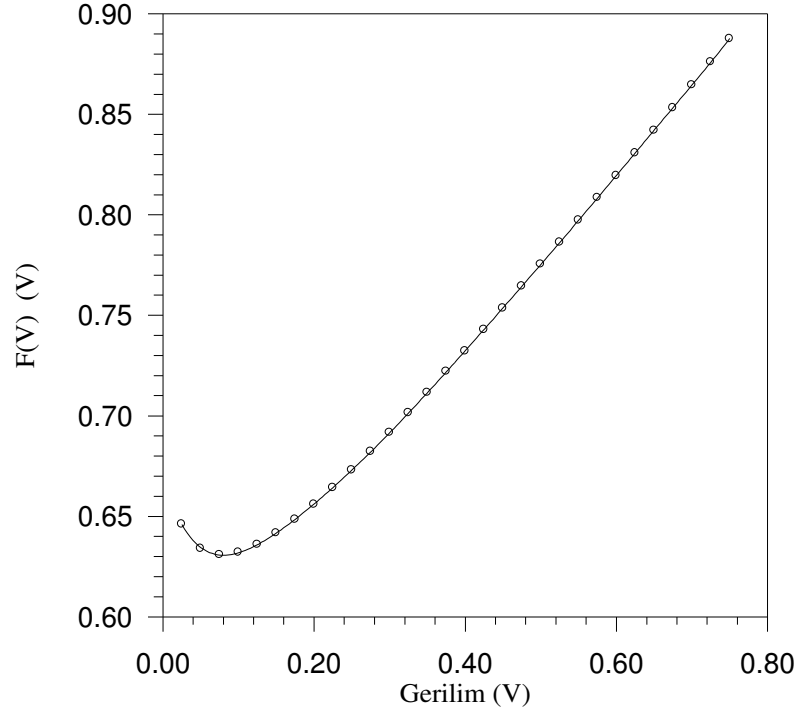
Şekilden, düz beslem bölgesinde en yüksek akım değeri Ni/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için, en düşük akım değeri ise Pb/n-Si/Au-Sb Schottky diyodu için gözlenmiştir. Çizilen grafikler düz beslem bölgesinde, her bir diyot için birkaç mertebelik akım aralığında doğrusal bir yapı sergilemektedir.

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).

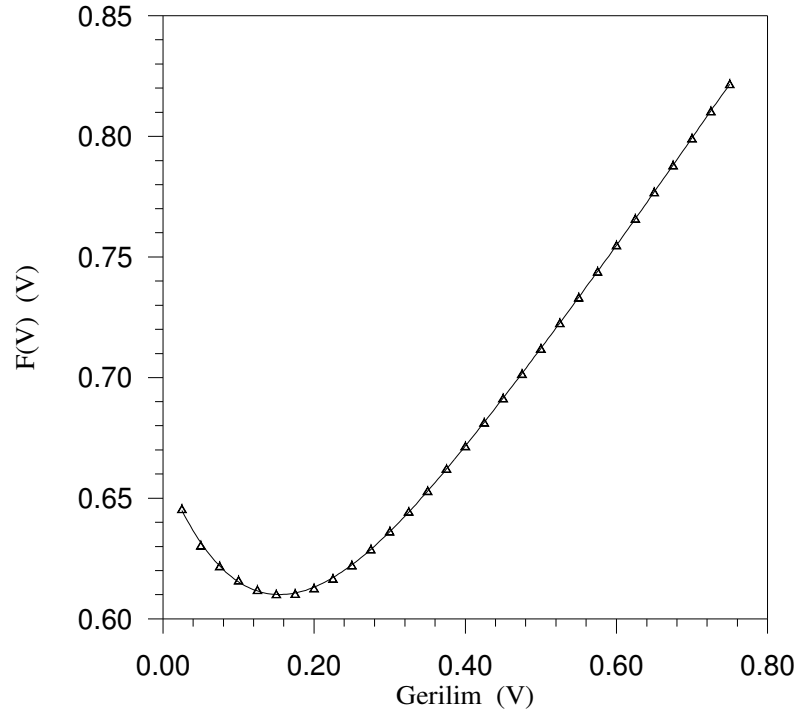
Bunlar içinde düz beslem akım-voltaj karakteristiklerini etkileyen en önemli iki sebep, arayüzey tabakasının varlığı ve seri direnç etkisidir. Şekil 4.1'deki $I-V$ grafiklerinin düz beslem bölgesinden görülebileceği gibi, her bir diyota ait akım eğrileri farklı seri direnç değerleri sebebiyle farklı değerlerden geçmektedir. Düşük seri dirençli diyotlarda akım geniş bir aralıkta gözlenebilirken, yüksek seri dirençli numunelerde akımın birkaç mertebeye sınırlandığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada, üretilen diyotlara ait idealite faktörü, engel yüksekliği ve nötral bölge seri direnci (3.11) ve (4.4) denklemleri kullanılarak geleneksel akım-gerilim ($I-V$) metoduyla hesaplandı ve sonuçlar Çizelge 4.1-6'da verildi. Bu metoda ek olarak diyot parametrelerinin hesaplanmasında Kesim 3.1.3.2'de verilen teoriler kullanıldı. Parametrelerin I. Metot (Norde, 1979) ile hesaplanması için (3.21) denklemi kullanılarak Şekil 4.2-7'de verilen $F(V)-V$ grafikleri çizildi. Bu grafiklerdeki deneysel noktaları temsil eden fonksiyonlar 0.002 V adımlarla simüle edilerek fonksiyonun dönüm noktası tespit edildi, (3.34) ve (3.35) denklemleri kullanılarak Çizelge 4.1-6'da verilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri bulundu.

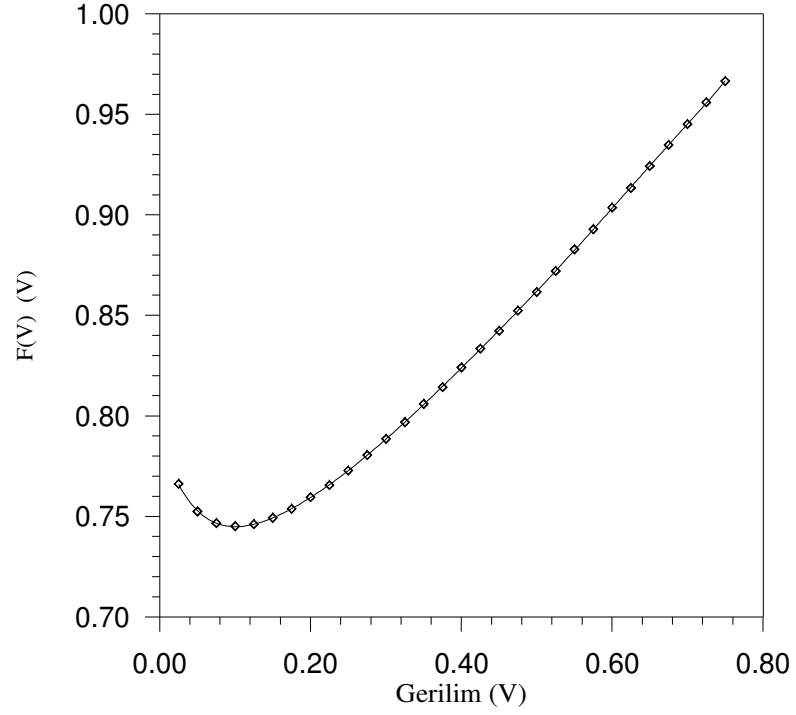
Aynı parametrelerin II. Metot (Lien, So ve Nicolet, 1984) ile hesaplanması için (3.49) denklemi kullanıldı. (3.49) denklemiyle farklı a değerleri için Şekil 4.8-13'de verilen $F_a(V)-I$ grafikleri çizildi. Bu grafiklerdeki deneysel noktaları temsil eden fonksiyonlar yine 0.002 V adımlarla simüle edilerek fonksiyonların minimum noktaları tespit edildi. Daha sonra, (3.51) denklemindeki I_a 'nın a 'ya karşı grafiği çizildi.



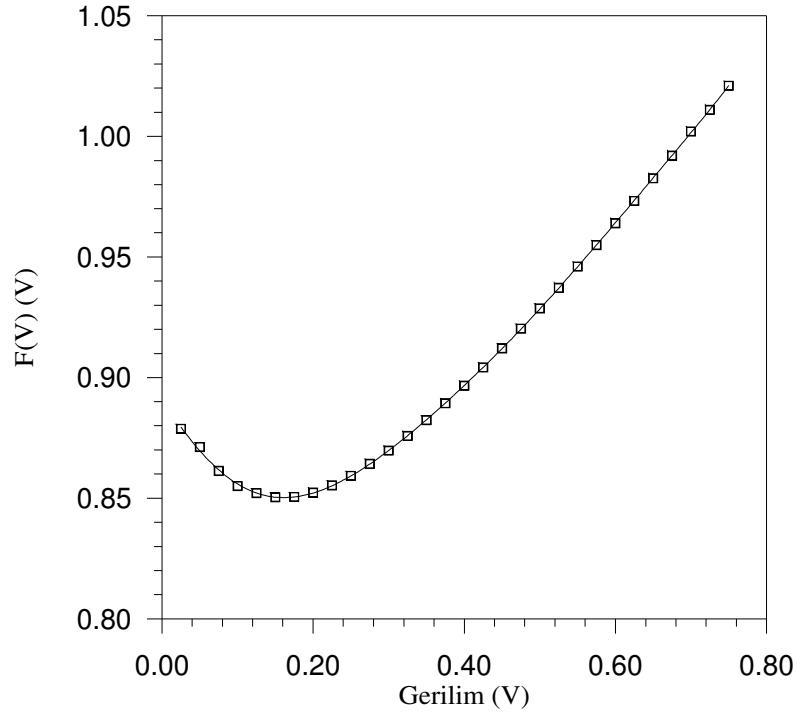
Şekil 4.2. Fe/*n*-Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - V grafiği



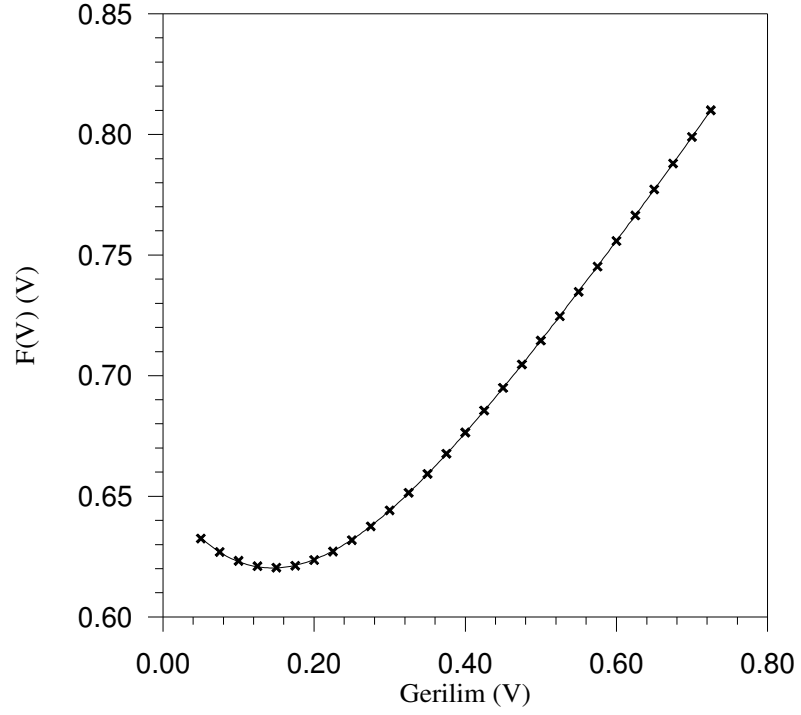
Şekil 4.3. Ni/*n*-Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - V grafiği



