

**BUHARLAŞTIRMA, SILAR VE ELEKTROKİMYASAL  
YÖNTEMLER İLE OLUŞTURULAN PbS ARAYÜZEYLİ  
SCHOTTKY KONTAKLARIN KARAKTERİZASYONU**

**Yasir GÜLEN**

**Doktora Tezi  
Fizik Anabilim Dalı  
Doç. Dr. Çiğdem NUHOĞLU  
2010  
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**BUHARLAŞTIRMA, SİLAR VE ELEKTROKİMYASAL  
YÖNTEMLER İLE OLUŞTURULAN PbS ARAYÜZEYLİ  
SCHOTTKY KONTAKLARIN KARAKTERİZASYONU**

**Yasir GÜLEN**

**FİZİK ANABİLİM DALI**

**ERZURUM  
2010**

**Her hakkı saklıdır**

Doç. Dr. Çiğdem NUHOĞLU danışmanlığında, Yasir GÜLEN tarafından hazırlanan bu çalışma 10/08/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, Fizik Anabilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT

İmza: 

Üye: Prof. Dr. Yavuz ONGANER

İmza: 

Üye: Doç. Dr. Çiğdem NUHOĞLU

İmza: 

Üye: Doç. Dr. Şükrü KARATAŞ

İmza: 

Üye: Doç. Dr. Şakir AYDOĞAN

İmza: 

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ömer AKBULUT**

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Doktora Tezi

### BUHARLAŞTIRMA, SILAR VE ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLER İLE OLUŞTURULAN PbS ARAYÜZEYLİ SCHOTTKY KONTAKLARIN KARAKTERİZASYONU

Yasir GÜLEN

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Çiğdem NUHOĞLU

SiC, IV-IV grubu bir yarıiletken malzemedir. Geniş yasak enerji aralığı, düşük sızıntı akımı, yüksek kırılma elektrik alan, iyi termal iletkenlik ve yüksek termal kararlılık, SiC'in bazı avantajlarıdır. Bu avantajlar SiC'i yüksek sıcaklık ve yüksek voltaj uygulamalarında oldukça etkin kılmaktadır. PbS, IV-VI grubu bir yarıiletkendir ve direkt dar band aralıklı PbS yapılar kızıl ötesi dedektörlerde, fotoğrafçılıkta, güneş enerjisinin emilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı farklı metotlar ile oluşturulan arayüzey tabakasının engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ) değerini nasıl değiştireceğini incelemektir. Omik kontaklar, numunenin mat yüzeyine Ni metalizasyonu ve 950°C'de 5 dakika azot gazı akışı altında tavlansarak oluşturuldu. Büyütme metotları içerisinde Buharlaştırma, SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) ve Elektrokimyasal yöntemler diğer yöntemlere kıyasla daha ucuz, daha basit ve az zaman harcanması gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda oldukça tercih edilmektedir. Dört parça olarak hazırlanan numunelerden üçünün parlak yüzeylerine Buharlaştırma, SILAR ve Elektrokimyasal teknikleri ile PbS ince film tabakası oluşturulduktan sonra Referans (PbS arayüzeysiz) ile birlikte her dört parça üzerinde Schottky diyodları imal edildi. Hazırlanan diyodların  $I$ - $V$  ölçümleri sıcaklığa bağlı olarak alındı. Engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi incelendi. Ayrıca oda sıcaklığında  $C$ - $V$  ölçümleri alındı. Norde Fonksiyonları ile engel yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplandı. Cheung Fonksiyonları kullanılarak her bir numune için seri direnç ve idealite faktörleri hesaplandı ve bu sonuçlar geleneksel  $I$ - $V$ 'den elde edilen verilerle kıyaslandı. Yine, elde edilen her bir numune için arayüzey hal yoğunluğu hesaplandı. Son olarak PbS arayüzeyli her üç numune için büyüme doğrultuları belirlendi. Buharlaştırma ve SILAR yöntemleriyle oluşturulan Au/PbS/n-SiC diyodların  $\Phi_b$  değerlerinin referans numuneninkinden (Au/n-SiC) küçük ve Elektrokimyasal olarak oluşturulan Au/PbS/n-SiC Schottky diyodların  $\Phi_b$  değerleri referans numuneninkinden büyük olduğu gözlenmiştir. Böylece, arayüzey tabakası oluşturularak  $\Phi_b$  değerinin değiştirilebileceği deneysel olarak doğrulanmıştır.

**2010, 144 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** SiC, SILAR, Elektrodepozisyon, Metal-yarıiletken kontaklar, XRD

## ABSTRACT

Ph. D. Thesis

### CHARACTERIZATION OF SCHOTTKY CONTACTS PbS INTERFACE CONSTITUTED WITH EVAPORATION, SILAR AND ELECTROCHEMICAL METHODS

Yasir GÜLEN

Atatürk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Çiğdem NUHOĞLU

SiC is a material from the IV-IV semiconductor family. Wide band gap, low leakage current, high breakdown electric field, good thermal conductivity and high thermal stability are some of the advantages of SiC. These advantages make SiC highly effective for high-temperature and high-voltage applications. PbS belongs to group IV-VI semiconductor material, and direct narrow band gap semiconductor PbS structures are widely used in the infra-red detectors, photography and solar energy. The aim of this study was to investigate how interface layers formed by various methods change  $\Phi_b$  values. Ohmic contacts were made by metallization of Ni the unpolished surface and followed by a temperature treatment at 950<sup>0</sup>C for 5 minutes in a flux of nitrogen. At the last decade, Evaporation, SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) and Electrochemical methods have been rather used because of the superior properties such as being cheaper, more easily and spending less time. After dividing to four pieces of substrate, Evaporation, SILAR and Electrochemical techniques were made to the polished surface of three substrates. Finally, reference Au/n-SiC and Au/PbS/n-SiC Schottky diode having interfacial layer were produced by Au metallization. Temperature dependent *I-V* measurements of Au/n-SiC and Au/PbS/n-SiC Schottky structures were obtained. Barrier height and ideality factor changes with temperature were investigated. *C-V* measurements were also done at room temperature. The barrier height and series resistance were calculated by Norde functions. Cheung's functions in each sample were calculated for series resistance and ideality factors, and these results were compared with data obtained from traditional of *I-V*. The interface state density was also calculated for each sample. In addition, all three samples on the surface of PbS interfaces, X-ray diffraction measurements were performed and revealed the presence of PbS thin films. Consequently, the barrier heights of the Au/PbS/n-SiC samples formed by the evaporation and SILAR method had lower values than those of the reference sample (Au/n-SiC) while the barrier height of the Au/PbS/n-SiC sample formed by the electrochemical method had higher value than that of the reference sample (Au/n-SiC). Thus, the barrier height modification in the Au/n-SiC Schottky diodes can be supplied by forming the PbS interfacial layer between Au and SiC interface.

**2010, 144 Pages**

**Keywords:** SiC, SILAR, Electrodeposition, Metal-semiconductor contacts, XRD

## TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarım süresince her türlü destek ve yardımlarını gördüğüm, bilimsel alanda hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve büyük fedakârlık gösteren Doktor'a Hocam Sayın Doç. Dr. Çiğdem NUHOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Teorik ve deneysel çalışmalarım boyunca yardımlarını gördüğüm ve bilimsel olarak istifade ettiğim Sayın Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT, Prof. Dr. Yavuz ONGANER, Doç. Dr. Şakir AYDOĞAN, Yrd. Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI ve Yrd. Doç. Dr. Emre GÜR hocalarıma ve Araş. Gör. Kadir EJDERHA'ya teşekkürlerimi sunarım.

XRD ölçümleri için Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Fatih YETİM'e ve Elektrokimyasal yöntem için Fen Fakültesi Kimya Bölümü Yrd. Doç. Dr. Murat ALANYALIOĞLU'na yardımlarından dolayı teşekkür ederim, ayrıca tez yazım aşamasında yardımını esirgemeyen Sayın Muhammet GÜLLÜCE ve Sayın Samih YALÇIN'a teşekkür ederim.

Bu süreçte, maddi-manevi hiç bir fedakârlıktan kaçınmayarak bana destek olan aileme de sonsuz şükranlarımı sunarım.

**Yasir GÜLEN**

**Ağustos 2010**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>15</b>
2.1. Kontaklar.....	15
2.2. Doğrultucu (Schottky) Kontaklar.....	15
2.2.1. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken Schottky kontaklar.....	15
2.2.2. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken Schottky kontaklar.....	18
2.3. Omik Kontaklar.....	20
2.3.1. Metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken Omik kontaklar.....	21
2.3.2. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken Omik kontaklar.....	22
2.4. Metal (Omik)/ <i>n</i> -tipi Yarıiletken/ Metal (Doğrultucu) Yapısı.....	24
2.5. Schottky Diyotlarda Termiyonik Emisyonla Akım İletimi.....	25
2.6. Norde Modeline Göre Akım-Gerilim Eğrilerinin Karakteristiği.....	26
2.7. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi.....	29
2.8. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler.....	33
2.9. Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı.....	36
2.10. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Sıcaklığın Etkisi.....	38
2.11. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojen Olmayan Engel Yüksekliğinin Analizi.....	39
2.12. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Karakteristiklerinin Belirlenmesi ...	42
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>45</b>
3.1. Giriş.....	45
3.2. SiC Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması.....	45
3.3. Omik Kontak Yapımı.....	46

3.4. SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) Tekniği .....	47
3.5. Çözeltilerin Hazırlanması .....	49
3.6. Kurşun Sülfür (PbS) .....	51
3.7. Altın ve p-PbS Eklem .....	52
3.8. p-PbS/n-SiC Eklem .....	54
3.9. PbS'ün Elektrokimyasal Depozisyon Yöntem ile Üretilmesi .....	55
3.10. Elektrotlar .....	56
3.11. Schottky Kontak Yapımı .....	60
3.12. X-ışını Kırınımı .....	60
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....	<b>63</b>
4.1. Giriş .....	63
4.2. Akım-Gerilim ( $I - V$ ) Ölçüleri ve Diyot Parametrelerinin Hesaplanması .....	63
4.3. Homojen Olmayan Engel Analizi .....	81
4.4. $C - V$ (Kapasite-Gerilim) Ölçümleri ile Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi ....	100
4.5. Akım Gerilim Karakteristiklerinde Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması ....	107
4.6. Arayüzey Hal Yoğunluğunun Hesaplanması .....	116
4.7. PbS Arayüzeyli Diyotların XRD Ölçümleri.....	121
<b>5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR</b> .....	<b>125</b>
KAYNAKLAR .....	137
ÖZGEÇMİŞ .....	144



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$\text{\AA}$	Angstrom
$A$	Diyodun etkin alanı
$A^*$	Richardson sabiti
$C-V$	Kapasite-gerilim
cm	Santimetre
$d$	Düzlemler arası mesafe
$e$	Elektronun yükü
eV	Elektron volt
$E_c$	İletkenlik bandının tabanının enerjisi
$E_f$	Fermi enerjisi seviyesi
$E_g$	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
$E_v$	Valans bandının tavanının enerjisi
$J$	Akım yoğunluğu
$J_o$	Ters beslem doyma akım yoğunluğu
$k$	Boltzmann sabiti
$m_e$	Elektronun kütlesi
$n$	İdealite faktörü
$N_c$	Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu
$N_d$	Donor konsantrasyonu
$N_{ss}$	Arayüzey durum yoğunluğu
$I-V$	Akım-gerilim
$R_s$	Seri direnç
$V_{dif}$	Difüzyon potansiyeli
$W$	Uzay yükü bölgesinin genişliği
$^{\circ}C$	Santigrad derece
$\lambda$	Dalga boyu
$\Phi_b$	Ortalama engel yüksekliği
$\Phi_{eff}$	Etkin engel yüksekliği
$\Phi_m$	Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_s$	Yarıiletkenin iş fonksiyonu

$\chi_s$	Yarıiletkenin elektron ilgisi
$\sigma_s$	Standart sapma
$\epsilon_s$	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
$\epsilon_o$	Boşluğun dielektrik sabiti

### **Kısaltmalar**

SILAR	Sıralı İyonik Tabaka Çökmesi ve Reaksiyonu
XRD	X-ışını Kırınımı
SED	Schottky Engel Diyot

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	C ve dört komşu Si atomu için tetragonal bağ yapısı.....	5
Şekil 1.2.	2H, 3C, 4H ve 6H-SiC politip modelleri (a, c ve u örgü parametreleri) .	6
Şekil 1.3.	a) Hegzagonal yapıya ait Miller indisleri b) SiC ait hegzagonal yapı ....	6
Şekil 1.4.	En yaygın olarak bilinen SiC politiplerin hegzagonallik dereceleri .....	7
Şekil 2.1.	Kontaktan önce metal ve <i>n</i> -tipi yarıiletken için enerji bant diyagramları ....	17
Şekil 2.2.	Kontaktan sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı.....	18
Şekil 2.3.	Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji-bant diyagramı a) kontaktan önce, b) kontaktan sonra ve termal dengede, c) $V \neq 0$ durumunda .....	19
Şekil 2.4.	$\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal/ <i>n</i> -tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı a) kontaktan önce, b) kontaktan sonra, c) düz beslem altında, d) ters beslem altında.....	22
Şekil 2.5.	Metal/p-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji-bant diyagramı a) kontaktan önce, b) kontaktan sonra, c) $V \neq 0$ durumunda .....	23
Şekil 2.6.	$n^+nM$ yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı.....	24
Şekil 2.7.	Metal <i>n</i> -tipi yarıiletken yapılarında doğrultucu kontakta; a) Potansiyel dağılımı b) Yük dağılımı .....	30
Şekil 2.8.	(a) Metal/yarıiletken arayüzeyinde imaj yükü ve elektrik alan çizgileri, (b) Elektrik alan sıfır iken potansiyel engelindeki bükülme, (c) Sabit bir elektrik alanda imaj kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme.....	35
Şekil 2.9.	Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip olan bir Schottky kontakta iki boyutlu enerji-bant diyagramı .....	39
Şekil 3.1.	Tavlama için kullanılan fırın .....	46
Şekil 3.2.	SILAR tekniğinin sistematik diyagramı: (a) $Y^+L^-$ adsorpsiyonu ve elektiriksel ikili katmanın oluşumu, (b) çalkalama (I) fazla ve yapışmayan $Y^+$ ve $L^-$ iyonlarının uzaklaştırılması, (c) daha önce yapışan $Y^+$ iyonları ile $G^-$ iyonlarının YG oluşturacak şekilde reaksiyona girmesi, (d) taban malzeme yüzeyinde oluşan YG bileşiğinden fazla ve reaksiyona girmeyen parçacıkların uzaklaştırılması .....	48
Şekil 3.3.	PbS ince filmin SILAR tekniği ile büyütülmesinin şematik gösterimi .	50
Şekil 3.4.	SILAR döngüsü için numune ile birlikte teflon tutucunun kesit görüntüsü; a) SILAR döngüsü öncesi b) SILAR döngüsü sonrası.....	51
Şekil 3.5.	Altın ve p-PbS eklem oluşturmadan önce enerji-bant diyagramı.....	53
Şekil 3.6.	Altın ve p-PbS eklem oluştuktan sonra enerji-bant diyagramı.....	54
Şekil 3.7.	p-PbS ve n-SiC eklem oluşturmadan önce enerji-bant diyagramı .....	54
Şekil 3.8.	p-PbS ve n-SiC eklem oluştuktan sonra enerji-bant diyagramı .....	55
Şekil 3.9.	PbS elektrodpozisyonunun şematik gösterimi.....	56
Şekil 3.10.	PbS elektrodpozisyonu için kullanılan elektrokimyasal sistem .....	58
Şekil 3.11.	ITO kaplı cam elektrot üzerinde PbS filmine ait soğurma spektrumu ve soğurma-enerji değişimi .....	59
Şekil 3.12.	Numune ile birlikte numune tutucunun kesit görüntüsü .....	60
Şekil 3.13.	X-ışınlarının atomik düzlemlerden kırınımı.....	61

Şekil 4.1.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodun oda sıcaklığında ( <i>I-V</i> ) karakteristiği	66
Şekil 4.2.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun oda sıcaklığında ( <i>I-V</i> ) karakteristiği	67
Şekil 4.3.	Au/PbS(Elektrokim.) /n-SiC/Ni diyodun oda sıcaklığında ( <i>I-V</i> ) karakteristiği	68
Şekil 4.4.	Referans Au/n-SiC/Ni diyodun oda sıcaklığında ( <i>I-V</i> ) karakteristiği	69
Şekil 4.5.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı ( <i>I-V</i> ) karakteristiği	70
Şekil 4.6.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı ( <i>I-V</i> ) karakteristiği	71
Şekil 4.7.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı ( <i>I-V</i> ) karakteristiği	72
Şekil 4.8.	Referans Au/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı ( <i>I-V</i> ) karakteristiği	73
Şekil 4.9.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi	77
Şekil 4.10.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi	77
Şekil 4.11.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi	78
Şekil 4.12.	Referans Au/n-SiC/Ni diyodun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi	78
Şekil 4.13.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodun idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi	79
Şekil 4.14.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi	79
Şekil 4.15.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi	80
Şekil 4.16.	Referans Au/n-SiC/Ni diyodun idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi	80
Şekil 4.17.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodun ( $n^{-1}-1$ ) ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye bağlı değişimi	83
Şekil 4.18.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun ( $n^{-1}-1$ ) ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye bağlı değişimi	84
Şekil 4.19.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun ( $n^{-1}-1$ ) ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye bağlı değişimi	85
Şekil 4.20.	Referans Au/n-SiC/Ni diyodun ( $n^{-1}-1$ ) ve engel yüksekliğinin $1/2kT$ 'ye bağlı değişimi	86
Şekil 4.21.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodunun bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akımın değişimi	87
Şekil 4.22.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodun $\ln I/T^2$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi	87
Şekil 4.23.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodunun bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akımın değişimi	88
Şekil 4.24.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun $\ln I/T^2$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi	88
Şekil 4.25.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodunun bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akımın değişimi	89
Şekil 4.26.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun $\ln I/T^2$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi	89
Şekil 4.27.	Referans Au/n-SiC/Ni diyodunun bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akımın değişimi	90
Şekil 4.28.	Referans Au/n-SiC/Ni diyodun $\ln I/T^2$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi	90
Şekil 4.29.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyoduna ait numune sıcaklığına bağlı Norde eğrileri	91
Şekil 4.30.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodun Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi	93

Şekil 4.31. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait numune sıcaklığına bağlı Norde eğrileri.....	94
Şekil 4.32. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi .....	95
Şekil 4.33. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait numune sıcaklığına bağlı Norde eğrileri.....	96
Şekil 4.34. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi .....	97
Şekil 4.35. Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait numune sıcaklığına bağlı Norde eğrileri	98
Şekil 4.36. Referans Au/n-SiC/Ni diyodun Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi .....	99
Şekil 4.37. Au/PbS (Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de $C-V$ grafiği.....	103
Şekil 4.38. Au/PbS (SILAR)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de $C-V$ grafiği .....	103
Şekil 4.39. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de $C-V$ grafiği.....	104
Şekil 4.40. Referans Au/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de $C-V$ grafiği .....	104
Şekil 4.41. Au/PbS (Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de $1/C^2-V$ grafiği .....	105
Şekil 4.42. Au/PbS (SILAR)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de $1/C^2-V$ grafiği.....	105
Şekil 4.43. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de $1/C^2-V$ grafiği.....	106
Şekil 4.44. Referans Au/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de $1/C^2-V$ grafiği.....	106
Şekil 4.45. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri ...	110
Şekil 4.46. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.....	110
Şekil 4.47. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri .....	111
Şekil 4.48. Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait $dV/d(\ln I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri.....	111
Şekil 4.49. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait $I-V$ karakteristikleri ve Cheung fonksiyonundan elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi .....	112
Şekil 4.50. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait $I-V$ karakteristikleri ve Cheung fonksiyonundan elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi.....	112
Şekil 4.51. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait $I-V$ karakteristikleri ve Cheung fonksiyonundan elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi .....	113
Şekil 4.52. Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait $I-V$ karakteristikleri ve Cheung fonksiyonundan elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi.....	113
Şekil 4.53. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait $I-V$ karakteristikleri, Norde ve Cheung fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	114
Şekil 4.54. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait $I-V$ karakteristikleri, Norde ve Cheung fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	114
Şekil 4.55. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait $I-V$ karakteristikleri, Norde ve Cheung fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	115
Şekil 4.56. Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait $I-V$ karakteristikleri, Norde ve Cheung fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi.....	115
Şekil 4.57. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait arayüzey durum yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimi.....	117

Şekil 4.58. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait arayüzey durum yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimi.....	118
Şekil 4.59. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait arayüzey durum yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimi .....	118
Şekil 4.60. Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait arayüzey durum yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimi .....	119
Şekil 4.61. Buharlaştırma ile PbS arayüzeyi oluşturulan diyoda ait XRD sonucu.....	122
Şekil 4.62. SILAR ile PbS arayüzeyi oluşturulan diyoda ait XRD sonucu.....	122
Şekil 4.63. Elektrokimyasal ile PbS arayüzeyi oluşturulan diyoda ait XRD sonucu ...	123
Şekil 5.1. Au/PbS/n-SiC/Ni diyodların 0,50 V doğru beslem geriliminde sıcaklığa karşı akımın değişimi .....	130
Şekil 5.2. Au/PbS/n-SiC/Ni diyodların 0,50 Volt'ta $\ln I/T^2$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi .....	131
Şekil 5.3. Au/PbS/n-SiC/Ni diyodların 0,90 V doğru beslem geriliminde sıcaklığa karşı akımın değişimi .....	131
Şekil 5.4. Au/PbS/n-SiC/Ni diyodların 0,90 Volt'ta $\ln I/T^2$ 'nin $1/kT$ 'ye karşı değişimi .....	132
Şekil 5.5. Au/PbS/n-SiC/Ni diyodların Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi .....	133

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Si, GaAs, SiC, Elmas ve GaN için bazı yarıiletken parametreler .....	4
Çizelge 3.1.	PbS ince film büyütülmesi için kullanılan parametreler .....	50
Çizelge 3.2.	PbS kristalinin elektriksel özellikleri .....	52
Çizelge 4.1.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyoduna ait sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri.....	74
Çizelge 4.2.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri.....	74
Çizelge 4.3.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri.....	75
Çizelge 4.4.	Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait sıcaklığa bağlı $\ln I-V$ grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri .....	75
Çizelge 4.5.	Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyoduna ait Norde eğrilerinden elde edilen Engel yüksekliği ve Seri direnç değerleri.....	93
Çizelge 4.6.	Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait Norde eğrilerinden elde edilen Engel yüksekliği ve Seri direnç değerleri.....	95
Çizelge 4.7.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait Norde eğrilerinden elde edilen Engel yüksekliği ve Seri direnç değerleri.....	97
Çizelge 4.8.	Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait Norde eğrilerinden elde edilen Engel yüksekliği ve Seri direnç değerleri.....	99
Çizelge 4.9.	Au/PbS (Buharlaştırma)/n-SiC/Ni ve Au/PbS (SILAR)/n-SiC/Ni diyodlarına ait Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen diyod parametreleri.....	108
Çizelge 4.10.	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni ve Referans Au/n-SiC/Ni diyodlarına ait Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen diyod parametreleri .....	109
Çizelge 4.11.	Au/PbS (Buharlaştırma)/n-SiC/Ni ve Au/PbS (SILAR)/n-SiC/Ni diyodlarına ait en küçük ve en büyük arayüzey hal yoğunluğu ve karşı gelen enerji değerleri .....	120
Çizelge 4.12.	Au/PbS (Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni ve Referans Au/n-SiC/Ni diyodlarına ait en küçük ve en büyük arayüzey hal yoğunluğu ve karşı gelen enerji değerleri .....	121
Çizelge 4.13.	PbS ince filmlerine ve Schottky metaline ait X-ışını kırınım verileri ...	123
Çizelge 5.1.	Elde edilen diyodlar için 300 K'de $C-V$ 'den elde edilen veriler .....	134
Çizelge 5.2.	Elde edilen diyodlar için 300 K'de $I-V$ , Norde, $C-V$ ve Cheung yöntemleri ile hesaplanan engel yüksekliği değerleri .....	135

## 1. GİRİŞ

19. yüzyılın başlarından itibaren insanoğlunun elektrik ve elektroniğe merakı ve bu merakla gündelik hayatta kullanacakları elektronik cihazları üretme arzusu olmuştur. İnsan ihtiyaçlarının değişip farklılaşması teknoloji alanındaki gelişmeleri tetikleyerek artırmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar oldukça geniş bir hacme sahiptir. Yapılan çalışmaların temelinde ise katıların elektriksel özelliklerini araştırma ve bunların elektronik aygıtlarda uygulanabilirliği yatmaktadır. Genel olarak metal-yarıiletken kontakların teorik olarak anlaşılması, teknolojik gelişmeden sonra olmuştur. Metal-yarıiletken doğrultucular üzerine ilk sistematik çalışma 1874 yılında Braun tarafından yapılmıştır. Braun, toplam direncin ayrıntılı yüzey durumlarına ve uygulanan gerilimin polaritesine bağlı olduğunu belirtmiştir (Braun 1874).

1904 yılının başlarında farklı biçimlerdeki nokta-kontak doğrultucular yapılmıştır (Bose 1904). 1906 yılında Pickard silisyumu kullanarak nokta kontak dedektörler için bir patent almıştır (Pickard 1906). Pierce, 1907 yılında metali yarıiletkenin yüzeyine püskürterek diyotların doğrultucu özelliklerinin varlığını kanıtlamıştır. Wilson, katıların band teorisine dayalı olarak yarıiletkenlerin akım iletim teorisini formüle etmiştir (Wilson 1931). Daha sonra bu teori metal-yarıiletken kontaklara uygulanmıştır. 1938 yılında Schottky, metal-yarıiletken yapıdaki potansiyel engelini yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığını ileri sürmüştür. 1947'de Bardeen, yüzey hallerindeki net elektron yükü ve zıt işaretli uzay yükünden dolayı yarıiletkenin serbest yüzeyinde bir çift tabakanın (dipol tabakası) oluşacağını göstermiştir. Bu yüzey hallerinden dolayı metal-yarıiletken kontakın doğrultucu karakteristiğinin pratikte metalin iş fonksiyonundan bağımsız olacağı yargısına varılmıştır (Bardeen 1947; Cowley and Sze 1965). Henisch doğrultucu metal-yarıiletken kontakların temel teorisi ve tarihi gelişimini "Doğrultucu Yarıiletken Kontaklar" adlı bir kitapta toplamıştır (Henisch 1957). Mott yarıiletken kontaklar için teorik bir model geliştirmiştir (Mott 1938).



Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda potansiyel engel yüksekliği en önemli karakteristik parametrelerden biridir (Robinson 1985; Rhoderick and Williams 1988). Metal-yarıiletken kontağın arayüzeyinde istenilmeyen etkenlerden dolayı potansiyel engel yüksekliği genellikle beklenenden farklı bir yükseklik değerinde oluşabilir ve kararlı kalmaz (Türüt *et al.* 1992; Brillson 1993). Farklı işlemlerle, potansiyel engelinin ve diyot parametrelerinin kararlı kalması sağlanabilir (Yu *et al.* 1986; Cheng *et al.* 1990). Bu işlemler metal ile yarıiletken arayüzeyinde yalıtkan bir tabaka oluşturmak veya metal-yarıiletken kontağı ısı olarak tavlama şeklinde. Aynı zamanda, Metal-yarıiletken kontaklarda potansiyel engel yüksekliğinin kararlılığı metal-yarıiletken alan etkili transistörler (MESFET) yapımında çok önemlidir (Lau *et al.* 1985; Cheung and Cheung 1986; Sands *et al.* 1988; Sands 1989). MESFET yapımında parazit oluşturan direnç değerini azaltmak ve MESFET'in performansını iyileştirmek için son zamanlarda en fazla tercih edilen metot, yarıiletken taban malzemenin yüzeyleri üzerine gerekli metal kontaklar oluşturulduktan sonra metal-yarıiletken yapının ısı olarak tavlama metodudur.

Bu tür bir işlemde metal Schottky kontak olarak kullanıldığında diyodun yüksek sıcaklık tavlamasından sonra kararlılığının bozulmadığı rapor edilmiştir (Grant *et al.* 1981; Woodall *et al.* 1981; Lau *et al.* 1985; Lahav *et al.* 1986; Everaert *et al.* 1990; Huang and Pang 1997). Tung Schottky engel diyotlarda deneysel olarak elde edilen  $I-V$  karakteristiklerinin bazı durumlarda termiyonik emisyon modeli ile uyumlayabileceğini göstermiştir (Tung 1992). Yarıiletken yüzeyinin farklı işlemlere maruz bırakılmasının Schottky engel yüksekliğinin değişimine sebep olduğu deneysel olarak bulunmuştur. Bundan dolayı Schottky engel yüksekliğinin ısı tavlama ile değişimi oldukça geniş bir ilgiye sebep olmuştur (Kowalczyk *et al.* 1981; Yokoyama *et al.* 1982; Huang and Yang 1991). Tavlama esnasında metal-yarıiletken arayüzeyinde kimyasal reaksiyonlar, kusurlar ve kirlilikler oluşabilir. Tavlama işlemi, sistemi daha kararlı yapıya getirmeyi amaçlar. Ancak bileşik yarıiletkenlerin yüksek sıcaklıkta tavlama ile anyonların yok olmasına ve donor

kusurlarının oluşmasına yol açmaktadır (Grant *et al.* 1981; Woodall *et al.* 1981; Brillson *et al.* 1982; Kirchner *et al.* 1985).

İçinde bulunduğumuz çağda Schottky diyotların önemi her geçen gün artmaktadır. Schottky diyotların elektriksel özellikleri, elektronik devre elemanı üretiminde büyük önem taşır. İstenen Schottky engel yüksekliği, aygıtın dış etkenlere karşı kararlılığı, idealite faktörü ve seri direnç gibi parametrelerin kullanım alanına göre istenilen özellikte ve değerinde oluşturulabilmesi için farklı karakterizasyon teknikleri vardır. Schottky diyotların karakteristikleri sıcaklık, tavlama, plastik deformasyon ve hidrostatik basınç gibi etkilerle değişebilir. Schottky diyotların performans ve güvenilirliği bu diyotların fabrikasyonunda kullanılan yarıiletkenin yüzeyinin temiz ve oksitlenmemiş olmasına bağlıdır. Bunun için yarıiletken yüzeyinin organik kirlere ve tabii oksitten arındırılması gerekir. Yarıiletken yüzeyi ile metal kontak arayüzeyinde istenmeyen bu doğal oksit tabakasının varlığından dolayı diyodun performansı düşer ve güvenilirliği azalır. Diyot oluşturulduktan sonra geçen zamanda oluşan oksit tabakasının diyodun akım-voltaj ( $I-V$ ), kapasite-voltaj ( $C-V$ ) ve diyot parametreleri üzerinde etkisinin ortadan kaldırılması ve kararlı metal-yarıiletken kontakların yapılması amaçlanır.

Si-aitlikli güç aygıtlar güç elektroniği ve güç sistem uygulamalarında kullanılmaktadır (Baliga 1996; Ghandhi 1998). Yine de artan karmaşıklık ve fonksiyonellik nedeniyle Si-aitlikli aygıtlar yüksek-güç, yüksek-voltaj ve yüksek-sıcaklık uygulamalarına yeterli cevap verememektedir. Ancak SiC ve GaN üstün özellikleri ile çok dikkat çekmektedirler. SiC yüksek-akım uygulamalarında yüksek-voltaj için uygun iken GaN yüksek-güç/yüksek-frekans uygulamalar için uygundur. Genelde yüksek voltaj doğrultucusu iki sınıfta kategorize edilir. Bunlar; tek kutuplu Schottky diyot ve çift kutuplu p-n eklemidir. Bu doğrultuculardan birinin seçiminde ters beslem voltajı, uygun maksimum ters beslem akım yoğunluğu, düz beslem akım yoğunluğu, çalışma sıcaklığı ve anahtarlama frekansı gibi özellikler göz önüne alınır. Örneğin, Schottky Engel Diyotlar (SED) yüksek ters sızıntı akımı ve düşük kırılma gerilimi nedeniyle yüksek-voltaj uygulamaları

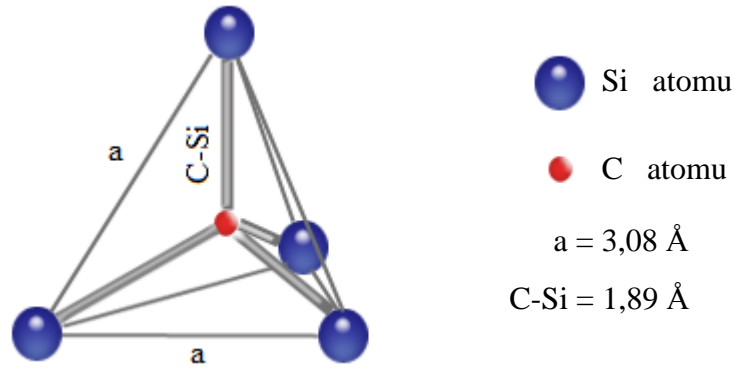
için henüz p-i-n diyotlar kadar yeterli değildirler. Ancak, düz beslem iletim esnasında sürüklenme bölgesinde biriken büyük yük miktarı ve yeniden dengeye gelme zamanının uzun olması nedeniyle anahtarlama hızı sınırlıdır. Bir SED ve p-i-n diyodu birleştiren bir yaklaşım Alexandrov ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir (Alexandrov *et al.* 2003). SiC, IV-IV yarıiletken ailesinden ilk keşfedilenlerden biridir. Kısa bağ uzunluğu ile Si-C büyük bağ enerjisine sahiptir. Çizelge 1.1’de Si, GaAs, SiC (3C, 4H, 6H), elmas ve GaN için bazı önemli yarıiletken parametreleri verilmiştir.

**Çizelge 1.1.** Si, GaAs, SiC, Elmas ve GaN için bazı yarıiletken parametreler

Özellik	Si	GaAs	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC	Elmas	GaN
Band aralığı (eV) 300 K	1,12	1,42	2,30	3,26	3,00	5,47	3,44
Uygun dielektrik sabiti	11,9	13,1	9,7	9,7	9,7	5,5	9
Erime noktası (K)	1690	1510	~ 3100 35 atm	~ 3100 35 atm	~ 3100 35 atm	Değişken	2500
Termal iletkenlik (W/cm K)	1,5	0,5	3-5	3-5	3-5	20	1,3
Elektron mobilitesi oda sıcak. (cm <sup>2</sup> /Vs)	1400	8500	800	900	400	2200	900
Hole mobilitesi oda sıcak. (cm <sup>2</sup> /Vs)	600	400	320	120	90	1600	250- 350
Doyuma ulaşma hızı (×10 <sup>7</sup> cm/s)	1,0	2	2,5	2	2	2,7	2,7
Kırılma nok. elektrik alan değ. (×10 <sup>6</sup> V/cm)	0,3	0,4	1,0	3-5	3-5	10	5

Düşük sızıntı akımı, yüksek kırılma elektrik alan, iyi termal iletkenlik ve yüksek termal kararlılık SiC'in bazı avantajlarıdır. Bu avantajlar SiC'i yüksek sıcaklık ve yüksek voltaj uygulamalarında oldukça etkin kılmaktadır (Weitzel *et al.* 1997; Carter *et al.* 1999; Rottner *et al.* 1999; Elasser *et al.* 2003).

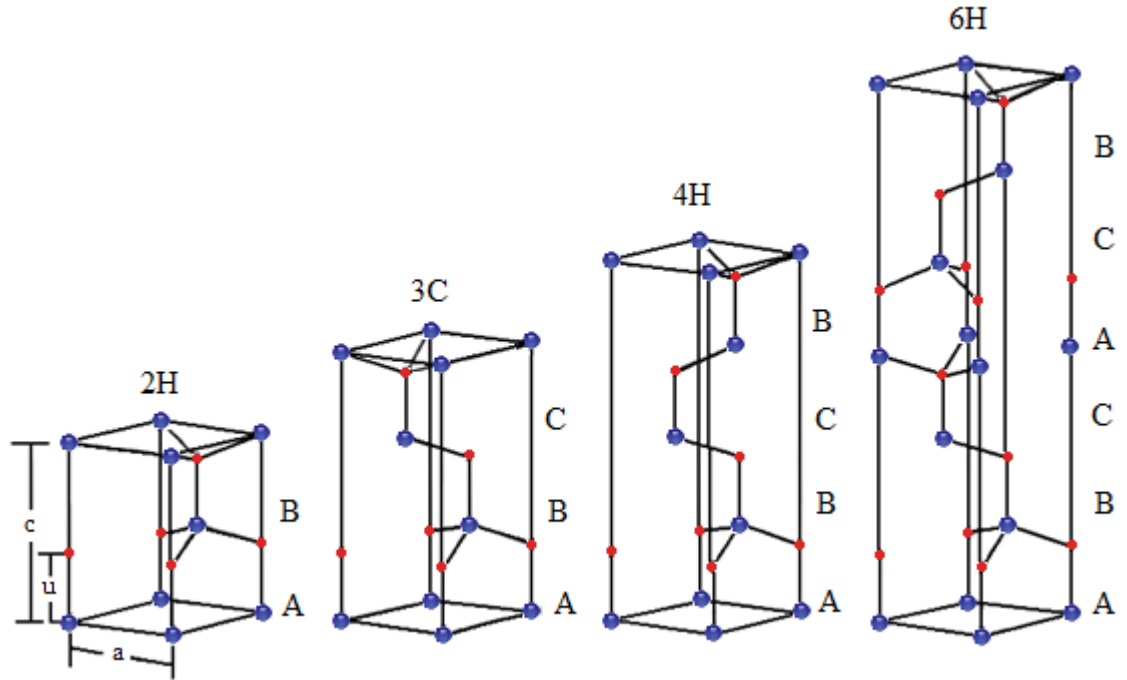
SiC yapılar politipler diye adlandırılan birçok değişik kristal yapı meydana getirirler (Nishino *et al.* 1980). C ve dört komşu Si atomu için tetragonal bağ yapısı Şekil 1.1'de verilmiştir.



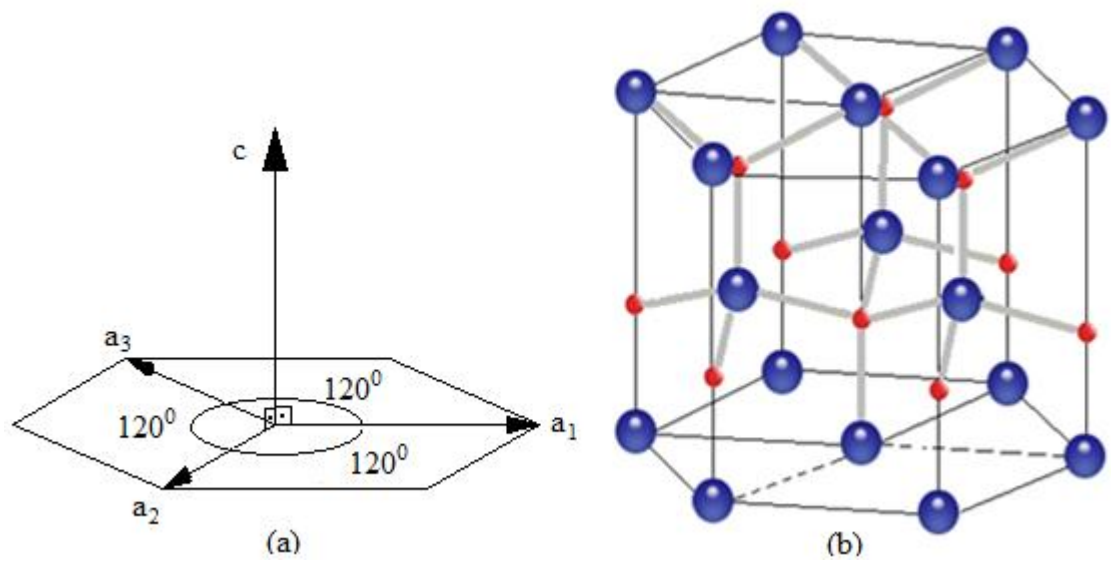
**Şekil 1.1.** C ve dört komşu Si atomu için tetragonal bağ yapısı

SiC kristal örgüsü içerisinde Si ve C atomları c-doğrultusunda farklı düzlemler meydana getirirler. SiC'in 200 den fazla politipinin bulunduğu rapor edilmiştir. Bu gerçeklere göre SiC politipleri birbirine kimyasal olarak bağlanmış %50 karbon ve %50 silisyum atomu içerirler. Her bir SiC politipi kendiliğinden temel bir elektrik ve optik özellik ortaya koyar. Ayrıca c-yönündeki örgü yapısına uyarak mümkün olan 3 pozisyondan birine yerleşirken kristalin tetrahedral (dört yüzlü) yapısını destekler. Bu pozisyonlarda her biri keyfi olarak A, B veya C şeklinde notasyonlandırılır (Morkoç *et al.* 1994). En yaygın SiC politiplerine ait hegzagonal birim hücreleri Şekil 1.2'de şematik olarak gösterilmiştir. Hegzagonal yapıya ait Miller indisleri ve SiC ait hegzagonal kristal yapı ise Şekil 1.3'de verilmiştir. Örneğin Şekil 1.2'de verilen 2H-SiC kristaline ait birim hücrenin Şekil 1.3.a'da

verilen  $120^\circ$  açılar ile üç kez dönme işlemi sonucu Şekil 1.3.b'de verilen hegzagonal kristal yapısı elde edilir.



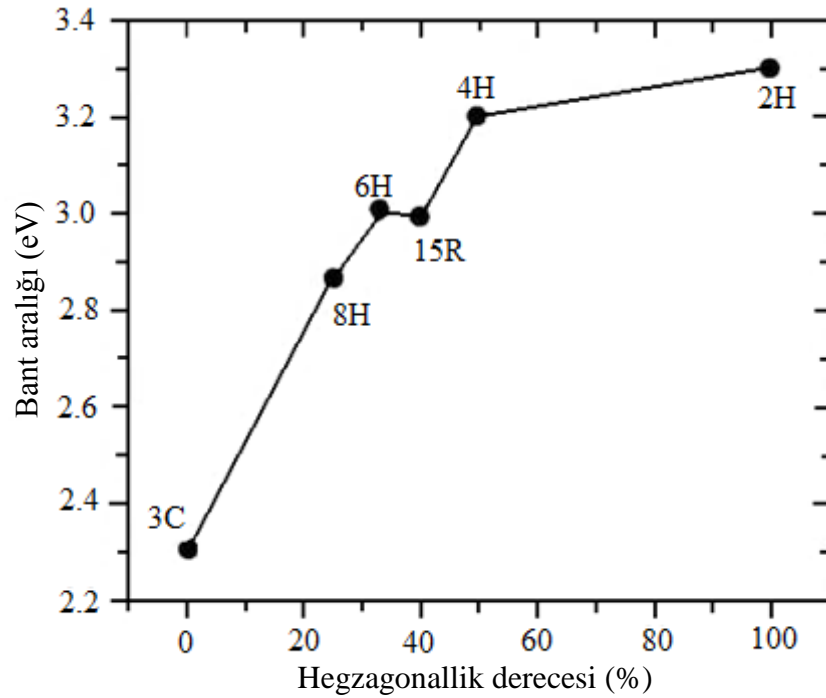
**Şekil 1.2.** 2H, 3C, 4H ve 6H-SiC politiplerine ait hegzagonal birim hücreleri (a, c ve u örgü parametreleri)



**Şekil 1.3.** a) Hegzagonal yapıya ait Miller indisleri b) SiC ait hegzagonal kristal yapısı

Hegzagonal yapıdaki malzemelerde kovalent bağ karakteri gözlenir ve bu malzemenin oldukça yüksek katılıkta, yüksek kırılma kırılma katsayısına sahip olmasına sebep olur (Hass and Thun 1969).