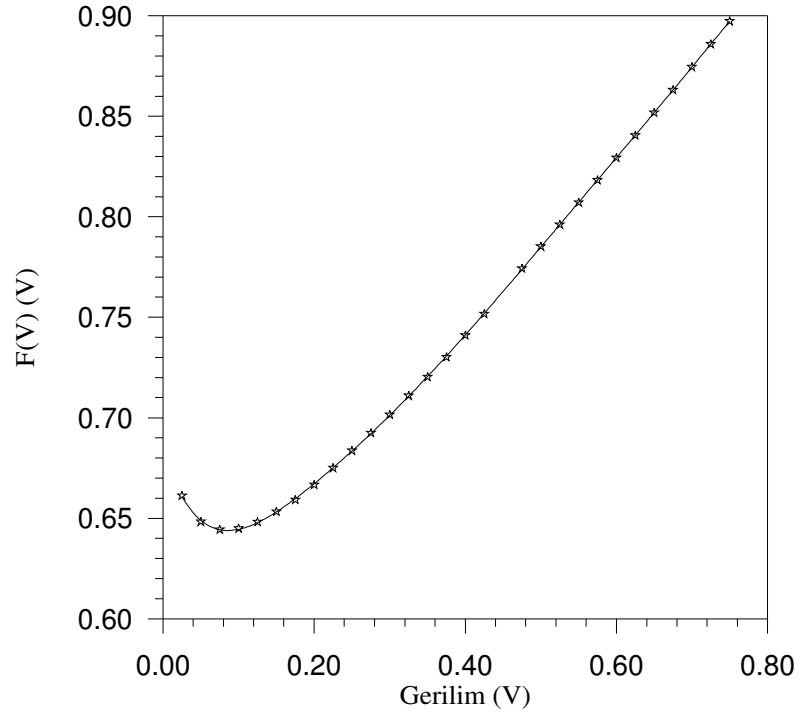
Şekil 4.4. Cd/n-Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - V grafiği



Şekil 4.5. Pb/n-Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - V grafiği



Şekil 4.6. Bi/n-Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - V grafiği



Şekil 4.7. Sn/n-Si Schottky diyotu için (3.21) denklemi (I. metot) ile çizilen $F(V)$ - V grafiği

Çizelge 4.1. Fe/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri

Fe/n-Si	n	ϕ_{Bn} (eV)	R_s (Ω)
Standart I - V metodu	1,243	0,652	---
I. Metot (Norde, 1979)	1,000	0,646	2734,00
II. Metot (Lien, So ve Nicolet, 1984)	1,044	0,638	3610,00
III. Metot (Cibils ve Buitrago, 1985)	0,589	0,664	3876,00
IV. Metot (Cheung ve Cheung, 1985)	1,038	---	3209,91
	---	0,638	3216,09
V. Metot (Bohlin, 1986)	0,540	0,673	3807,00
VI. Metot (Lee, Fung, Beling ve Au, 1992)	0,900	---	3261,00

Çizelge 4.2. Ni/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri

Ni/n-Si	n	ϕ_{Bn} (eV)	R_s (Ω)
Standart I - V metodu	1,212	0,650	---
I. Metot (Norde, 1979)	1,000	0,661	293,90
II. Metot (Lien, So ve Nicolet, 1984)	1,158	0,648	193,86
III. Metot (Cibils ve Buitrago, 1985)	0,756	0,726	218,82
IV. Metot (Cheung ve Cheung, 1985)	1,017	---	212,19
	---	0,667	212,57
V. Metot (Bohlin, 1986)	1,425	0,630	173,13
VI. Metot (Lee, Fung, Beling ve Au, 1992)	1,137	---	208,85

Çizelge 4.3. Cd/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri

Cd/n-Si	n	ϕ_{Bn} (eV)	R_s (Ω)
Standart I - V metodu	1,124	0,775	---
I. Metot (Norde, 1979)	1,000	0,769	153800,00
II. Metot (Lien, So ve Nicolet, 1984)	1,071	0,778	135500,00
III. Metot (Cibils ve Buitrago, 1985)	1,777	0,742	78930,00
IV. Metot (Cheung ve Cheung, 1985)	2,095	---	54088,90
	---	0,741	53773,40
V. Metot (Bohlin, 1986)	1,181	0,762	123000,00
VI. Metot (Lee, Fung, Beling ve Au, 1992)	1,032	---	135500,00

Çizelge 4.4. Pb/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri

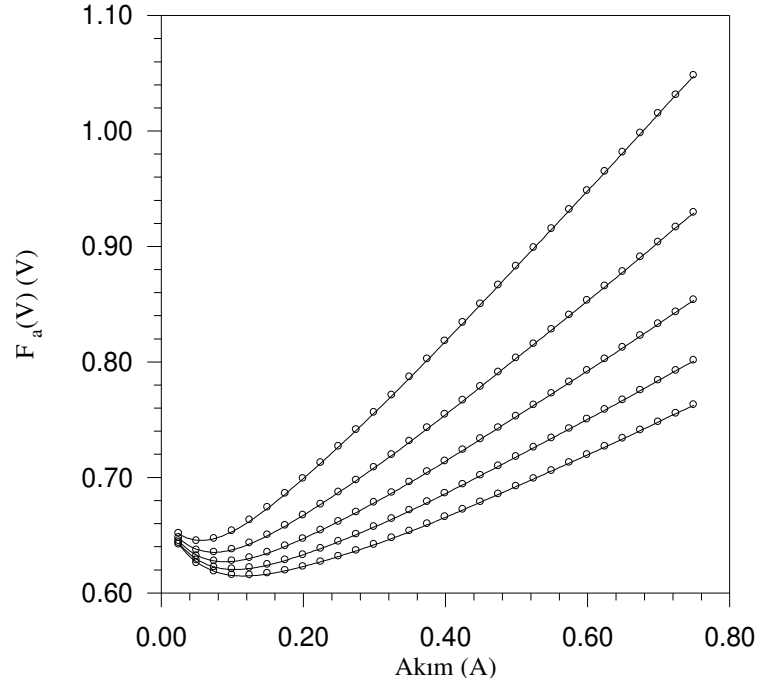
Pb/n-Si	n	ϕ_{Bn} (eV)	R_s (Ω)
Standart I - V metodu	1,176	0,888	---
I. Metot (Norde, 1979)	1,000	0,905	2732152,00
II. Metot (Lien, So ve Nicolet, 1984)	1,172	0,888	1346266,00
III. Metot (Cibils ve Buitrago, 1985)	1,563	0,865	1328939,00
IV. Metot (Cheung ve Cheung, 1985)	2,828	---	150555,00
	---	0,839	155704,00
V. Metot (Bohlin, 1986)	1,723	0,857	100697,00
VI. Metot (Lee, Fung, Beling ve Au, 1992)	2,156	---	300652,40

Çizelge 4.5. Bi/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri

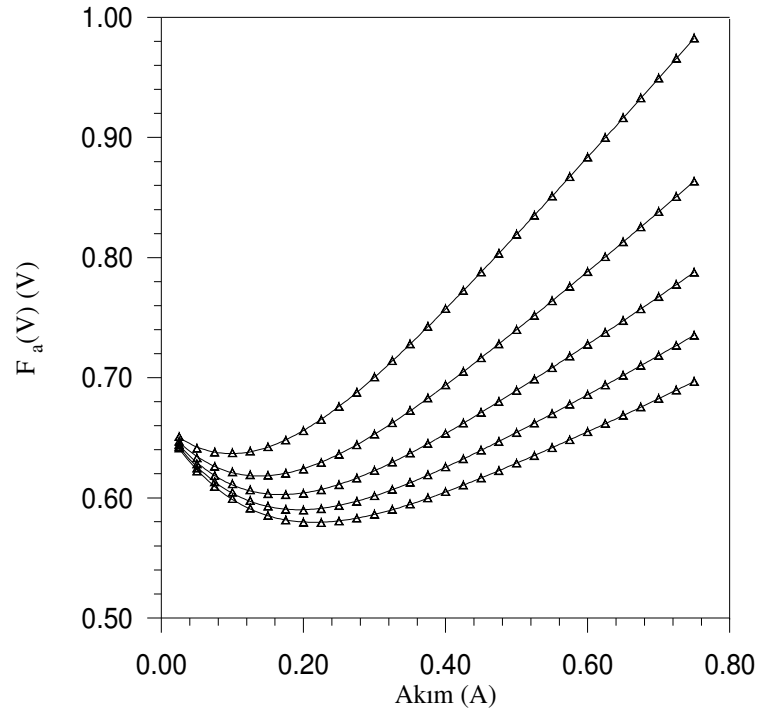
Bi/n-Si	n	ϕ_{Bn} (eV)	R_s (Ω)
Standart I - V metodu	1,087	0,666	---
I. Metot (Norde, 1979)	1,000	0,666	530,16
II. Metot (Lien, So ve Nicolet, 1984)	1,027	0,668	204,50
III. Metot (Cibils ve Buitrago, 1985)	1,763	0,625	176,16
IV. Metot (Cheung ve Cheung, 1985)	1,874	---	166,74
	---	0,619	168,42
V. Metot (Bohlin, 1986)	1,682	0,628	188,35
VI. Metot (Lee, Fung, Beling ve Au, 1992)	1,669	---	175,03

Çizelge 4.6. Sn/n-Si/Au-Sb Schottky diyot yapısı için farklı teorilerle hesaplanan diyot karakteristikleri

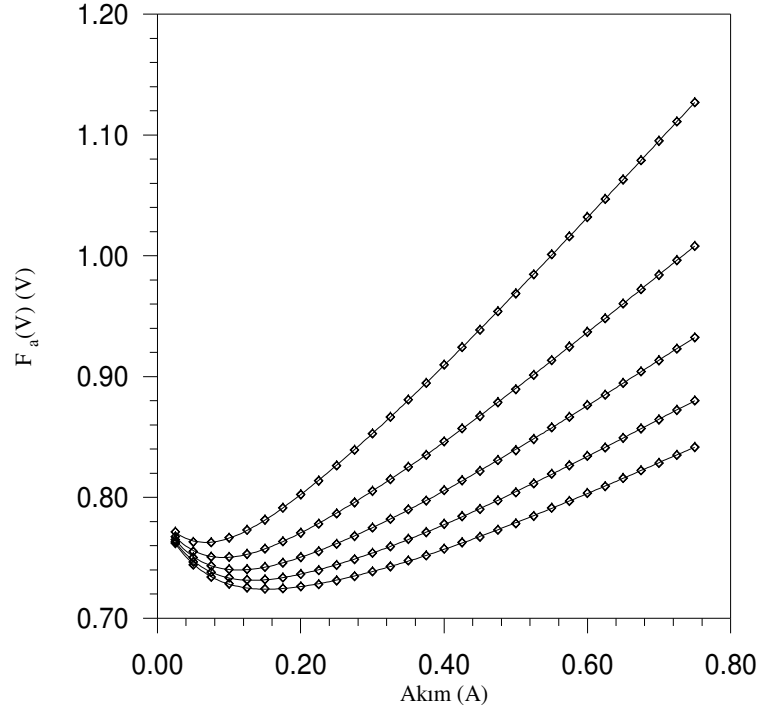
Sn/n-Si	n	ϕ_{Bn} (eV)	R_s (Ω)
Standart I - V metodu	1,194	0,668	---
I. Metot (Norde, 1979)	1,000	0,661	4059,00
II. Metot (Lien, So ve Nicolet, 1984)	1,045	0,661	5521,00
III. Metot (Cibils ve Buitrago, 1985)	0,870	0,663	5002,00
IV. Metot (Cheung ve Cheung, 1985)	0,990	---	4559,26
	---	0,654	4660,04
V. Metot (Bohlin, 1986)	0,545	0,691	5828,00
VI. Metot (Lee, Fung, Beling ve Au, 1992)	0,753	---	4788,00