SiC değişik politipleri fiziksel özellikleriyle geniş bir alanı kapsar. 3C-SiC'in kübik kristal simetrisinin artması ile fonon saçılması azalır. Band aralığı politip veya yığın düzenine bağlıdır. Band aralığı politipler arasında farklı genişliktedir. 3C, 2H, 4H ve 6H için band aralığı sırasıyla 2.3, 3.3, 3.2 ve 3 eV'dur. İdeal Hegzagonal yapıda  $c/a$ ; 1,64'dür bu oran 2H; 1,64, 4H; 3,271 ve 6H; 4,908 dir, diğer bir ifade ile AB yığın düzeni ile 2H politipi tam hegzagonaldır. 3C politipi hegzagonalılığı %0 dır ve 4H ise %50 hegzagonaliteye sahiptir. Şekil 1.4'de eksiton enerji aralığı ile hegzagonalite değişimi verilmiştir. 4H politipi gittikçe daha fazla dikkat çekerken SiC politipleri içerisinde en kolay hazırlanan ve en kapsamlı çalışılan 6H dır. Bu konudaki çalışmaların yaklaşık %95'i üç ana politip 3C, 4H ve 6H üzerinde yoğunlaşmıştır.



Şekil 1.4. En yaygın olarak bilinen SiC politiplerinin hegzagonalite dereceleri

SiC için hem büyüme hem de iyon aşılama (implantation) esnasında p-tipi, n-tipi ve yarıyalıtkan malzeme yapımı önemli bir konudur.

SiC için popüler olan n-tipi katkılama atomları Azot (N), Fosfor (P), Arsenik (As) ve Antimon (Sb) dur (Pensl and Choyke 1993; Troffer *et al.* 1996a). Düşük atomik kütlesi ve küçük iyonizasyon enerjisi nedeniyle N en popüler olanıdır ve genelde N'un bir C atomunun yerini aldığı kabul edilir. N katkı araştırmalarına büyük ilgi olurken P katkı kullanımı hakkında daha az bilgi vardır. Kristal büyütme sonrası SiC örgüde difüzyon özellikleri nedeniyle P donörleri kolayca tanınır (Mokhov *et al.* 1992). SiC yapıda atomik büyüklüklerine dayanarak P'un muhtemelen Si'un yerini alacağı beklenir (Weber *et al.* 1995; Larkin 1997). SiC için en yaygın bilinen p-tipi katkı atomları Alüminyum (Al), Bor (B) ve Galyum (Ga) dur. Düşük iyonizasyon enerjisi nedeniyle en yaygın olarak Al kullanılır. 6H-SiC de valans bandının maksimumu üzerinde Al akseptör seviyesi 0,1-0,27 eV olarak bulunmuştur (Raynaud *et al.* 1995; Schöner *et al.* 1996). Al ve B'un SiC yapıda Si'un yerini işgal ettiğini bulmuşlardır (Petrenko *et al.* 1992; Müller *et al.* 1993; Larkin *et al.* 1994).

Omik kontak özellikleri kontak oluşturmadan uygulanan temizleme prosedürüne güçlü bir şekilde bağlıdır. Yüksek-güç ve yüksek-sıcaklık gerektiren uygulamalar için tasarlanan aygıtlarda düşük özdirençli omik kontaklar tercih edilir. Çünkü hız ve yüksek güç performansı gibi yarıiletkenin birçok önemli parametresi güçlü bir şekilde omik kontakın direncine bağlıdır. Son zamanlarda yüksek sıcaklık gerektiren aygıtların çeşitli uygulamalarda kullanımları arttıkça termal kararlılık ve düşük omik kontak direnci önem kazanmıştır. Bu ise büyük Schottky engel yüksekliğine sahip geniş band aralıklı yarıiletkenler için önemli bir konudur. SiC'de omik kontak için geleneksel kontak metalleri kullanıldığı zaman iyi ürün ve düşük direnç için  $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar çıkan tavlama sıcaklığı gerekebilir. SiC kristaline omik kontak için yüksek sıcaklıkta kararlılık ve düşük direnç nedeniyle TiC, TiW ve TiN gibi Ti-altlıklı bileşikler en iyi aday olarak gösterilir (Glass *et al.* 1992; Pecz 2001). n-tipi SiC'de omik kontak için en yaygın kullanılan metal Ni'dir ve bu genelde yüksek tavlama sıcaklığı gerektirir. Ni ve Ni-altlıklı iyi omik kontaklar için tavlama sıcaklığı  $1050^{\circ}\text{C}$ 'de 10

dakika gibi çeşitli termal prosesler rapor edilmiştir (Crofton *et al.* 1995; Uemoto 1995; Oskam *et al.* 2000). Bunun sonucunda hem n-tipi hemde p-tipi malzemeler için kontak spesifik öz direnci sırası ile  $6 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$  ve  $1 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$  olarak bulunmuştur (Fursin *et al.* 2001). Palmour ve arkadaşları 1991 yılında Ni kullanıp daha sonra yüksek sıcaklıkta tavlayarak omik kontakları üretmişlerdir. Al tavlama ile omik kontaklar oluşturulmuştur (Crofton *et al.* 1997a; Crofton *et al.* 1997b). Sahip olduğu oksidasyon karakteristiği ve düşük erime noktası nedeniyle Al için sınırlı çalışma sıcaklığı söz konusudur. Bu erime noktası TiAl gibi Al içeren alaşımlar kullanılarak arttırılabilir. Bu tür alaşımlar yıllardır kullanılmaktadır ve literatürde en düşük TiAl kontak direnci ( $1000^{\circ}\text{C}$ 'de tavlama sonrası)  $1,5 \times 10^{-4}$ - $1,0 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$  civarında rapor edilmiştir.

Crofton ve arkadaşları 2002 yılında dört farklı AlTi kompozisyonu ile p-tipi 6H-SiC yapıda omik kontak için en iyi AlTi alaşımını tespit etmeye çalışmışlardır. p-tipi 6H-SiC için kütlece yüzde oranı Al(70)/Ti(30) olan Al-Ti alaşım kompozisyonu iyi sonuç vermiştir (Johnson and Capano 2003). p-tipi SiC'de geniş band aralığından kaynaklanan büyük iş fonksiyonu nedeniyle p-tipi malzemelerde omik kontak yapımı daha zordur.

SiC-altlıklı aygıtlarda metal/yarıiletken (MY) kontak önemli bir konudur. Yenilenebilir aygıtlar elde etmek için MY arayüzeyini anlama ve kontrol edilebilmesi gerekir. Metal/yarıiletken kontakların engel yüksekliği anahtarlama yapılırken açık durumda minimum voltaj düşüşüdür ve bu açıdan düşük engel yüksekliğine sahip aygıtlar tasarlanır. Diğer taraftan ters beslem akımı engel yüksekliği ile exponansiyel olarak azalır ve ters beslem voltajını tutmak için büyük engel yüksekliğine sahip aygıtlar tasarlanır.

Ni, Ti, Al ve Au gibi birçok metal SiC yapıda Schottky kontak yapımı için kullanılmıştır. n-tipi ve p-tipi 6H-SiC yapıda birkaç metalin Schottky engel yüksekliği farklı sıcaklık değerlerinde ölçülmüştür. n-tipi materyal için engel



yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olmadığı, bunun aksine p-tipi materyalde engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir (Aboelfotoh *et al.* 2003).

HA *et al.* (2007), 6H-SiC yarıiletkenine dayanan alfa parçacıklı dedektörler imal etmişlerdir. Dedektör çok katmanlı Au/Ni/6H-SiC/Ni/Au yapıda olup elektriksel ve radyasyon performanslarını ölçmüşlerdir. Dow Corning şirketi tarafından üretilmiş 2 inç çapında 6H-SiC kristali kullanılmıştır. Kristalin kalınlığı 387  $\mu\text{m}$ , direnci  $0,668 \times 10^6 \Omega\text{cm}$  ve doğrultusu ise (0001) dir. Au/Ni/6H-SiC Schottky dedektörlerin tavlama etkilerini incelemişler ayrıca *I-V* karakteristikleri ile hava ortamında tavlama öncesi ve sonrası dedektörün radyasyon cevabını ölçmüşlerdir. Metalleştirmeden sonra hava ortamında  $100^{\circ}\text{C}$  ve  $300^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta hızlı tavlama aleti ile tavlayıp, düz ve ters sızıntı akımın tavlama sıcaklığının artması ile azaldığını gözlemlemişlerdir (Morrison *et al.* 2000; Sarpatwari *et al.* 2007). Tavlama ile yüzey pürüzlüğü yaklaşık %50 artmıştır. Tavlama sıcaklığı arttıkça Schottky engel yüksekliğinin (SEY) yavaşça arttığını gözlemlemişlerdir.  $300^{\circ}\text{C}$ 'de tavllanmış Au/Ni/6H-SiC Schottky engel tipi alfa parçacık dedektörü yüksek sıcaklık ortamında iyi performans gösterebilen radyasyon dedektörü olarak imal edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır.

6H-SiC kristalinin Si ve C yüzeyleri üzerine Mo, Ni, Al ve Au gibi çeşitli metaller kullanılması sonucu oluşturulan diyotların *I-V* karakteristiklerini,  $J_0$  doyma akım yoğunluğunu incelemişlerdir. Mo/SiC Schottky diyot için 300 K'de aynı epitaksiyel tabakanın farklı bölgelerindeki diyotlar için farklı *I-V* grafikleri elde edildi. Bu grafiklerden elde edilen  $n=1,2; 1,14; 1,16$  ve  $1,25$  idealite faktörleri değerleri için akım yoğunlukları sırasıyla  $J_0=8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^{-2}; 1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^{-2}; 2 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^{-2}$  ve  $1 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^{-2}$  şeklinde hesaplanmıştır. Ni/SiC Schottky diyot için idealite faktörlerinin  $1,2; 1,9$  arasında değiştiği, Al/SiC kontak için idealite faktörünün sabit (1,16) olduğunu göstermişlerdir (Strel'chuk and Rastegaeva 1997).

Ha *et al.* (2007), oda sıcaklığında bir radyasyon için 6H-SiC yarıiletken dedektörün vasıfları ve imalatını incelemişlerdir. Band aralığını 3,03 eV olarak belirlemişlerdir ve bu sonuç literatür ile uyumaktadır. Ayrıca etkin SED için Richardson sabiti  $194,4 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$  (Porter *et al.* 1995) kullanarak Ni/6H-SiC için SED 0,86 (0,02) eV olarak hesaplamışlardır. Metal/yarıiletken arasında Schottky engel yüksekliği Schottky-Mott kuralı ile açıklanır ve Ni'in iş fonksiyonunu 5,15 eV kullanarak SED n-tipi için 1,81 eV ve p-tipi için 1,22 eV bulmuşlardır. Bu sonuçlar hesaplanan 0,8 eV'a göre yüksektir ve bu birçok yarıiletkende Fermi seviyesinin irdelenmesi ile açıklanmıştır (Rhoderick and Williams 1988). SiC'de SED hemen hemen metalin iş fonksiyonuna bağlıdır. Fermi seviyesi iyonik bağlı yapılardan ziyade kovalent bağlı yapılarla ilişkilendirilir (Mead 1966).

Lee *et al.* (2002), SiC kristalinde Au nano parçacıklarının kullanımı ile Schottky engel yüksekliğinin azaldığını göstermişlerdir. Cree Research Inc.'den n ve p-tipi 4H-SiC ve 6H-SiC (0001) altlık temin etmişlerdir. SiC'in yüzeyine  $90 \mu\text{m}^{-2}$  yoğunluğunda ve 20 nm çapında nano Au parçacıkları ile Schottky kontak gerçekleştirmişlerdir. Au nano parçacıkları üzerine ekstra Ti (200 nm) buharlaştırmışlardır. Bu çalışmada Schottky metal olarak Au ve Ti seçmelerindeki amaç bunların yüksek engel farkına sahip olmalarıdır. Örneğin Au ve Ti arasındaki SED farkı 0,63 eV (n-4H) ve 0,59 eV (p-4H), 0,64 eV (n-6H) ve 0,49 eV (p-6H) dur. *I-V* ölçümlerinden p-tipi 6H-SiC yapıda Ti-Schottky kontak için SED=1,70 eV, idealite faktörü  $n=1,24$  iken Au nano parçacıklı Ti-Schottky kontak için SED=1,60 eV,  $n=1,38$  dir. Bu değerleri n-tipi için sırası ile Ti-SED=0,76 eV,  $n=1,07$  Au-Ti SED=0,59 eV  $n=1,05$  olarak bulmuşlardır. 6H-SiC'e gömülmüş Au-Ti Schottky kontağın SED'nin Ti-Schottky kontağına göre düşük olması büyük SED farkına ve Au nano parçacık nedeniyle yarıiletkenin yüzeyine yakın tüketim bölgesinde elektrik alanının artması ile açıklamışlardır (Tung 1992).

Hara *et al.* (1997), 6H-SiC ve Si (111) alt tabakalarını kullanarak engel yüksekliğinin kontrolünü ve omik kontak oluşumunu göstermişlerdir. Eğer bir yarıiletken yüzeyi tamamen asılı bağlara sahip değilse oksitlenmeye ve kirlenmeye uzun süre dayanır ve bu da düşük arayüzey durum yoğunluklu (Dit) ideal bir arayüzey meydana çıkarır.

Yarıiletken yüzeyi için kimyasal çözeltiler kullanılması yüzey durum yoğunluğunu azaltır.  $700^{\circ}\text{C}$ 'de Ti/6H-SiC arayüzeyinde TiC oluşumu sonrası omik kontak özelliklerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca geleneksel olarak %5 HF ile çalkalandığı için TiC oluşumu sonrası Ti/6H-SiC yapının hâlâ Schottky özelliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Via *et al.* (2002), n-tipi 6H-SiC (0001) yüzeyinde hem titanyum hem de nikel ince film buharlaştırma ve tavlama sıcaklığının işlevselliğini araştırmışlardır. Ti durumunda, analiz sıcaklığının değişim bölgesinde elektriksel özellikler ciddi ölçüde değişmektedir. Ti içeren numunelere iki farklı sıcaklıkta ( $900$  ve  $1000^{\circ}\text{C}$ ) tavlama yapmışlardır. Daha önceden tespit edilen literatür bilgilerinden; Schottky engel yüksekliği Ti altlıklı diyotlarda Ni altlıklı diyotlara nazaran daha düşüktür. Bu bilgilerden bütün ölçümler için yaklaşık idealite faktörü  $n=1,07$  ve Schottky engel yüksekliğini  $1,30\pm 0,01$  eV bulmuşlardır. Bu değer literatür bilgileriyle uyum içindedir. C-V karakteristiği ile Schottky engel yüksekliğini 2,1 eV bulmuşlardır. Bu davranışın sebebini tipik olarak Schottky engel yüksekliğinin inhomojen yapıda oluşuna bağlamışlardır (Sullivan *et al.* 1991; Tung 1992). Gerçekte eğer birkaç Schottky engel yüksekliği bulunuyorsa, düz beslemde taşıyıcılar en düşük Schottky engel yüksekliğinden geçmeyi tercih ederler. Ancak eğer Schottky diyot C-V karakteristiğini ölçmek için ters beslem ile polarize edilmişse yüksek Schottky engelli bu bölge ölçümleri etkileyecektir.

Doğan *et al.* (2004), Schottky aygıtlarda kullanılabilir uygun 6H-SiC yüzey üretmek için tavlama sıcaklığının etkilerine bakmışlardır. n-tipi 6H-SiC altlık üzerine omik kontak için sırası ile Ni/Ti/Au ( $500\text{Å}/300\text{Å}/750\text{Å}$ ) metallere Ni ve Ti'ü elektron ışın demeti ile Au ise termal buharlaştırma ile buharlaştırmışlardır, daha sonra bu omik kontak azot gazı içerisinde  $950^{\circ}\text{C}$ 'de iki dakika tavlama yapmışlardır. Schottky kontak için Ni/Au( $300\text{Å}/700\text{Å}$ ) metalleri çapı  $500\ \mu\text{m}$  olan maske kullanarak buharlaştırmışlardır. 80 K den 700 K'e kadar 1 K'den küçük aralıklarla I-V-T ölçümlerini almışlardır. I-V özellikleri tavlama sıcaklığı ile başarılı gelişme göstermiş ve tavlama sıcaklığı  $1000^{\circ}\text{C}$ 'den  $1450^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkınca sızıntı akımı azalmıştır.

Venter *et al.* (2004), yapmış oldukları çalışmada, termal kararlılığı iyi olduğu için, Schottky metal olarak Ru'yu seçmişlerdir. Cree Research Inc.'den elde edilen p-tipi Al katkılanmış ( $5-8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) külçe halinde büyütülmüş 6H-SiC kristal kullanmışlardır. Omik kontaklar SiC'in arka yüzeyine Al (180 nm) ve daha sonra Ti (50 nm) tabakası ile kaplamışlar ve düşük dirençli kontak (50  $\Omega$ ) garantilemek için Ar gazında tavlama işlemi gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra Schottky kontaklar  $10^{-5}$  mbar basınç altında 0,8 mm çapında ve 40 nm kalınlığında Ru (e-ışınlama) ve Al (termal) buharlaştırması ile yapmışlardır. Katkılanmış Schottky engel diyotta ters beslem voltajı -5V uygulandığında sızıntı akımını  $10^{-8}$  A olarak okumuşlardır. En çok göze çarpan sıfır beslem voltajında akımın yaklaşık -0,6 V'da dengelendiğidir.

Basak and Mahanty (2003), n-tipi 6H-SiC yapıda Ti/Ni/Ti/Au çok katmanlı omik kontak oluşumunu çalışmışlardır. Birkaç altlığın hem parlatılmış hemde parlatılmamış kısımlarına Ti (10 nm) / Ni (20 nm) / Ti (20 nm) / Au (45 nm) buharlaştırmışlardır. Kontaklar  $750^{\circ}\text{C}$ 'de tavlama ile çok düşük omik direnç göstermişlerdir. Ancak parlatılmamış yüzey parlatılmış yüzeye nazaran daha düşük direnç göstermektedir. Bunu ise parlatılmamış yüzeyde girinti ve çıkıntılarının fazla oluşu, yani kontak yüzey alanının daha büyük oluşu ile açıklamışlardır.

Optoelektronik ve yarıiletken aygıt üretiminde yarıiletken ince filmlerin üretilmesi ve bu filmlerin üretim teknikleri konusundaki çalışmalar devam etmektedir. Bileşik yarıiletken materyallerin sentezi için, Sıvı Faz Epitaksi (LPE), Ara yüzey Alaşım Tekniği (IAT), Kimyasal Buhar Depozisyon Yöntemi (CVD), Kimyasal Banyo Depozisyon Yöntemi (CBD), Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi (MBE), Atomik Tabaka Epitaksi Yöntemi (ALE), Sıralı İyonik Tabaka Çökmesi ve Reaksiyonu (SILAR) ve Elektrokimyasal yöntemler gibi çok çeşitli teknikler kullanılmaktadır. SILAR, altlık malzeme ile çözelti arasında ardışık reaksiyonları içeren sulu çözelti tekniği olup altlık olarak kullanılan malzemenin bileşik yarıiletkenin her bir türünün iyonlarını içeren sulu çözeltiler içerisinde belli bir sıra ile daldırılmasıdır. SILAR tekniği ilk olarak 1980'li yılların ortalarında Y.F. Nicolau tarafından epitaksiyel ince filmlerin büyütülmesinde kullanılmıştır (Nicolau 1985). Bu teknikte büyütme işlemi genellikle

oda sıcaklığında ve kullanılan çözeltilerin bulunduğu ortam basıncı altında gerçekleştirilir. İnce film büyütülmesinde fazla zaman gerektirmemesi, ucuz olması, büyüme esnasında kalınlık, çözelti pH'sı ve sıcaklığının kontrol edilebilirliği nedeniyle SILAR tekniği kullanımına karar verdik.

SILAR dışındaki atomik tabaka adsorbsiyonuna dayalı kimyasal esaslı teknikler oldukça pahalı ve bakımı zor olan, yüksek vakum sistemlerini gerektirmeleri, yüksek sıcaklıklarda çalışma gerektirdiği, karmaşık ve pahalı parçalardan oluşan cihazlar gerektirmeleri gibi bazı dezavantajlara sahiptirler. Ayrıca SILAR yöntemi kadar olmasa da Elektrokimyasal tabanlı tekniklerde bu tür sıkıntıların üstesinden gelinebileceği için Elektrokimyasal tekniğin de kullanımına karar verdik. Elektrokimyasal yöntem ile geniş yüzeylere kaliteli ince filmler büyütme mümkündür. Seçilen uygun geniş tabanlar, hazırlanan çözeltiler içine daldırılır ve kimyasal olarak yüzeye ince filmler oluşturulur. Kaliteli filmler üretmek için seçilen tabanın yüzeyinin çok temiz ve pürüzsüz olması gerekmektedir. En önemlisi de hazırlanan çözeltinin ideal katkı oranlarında ve uygun şartlarda olması gerekir.

## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2.1. Kontaklar**

İletken ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin incelenmesi ve bu kristallerin teknolojiye kullanılabilirliğini arttırmak için kristallere uygun kontakların yapılması gerekmektedir. Genel olarak kontak iki maddenin idealde sıfır dirençle temas etmesi olarak düşünülür. Bir metal ile yarıiletkenin belirli şartlar altında kontak haline getirilmesi ile Schottky diyot, bir n-tipi yarıiletkenin bir p-tipi yarıiletkenle belirli şartlar ile üst üste getirilmesi ile de p-n eklemi elde edilir. Schottky diyotların karakteristikleri p-n eklem diyodun karakteristiklerine benzemekte, ancak yine de bazı uygulamalarda farklılıklar göstermektedir. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcılar ile p-n ekleminde ise azınlık taşıyıcılar ile sağlanır. Schottky kontaklar düşük gerilim, yüksek akım doğrultucuları iken, p-n eklemi yüksek gerilim düşük akım doğrultucularıdır.

### **2.2. Doğrultucu (Schottky) kontaklar**

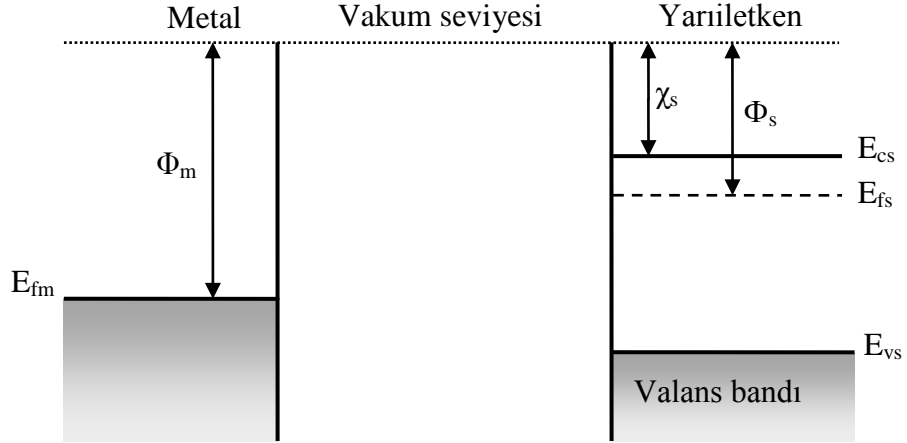
#### **2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklar**

Kontak haline getirilen iki iletken arasında bir yük düzenlemesi olur. İki iletken arasındaki yük geçişi; bu iki iletkenin Fermi enerji seviyelerinin eşit olduğu termal denge kuruluncaya kadar devam eder. Bu kural sadece iki iletken arasındaki kontak durumunda değil, bir iletken ve bir yarıiletken (n-tipi ya da p-tipi) arasındaki kontak durumunda da meydana gelir. Bu yük akışı sonrası oluşan yeni yük dağılımı nedeniyle kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir. İki metal arasında yapılan kontak durumunda, bu dipol tabakası kontağın her iki tarafındaki yüzey yükleri nedeniyle meydana gelir. Oluşan bu kontak, elektronların her iki yönde serbestçe hareket edebilmeleri nedeniyle omik kontak olarak adlandırılır. Şayet, kontağı oluşturan

maddelerden biri metal diğeri yarıiletken ise oluşacak kontak omik ya da doğrultucu olabilir. Doğrultucu kontak durumunda ise elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken ters yöndeki geçişleri, kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli nedeniyle zorlaşır. Bu durum her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilişkilidir (Ziel 1968).

Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda bu doğrultma mekanizmasını açıklamak için bir metal ve bir n-tipi yarıiletken göz önüne alalım. Oda sıcaklığında yarıiletken içindeki bütün donörler iyonize olmuş olsunlar. Metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$ , yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_s$ , yarıiletkenin elektron ilgisi  $\chi_s$  ve  $\Phi_m > \Phi_s$  olsun. Kontakta önceki durumda, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar yukarıdadır. Kontakta sonra, yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan daha küçük olduğundan, yarıiletkenin yüzeyinden metale elektronlar geçer ve geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yük geçişi, metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelinceye kadar devam eder. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 2.2’de görüldüğü gibi  $(\Phi_m - \Phi_s)$  kadar alçalır ve kontakta bir dipol tabakası oluşur. Bu dipol tabakası nedeniyle yarıiletkenin yüzeyinde bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği  $(\Phi_m - \Phi_s)$  ve metal tarafındaki yüksekliği ise  $\Phi_m - \chi_s$  kadardır. Ayrıca bu engel yüksekliği difüzyon potansiyeli cinsinden  $eV_{dif} = \Phi_m - \Phi_s$  şeklinde ifade edilebilir. Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metale geçerken bu engelle karşılaşılırlar. Kontakta yarıiletken tarafındaki pozitif yüklere, yarıiletken içinde hareketsiz olmalarından dolayı yüzey yükü olarak değil, uzay yükü (bir yük dağılımı) olarak bakmak gerekir. Kontakta potansiyel engelinden dolayı, yüzey tabakası engel tabakası olarak bilinir. Bu tabakanın kalınlığı difüzyon potansiyelinin değerine ve iyonize olmuş donörlerin konsantrasyonuna bağlıdır. Metal ve yarıiletken içindeki bazı elektronların termal olarak kazandıkları enerji, elektronun potansiyel engeli aşması için yeterli büyüklükte olduğu zaman, kontakta eşit ve zıt yönde bir  $I_0$  sızıntı akımı geçer. Şayet yarıiletkene bir  $-V$  gerilimi uygulanırsa, metalden yarıiletkene geçecek elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bu nedenle bu elektronların oluşturacakları akım da değişmez. Fakat yarıiletken tarafında, iletkenlik bandı  $eV$  kadar yükseleceği için

yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği  $eV$  kadar azalacaktır. Bundan dolayı metalden yarıiletkene doğru akan akım  $\exp(eV/kT)$  faktörü kadar artacaktır.



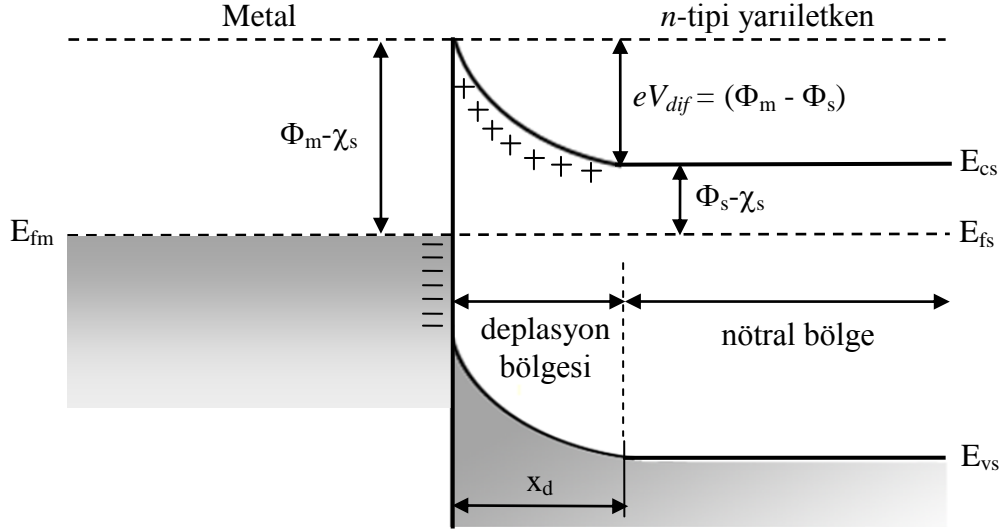
**Şekil 2.1.** Kontakta önce metal ve  $n$ -tipi yarıiletkene ait enerji bant diyagramları

Bu durumda oluşan net akım;

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

eşitliği ile verilir. Bu ifadede,  $I$  net akımı pozitifdir.  $V \gg kT/e$  beslem durumuna düz beslem durumu denir. Yarıiletken tarafına  $+V$  gerilimi uygulandığında iletkenlik bandı  $eV$  kadar alçalır ve yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği  $eV$  kadar artar. Oluşan net akım  $-I_0$  değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna ( $V \ll -kT/e$ ) ters beslem durumu denir.





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

### 2.2.2. Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontaklar

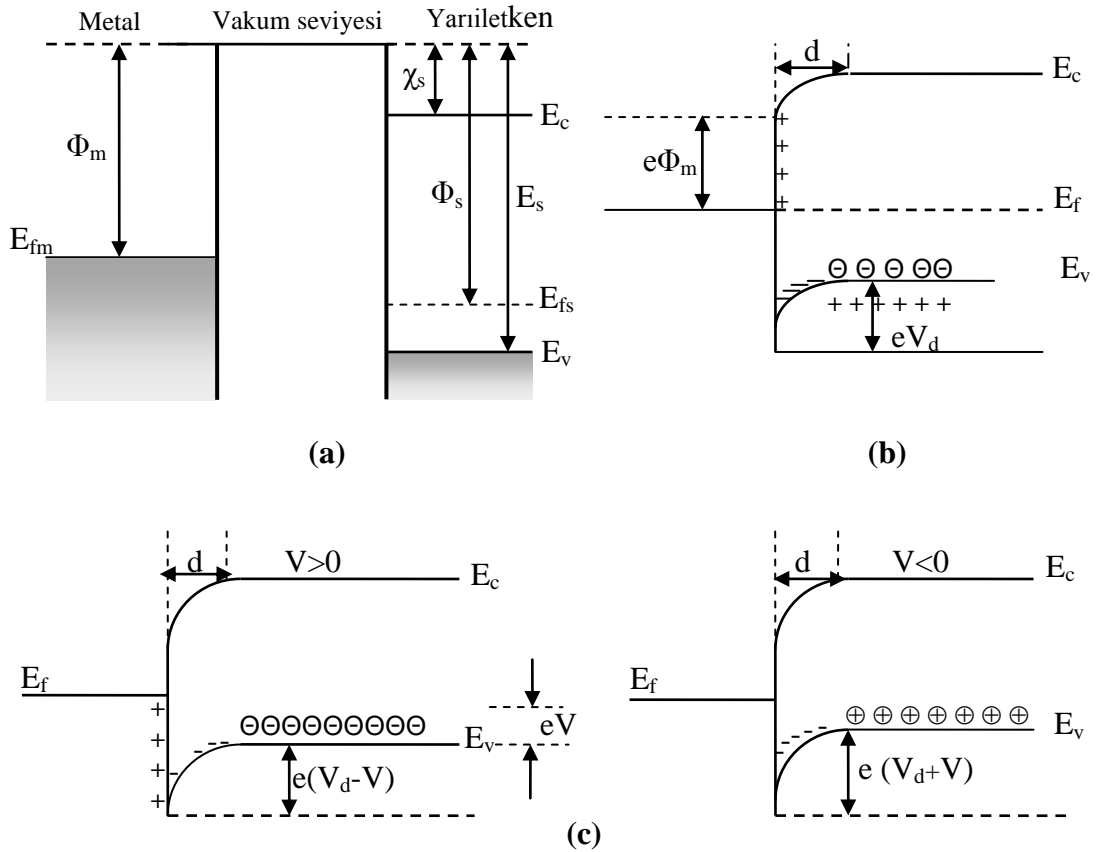
Metal/p-tipi şeklinde oluşan bir kontak için  $\Phi_m < \Phi_s$  olsun. Oda sıcaklığında yarıiletken içindeki akseptörlerin hepsi iyonize olmuş olsun. Şekil 2.3.a'da görüldüğü gibi kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar aşağıdadır. Kontakta sonra, metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelinceye kadar metalden yarıiletkene doğru elektron akışı devam eder. Bunun neticesinde yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler  $d$  kalınlığında bir uzay yükü tabakası içerisinde dağılırlar. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar yükseldiği için, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m \quad (2.2)$$

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

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilir. Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanarak, metalin içine geçebilirler. Aynı şekilde metalde termal olarak oluşan bazı hollerde engeli aşacak kadar enerji kazanıp, yarıiletkene içine geçebilirler. Böylece kontakta engelden geçen eşit ve zıt yönlü iki  $I_0$  akımı oluşur. Eğer yarıiletkene bir  $V$  gerilimi uygulanırsa (Şekil 2.3.b), soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola doğru akan akım  $\exp(eV/kT)$  çarpanı kadar değişir.



**Şekil 2.3.** Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji-bant diyagramı  
a) kontak öncesi, b) kontak sonrası ve termal dengede, c)  $V \neq 0$  durumunda

Bundan dolayı, yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü  $eV$  kadar düşer ve buna bağlı olarak sağdan sola (yarıiletkenden metale) geçen holler için engel yüksekliği  $eV$  kadar azalır. Sonuç olarak sağdan sola akım doğrultusu (yarıiletkenden metale geçen hollerin oluşturduğu akım) pozitif olarak kabul edilirse, karakteristik akım;

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

olur ve bu bir doğrultucu kontaklıdır. Burada  $I_0$  saturasyon akımıdır. Saturasyon akım yoğunluğu  $J_0$  ise,

$$J_0 = \frac{I_0}{A_d} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2.5)$$

ile verilir. Bu ifadede,  $A_d$  diyot alanı,  $\Phi_{b0}$  sıfır-beslem engel yüksekliğidir. (2.5) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp,  $\Phi_{b0}$ 'a göre çözümlerse, engel yüksekliği ( $q\Phi_{b0} = kT \ln(AA^*T^2/I_0)$ ) elde edilir.

Deneysel verilerin değerlendirilmesi sırasında  $I-V$  eğrisinin ideal davranıştan saptığı görülür ve  $I-V$  eğrileri denklem (2.4) ile fit edilemez. İdeal olmayan davranışın sebebinin Schottky etkisi, seri direnç, paralel direnç, ara yüzey etkisi ve homojen olmayan Schottky engel yükseklikleri olduğu yönünde literatürde birçok çalışma mevcuttur. ( $V \geq 3kT/q$ ) olmak üzere doğru beslem ile engel yüksekliğinin lineer arttığı kabul edilip, seri direnç etkisi göz önünde bulundurularak denklem (2.4),

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-qV_d}{kT}\right) \right] \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede  $V_d$  ( $V_d = V - IR_s$ ) diyot voltajıdır.

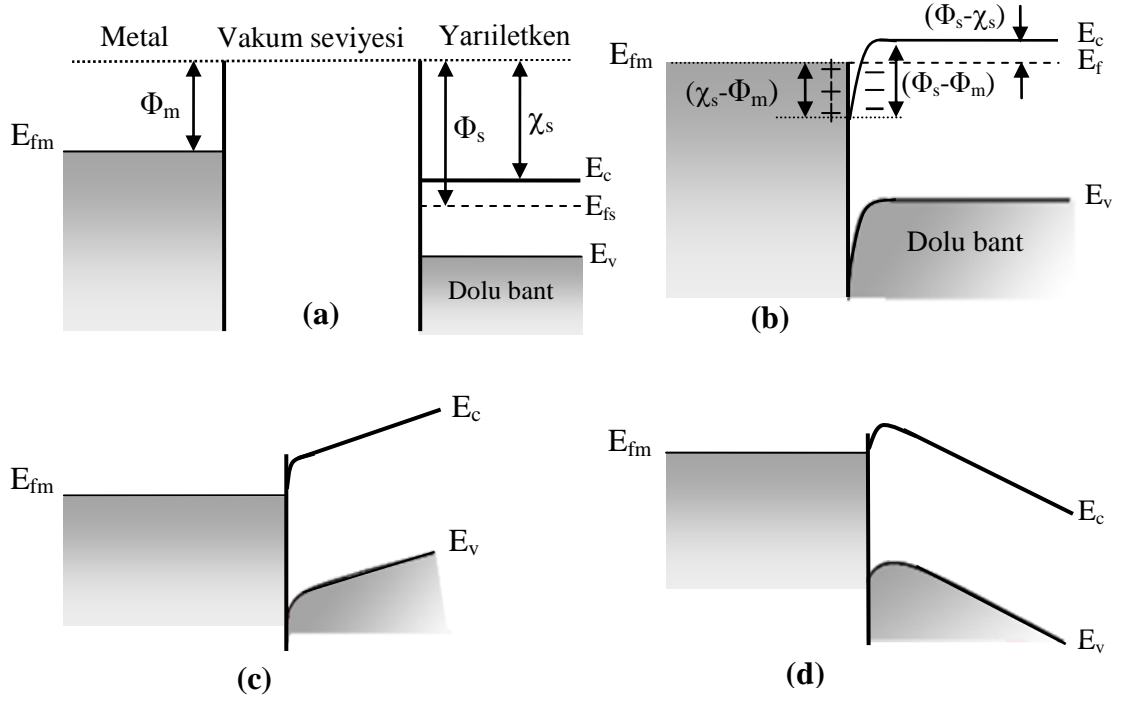
### 2.3. Omik Kontaklar

Uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren bir metal/yarıiletken kontak omik kontak olarak bilinir (Brillson 1993; Neamen 1992). Akım-gerilim ilişkisi Ohm Kanunu ile verilen kontaklar

omik davranış sergilerler. Kontak direncinin değeri ise omik kantağın kalitesini belirler. Omik kontak elde etmenin üç genel şekli vardır. Bunlardan ilki, Schottky engel yüksekliği düşük bir eklem oluşturmak suretiyle elektronların her iki yönde de geçiş yapabileceği bir kontak oluşturmak (non-rectifying barrier), ikincisi ise Schottky engel yüksekliği büyük olsa dahi elektronların tünelleme yapabileceği dar potansiyel engeli oluşturmaktır (tunelling barrier). Bu tünelleme engeli, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik ( $n^{++}$  veya  $p^{++}$ ) gösterecek şekilde katkılama suretiyle elde edilir. Üçüncü olarak da, termal difüzyonla dar bant aralıklı ve taban ile aynı özellikte bir tabaka oluşturmak suretiyle omik kontak oluşturmaktır. Burada sadece düşük Schottky engel yüksekliğine sahip metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda omik kontak oluşumu anlatılacaktır.

### 2.3.1. Metal/n-tipi yarıiletken Omik kontaklar

$\Phi_s$  ve  $\Phi_m$  sırası ile yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonları olmak üzere  $\Phi_m < \Phi_s$  durumunda, bir metalle bir  $n$ -tipi yarıiletken kontak halinde olsun. Kontakta önceki durumda yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ( $\Phi_s - \Phi_m$ ) kadar aşağıdadır. Metal ve yarıiletkenin kontakta önceki enerji-bant diyagramları Şekil 2.4.a'da görülmektedir. Kontakta sonra termal denge durumunda, elektronlar metalden yarıiletkene doğru geride pozitif boşluklar bırakarak geçerler ve bu durumda yarıiletken yüzeyin  $n$ -tipliliği artar. Yarıiletken yüzeydeki bu fazla elektronlar bir negatif yüzey yükü tabakası meydana getirirler. Yine metalden ayrılan elektronlar geride bir yüzey yükü tabakası (pozitif yük dağılımı) meydana getirirler ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Bu durum Şekil 2.4.b'de görülmektedir. Metal tarafına pozitif bir  $+V$  gerilimi uygulanırsa bu durumda yarıiletkenden metale doğru akan elektronlar için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket edebilirler (Şekil 2.4.c). Şayet yarıiletken tarafına pozitif bir  $+V$  gerilimi uygulanırsa, elektronların karşılaşacakları engel yüksekliği yine çok küçük olacaktır ve elektronlar kolayca metalden yarıiletkene doğru akacaklardır (Şekil 2.4.d).