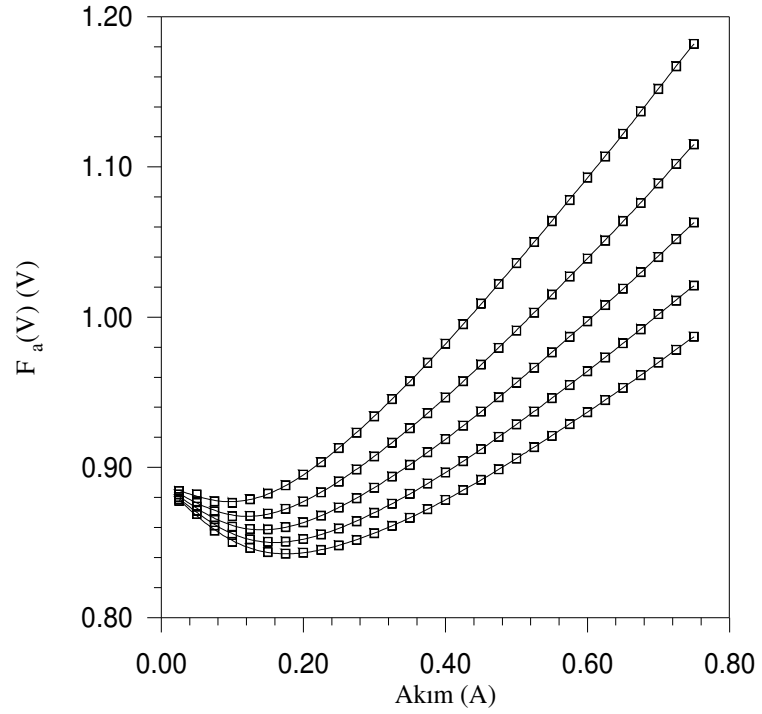
Şekil 4.8. Fe/n-Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)-(I)$ grafiği



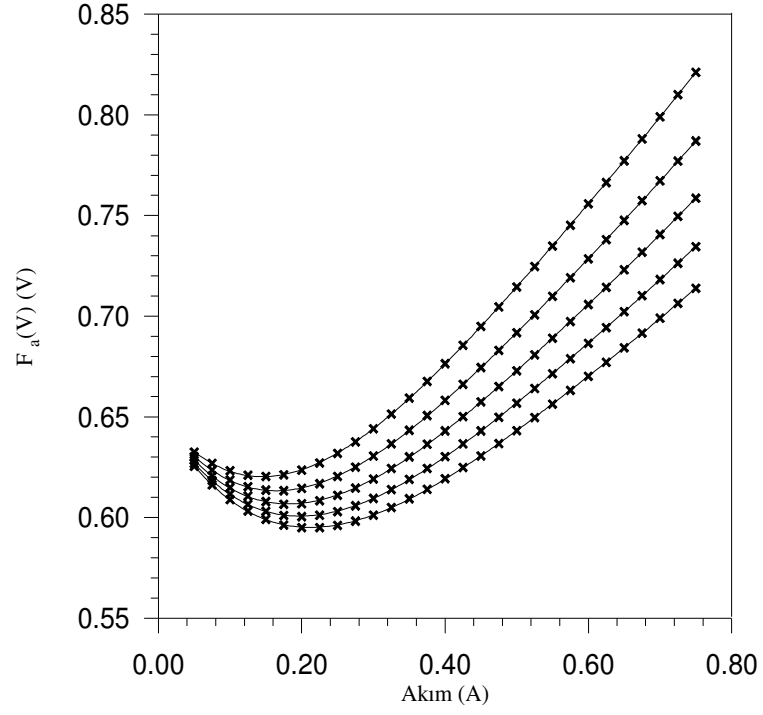
Şekil 4.9. Ni/n-Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)-(I)$ grafiği



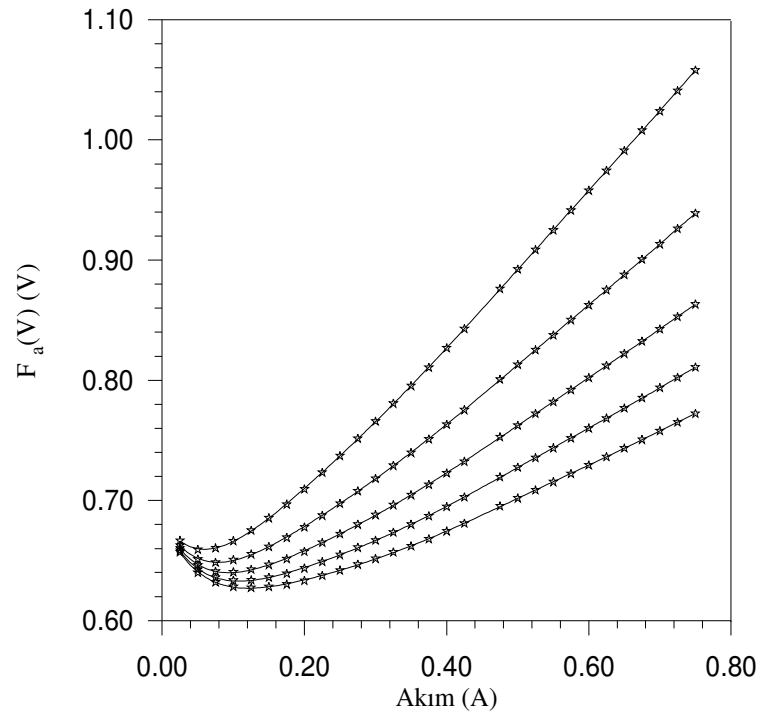
Şekil 4.10. Cd/n-Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)-(I)$ grafiği



Şekil 4.11. Pb/n-Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)-(I)$ grafiği



Şekil 4.12. Bi/n-Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)-(I)$ grafiği

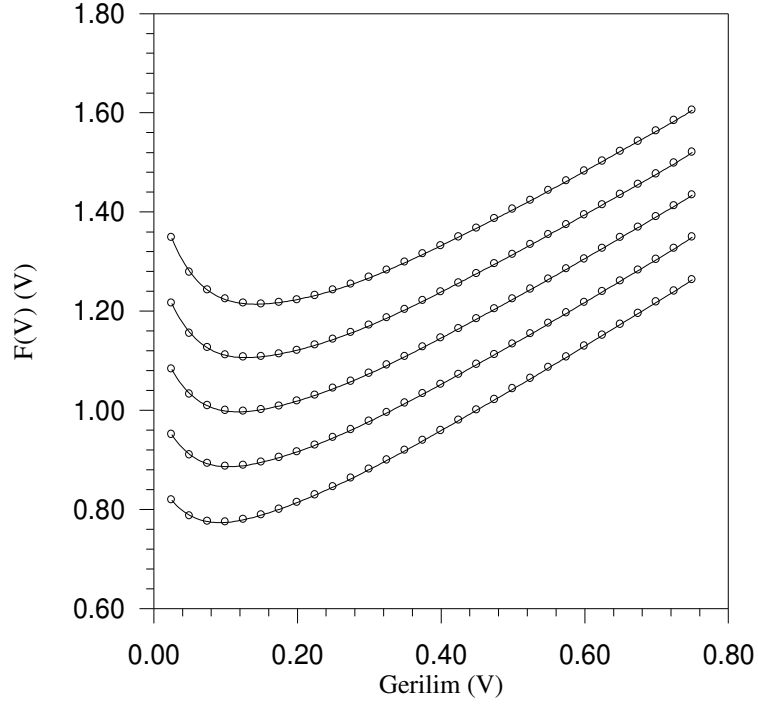


Şekil 4.13. Sn/n-Si Schottky diyotu için (3.49) denklemi (II. metot) ile çizilen $F_a(V)-(I)$ grafiği

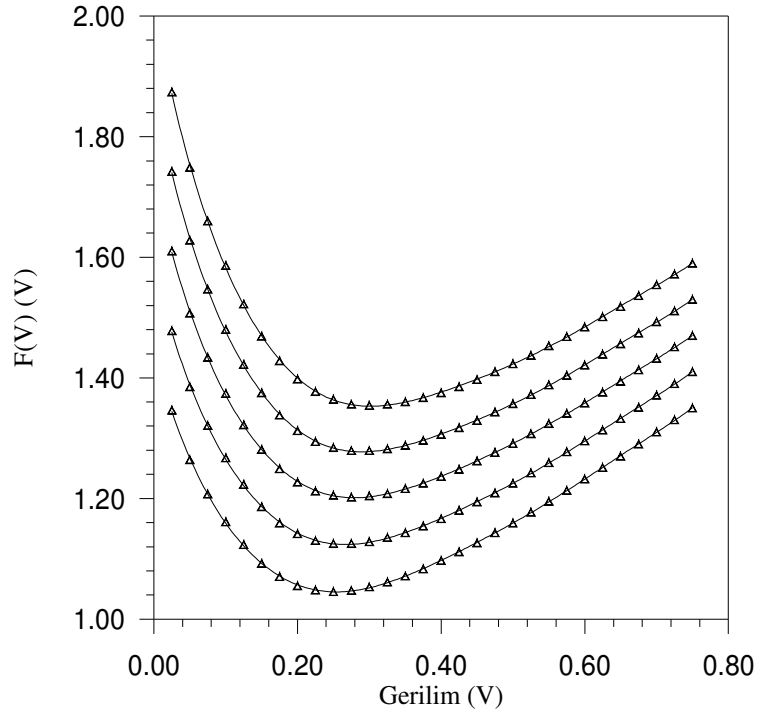
Bu grafik doğru bir çizgi şeklinde olup, eğiminden diyotun seri direnci R ve $I_a = 0$ noktasındaki ara kesim değerinden de n değeri bulundu. Her bir deneysel veri noktasında $V_d = V - IR$ eşitliği dikkate alınarak uygulama geriliminden R_s değeri hesaplandı. Buradan elde edilen yeni V_d değerlerine göre çizilen $\ln(I) - V_d$ grafiği deneysel hata sınırları içerisinde doğru şekilde olup, bu doğrunun eğiminden ve akım eksenini ile ara kesim noktasından geleneksel yöntemle Çizelge 4.1-6'da verilen n ve R_s değerleri bulundu.

Diyot parametrelerinin III. Metot (Cibils ve Buitrago, 1985) ile hesaplanması için (3.52) denklemi kullanıldı. Bu denklemden, farklı yardımcı V_A gerilimleri için Şekil 4.14-19'da verilen $F(V) - V$ grafikleri çizildi. Bu grafiklerdeki deneysel noktaları temsil eden fonksiyonlar yine 0.002 V adımlarla simüle edilerek fonksiyonların dönüm noktası tespit edildi, daha sonra (3.54) denklemi yardımıyla grafiğin eğiminden ve ara kesim noktasından Çizelge 4.1-6'da verilen seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri bulundu. IV. Metot'un (Cheung ve Cheung, 1985) uygulanması için (3.57) ve (3.58) denklemleri yardımıyla Şekil 4.20-25'de verilen $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri çizildi. $dV/d(\ln I) - I$ grafiğinin eğiminden ve düşey eksenini kestiği değerin kT/e' ye bölünmesinden seri direnç ve idealite faktörü değerleri, $H(I) - I$ grafiklerinin eğiminden ve düşey eksenini kestiği noktalardan da seri direnç ve engel yüksekliği değerleri bulundu ve Çizelge 4.1-6'da verildi.