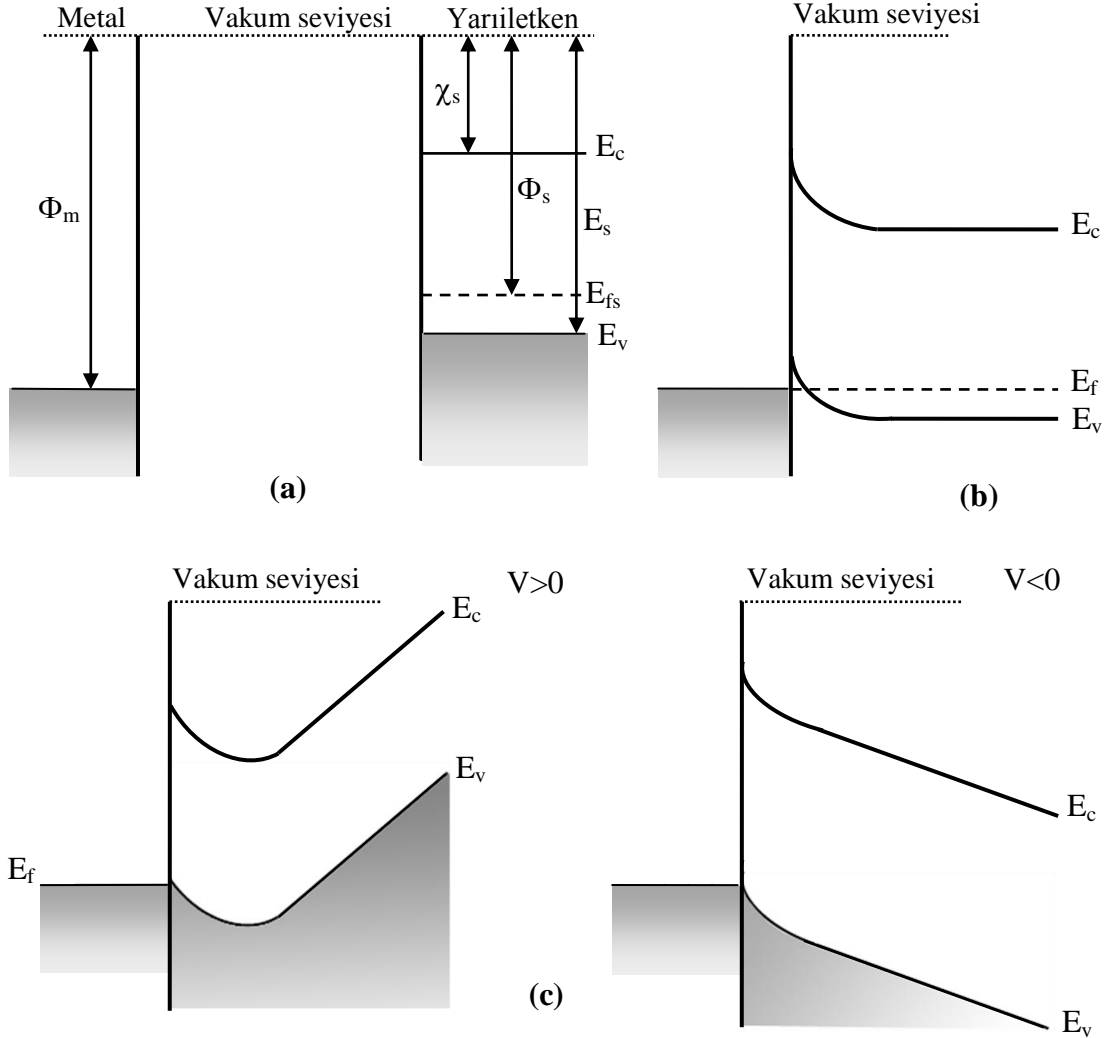


**Şekil 2.4.**  $\Phi_m < \Phi_s$  durumu için metal/*n*-tipi yarıiletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı a) kontakta önce, b) kontakta sonra, c) düz beslem altında, d) ters beslem altında

Sonuç olarak böyle bir kontakta, elektronlar her iki yönde de kolayca hareket edebilirler.  $(\Phi_s - \chi_s)$  nispeten küçük olursa, elektronlar herhangi bir zorlukla karşılaşmadan engel boyunca hareket edebilirler. Omik kontakta bir  $+V$  gerilimi uygulandığında, potansiyel bütün yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Metale negatif bir  $-V$  gerilim uygulandığında, metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına elektron geçişi olmasından dolayı bu kontaklara enjeksiyon kontakları da denir (Ziel 1968).

### 2.3.2. Metal/*p*-tipi yarıiletken Omik kontaklar

$\Phi_m > \Phi_s$  durumunu göz önüne alalım. Şekil 2.5.a'da görüldüğü gibi, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar yukarıdadır. Kontakta sonra metal ile *p*-tipi yarıiletken arasında bir yük mübadelesi meydana gelecektir.



**Şekil 2.5.** Metal/p-tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diyagramı  
a) kontakdan önce, b) kontakdan sonra, c)  $V \neq 0$  durumunda

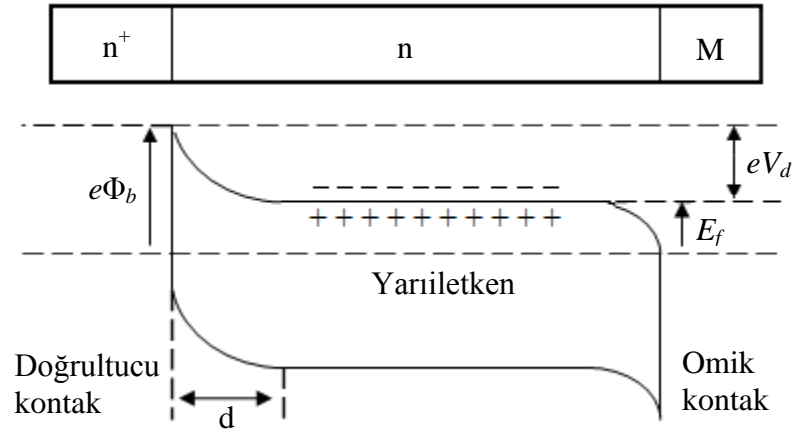
Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (hollerden dolayı) bırakarak ve metal tarafında bir negatif yüzey yüküne neden olarak metal tarafına akarlar. Buna bağlı olarak yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 2.5.b'de görüldüğü gibi  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar aşağı düşer.

Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla *p*-tipi olur. Elektronlar, metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca akabilirler. Bu yük hareketi, hollerin yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen holler yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralize olurlar. Ters beslem

durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler de kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Böylece her iki doğrultuda akımı kolayca geçirebilen kontaklar, omik kontaklar olarak bilinir.

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

Metal(Omik)/n-tipi Yarıiletken/Metal(Doğrultucu) yapısı; kullanılan n-tipi yarıiletkenin bir yüzeyinin aşırı katkılanması sonucu elektron bakımından çok zengin  $n^+$  omik kontağı ile diğer yüzeyine uygulanan nM doğrultucu kontağından meydana gelir. Böyle bir yapının termal dengede enerji-bant diyagramı Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6.  $n^+nM$  yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı

$n^+$  omik kontak kısmına  $V < 0$  olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı doğru beslemde olur. Şayet  $n^+$  tarafına  $V > 0$  olacak şekilde bir gerilim uygulanırsa yapı ters beslemde olur.  $n^+nM$  yapısı diyot özelliği gösterir ve yarıiletken diyot olarak adlandırılır. Elektronlar için engel yüksekliği Şekil 2.6'da görüldüğü gibi  $e\Phi_b = eV_d + E_f$  'ye eşittir.

## 2.5. Schottky Diyotlarda Termiyonik Emisyonla Akım İletimi

Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı termiyonik emisyon olarak bilinir. Metal/yarıiletken Schottky diyotlarda termiyonik emisyon teorisi; taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise holler akım iletimini sağlar. İdeal metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda, doğru beslem durumunda, yarıiletkenden metale termiyonik emisyon akım yoğunluğu;

$$J_{s \rightarrow m} = \left( \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[ \frac{-e\phi_b}{kT} \right] \exp \left( \frac{eV}{kT} \right) \quad (2.7)$$

eşitliği ile verilir. Metalden yarıiletkene akım yoğunluğu uygulanan gerilimden bağımsızdır ve

$$J_{m \rightarrow s} = \left( \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[ \frac{-e\phi_b}{kT} \right] \quad (2.8)$$

ifadesine eşittir. Böylece, eklemdeki net akım yoğunluğu  $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$  olur.

Daha açık bir ifadeyle net akım yoğunluğu,

$$J = \left[ A^* T^2 \exp \left( \frac{-e\phi_b}{kT} \right) \right] \left[ \exp \left( \frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

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

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (2.10)$$



ile verilir. Elektronun yükü  $e=1,6 \times 10^{-19}$  C, Boltzmann sabiti  $k=8,625 \times 10^{-5}$  eV/K ve T (K) Kelvin cinsinden ortamın sıcaklığıdır. Genel bir durum için (2.4) ifadesi,

$$J = J_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.11)$$

olarak yazılabilir. Burada  $J_0$  ters-doyma akım yoğunluğu olarak bilinir ve

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir.

## 2.6. Norde Modeline Göre Akım-Gerilim Eğrilerinin Karakteristiği

Daha önce termiyonik emisyonla akım iletiminde akım yoğunluğu denklemi (2.9) diyodun etkin alanı  $A$  ile çarpıldığında, akım denklemi aşağıdaki gibi bulunur;

$$I = A \cdot J = \left[ AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.13)$$

ideal bir Schottky diyot için termiyonik emisyon etkili akım ifadesi;

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

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

$$I_0 = AA^* T^2 \exp(-\beta\phi_b) \quad (2.15)$$

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

$$I \cong I_0 \exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \quad (2.16)$$

elde edilir. Burada  $\ln(I)$ 'nin  $V$ 'ye karşı grafiği ( $e\phi_b$ ) engel yüksekliğinin tayini için farklı yol sergiler. Akım-voltaj karakteristiği,  $kT/e \ll V \ll IR$  aralığındaki gerilimler için doğru şeklinde olup,  $R$  çok büyük ise doğru kısım oldukça dar olur. Bu seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için  $F(V)$  fonksiyonu kullanılır;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.17)$$

seri direnç hesaba katılınca diyot için akım;  $V_d = V - IR$  alınır,

$$I = I_0 [\exp(\beta V_d) - 1] \quad \Rightarrow \quad I = I_0 [\exp[\beta(V - IR)] - 1] \quad (2.18)$$

bağıntısı ile verilir.  $V_d \gg kT/e$  olduğu kabul edilip denklem (2.18), denklem (2.17)'de yerine yazılırsa;

$$F(V) = \phi_b + IR - \frac{V}{2} \quad (2.19)$$

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

$$F(V) = \phi_b - \frac{V}{2} \quad (2.20)$$

ifadesi elde edilir. Bu eğimi  $(-1/2)$  olan bir doğru denklemdir. Denklem (2.17)'de ohm yasası ( $I=V/R$ ) ifadesi yerine yazılırsa

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V}{RAA^*T^2}\right) \quad (2.21)$$

elde edilir. Çok büyük voltajlar için bu ifade eğimi 1/2 olan bir doğruya yaklaşacaktır. 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. (2.19) eşitliğinin  $V$ 'ye göre türevi alındığında,

$$\frac{dF(V)}{dV} = R\left(\frac{dI}{dV}\right) - \frac{1}{2} \quad (2.22)$$

bağıntısı elde edilir,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[ 1 + R\left(\frac{dI}{dV_d}\right) \right]^{-1} \quad (2.23)$$

ve

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} [I_{\min.} \exp(\beta V_d)] = \beta I \quad (2.24)$$

olduğundan, fonksiyon türevi

$$\frac{dF(V)}{dV} = \frac{\beta RI}{1 + \beta RI} - \frac{1}{2} \quad (2.25)$$

olarak elde edilir.  $dF(V)/dV=0$  değeri  $F(V)$ 'nin minimum noktasındaki  $I_{\min.}$  akımını verir ve buna göre (2.25)'den  $I_{\min.}$  akımı

$$I_{\min.} = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{qR} \quad (2.26)$$

olur,  $I_{min.}$  akımına karşılık gelen voltaj ise

$$V_{min.} = I_{min.} R + V_d(I_{min.}) \quad (2.27)$$

$$V_{min.} = \frac{1}{\beta} + \ln\left(\frac{I_{min.}}{AA^*T^2}\right) \quad (2.28)$$

şeklinde olup, buna göre  $F(V)$ 'nin minimum değeri

$$F(V_{min.}) = \frac{V_{min.}}{\beta} - \frac{1}{\beta} \left( \frac{I_{min.}}{AA^*T^2} \right) \quad (2.29)$$

olur.  $I_{min.}$  ve  $V_{min.}$ 'un ölçülen değerleri kullanılarak

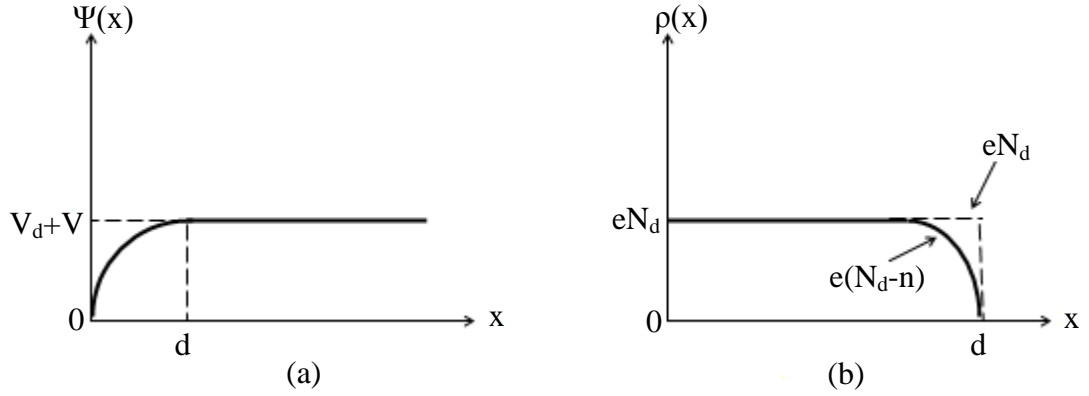
$$R = \frac{kT}{qI_{min.}} \quad (2.30)$$

$$\phi_b = F(V_{min.}) + \frac{V_{min.}}{2} - \frac{kT}{q} \quad (2.31)$$

olarak elde edilir.

## 2.7. Metal/Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi

Metal ile yarıiletken kontak haline getirilince oluşan dipol tabakası, yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ve metal tarafındaki yüzey yüklerinden dolayı bir kondansatör gibi davranır. Ters beslenmiş ideal bir metal  $n$ -tipi yarıiletken Schottky diyodunda, ters beslem gerilimi arttırılırsa arınma bölgesinin genişliği artar.



**Şekil 2.7.** Metal  $n$ -tipi yarıiletken yapılarda doğrultucu kontağın; a) Potansiyel dağılımı, b) Yük dağılımı

Arınma bölgesindeki yük değişir ve dolayısıyla sığa da değişir (Ziel 1968; Rhoderick and Williams 1988). Bu nedenle diyotlar değişken kapasitör olarak kullanılabilirler. Ayrıca, diyot parametrelerinin birçoğu ters beslem altındaki sığa ölçümünden elde edilebilir. Metal  $n$ -tipi yarıiletken diyodunun engel tabakasındaki potansiyel dağılımı poisson eşitliği ile ifade edilir ve poisson eşitliği;

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (2.32)$$

şeklinde ifade edilir (Ziel 1968). Bu ifadede  $\epsilon_s$  yarıiletkenin,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti,  $\rho(x)$  ise konuma bağlı uzay yükü yoğunluğudur. Metal- $n$  tipi yarıiletken doğrultucu kontağın  $\Psi(x)=0$  potansiyel fonksiyonu ile uzay yük yoğunluğu  $\rho(x)$ 'in konuma bağlı değişimleri Şekil 2.7'de gösterilmiştir.  $N_d$ ,  $n$ -tipi yarıiletkenin donör yoğunluğu (serbest taşıyıcı yoğunluğu) ve  $n$  yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu olmak üzere, uzay yük yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_d - n) \quad (2.33)$$

ifadesi ile verilir. Difüzyon potansiyelini  $V_d$  ve kontağa uygulanan potansiyeli  $V$  ile gösterelim.  $e(V_d - V) \gg kT$  olduğunda  $0 \leq x \leq d$  aralığında  $N_d \gg n$  olur. Eşitlik (2.33)

$$\rho(x) \cong eN_d \quad (2.34)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeyi poisson denkleminde kullanalım.

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\varepsilon_s\varepsilon_0} \quad (2.35)$$

Potansiyel engel bölgesinde potansiyel dağılımının bulunması için denklem (2.35)'in aşağıdaki sınır değerleri altında düşünülmesi gerekir.

$$\begin{aligned} 1) \quad x = d & \quad \text{için} & \quad \frac{d\Psi}{dx} = 0 \\ 2) \quad x = 0 & \quad \text{için} & \quad \Psi(x) = 0 \\ 3) \quad 0 \leq x \leq d & \quad \text{ise} & \quad \Psi(x) = V_{d0} \pm V \end{aligned}$$

Birinci sınır şartı altında Eşitlik (2.35)'in integralini alırsak kontak bölgesi elektrik alanını elde ederiz.

$$E(x) = -\frac{d\Psi(x)}{dx} = -\frac{eN_d}{\varepsilon_s\varepsilon_0}(x-d) \quad (2.36)$$

Bu ifadenin ikinci sınır şartı altında integralini alırsak, potansiyel dağılım fonksiyonunu buluruz.

$$\Psi(x) = -\frac{eN_d}{\varepsilon_s\varepsilon_0} \left( \frac{1}{2}x^2 - xd \right) \quad (2.37)$$

Üçüncü sınır şartı altında bu son ifadeyi çözersek Schottky tabakasının genişliğini elde ederiz.

$$d = \left[ \frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0}{eN_d} (V_{d0} \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.38)$$

Burada  $V_{d0}$  sıfır gerilimdeki difüzyon potansiyelidir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu için

$$Q = eN_d d = \left[ 2\varepsilon_s \varepsilon_0 eN_d (V_{d0} \pm V) \right]^{1/2} \quad (2.39)$$

bağıntısı bulunur. Schottky kapasitesi (2.39) eşitliğine sahip  $Q$  yükünün uygulanan gerilime göre değişimi olarak tanımlanır. Buna göre kapasite;

$$C = \left| \frac{\partial Q}{\partial V} \right| = \left[ \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 eN_d}{2(V_{d0} + V)} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{d} \quad (2.40)$$

eşitliğiyle verilir. Bu ifadeye göre arınma bölgesinin kapasitesi; uygulanan gerilim ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters orantılı ve donör yoğunluğu ile doğru orantılı olduğu görülür. Eşitlik (2.40) şu şekilde de yazılabilir.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{d0} + V)}{\varepsilon_s \varepsilon_0 eN_d A^2} \quad (2.41)$$

$C^{-2}$  nin  $V$ 'ye göre grafiği bir doğru verir. (2.41) ifadesinin türevi alınıp  $N_d$  çekilirse,

$$N_d = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e} \frac{dV}{d(1/C^{-2})} \quad (2.42)$$

elde edilir. Eşitlik (2.42) ve  $C^{-2}$  - $V$  grafiğinin lineer kısmına fit yapılarak elde edilecek doğrunun eğiminden donör yoğunluğunun bulunabileceğini gösterir. Termal denge durumunda,  $n$ -tipi yarıiletken içindeki elektron konsantrasyonu

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (2.43)$$

ile verilmektedir. Burada  $N_c$  iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu olup n-SiC için  $N_c=8.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  olarak verilmektedir.  $n$ -tipi yarıiletken durumunda  $N_d > n_i$  olacağı için  $n_0 \cong N_d$  olur. Burada  $n_i$  intrinsic (asal) elektron konsantrasyonudur. Bu durum dikkate alınarak Eşitlik (2.43) denklemi yeniden düzenlenecek olursa,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (2.44)$$

eşitliği elde edilir. Her iki tarafın tabii logaritması alınır ve iletkenlik bandı referans seviyesi olarak kabul edilirse ( $E_c=0$ ), bu durumda yukarıdaki ifade,

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \quad (2.45)$$

şeklini alır. Eşitlik (2.45) ile her bir diyot için hesaplanan  $N_d$  değerleri, (2.45) denkleminde yerine yazılarak, iletkenlik bandının tabanı ile Fermi seviyesi arasındaki fark olan  $E_f = V_n$  değerleri elde edilir (Sağlam and Türüt 1997).

## 2.8. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler

İdeal bir Schottky diyot için engel yüksekliği ifadesi,

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (2.46)$$

ile verilir. Ancak bazı etkiler Schottky engel yüksekliğinin değişmesine neden olurlar. Bu etkilerden ilki; Schottky etkisi veya imaj-kuvvet etkisinden dolayı engel yüksekliğinin azalmasıdır. Metalden  $x$  kadar uzaklıktaki bir mesafede



yarıiletkendeki bir elektron bir elektrik alan oluşturacaktır. Elektrik alan çizgileri, metal yüzeyine diktir ve bu çizgiler metalin yüzeyinden iç kısma doğru  $x$  mesafesinde de yerleşmiş bir  $+e$  imaj yükünün çizgileri ile aynıdır. Bu imaj etkisi Şekil 2.8.a'da gösterilmiştir.