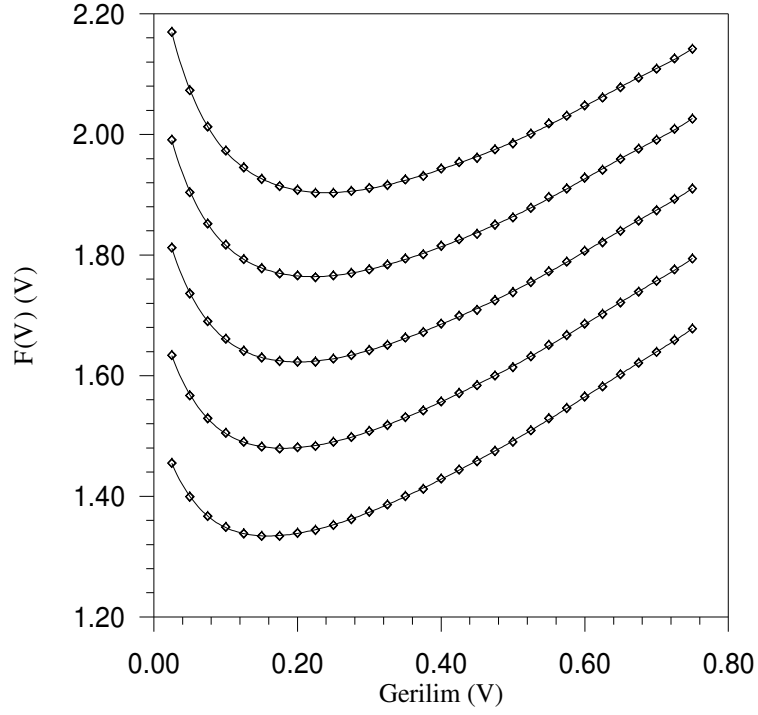
Aynı parametrelerin V. Metot (Bohlin, 1986) ile hesaplanması için, (3.60) denklemi kullanılarak Şekil 4.25-31'de verilen $F(V) - V$ grafikleri çizildi. Bu grafiklerdeki deneysel noktaları temsil eden fonksiyonlar 0.002 V adımlarla simüle edilerek fonksiyonun dönüm noktasından I_{\min} ve V_{\min} minimum değerleri bulundu. Sonra (3.67-3.73) denklemleri kullanılarak Çizelge 4.1-6'da verilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri bulundu. Diyot parametrelerinin VI. Metot (Lee, Fung, Beling ve Au, 1992) ile hesaplanması için, (3.77) denkleminin deneysel verilere uyum (fit) eğrisinden a , b ve c katsayıları tespit edildi, (3.80) denklemi kullanılarak Şekil 4.32-37'de verilen $I_{\min} - V_A$ grafikleri çizildi. Farklı V_A yardımcı gerilimleri için fonksiyonun minimum noktasına karşı gelen farklı I_{\min} değerleri tespit edildi, grafiğin eğimi kullanılarak Çizelge 4.1-6'da verilen idealite faktörü ve seri direnç değerleri bulundu.



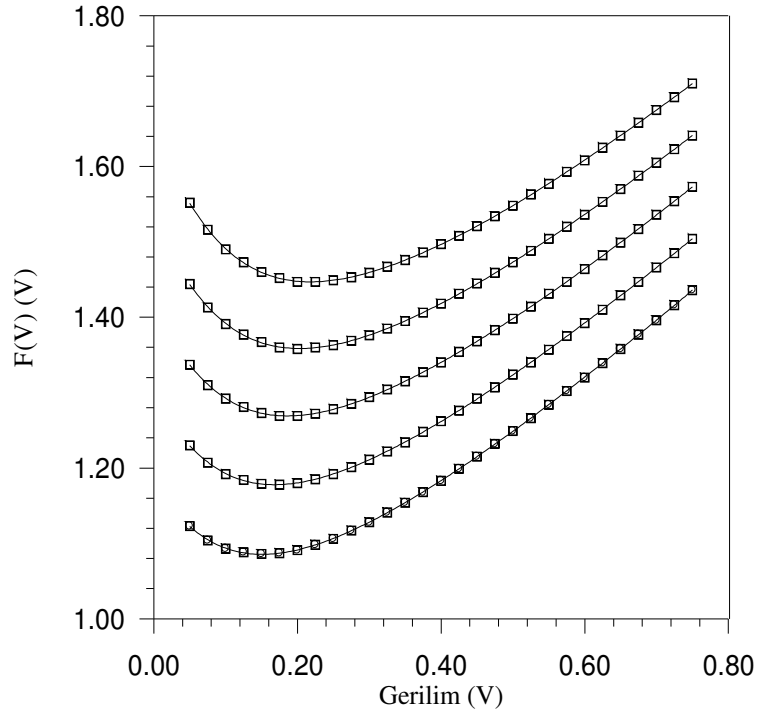
Şekil 4.14. Fe/n-Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



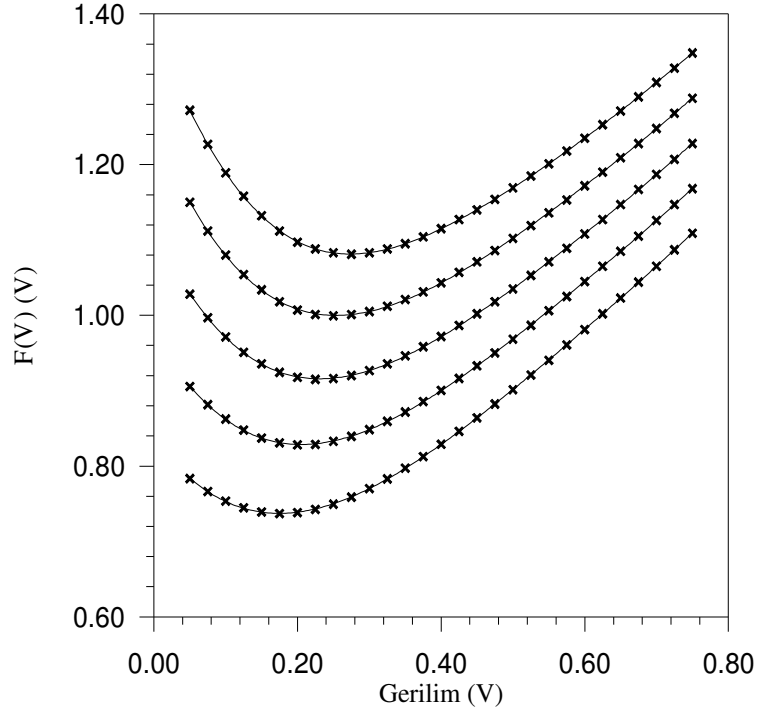
Şekil 4.15. Ni/n-Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



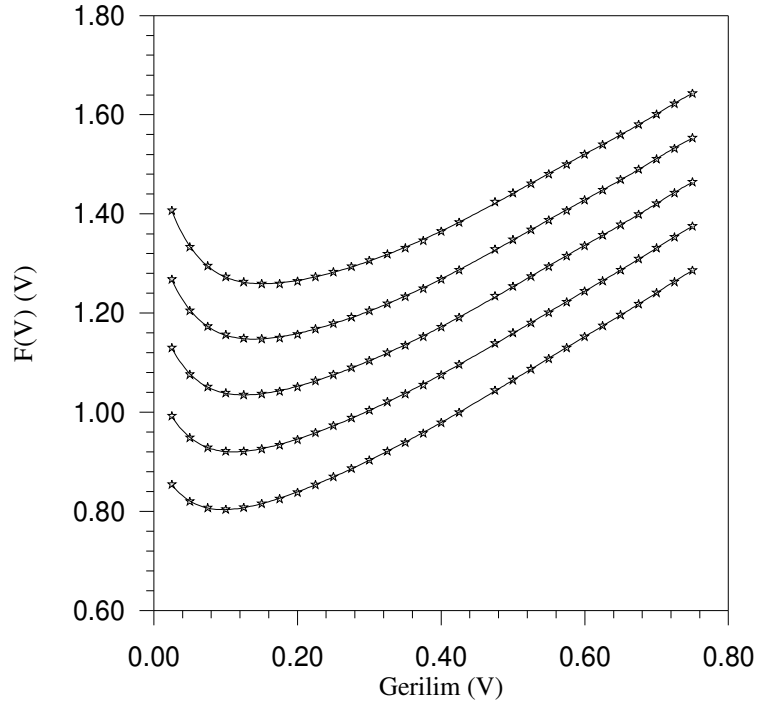
Şekil 4.16. Cd/n-Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



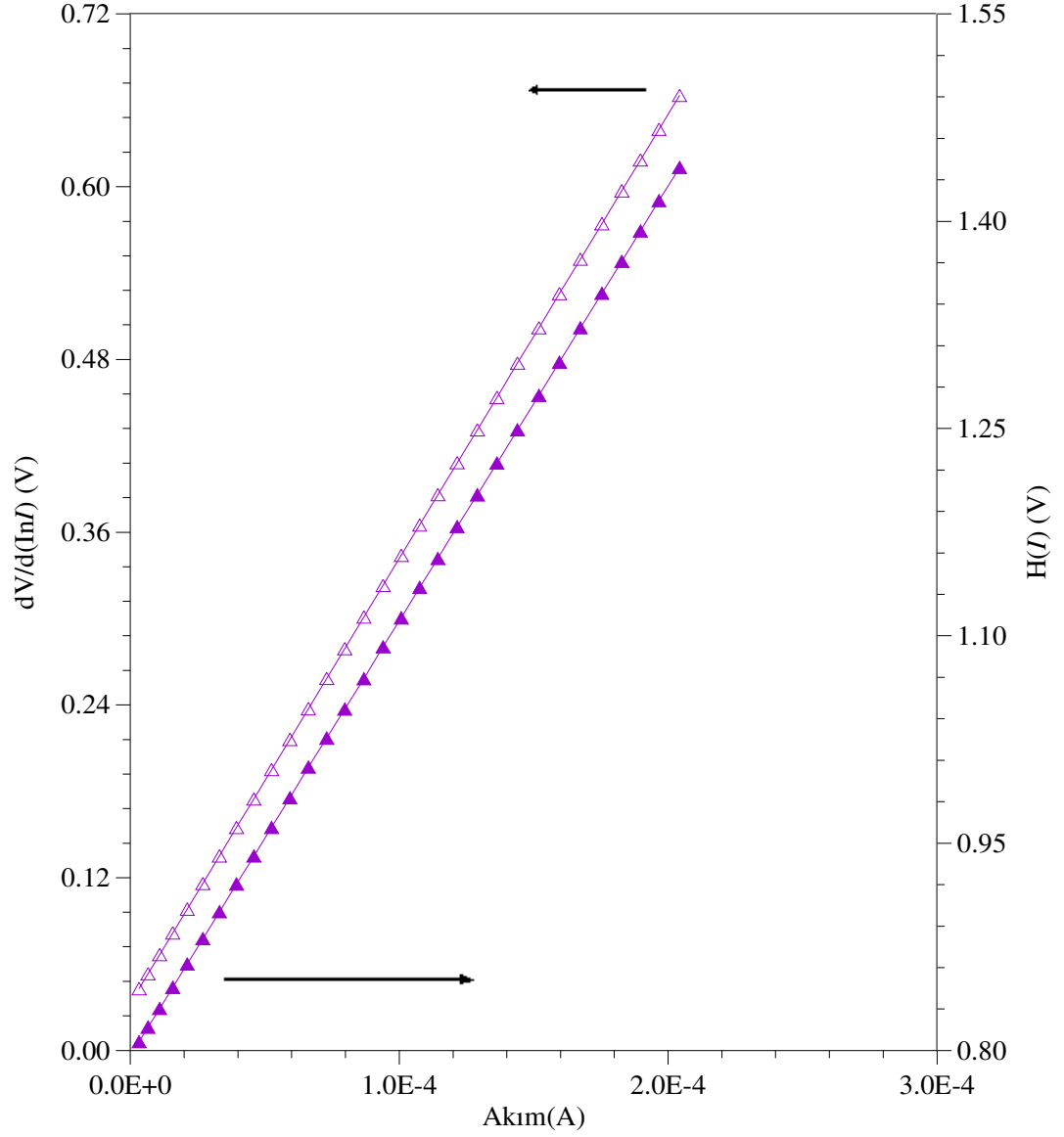
Şekil 4.17. Pb/n-Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