İmaj yükü ile Coulumb etkileşmesinden dolayı, elektron üzerine etki eden kuvvet,

$$F = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -eE \quad (2.47)$$

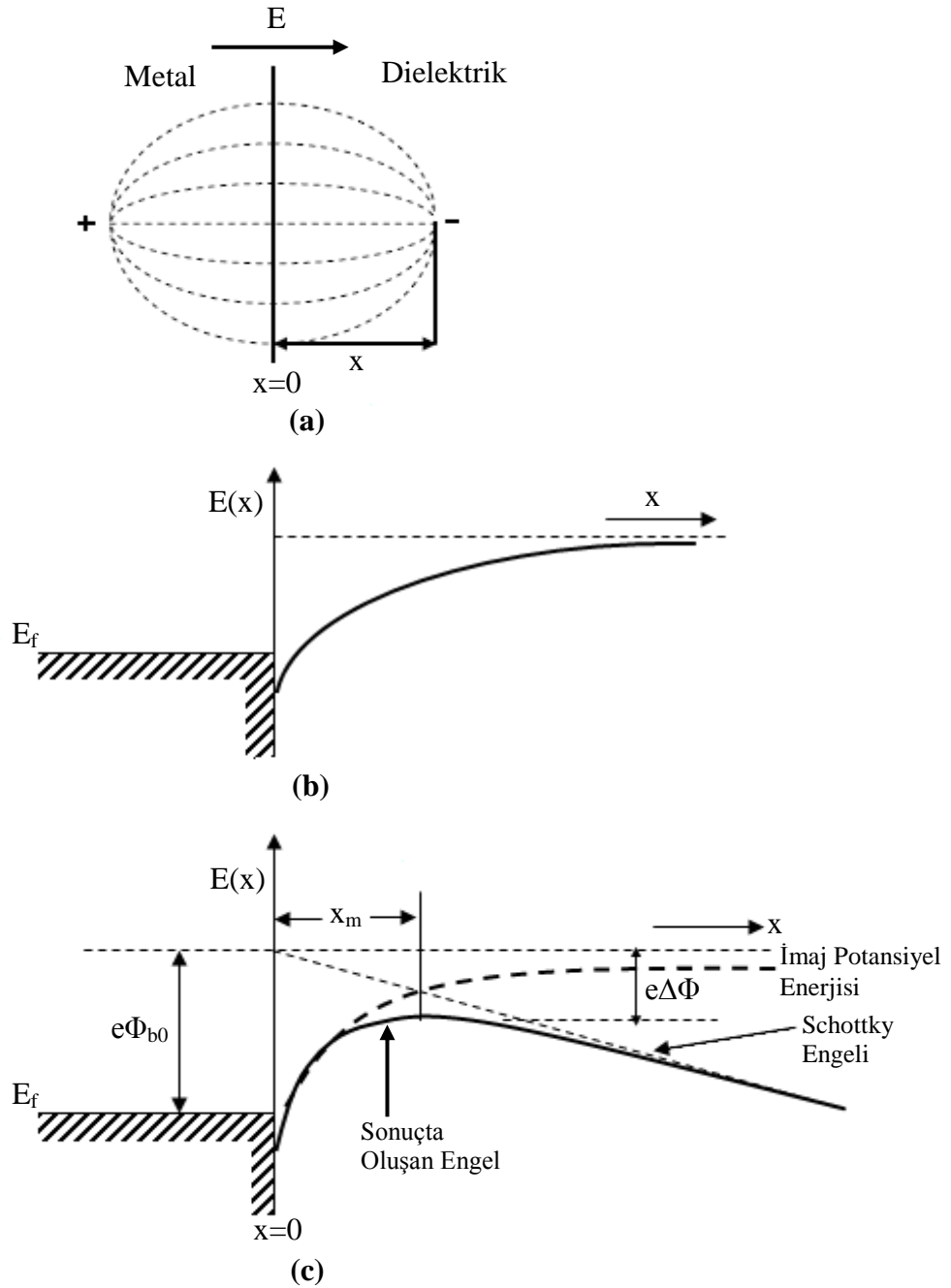
ifadesi ile verilir (Neamen 1992).

Deplasyon bölgesindeki potansiyel ifadesi ise,

$$-\Phi(x) = +\int_x^\infty E dx = +\int_x^\infty \frac{e}{4\pi\epsilon_s 4(x)^2} dx = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} \quad (2.48)$$

ile verilir. Bu ifadede  $x$  integral değişkeni olup,  $x = \infty$  için potansiyel sıfır olarak kabul edilmektedir. Elektronun potansiyel enerjisinin  $-e\Phi(x)$  değişimi başka elektrik alanın olmadığı kabul edilerek Şekil 2.8.b'de gösterilmektedir. Metal-yarıiletken arayüzeyindeki toplam potansiyele, bu imaj potansiyeli de katkıda bulunacağından toplam potansiyel ifadesi yeniden şu şekilde düzenlenir.

$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi\epsilon_s x} - E \cdot x \quad (2.49)$$



**Şekil 2.8.** (a) Metal/yarıiletken arayüzeyinde imaj yükü ve elektrik alan çizgileri, (b) Elektrik alan sıfır iken potansiyel engelindeki bükülme, (c) Sabit bir elektrik alanda imaj kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme

Sabit bir elektrik alanın varlığında elektronun potansiyel enerji değişimi Şekil 2.8.c'de gösterilmiştir. Bu şekilde potansiyel engeli piki azalmıştır. Potansiyel engeli pikinin bu şekilde azalması imaj-kuvvet etkisi (Schottky etkisi) ile engel

yüksekliğinin azalması olarak bilinir. Toplam potansiyelin maksimum olduğu noktanın türevi sıfır olacağından,

$$\frac{d(e\Phi(x))}{dx} = 0 \quad (2.50)$$

şartı dikkate alınarak maksimum potansiyel engelinin konumu

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (2.51)$$

ve imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması,

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.52)$$

ile verilir.

## 2.9. Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı

İnhomojen engele sahip bir Schottky diyot için aşağıdaki temel ifadeler verilebilir.

$$\Phi_b^j = \bar{\Phi}_b - \frac{\sigma_s^2}{\left(\frac{2kT}{q}\right)} \quad \text{ve} \quad \Phi_b^c = \bar{\Phi}_b \quad (2.53)$$

Bu ifadede  $\Phi_b^j$ , düz beslem gerilimine bağlı olarak  $I$ - $V$  ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği,  $\Phi_b^c$ ,  $C$ - $V$  ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği,  $\bar{\Phi}_b$ , ortalama engel yüksekliği ve  $\sigma_s$  standart sapmadır. Bu ifadelere göre,  $I$ - $V$  ve  $C$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği farklı olacaktır. Ayrıca gerilim

altında engel dağılımının değiştiği dikkate alınır, bu ifadelerle idealite faktörünün de açıklanması mümkün olur. (2.53) ifadesi potansiyel engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi hakkında bilgi vermektedir. Her sıcaklık için  $I$ - $V$  karakteristiğinin sıfır uygulama gerilimine fit edilmesi ile bulunan  $I_0$  doyma akımlarından hesaplanan engel yüksekliklerinin,  $1/T$ 'ye karşı değişim karakteristiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi  $(q\sigma_s^2/2k)$  olur ve bu değerlerden standart sapma bulunur. Bu lineer doğrunun potansiyel engel yüksekliğini kestiği nokta ise ortalama engel yüksekliğini verir. Bu standart sapma  $(\sigma_s)$  ve ortalama potansiyel engel yüksekliği  $(\bar{\Phi}_b)$  değerleri (2.53) eşitliğinde yerine yazılırsa, uzaysal inhomojen potansiyel engelleri için Gauss dağılımı elde edilir. Standart sapmanın  $(\sigma_s)$  sıcaklığa bağlı ifadesi;

$$\sigma_s^2(T) = \sigma_s^2(T=0) + \alpha_\sigma(T) \quad (2.54)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $\alpha_\sigma$ , standart sapmanın sıcaklığa bağlılığı olarak ifade edilir. Sıfır beslemdeki standart sapmayı ve bir ortalama değere sahip engel yüksekliklerinin Gauss dağılımını göz önüne alarak, deneysel doğru beslem  $I$ - $V$  grafiğinden bulunan engel yüksekliği  $(\Phi_b^j)$ ,  $\bar{\Phi}_b = \bar{\Phi}_b^c$  engel yüksekliği ile de ilgilidir. Kapasite sadece ortalama bant bükülmesine bağlı olup, engel yüksekliğinin standart sapmasından  $(\sigma_0)$  bağımsızdır. Deneysel engel yüksekliği  $(\Phi_b^j)$  ile  $C^{-2}$ - $V$  grafiğinden elde edilen ortalama engel yüksekliği  $(\bar{\Phi}_b)$  arasındaki bağıntı,

$$\bar{\Phi}_b - \Phi_b^j = -\frac{q\sigma_0^2}{2kT} + \frac{q\alpha_\sigma}{2k} \quad (2.55)$$

ile verilir (Karataş *et al.* 2003). Kapasite-voltaj ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği  $(\Phi_b^c)$  ile doğru beslem altında  $I$ - $V$  ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği  $(\Phi_b^j)$  arasındaki farkın  $((\Phi_b^c) - (\Phi_b^j))$   $1/2$   $kT$ 'ye göre değişimi lineer bir

doğru verir. Bu doğrunun eğimi  $q\sigma_0^2$  ye eşit olup, y eksenini kestiği nokta  $q\sigma_0^2/2k$  dir. Schottky engel yüksekliğinin  $(\bar{\Phi}_b)$  sıcaklığa bağlı değişimi;

$$\bar{\Phi}_b(T) = \bar{\Phi}_b(T=0) + \alpha T \quad (2.56)$$

şeklinde ifade edilir. (2.56) denkleminde  $\bar{\Phi}_b(T=0)$ ,  $T=0$  için ortalama engel yüksekliği,  $\alpha$  ise sıcaklık katsayısıdır.

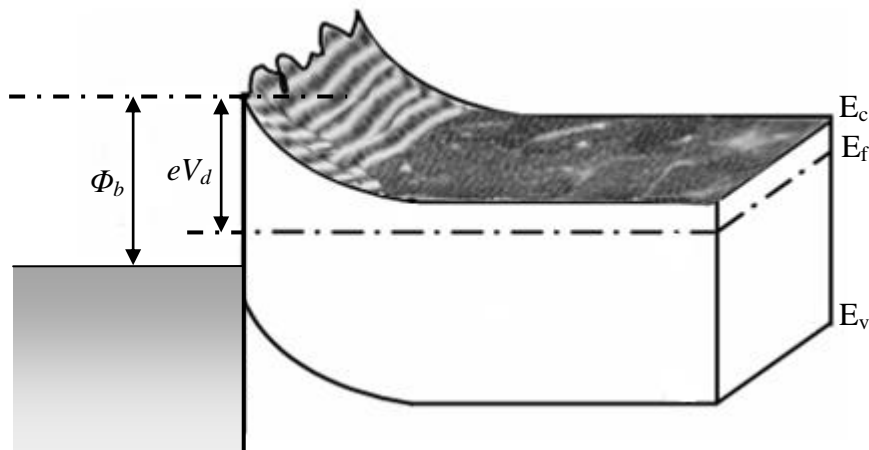
## 2.10. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Sıcaklığın Etkisi

Yarıiletken devre elemanlarında kullanılan kontakların çoğu ısıya maruz kalmaktadır. Metalin yarıiletkene adhezyonunu artırmak için bu durum kaçınılmaz olabilir (Aydoğan 2004). Çünkü metalin kaplanmasıyla oluşan diğer işlem basamakları için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulabilir. Yapılan bu işlem ısı sinterleme veya ateşleme olarak adlandırılır. Doğrultucu kontağın eriyebileceği sıcaklıktan kaçınmak çok önemlidir. Çünkü arayüzey yarıiletkenin içinde keskin metalik sivri bir çıkıntıya sahip düzlemsel olmayan yapıya sahip olmaya başlar. Bu durum oluştuğunda, çıkıntının ucundaki yüksek alan bölgesi elektriksel karakteristikleri nispeten küçültebilir (Andrews 1974). Kontakın alaşım hali istenmedikçe (omik kontak oluşumundaki gibi) sıcaklıkları metal/yarıiletken sisteminin eutektik sıcaklığının altında kontakın oluşacağı değerde tutmak gerekir. Örneğin, Silisyum'un Au, Al ve Ag ile yapılan alaşımlarının eutektik sıcaklıkları sırasıyla 370°C, 577°C ve 840°C'dir. Esasen eutektik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda bile yarıiletkenin içine metal göçü oluşabilir. Bu metalürjik değişimler son zamanlarda yeni geliştirilmiş olan Rutherford'un backscattering (geri saçılma), Auger Electron Spectroscopy ve Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) teknikleri kullanılarak yaygın olarak çalışılmıştır. Örneğin Hiraki ve arkadaşları (1971) 200°C'ye kadarki sıcaklıklarda Rutherford'un backscattering tekniği kullanılarak bir altın film içine silisyumun taşındığını göstermişlerdir. Buharlaştırmadan önce bu göçün veya taşınmanın genişlemesi silisyumun yüzeyinin durumuna oldukça duyarlıdır ve ara yüzeyde ince bir oksit tabakasının varlığı ile engellenebilir. Bu durum basitçe tek tip

difüzyonla açıklanamayabilir, muhtemelen buna ek olarak tane sınırı difüzyonunu da gerektirir. Devre elemanı uygulamalarında diyot da akım akışı ile oluşan ısının bir sonucu olarak bir düzensizlik oluşabilir. Gözlenen metalürjik değişimler için  $I-V$  karakteristiklerinin bozulmasını açıklamak oldukça zordur.  $I-V$  karakteristiklerindeki değişim her zaman engel yüksekliğindeki bir değişimle basitçe açıklanamayabilir. Bazen karakteristikler donör veya akseptör olarak davranan atomların yarıiletkene difüze oldukları kabul edilerek yorumlanabilir veya yarıiletkende katkı atomlarının etkin yoğunluğunun değiştirilmesi için elektriksel olarak aktif merkezler oluşturulur. Katkı yoğunluğu arttıkça engel daralır ve termiyonik alan emisyonu oluşabilir. Yarıiletken içine giren atomlar veya kusurlar asıl katkı atomlarıyla zıt polaritede iseler etkin hal yoğunluğu azalır ve bazen p-n eklemine oluşabileceği durum elde edilir (Rhoderick 1988).

## 2.11. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojen Olmayan Engel Yüksekliğinin Analizi

Schottky kontaklarda ( $I-V$ ) karakteristiklerinden elde edilen sıcaklığa bağlı engel yüksekliğinin değişimi ve idealite faktörünün birden büyük olması farklı şekillerde açıklanmaktadır (Dobrocka and Osvald 1994; Horváth 1996; Tung 2001).



**Şekil 2.9.** Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip olan bir Schottky kontakın iki boyutlu enerji-bant diyagramı

Metal/yarıiletken arayüzeyinin düzgün olmaması Şekil 2.9'da gösterilen difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) ve engel yüksekliğinin farklı uzaysal değişimlerine neden olarak homojen olmayan bir dağılıma neden olacaktır.

Metaldeki atomik yapı, dislokasyonlar ve tane sınırlarının yanı sıra metalin kalınlığının değişimi metal/yarıiletken arayüzeyin pürüzlü olmasına neden olabilir. Bunun yanı sıra potansiyel değişimlerin bir başka nedeni de alan emisyonundan dolayı lokal engel yüksekliğinin azalması olabilir. Ayrıca, arayüzeyde farklı metalik fazların etkisi ile de lokal değişimler ortaya çıkabilir. Bunun yanı sıra yarıiletkendeki donör atomlarının rastgele dağıldığı düzenli bir örgüde, donör atomları arasındaki düzensiz mesafeler de bahsedilen potansiyel değişimlerin bir başka nedeni olabilir. Küçük boyutlu devre elemanlarındaki bu tür katkı atomlarının etkisi, potansiyel değişim modeli, homojen olmayan Schottky kontaklar için daha önce yapılan çalışmalardan farklıdır (Werner and Güttler 1991). Bu konuda, daha önce yapılan çalışmalarda, farklı engel yüksekliğine sahip olan homojen ve homojen olmayan Schottky diyotlar üzerinde farklı çalışmalar yapılmıştır.

Schottky diyotlardaki ideal durumdan sapmaları açıklayan modellerden birinin; "engelin inhomojenliği modeli" olduğu yukarıda belirtilmiştir. Bu durumdaki davranışlar Gauss dağılımı kullanılarak açıklanabilmektedir. Ortalama engel yüksekliği  $\bar{\Phi}_b$ , ve standart sapması  $\sigma_s$  olan bir Schottky diyot için Gauss dağılımı ifadesi,

$$P(\Phi_b) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\Phi_b - \bar{\Phi}_b)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2.57)$$

bu ifadede  $\frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}}$ , Gauss engel yüksekliği dağılımının normalizasyon sabitidir. Düz

beslemdeki toplam akım;

$$I(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\Phi_b, V) P(\Phi_b) d\Phi_b \quad (2.58)$$

ile verilir. Belirtilen aralıklarda integral çözümü yapılırsa;

$$I(V) = AA^*T^2 \exp\left[-\frac{e}{kT}\left(\bar{\Phi}_b - \frac{e\sigma_s^2}{2kT}\right)\right] \exp\left(\frac{eV}{n_{ap}kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)\right] \quad (2.59)$$

elde edilir. Ayrıca saturasyon akımı,

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{ap}}{kT}\right) \quad (2.60)$$

ile verilir. Burada  $\Phi_{ap}$  ve  $n_{ap}$  sırasıyla, sıfır gerilimdeki etkin engel yüksekliği ve idealite faktörüdür. İnhomojenlik modelinde ortalama engel yüksekliği ve deneysel idealite faktörleri, sırasıyla,

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_b - \frac{e\sigma_0^2}{2kT} \quad (2.61)$$

$$\left(\frac{1}{n_{ap}} - 1\right) = \rho_2 - \frac{e\rho_3}{2kT} \quad (2.62)$$

eşitlikleri ile verilir (Werner and Güttler 1991).  $\sigma_s$ 'nin sıcaklığa bağlılığı genellikle küçüktür ve bu yüzden ihmal edilebilir. Burada  $\rho_2$  ve  $\rho_3$ , sıcaklığa bağlı olabilen ve engel yüksekliği dağılımının voltaj değişimlerini tanımlayan nicelikler olup voltaj katsayıları olarak adlandırılırlar.

Ayrıca (2.60) ve (2.61) ifadeleri birleştirilerek,



$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{e^2 \sigma_0^2}{2kT^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\bar{\Phi}_b}{kT} \quad \text{elde edilir.} \quad (2.63)$$

Schottky diyotlarda idealite faktörü ve engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlılığı  $T_0$  etkisi olarak bilinmektedir. Genellikle sıcaklık düşürüldüğünde diyodun idealite faktörü artar. Bazı metal-yarıiletken arayüzeylerinde elde edilen Schottky engel yüksekliği ve idealite faktörleri,  $T_0$  anormalliği olarak bilinen, ölçülen sıcaklıkla değişimi ifade eder. Bu durum, tek ve bileşik yarıiletkenlerde Schottky engelinin bütün tiplerinde gözlenmiş olan bir olgudur. Bunun için eşitlik (2.9) ile verilen akım yoğunluğu ifadesini akım cinsinden ve  $T_0$  değerini de katarak aşağıdaki gibi yazabiliriz;

$$I = AA^*T^2 \left[ \exp\left(-\frac{e\phi_b}{k(T+T_0)}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{eV_a}{k(T+T_0)}\right) - 1 \right] \quad (2.64)$$

Burada  $T_0$  bir sabittir. İdeal durumda ( $n=1$  için)  $T_0$ , 0 değerini göstermektedir. Açıkcası,  $T_0$  değeri sifira yaklaştıkça diyotlar da ideal duruma yaklaşırlar.

## 2.12. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Cheung (1986) Metal-yarıiletken kontak yapısının doğru beslem  $I-V$  karakteristikleri yardımı ile Schottky diyot parametrelerinin hesaplanması için farklı bir model sundu. Termiyonik emisyon teorisinden bulunan akım yoğunluğu ( $J$ ) ifadesi, diyodun  $A$  etkin alanıyla çarpılırsa, diyottan geçen toplam akım;

$$I = A \cdot J = \left[ AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.65)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadede  $qV \gg kT$  ise, 1 ihmal edilebilir.

Uygulanan voltajın tamamı deplasyon bölgesine düşmediği için ideal durumdan sapmalar olacaktır. Bu ideal durumdan sapmaları ifade edebilmek için birimsiz olan idealite faktörünün ( $n$ ) hesaba katılması gerekir. Böylece akım denklemi,

$$I = A \cdot J = \left[ AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (2.66)$$

şeklinde olur.

Burada uygulanan voltaj ( $V$ )'nin  $IR_s$  kadarlık kısmı seri direnç üzerinde düşeceği göz önüne alınırsa ( $V \rightarrow V - IR_s$ ), son ifade

$$I = A \cdot J = \left[ AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right) \right] \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.67)$$

şeklinde yazılabilir. Bu son ifadenin logaritması alınıp,  $V$ 'ye göre çözüm yapılırsa

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.68)$$

elde edilir. Elde edilen son ifadenin  $\ln I$ 'ya göre diferansiyeli alınırsa

$$\left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.69)$$

elde edilir. (2.69) eşitliğinde  $dV/d(\ln I)$ 'nin  $I$ 'ya göre grafiği bir doğru verecektir. Bu doğrunun eğimi  $R_s$  seri direncini verir, yine bu doğrunun ordinat eksenini kestiği noktadan idealite faktörü bulunabilir (Cheung and Cheung 1986). Potansiyel engelini ( $\Phi_b$ ) bulmak için

$$H(I) = V - \left( \frac{nkT}{q} \right) \ln \left( \frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2.70)$$

şeklinde bir  $H(I)$  fonksiyonu tanımlanabilir. (2.68) ve (2.69) eşitliklerinden

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.71)$$

ifadesi yazılabilir. Bu son ifade göz önüne alınarak  $H(I)$ - $I$  grafiği çizilecek olursa yine bir doğru verecektir. Bu doğrunun eğimi ise nötral bölge direnci ve kontak direncinin toplamını, yani seri direnci ( $R_s$ ) verecektir. Bu doğrunun  $H(I)$  eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği ( $q\Phi_b$ ) bulunur.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Giriş

Bu bölüm 6H-SiC kristali üzerine omik ve Schottky kontak yapımı ile PbS ince filmlerinin buharlaştırma, SILAR ve Elektrokimyasal yöntemler ile büyütülmesi için gerekli malzeme, numune hazırlanması, temizlenmesi, deney ve ölçüm sistemi ile ilgili bilgileri kapsamaktadır. Ayrıca hazırlanan numunenin  $I-V$  ve  $C-V$  karakteristik parametrelerinin ölçümünde kullanılan aletler ve teknikler de yer almaktadır.

#### 3.2. SiC Kristalinin Temizlenmesi ve Numunenin Hazırlanması

Bu çalışmada (0001) doğrultusunda büyütülmüş, 0,4 mm kalınlığında, oda sıcaklığında 0,076  $\Omega\text{cm}$  dirence sahip tek yüzü parlatılmış n-tipi 6H-SiC kristali kullanıldı. Elde edilen sonuçların güvenilir olabilmesi için kristal yüzeyinin mekanik ve organik kirlerden arındırılması gerekmektedir. Numune yüzeyinin parlatılma işlemi fabrikasyon olarak yapıldığı için ayrıca bir mekanik temizlemeye ihtiyaç duyulmadı. Kimyasal temizleme için sırasıyla aşağıdaki işlemler takip edildi.

- 1)  $\text{NH}_4\text{OH}$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2$ ;  $\text{H}_2\text{O}$  (1;1;5)  $75^\circ\text{C}$ 'de 15 dakika yıkandı.
- 2) Deiyonize su ( $\sim 18\text{ M}\Omega$ ) içerisinde 3 dakika yıkandı.
- 3)  $\text{HCl}$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2$ ;  $\text{H}_2\text{O}$  (1;1;6)  $75^\circ\text{C}$ 'de 15 dakika yıkandı.
- 4) Deiyonize su ile 3 dakika yıkandı.
- 5) Aseton ile 5 dakika yıkandı.
- 6) Deiyonize su ile 3 dakika yıkandı.
- 7) Metanol ile 5 dakika yıkandı.
- 8) Deiyonize su ile 5 dakika yıkandı.

Kontak yapımı için buharlaştırılacak metaller, metanolde ultrasonik olarak 5 dakika yıkandıktan sonra %10 seyreltik HF içerisinde 5 dakika yıkandı. Kristale omik kontak

yapılırken buharlaştırma işleminden sonra numune tavlanaacağı için, tavlama işlemi için numunenin içerisine konulduğu quartz pota da asetonla ve metanolle sırası ile 5'er dakika yıkandı.

### 3.3. Omik Kontak Yapımı

Kristalin kimyasal temizleme işleminden sonra mat tarafına omik kontak yapımı için buharlaştırmada kullandığımız ısıtıcı ilk önce %10'luk HCl ile yıkayıp, deiyonize su ile iyice yıkandıktan sonra kurutulup vakum cihazı içerisindeki yerine yerleştirildi. Kristalin omik kontak yapılacak mat tarafı vakum cihazı içerisinde aşağı bakacak şekilde yerleştirildi. Vakum cihazı içerisindeki basınç, yaklaşık olarak  $10^{-5}$  torr değerine düşüncü, kimyasal temizliği yapılmış ve kurutulmuş metaller Ni n-SiC üzerine buharlaştırıldı. Daha sonra vakum cihazına hava verildikten sonra numune vakum cihazından çıkartılarak kimyasal olarak temizlenmiş quartz pota içerisine yerleştirilerek, önceden yakılarak numune tavlama işlemi için hazır hale getirilen fırına yerleştirilip 5 dakika tavlandı. Tavlama için kullanılan fırın Şekil 3.1'de verilmiştir.



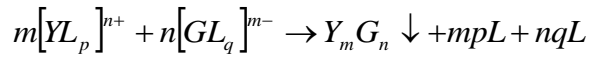
Şekil 3.1. Tavlama için kullanılan fırın

Tavlanan numunelerden birinin parlak yüzeyine buharlaştırma ile PbS filmi oluşturulup Schottky kontak için temizlenmiş kapalı bir kutuya yerleştirildi. Numunelerden birinin parlak yüzeyine buharlaştırma yöntemi ile PbS buharlaştırıldı. Diğer bir numune ise yine parlak yüzeyi dışa bakacak şekilde teflon tutucuya yerleştirildi.

### 3.4. SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) Tekniği

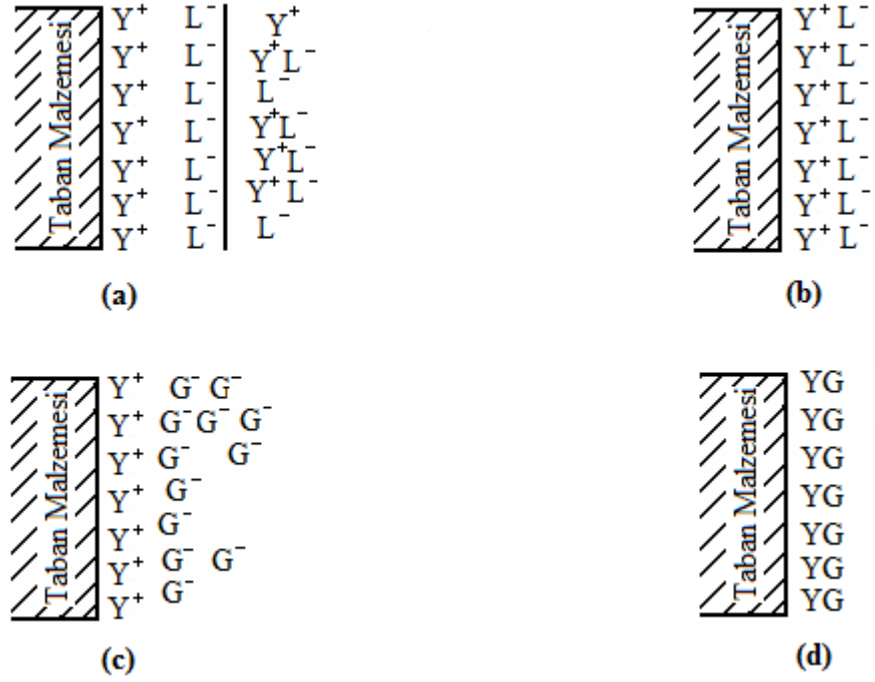
PbS ince filmleri büyötmek için, sahip olduğumuz imkânlar dâhilinde, amacımıza uygun, büyötmeye yönteminin pratik olması, maliyetinin düşük olması, büyöme boyunca, kalınlık, çözelti konsantrasyonu, sıcaklık, çözelti pH'sı ve daldırma sayısı gibi parametrelerinin kontrol edilebilmesine imkân veren bir teknik olması sebebiyle SILAR tekniğinin kullanımına karar verilmiştir.

Sıralı iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) yöntemi taban malzemenin yüzeyinde ardışık reaksiyonlara dayanır. Her bir reaksiyonu, katı faz ile çözünmüş iyonlar arasında heterojen reaksiyona imkân veren durulama işlemi takip eder. Örneğın  $Y_m G_n$  bileşiğı için gerekli olan katyon ve anyon çözeltileri sırası ile  $[YL_p]^{n+}$  ve  $[GL_q]^{m-}$  bu katyon ve anyon reaksiyona girerek  $Y_m G_n$  bileşiğı oluşur ve



şeklinde verilir. SILAR ile büyötmeye Şekil 3.2'de gösterildiğı gibi dört adımdan oluşur. a) Soğurma b) Çalkalama (I) c) Reaksiyon d) Çalkalama (II)

SILAR döngüsünün ilk adımı, taban malzemenin başlangıç katyonik çözeltilisine  $[YL_p]^{n+}$  daldırılması ve belli bir süre bekletildikten sonra taban malzeme yüzeyinde bir elektriksel çift tabaka oluşması ile sonuçlanır. Bu oluşan tabaka daha iç + ve daha dış - yüklü iki tabakadan oluşur. Pozitif tabaka katyon ( $Y^+$ ), negatif tabaka ise anyon ( $L^-$ ) iyonlarını içerir.



**Şekil 3.2.** SILAR tekniğinin sistematik diyagramı: (a)  $Y^+L^-$  adsorpsiyonu ve elektriksel ikili katmanın oluşumu, (b) çalkalama (I) fazla ve yapışmayan  $Y^+$  ve  $L^-$  iyonlarının uzaklaştırılması, (c) daha önce yapışan  $Y^+$  iyonları ile  $G^-$  iyonlarının  $YG$  oluşturacak şekilde reaksiyona girmesi, (d) taban malzeme yüzeyinde oluşan  $YG$  bileşiğinden fazla ve reaksiyona girmeyen parçacıkların uzaklaştırılması.

Taban malzemesinin deiyonize su içerisine daldırılması (çalkalama I) ile zayıf bağlı ve reaksiyona girmemiş  $Y^+$  ve  $L^-$  iyonlarını uzaklaştırır. Böylece doymun elektriksel bir tabaka oluşturulur. Daha sonra taban malzeme anyonik çözeltisine  $[GL_q]^{m-}$  daldırılır.  $Y_mG_n$  katı malzemenin düşük çözünürlüğünden dolayı  $Y^+G^-$  tabakası arayüzeyde oluşur. Son olarak taban malzeme tekrar ayrı deiyonize su içerisine daldırılarak karışık iyonlar ve zayıf bağlı iyonlar uzaklaştırılır. Bu dört adıma bir SILAR döngüsü denir. Bu döngünün tekrarlanması ile istenen kalınlıkta  $Y_mG_n$  ince filmi elde edilir. Burada dikkat edilecek husus her bir farklı malzeme için daldırma süresinin farklı olmasıdır. Ölçülen toplam film kalınlığı SILAR döngüsü sayısına bölünürse, döngü başına düşen film kalınlığı hesaplanır (Nicolau and Menard 1988).

SILAR tekniği ile II-VI grubu yarıiletken malzemelerin büyütülmesin de oldukça yaygın kullanılmıştır, CdSe (Lokhande *et al.* 2002), ZnSe (Kale *et al.* 2004). Bunlardan başka kurşun ve bakır sülfürler, PbS ve CuS büyütülmüştür (Lindroos *et al.* 2000). 2003 yılında Puišo ve arkadaşları SILAR tekniği ile aşırı ince PbS film büyütmüşlerdir (Puišo *et al.* 2003). Büyüme olayı çözeltilerin özellikleri, pH değerleri, konsantrasyonları, karşıt iyonlar, daldırma zamanı ve çalkalanan suyun özellikleri gibi değişik faktörlerden etkilenmektedir.

SILAR metodunda kontrol edilebilen parametrelerin en önemlilerinden biri de SILAR döngü sayısıdır ve döngü sayısı da film kalınlığının kontrol edilmesinde etkin rol oynar. Döngü sayısı arttıkça film kalınlığı artar ve daha kararlı bir yapı elde edilir. Ancak SILAR döngü sayısının çok fazla olması da uygun değildir. Çünkü film kalınlığı belli bir değerın üzerine ulaşınca bu defa iyonlar artık tortu şeklinde yüzeyde birikmeye başlayacak bunun sonucunda kopmalar daha kolaylaşacak ve filmin kalitesi düşecektir.

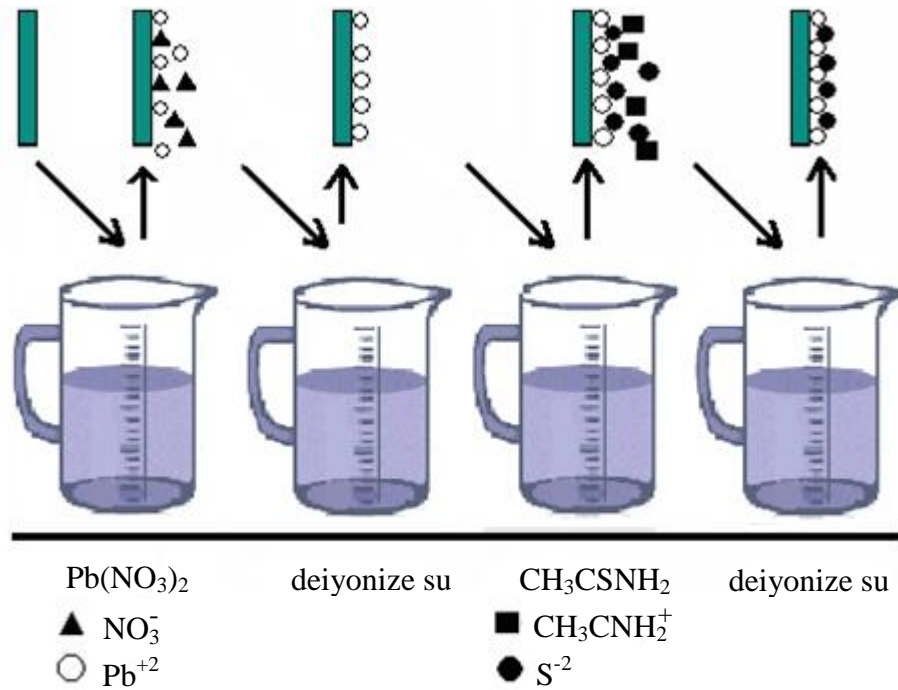
### 3.5. Çözeltilerin Hazırlanması

PbS filmlerinin SILAR metodu ile elde edilmesi için Pb ve S elementlerini içeren bileşiklerin ayrı ayrı çözeltileri hazırlandı. Pb kaynağı olarak  $Pb(CH_3COO)_2$ ,  $Pb(NO_3)_2$  ve S kaynağı olarak  $CH_3CSNH_2$  ile  $Na_2S$  kullanıldı.

SILAR yöntemi ile PbS film büyötmek için oda sıcaklığında üç farklı SILAR döngüsü denendi. Birinci döngüde PbS film üretimi için katyon çözeltisi olarak 0,2 M  $Pb(CH_3COO)_2$  ile 0,4 M  $C_6H_5NO_3$  karışımı kullanıldı ve bu karışımın pH'ı 7,5-7,7 aralığında idi. Anyon çözeltisi olarak pH'ı 4,6-5,3 aralığında olan 0,4 M  $CH_3CSNH_2$  kullanıldı. Her iki çözeltide de daldırma (D.) süresi 20 s ve deiyonize suda çalkalama (Ç.) süresi 70 s idi. İkinci döngüde ise katyon çözeltisi olarak pH'ı 5,7-6,1 0,4 M  $Pb(CH_3COO)_2$  anyon çözeltisi ise pH'ı 4,7-5,8 olan 0,4 M  $CH_3CSNH_2$  kullanıldı. Her iki çözeltide de daldırma süresi 20 s. ve deiyonize suda



çalkalama süresi 80 s. idi. Üçüncü döngüde ise katyon çözeltisi olarak pH'ı 3,7-3,9 olan 0,2 M  $Pb(NO_3)_2$  anyon çözeltisi ise pH'ı 7,8-8,5 olan 0,4 M  $CH_3CSNH_2$  kullanıldı. Üçüncü döngünün katyon çözeltisinde daldırma süresi 20 s iken anyon çözeltisinde daldırma süresi 40 s. ve deiyonize suda çalkalama süresi 75 saniye idi. Burada yalnızca üçüncü SILAR döngüsünün şematik gösterimini Şekil 3.3'de verilmiştir.



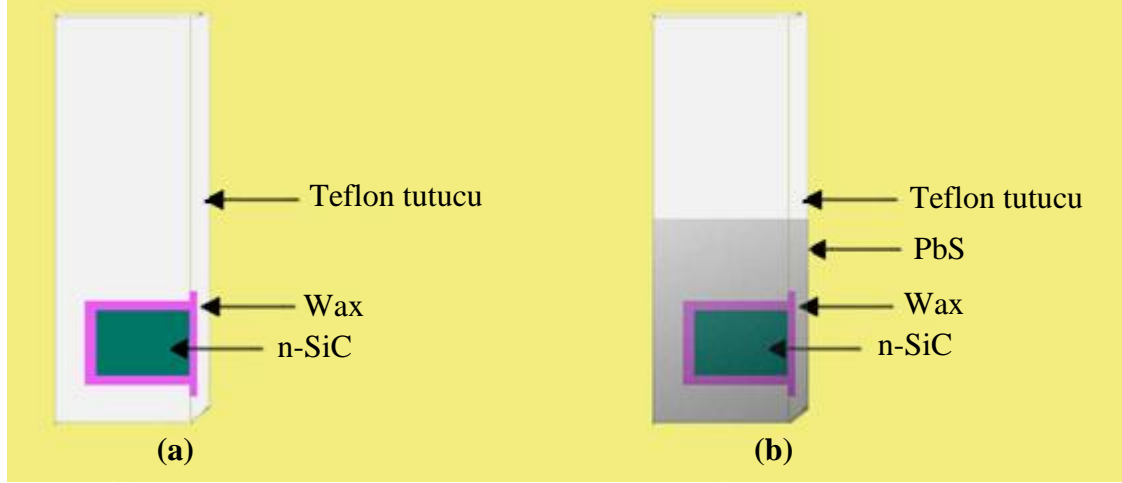
**Şekil 3.3.** PbS ince filmin SILAR tekniği ile büyütülmesinin şematik gösterimi

PbS ince film büyütülmesi için kullanılan üç farklı SILAR döngüsüne ait parametreler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** PbS ince film büyütülmesi için kullanılan parametreler

Katyon Çözelti			Anyon Çözelti			
Çözelti	pH	D. (s)	Çözelti	pH	D. (s)	Ç. (s)
0,2 M $Pb(CH_3COO)_2$ + 0,4 M $C_6H_{15}NO_3$	7,5-7,7	20	0,4 M $CH_3CSNH_2$	4,6-5,3	20	70
0,4 M $Pb(CH_3COO)_2$	5,7-6,1	20	0,4 M $CH_3CSNH_2$	4,7-5,8	20	80
0,2 M $Pb(NO_3)_2$	3,7-3,9	20	0,4 M $CH_3CSNH_2$	7,8-8,5	40	75

Teflon tutucuya yerleştirilen n-SiC kristalinin SILAR döngüsü öncesi ve sonrasına ait şematik gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir.



**Şekil 3.4.** SILAR döngüsü için numune ile birlikte teflon tutucunun kesit görüntüsü; a) SILAR döngü öncesi b) SILAR döngü sonrası

SiC üzerine elde edilen PbS filmler koyu bir renktedir. Elde edilen filmlerin hot probe tekniği ile p-tipi olduğuna karar verildi. Bu teknikte voltmetreye bağlı iki prop kullanıldı. Probun biri yaklaşık 200-300<sup>0</sup>C’ye kadar ısıtılır diğer prop ise oda sıcaklığında tutuldu. Oluşan sıcaklık farkından dolayı n-tipi yarıiletkende elektronların daha sıcak prop’dan daha soğuk prop’a doğru hareket ettiği gözlenmiştir. Neticede, sıcak prop’un dokunduğu yarıiletken bölge pozitif, p-tipi yarıiletkeninde ise bunun aksine sıcak prop’un kutbu negatif olmaktadır.

### 3.6. Kurşun Sülfür (PbS)

PbS dar enerji aralığı, yüksek taşıyıcı mobilitesi ve yüksek dielektrik sabiti ile karakterize edilir. Bu bileşiğin direkt enerji aralıklarının benzersiz özelliği, artan sıcaklıkla artmasıdır (yani enerji aralığı pozitif sıcaklık katsayısına sahiptir). Hâlbuki diğer elementel ve bileşik yarıiletkenler negatif sıcaklık katsayısına sahiptirler. (Yacobi 2004). PbS nano yapıların band aralığı 0,41 eV olarak verilmiştir. PbS nano yapıların eksiton yarıçapı 9 nm olarak verilmiştir (Babu *et al.* 2005). Kurşun sülfür (PbS) nano

yapılar kızılötesi (IR) dedektörlerde kullanılmaktadır. Direkt dar band aralıklı PbS yapılar kızıl ötesi dedektörlerin yanı sıra, fotoğrafçılıkta, güneş enerjisinin emilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca fotorezistans, lazer diyot, nem sensörlerinde, sıcaklık sensörlerinde, dekoratif ve güneş enerjisi kontrol kaplamalarında kullanılmaktadır Çizelge 3.2’de PbS kristalinin elektriksel özellikleri verilmiştir (Türkmen 2006).

**Çizelge 3.2.** PbS kristalinin elektriksel özellikleri

	Eşik enerjisi $\Phi$ (eV)	İş fonksiyonu $\phi$ (eV)	Yarıiletken band aralığı $E_g$	Elektron ilgisi $\chi$ (eV)
PbS	3,7	3,6	0,4	3,3

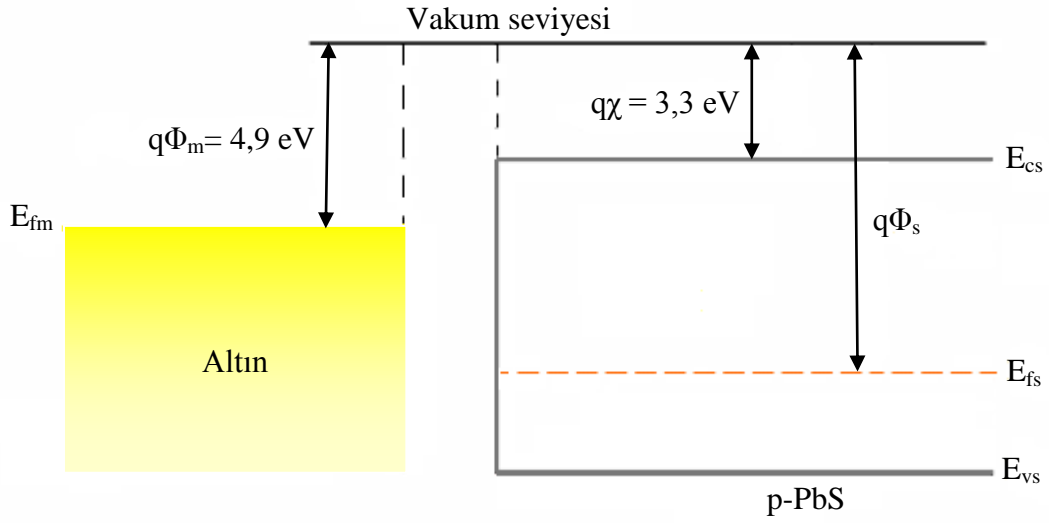
### 3.7. Altın ve p-PbS Eklem

Altın çok iyi bir iletkenidir ve Fermi seviyesi metal yüzeyi olarak alınabilir. PbS ise p-tipi bir yarıiletkenidir ve Fermi seviyesi valans bandı kıyısındadır. Yarıiletkenlerin Fermi seviyesi iletkenlik ve valans bandlarının enerjileri ile iletkenlik ve valans bandlarındaki elektron ve hol sayılarına bağlı olarak;

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_g - E_f}{kT}\right)} \quad (3.1)$$

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) \quad (3.2)$$

denklemleri ile belirlenir. (3.1) denkleminde  $E_g$  ve  $E_f$  sırası ile yarıiletken band aralığı ve Fermi enerji seviyesidir. (3.2) denkleminde ise verilen  $E_c$  iletkenlik bandı enerjisi,  $E_v$  valans bandı enerjisi,  $N_c$  iletkenlik bandındaki elektron sayısı,  $N_v$  valans bandındaki hol sayısıdır.