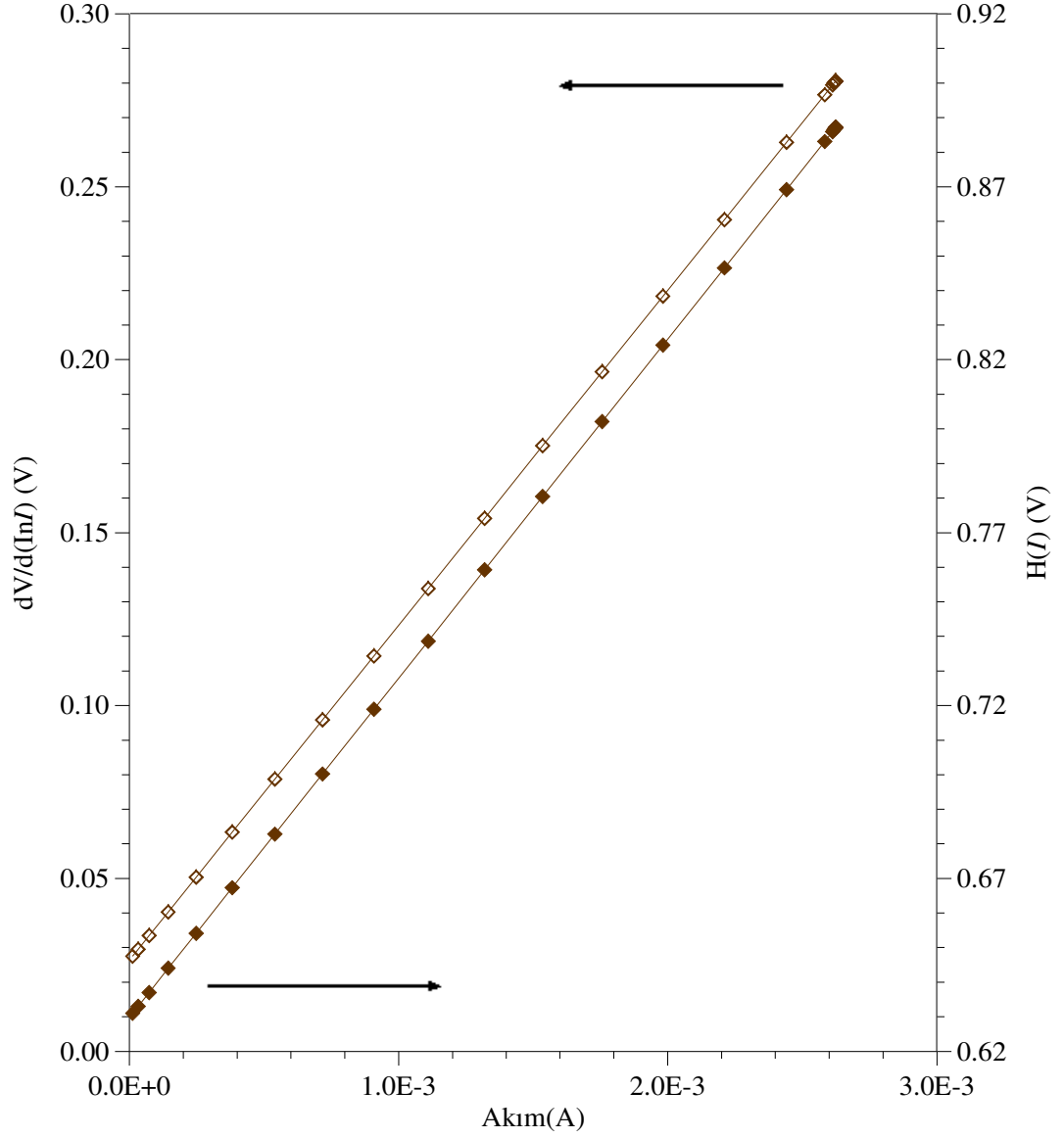
Şekil 4.18. Bi/n-Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



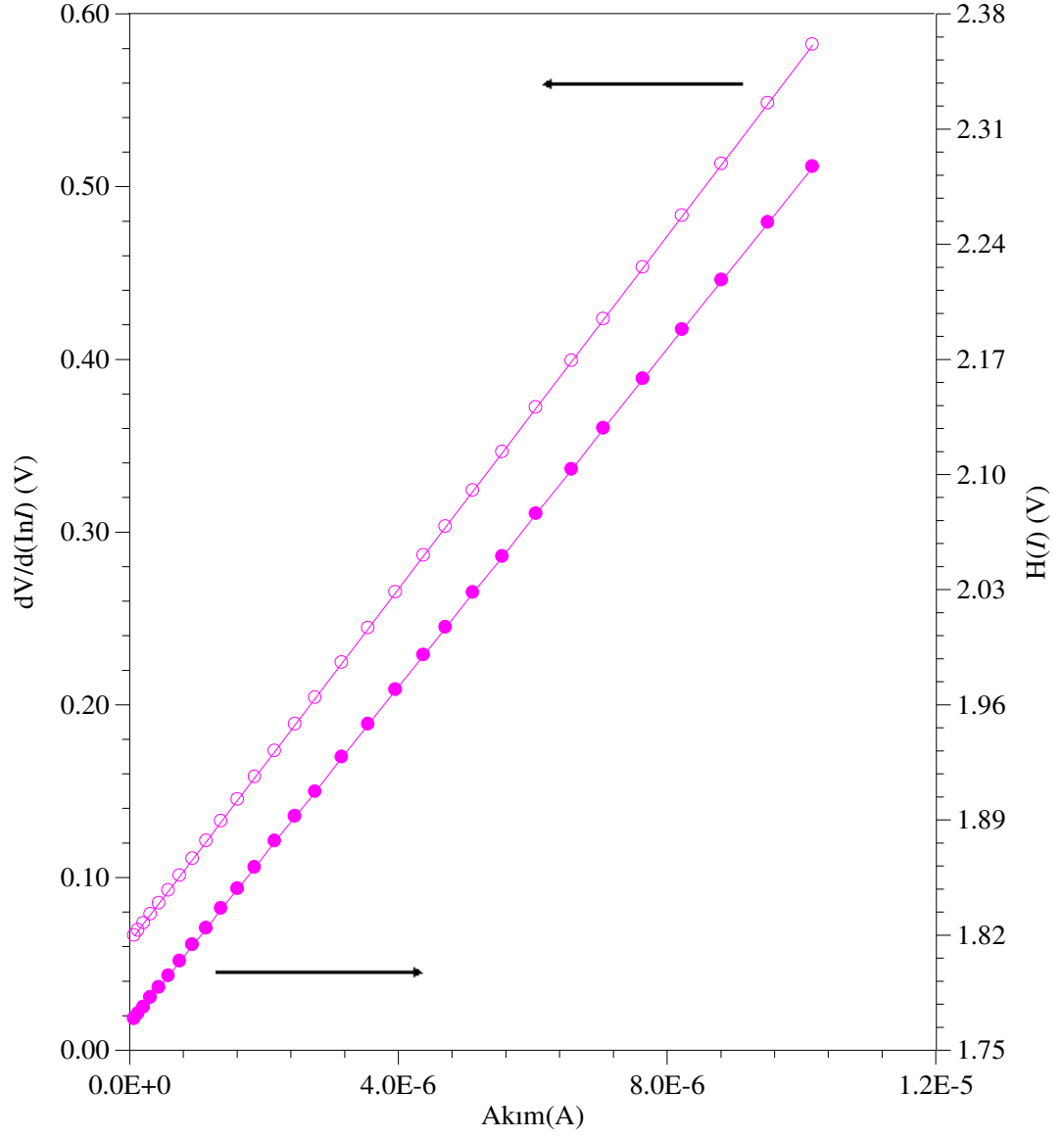
Şekil 4.19. Sn/n-Si Schottky diyotu için (3.52) denklemi (III. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



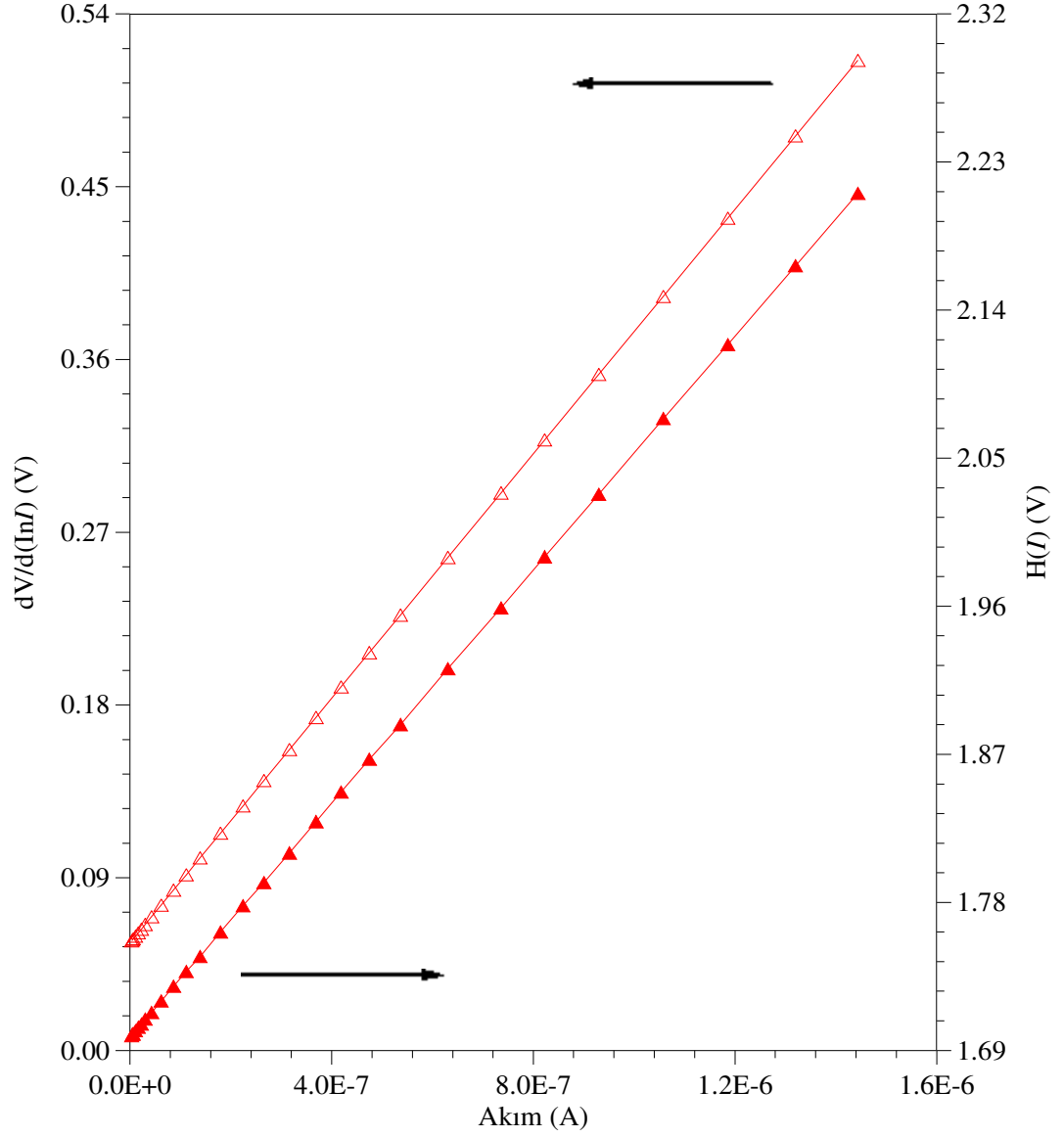
Şekil 4.20. Fe/n-Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri



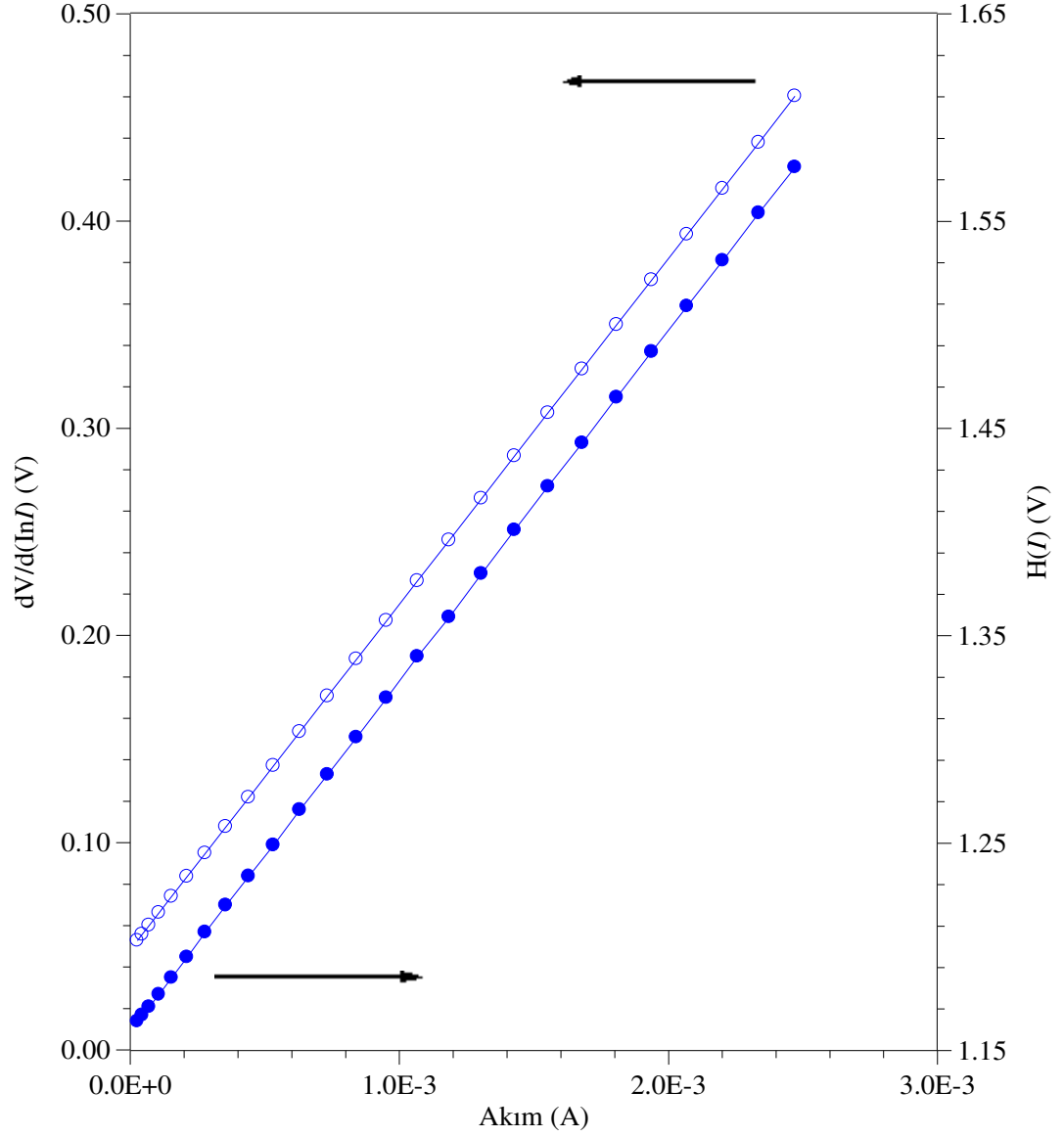
Şekil 4.21. Ni/n-Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri



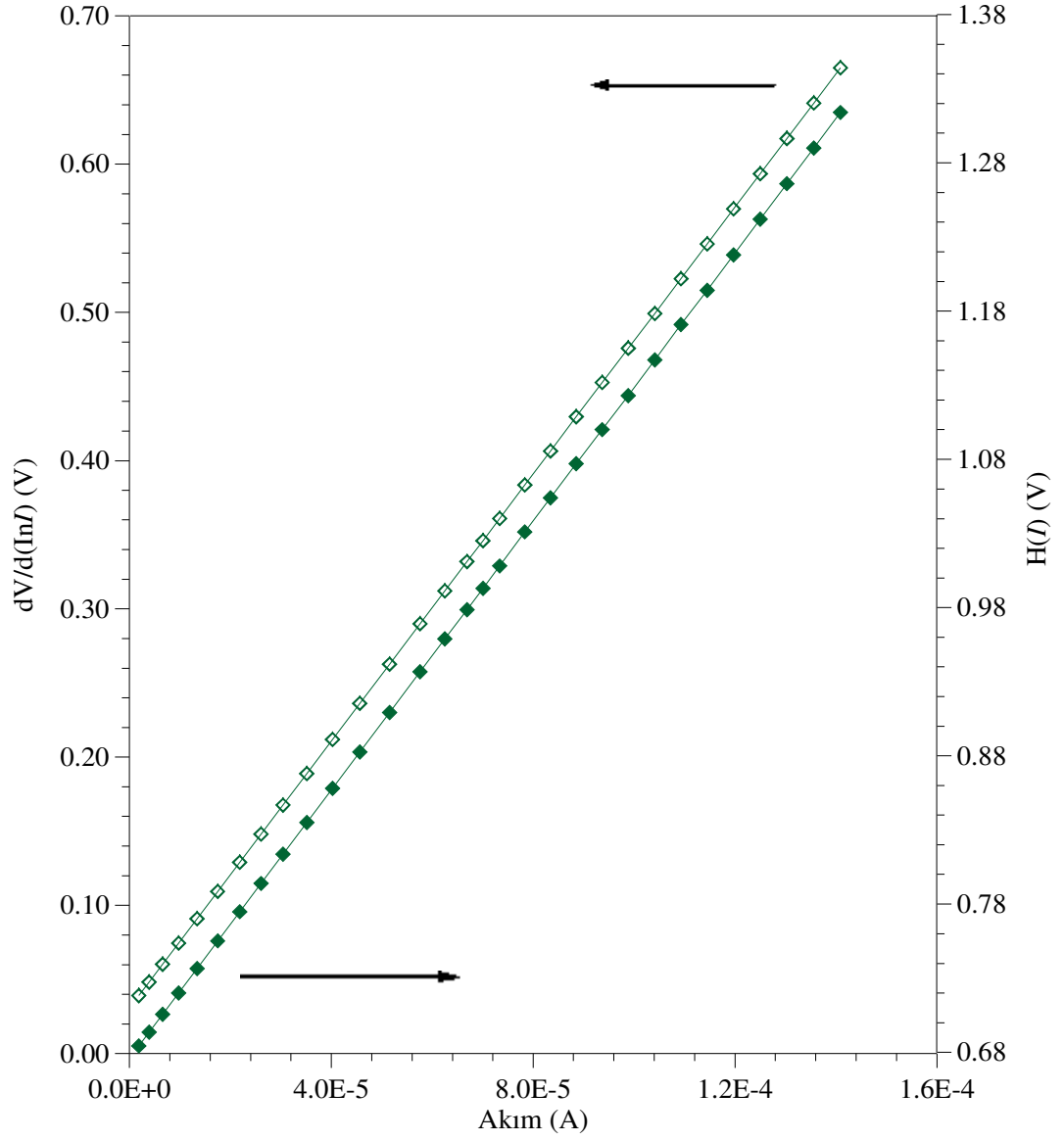
Şekil 4.22. Cd/n-Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metod) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri



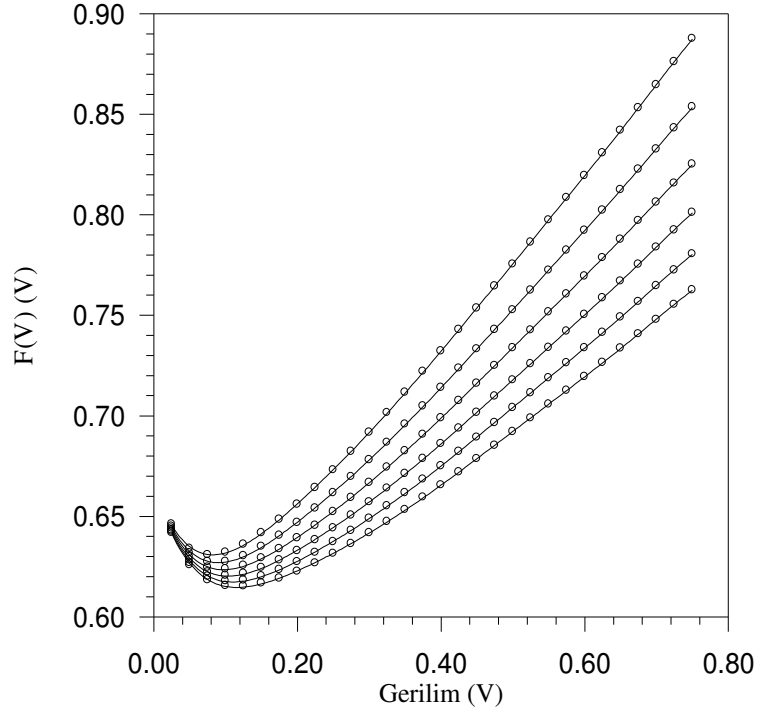
Şekil 4.23. Pb/n-Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri



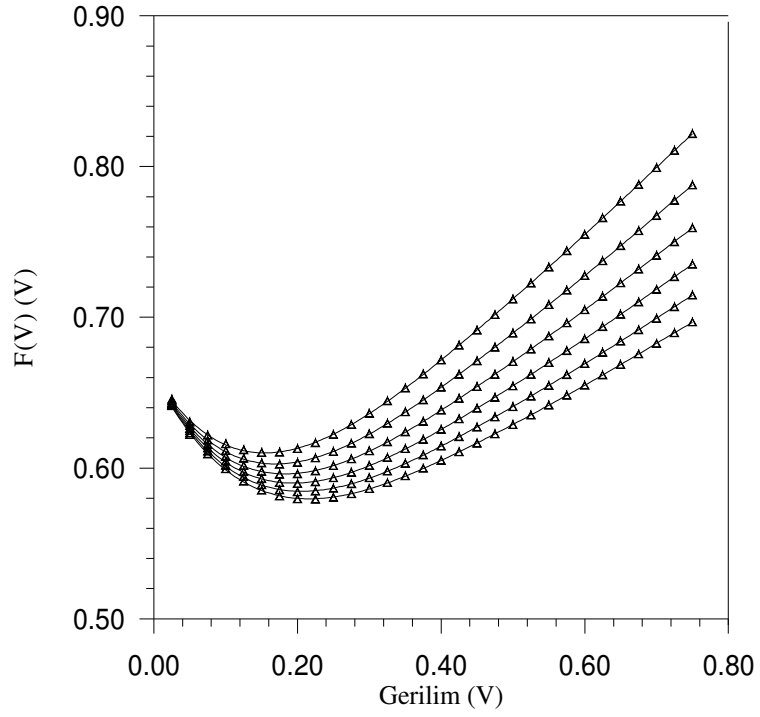
Şekil 4.24. Bi/n-Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metot) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri



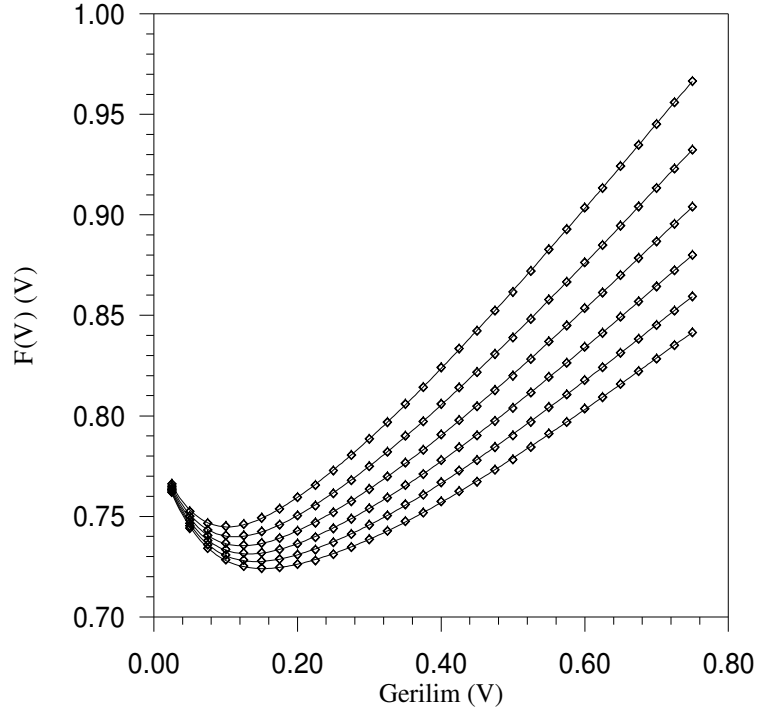
Şekil 4.25. Sn/n-Si Schottky diyotu için (3.57) ve (3.58) denklemleri (IV. metod) ile çizilen $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri



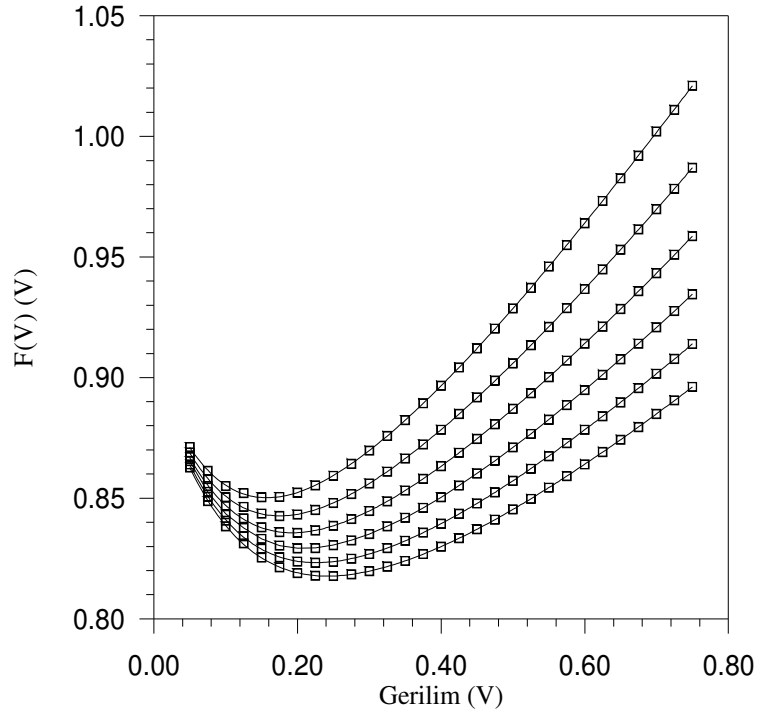
Şekil 4.26. Fe/*n*-Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



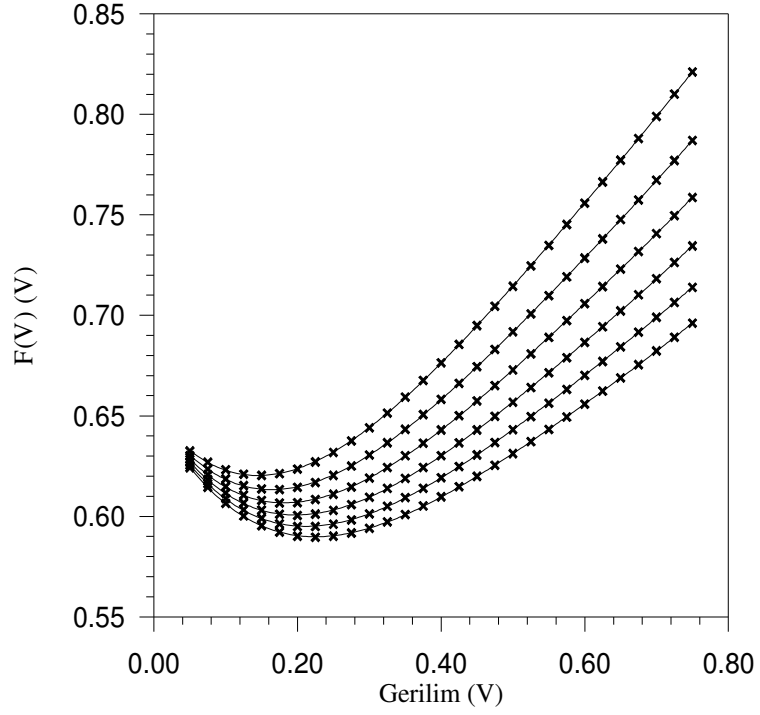
Şekil 4.27. Ni/*n*-Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



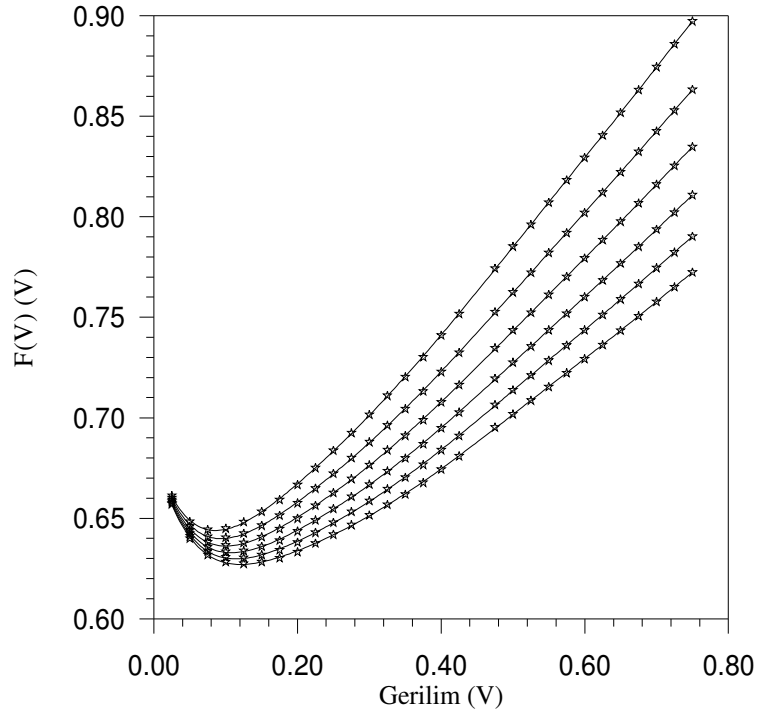
Şekil 4.28. Cd/n-Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



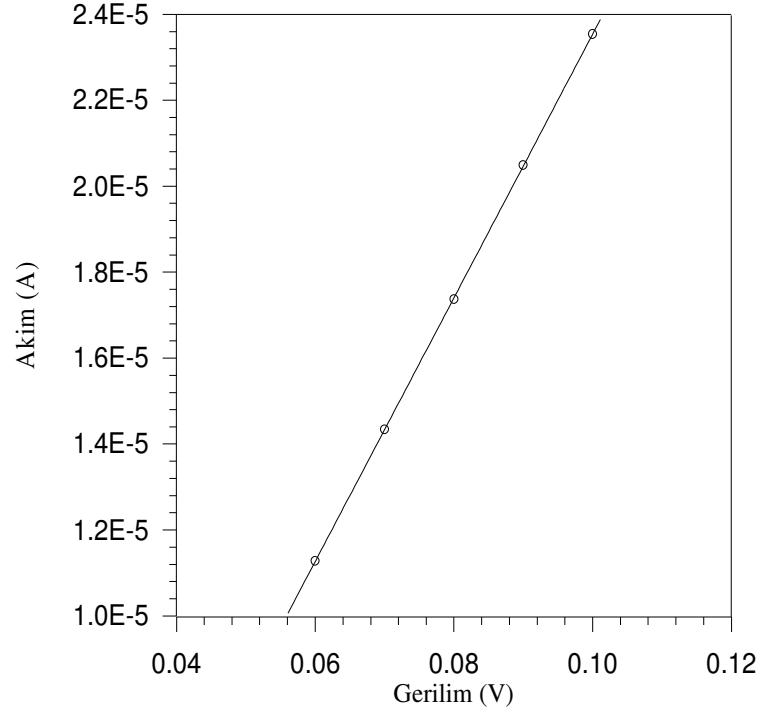
Şekil 4.29. Pb/n-Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



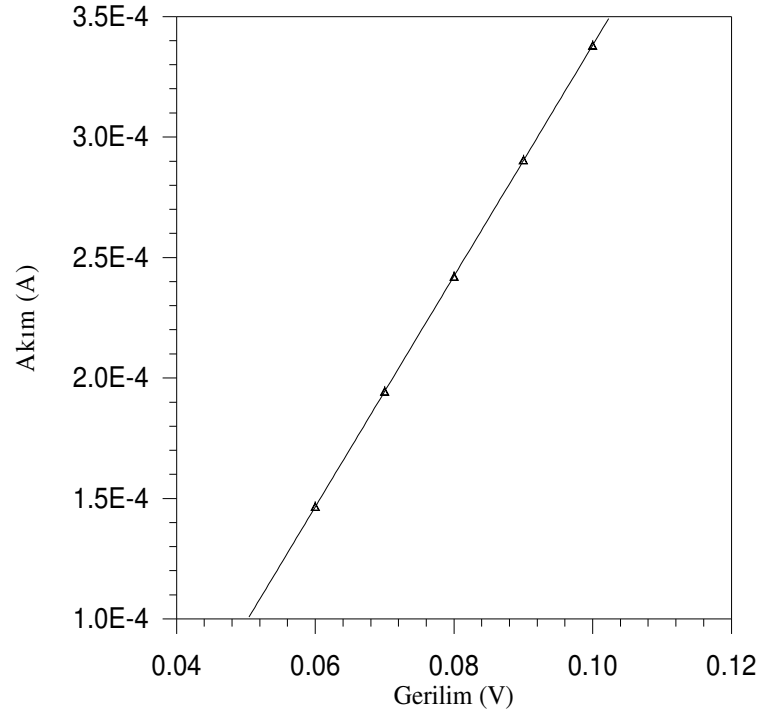
Şekil 4.30. Bi/n-Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



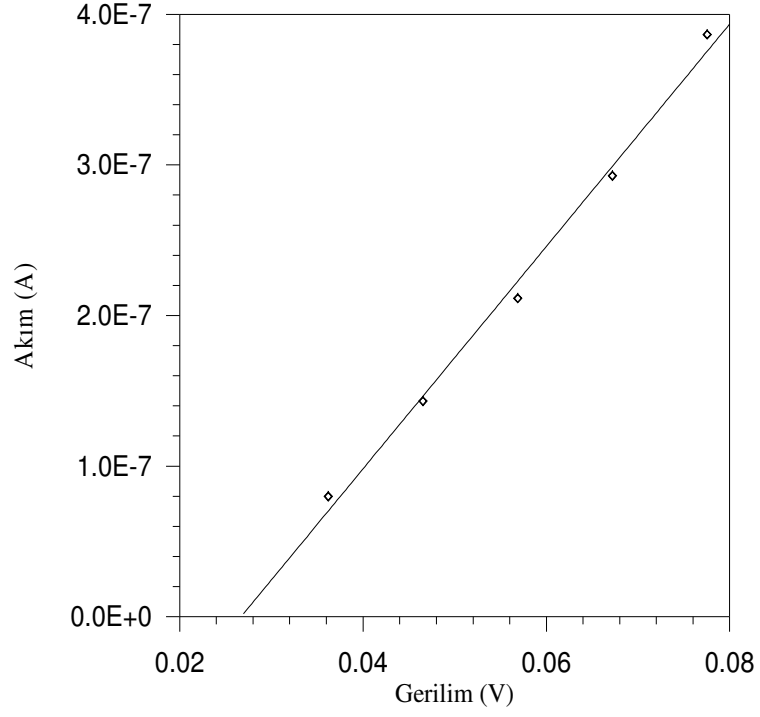
Şekil 4.31. Sn/n-Si Schottky diyotu için (3.60) denklemi (V. metot) ile çizilen $F(V)$ -(V) grafiği



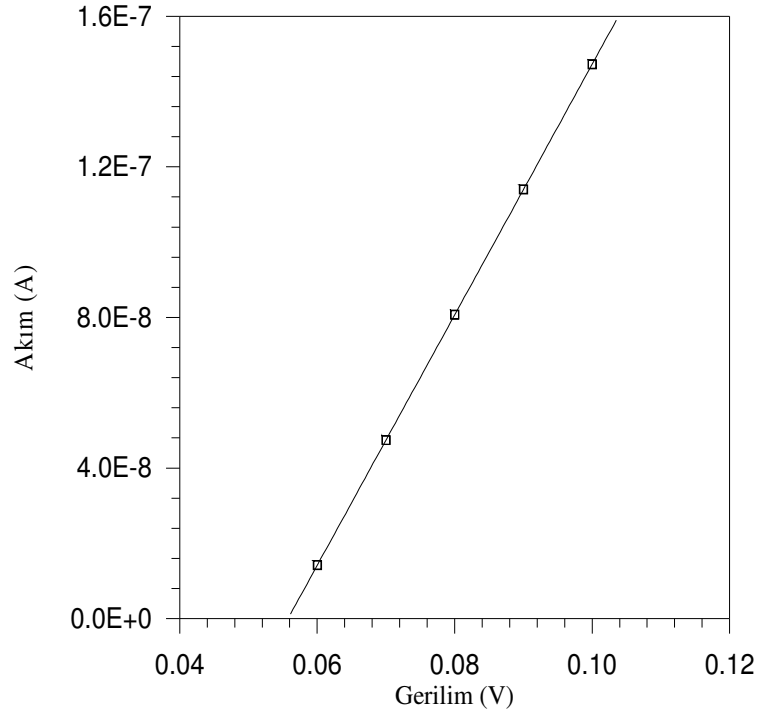
Şekil 4.32. Fe/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin I - V grafiği



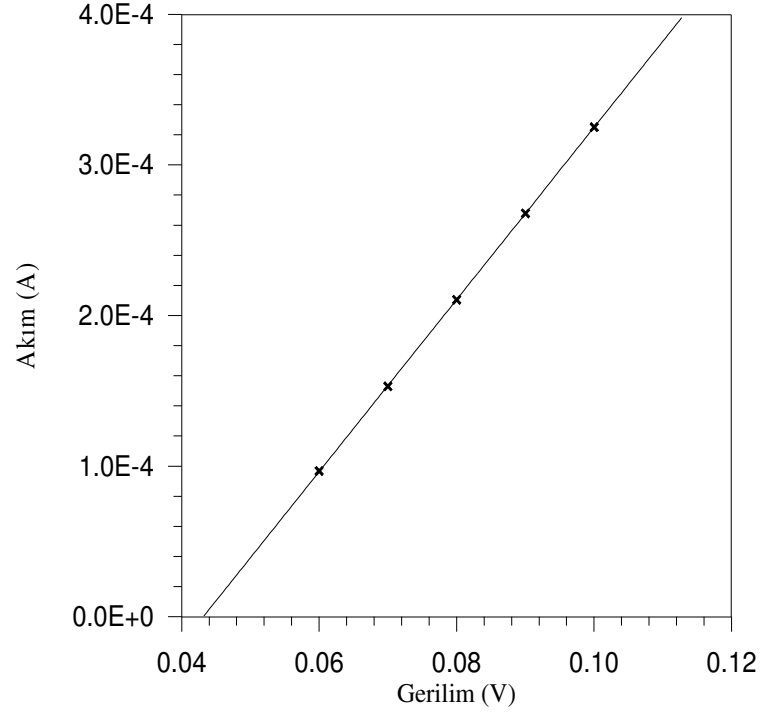
Şekil 4.33. Ni/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin I - V grafiği



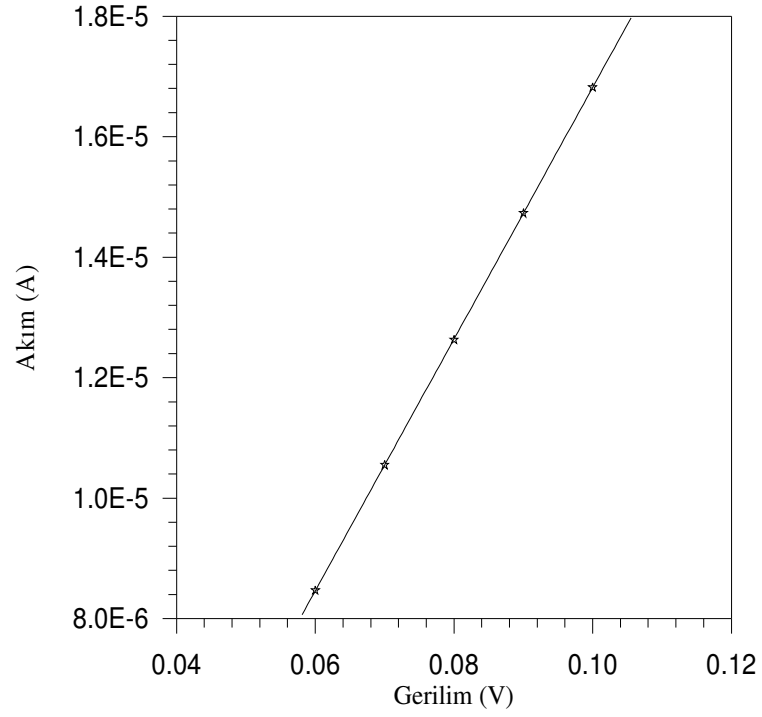
Şekil 4.34. Cd/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin I - V grafiği



Şekil 4.35. Pb/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin I - V grafiği



Şekil 4.36. Bi/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin I - V grafiği



Şekil 4.37. Sn/n-Si Schottky diyotu için (3.80) denklemi (VI. metot) ile çizilen fit değerlerinin I - V grafiği

Çizelge 4.1-6'daki veriler incelendiğinde, Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn ile yapılan diyotlar için idealite faktörü değerlerinin sırasıyla 0.589-1.243, 0.756-1.425, 1.000-2.095, 1.000-2.828, 1.000-1.874 ve 0.545-1.194 aralığında değiştiği görülmektedir. İdealite faktörü değerlerinin genelde birbiri ile iyi bir uyum içinde olduğu ancak III, IV ve V. metotlarda diğer metotlardan bulunan sonuçlara göre oldukça düşük ya da yüksek olduğu görülmektedir.

Yine Çizelge 4.1-6'dan, yukarıdaki diyotlar için engel yüksekliği değerlerinin sırasıyla 0.638-0.673, 0.630-0.726, 0.741-0.778, 0.839-0.905, 0.619-0.668 ve 0.654-0.691 eV aralığında olduğu görülmektedir. Bu verilerin detaylı incelenmesinden, tüm diyotlar için engel yüksekliği değerlerinin birbiri ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

Diyotların seri direnç değerlerinin ise Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn için ~2730-3800, ~173-290, ~53750-153800, 100697-300650, ~165-530 ve ~4050-5830 Ω aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu değerler de kendi içinde birbiri ile iyi bir uyum içindedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuç

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. Kesim 3.2'de verilen kimyasal temizleme işlemlerini takiben yarıiletkenin bir yüzeyi ısısal buharlaştırma yöntemiyle Au-Sb metaliyle kaplanarak omik kontak yapısı oluşturulduktan sonra, kristal 6 eşit parçaya bölünerek diğer yüzeye Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn 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.

Nötral bölge direncinin diyotların akım-gerilim karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemek için teorileri Kesim 3.1'de verilen altı farklı metotla idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Verilerin incelenmesinden, tüm diyotlar için engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin birbiri ile iyi bir uyum içinde olduğu, ancak üçüncü, dördüncü ve beşinci metotlarda idealite faktörü değerlerinin diğerlerine göre oldukça düşük ya da yüksek olduğu görülmüştür.

İdealite faktörü ve etkin engel yüksekliğinin uygulanan gerilimle anlamlı biçimde değiştikleri, nötral bölge seri direncinin idealite faktörü ve etkin engel yükseklikleri üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olduğu gözlemlendi.

5.2. Öneriler

Bu çalışma, Fe, Ni, Cd, Pb, Bi ve Sn/ n -Si Schottky diyotların oda sıcaklığındaki düz beslem akım-gerilim karakteristiklerinden idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç parametrelerinin incelenmesi ve değerlendirilmesiyle sınırlandırılmıştır. Bulunan parametrelerin sıcaklığa bağlı değerlerinin de belirlenmesi, veriler üzerinde daha ileri düzey değerlendirmelerin yapılabilmesi için faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Bohlin, K.H., 1986. Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. **J. Applied Physics**, 3, 60: 1223.
- Braun, F., 1874. **Pogg. Ann.**, 153: 556.
- Büget U. and Wright, G.T., 1967. Space-charge-limited current in silicon. **Solid-State Electronics**, 10:199.
- Cheung, S.K. and Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from I-V characteristics. **Applied Physics Letters**, 2, 49: 85.
- Cibils, R.M. and Buitrago, R.H., 1985. **J. Applied Physics**, 58: 1072.
- Sze, S.M., 1981. **Physics of semiconductor devices**. John-Wiley and Sons, Inc., 104, New York.
- Çetinkara, H.A., 1996. **Yüksek Lisans Tezi**. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Çetinkara, H.A., 2002. **Doktora Tezi**. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Ferendeci, A.M., 1991. **Physical foundations of solid state and electron devices**. McGraw-Hill Inc., 443, New York.
- Kelvey, P.J, 1982. **Semiconductor physics**. E. Robert Krieger Publishing Company, 16, 478-489, Florida.
- Lee, T.C., Fung, S., Beling, C.D. and Au, H.L., 1992. **J. Applied Physics**. 72: 4739.
- Lien, C.D., So, F.C.T. and Nicolet, M.A., 1984. **IEEE Trans-Electron Devices**, 31: 1502.
- Norde, H.A., 1979. **J. Applied Physics**, 50: 5052.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., 1988. **Metal-semiconductor contacts**. Clarendon Press., 4:14, Oxford.
- Sato, K. and Yashumura, Y., 1985. Study of forward *I-V* plot for schottky diodes with series resistance. **J. Applied Physics**, 9, 58: 3655.
- Schottky, W., 1938. **Naturwiss**, 26: 843.
- Shuer, M., 1990. **Physics of semiconductor devices**. Prentice-Hall Inc., 194-225, New Jersey.
- Ziel, A., 1968. **Solid-state physical electronics**. Prentice-Hall, Inc., 7: 136-144, New Jersey.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü Öğretim yesi 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 teŐekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

AraŐtırmanın yürütülmesi için gereken numunelerin hazırlanması ve deneysel çalıŐmaların yapılmasındaki çok kıymetli yardımlarından dolayı sayın Doç.Dr. Güven ÇANKAYA'ya (GaziosmanpaŐa Üniv., Fen-Edebiyat Fak., Fizik Bölümü) teŐekkürü bir borç bilirim. Deney sistemlerinin sağlanmasındaki katkılarından dolayı sayın Prof.Dr. Nazım UÇAR'a (Süleyman Demirel Üniv., Fen-Edebiyat Fak., Fizik Bl.), kaynakların sağlanması ve hesaplamaların yapılmasındaki katkılarından ve kıymetli yardımlarından dolayı sayın Yrd.Doç.Dr. H. Ali ÇETİNKARA ve Yrd.Doç.Dr. Oğuz KILIçOğLU'na, ders aŐamasında ve tez yazımı sırasında maddi-manevi destek olan sayın Öğr.Gör. Mustafa YENİAD, Burhan KIZILDAė ve Bekir VARLIBAŐ'a da teşekkür ederim.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Hatay'ın İskenderun ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Cumhuriyet İlkokulunda, Orta öğrenimini Aktepe İlköğretim okulunda, Lise öğrenimini ise Gazi Lisesi'nde tamamladı. 1997 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü'nü kazandı ve 2002 yılında mezun oldu.

Eylül-2004'de Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans'a başladı ve Eylül-2007'de mezun olarak, Fizik Bilim Dalı'nda "Bilim Uzmanı" unvanını aldı. Halen Maliye Bakanlığına bağlı olarak memuriyet görevini sürdürmektedir.