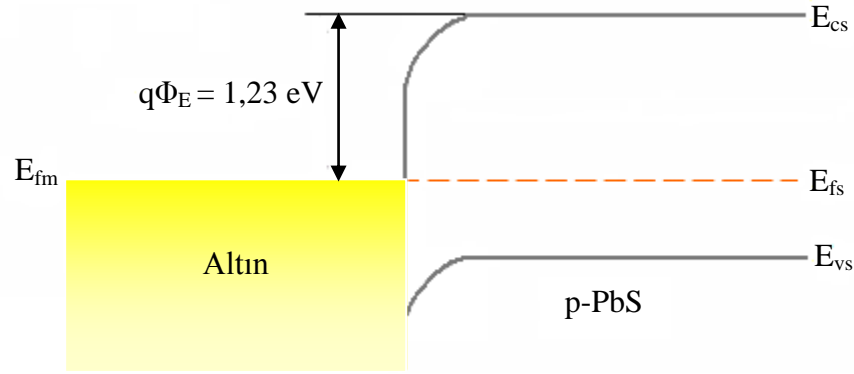
**Şekil 3.5.** Altın ve p-PbS eklem oluşturmadan önce enerji-band diyagramı

Şekil 3.5’de gösterildiği gibi altının ve p-PbS yarıiletkenin eklem oluşturmadan önceki enerji-band diyagramı verilmiştir. Görüldüğü gibi eklem oluşmadan önce metal ve yarıiletkenin Fermi enerji düzeyleri birbirinden farklıdır. Altın ve p-PbS arasında eklem oluştuktan sonra Fermi düzeyleri çakışacak şekilde termal denge oluşuncaya kadar metalden yarıiletkene elektron geçişi, yarıiletkenden de metale hol geçişi olur. Termal denge sağlandığında Altın ve p-PbS yarıiletkenin Fermi düzeyleri aynı seviyeye gelir.

Bir metal olan altın ile p-tipi bir yarıiletken olan PbS tabakalı yarıiletken eklem oluşturduğunda, metal-yarıiletken arayüzeyi arasında bir engel oluşur. Oluşan eklem engel yüksekliği yarıiletkenin band aralığına, metalin iş fonksiyonuna ve yarıiletkenden elektron koparmak için gerekli olan enerjiye bağlıdır. Engel yüksekliği denklemi şöyle verilir (Sze 1981; Schroder 1998; Streetman and Banerjee 2000).

$$q\phi_{EP} = E_g - q(\phi_m - \chi) \quad (3.3)$$

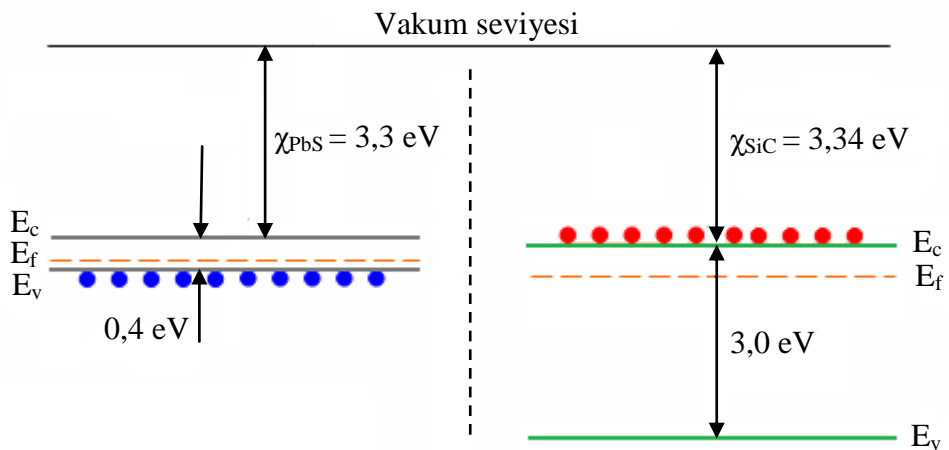
Altının iş fonksiyonu  $q\phi_m = 4.93 \text{ eV}$ , PbS yarıiletkenin yasak band aralığı  $E_g = 0.4 \text{ eV}$  ve PbS yarıiletken yüzeyinden elektron koparmak için verilmesi gereken enerji  $q\chi = 3.3 \text{ eV}$  olarak alındığında Au/p-PbS eklem engel yüksekliği denklem 3.3’den  $q\phi_{EP} = 1.23 \text{ eV}$  olarak hesaplanır (Sze 1981).



Şekil 3.6. Altın ve p-PbS eklem oluştuktan sonra enerji-band diyagramı

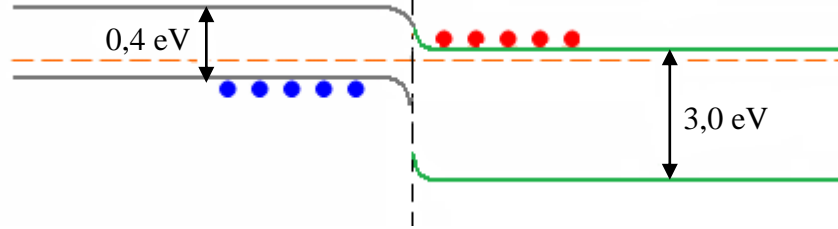
### 3.8. p-PbS/n-SiC Eklem

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi PbS nano yapı 0,4 eV band aralığına sahip ve p-tipi iletkenlik göstermektedir. SiC kristali ise 3,0 eV band aralığına sahiptir ve n-tipi iletkenlik göstermektedir. SiC için elektron ilgisi 3,34 eV’dir (Oder *et al.* 1998; Kuriplach *et al.* 1999). Eklem oluşturmadan önce p-PbS nano yapıların Fermi seviyesi valans bandı kuyusunda, n-SiC kristalin Fermi enerji seviyesi ise iletkenlik bandı kuyusunda olacaktır.



Şekil 3.7. p-PbS ve n-SiC eklem oluşturmadan önce enerji-band diyagramı

Eklem oluştuktan sonra enerji–band ilişkisi Şekil 3.8’de verilmiştir. Termal denge sağlandığında her iki yarıiletkenin Fermi düzeyleri aynı olacaktır.

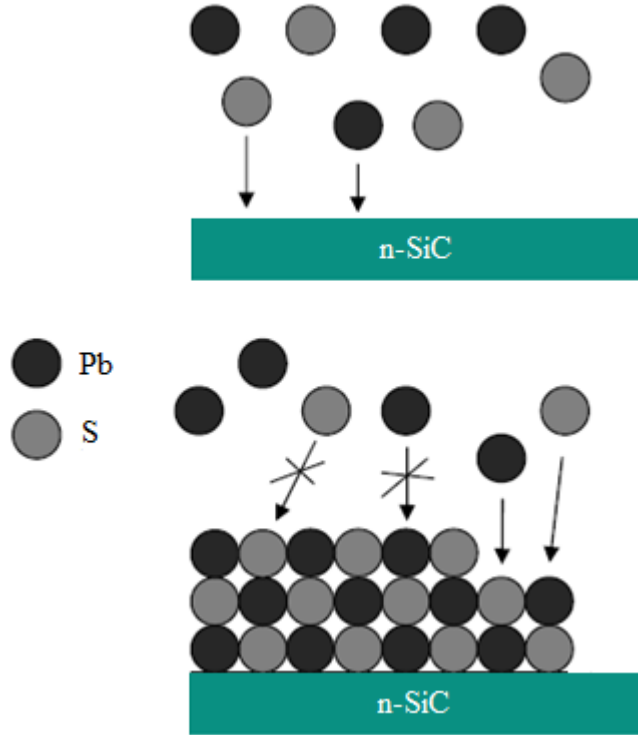


**Şekil 3.8.** p-PbS ve n-SiC eklem oluştuktan sonra enerji-band diyagramı

### 3.9. PbS’ün Elektrokimyasal Depozisyon Yöntem ile Üretilmesi

Elektrokimyasal yöntem ile geniş yüzeylere kaliteli ince filmler üretmek mümkündür. Seçilen uygun geniş tabanlar, hazırlanan çözeltiler içine daldırılır ve kimyasal olarak yüzeyde ince filmler oluşturulur. Seçilen malzemenin yüzeyi ne kadar temiz ve pürüzsüz olursa elde edilen filmlerin kalitesi o kadar iyi olur. Düzgün yüzeyli kristaller üzerine Elektrokimyasal yöntem ile üretilecek filmler de daha düzgün yapıda olacaktır.

Elektrokimyasal yöntemin esası, PbS’ün doygun çözeltilisinde, PbS’ün çözünmesi ile ortamda oluşacak Pb ve S elektroaktif türlerinden her ikisinin de Elektrokimyasal potansiyeline uygun tek bir potansiyelde oluşan elektrodepozisyon ile atomik boyutta iyi düzenlenmiş PbS filmlerinin oluşturulmasıdır. Uygulanan bu ortak ve tek bir potansiyelde ne Pb üzerinde Pb, ne de S üzerinde S depozitlenmemekte olup, sadece Pb atomları üzerinde S ve S atomları üzerinde Pb atomları depozitlenecek ve bu sayede atomik seviyede iyi düzenlenmiş PbS filmlerinin gelişimi sağlanacaktır (Şekil 3.9).



**Şekil 3.9.** PbS elektrodepozisyonunun şematik gösterimi

Bu çalışmada; bölünmemiş, kapalı, akıcı tip elektrokimyasal hücre kullanıldı ve sülfürün hava oksijeninden etkilenmemesi için inert azot gazı atmosferinde çalışıldı. Bileşik yarı iletken PbS sentezi için termostatlı ve dıştan ısıtılmalı bir sistemle hücre sıcaklığı istenilen sıcaklığa ayarlanabilen elektrokimyasal sistem kullanıldı.

### 3.10. Elektrotlar

Üç elektrotlu sistemlerde; referans, karşıt ve çalışma (Skoog *et al.* 1998) olmak üzere üç tip elektrot kullanılmaktadır.

**Referans elektrot:** Elektrokimyasal işlemlerde, değeri bilinen, sabit bir potansiyele sahip ve çözeltinin bileşenlerinden bağımsız olan bir elektrot kullanılır. Bu özellikleri taşıyan elektrotlar referans elektrot olarak adlandırılmaktadır. Referans elektrot, çalışma elektrodunun potansiyelini ölçer, reaksiyon ile hiçbir ilgisi yoktur. Çok yaygın olarak

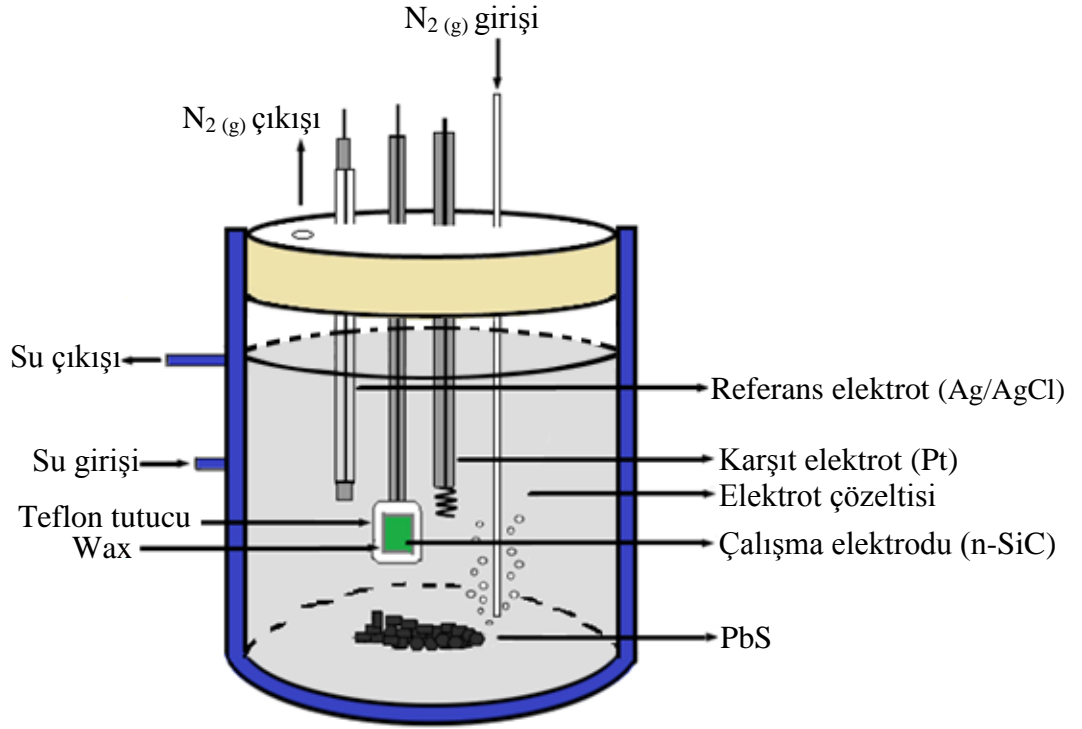
kullanılan bir referans elektrot gümüş-gümüş klorür elektrottur. Bu elektrot, elektrolitik yoldan AgCl ince tabakası ile kaplanan bir gümüş telin hem gümüş klorür hem de potasyum klorür yönünden doygun bir çözeltiye daldırılmasıyla elde edilir.

**Karşit elektrot:** Karşit elektrodun görevi devreyi tamamlamaktır. Elektrokimyasal reaksiyonlarda karşit elektrot olarak genelde altın, grafit, karbon, platin ve çeşitli metal oksitler kullanılmaktadır. Bu çalışmada karşit elektrot olarak platin tel elektrot kullanıldı.

**Çalışma elektrodu:** Çalışma elektrodu, üzerinde elektrokimyasal reaksiyonun meydana geldiği elektrottur. Çalışma elektrodu, elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bir yüzey görevi görür. Referans elektrottan hiç akım geçmez ancak karşit elektrottan akım geçer. Sinyal karşit elektroda uygulanır ve bunun karşılığında çalışma elektrodunda meydana gelen akım bir işlemsel yükselticiyle yükseltilerek ölçülür (Skoog *et al.* 1998). Elektrokimyasal yöntem ile n-SiC kristal yüzeyine PbS ince film büyütme için ilk olarak PbS üretildi.

PbS hazırlanması için, 10 mM Na<sub>2</sub>S.9H<sub>2</sub>O ve 10 mM Pb(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O çözeltileri ayrı ayrı beherlerde hazırlandı. 10 mM Pb(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O çözeltisi, Argon inert gazı (soy gaz) ortamında, 1250 rpm (dakikadaki devir sayısı) karıştırma hızında ve 90<sup>0</sup>C sıcaklıkta karıştırılırken, üzerine 10 mM Na<sub>2</sub>S.9H<sub>2</sub>O çözeltisi yavaş yavaş ilave edilerek, siyah PbS çökeleği oluşturuldu. Çökeleğin olgunlaşması için karıştırmaya Argon gazı atmosferinde 30 dakika devam edildi. Daha sonra filtrelenip, deiyonize su ile yıkandıktan sonra dört saat, 50<sup>0</sup>C'de kurutuldu (Alanyalıoğlu 2006).



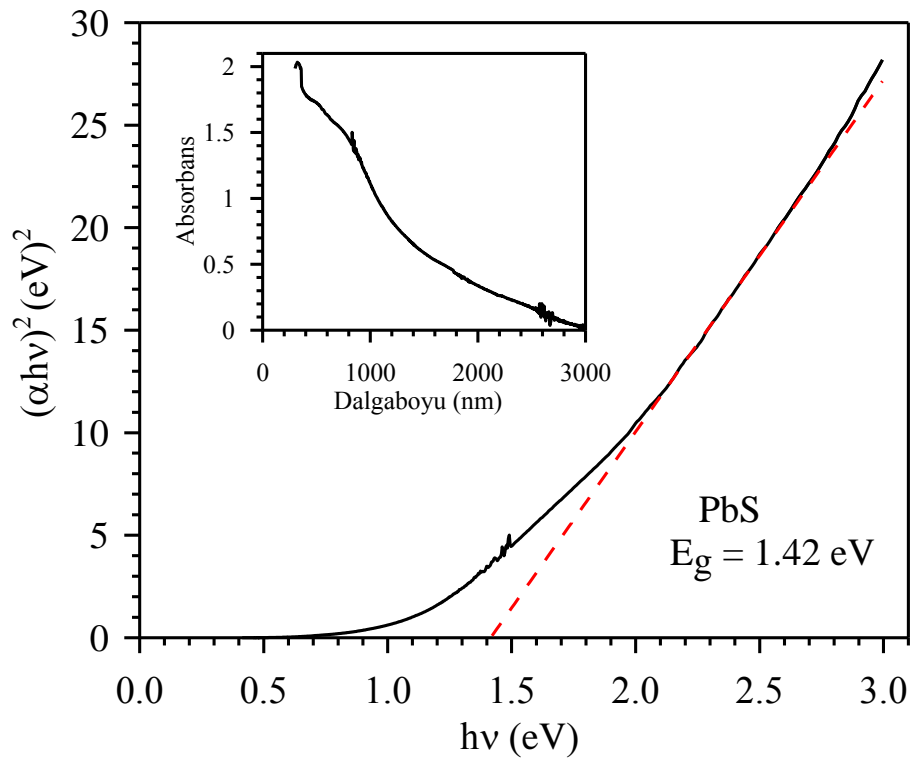


**Şekil 3.10.** PbS elektrodepozisyonu için kullanılan elektrokimyasal sistem

PbS'ün oda sıcaklığında ( $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ) çözünürlüğü,  $8,81 \cdot 10^{-29}$ 'dur (Handbook of Chemistry and Physics). Bu çözünürlük değeri PbS filmini oluşturmak için yeterli değildir. Bu yüzden çözünürlüklerinin artırılması gerekir. Bir maddenin çözünürlüğünü sıcaklık, basınç, parçacık boyutu, çözelti pH'sı gibi faktörler etkiler. PbS'ün çözünürlüğü sıcaklıkla arttığı için (Zhang *et al.* 2004), çalışmalarımız hücre sıcaklığının termostat ile kontrol edildiği bir sistemde yapıldı (Şekil 3.10).

Sıcaklığı belli bir değerde sabit tutulan suyun hücre dışında sürekli dolaşımı sağlanarak sistemin sıcaklığı istenen değerde sabit tutulabilmektedir. PbS çözeltisindeki elektroaktif kurşun ve sülfür türlerinin elektrodepozisyon potansiyelini belirlemek için dönüşümlü voltametri tekniği kullanıldı ve bu teknik ile Altın elektrot üzerindeki PbS elektrodepozisyonu için en uygun potansiyel olarak  $-350 \text{ mV}$  değeri uygulanmıştır (Alanyalıoğlu 2006). Buna göre, elektrokimyasal hücre sıcaklığının  $90^{\circ}\text{C}$  olduğu,  $0,1 \text{ M}$  asetat tamponu (pH:4,5) içeren PbS doymuş çözeltisinde, n-SiC elektrot üzerindeki PbS elektrodepozisyonu için en uygun elektrodepozisyon potansiyeli olarak  $-550 \text{ mV}$  değeri

uygulanmıştır. Uygulanan bu -550 mV elektrodpozisyon potansiyeli beş dakika süre ile uygulanmış ve SiC kristali üzerinde siyah renkte PbS filmi gözlenmiştir. Elektrodpozitlenen PbS filmine ait enerji aralığı değeri, dalga boyu ekseninin enerji eksenine dönüştürülmesi ile elde edilen soğurma-enerji spektrum değişiminden hesaplanır. Şekil 3.11'deki dalga boyu ekseninin enerji eksenine dönüştürülmesi ile elde edilen soğurma-enerji değişimi verilmiştir.

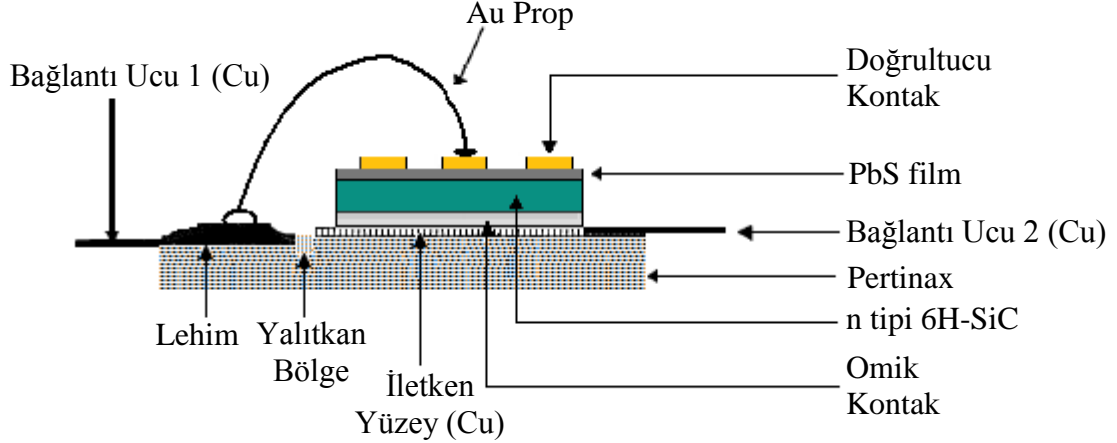


**Şekil 3.11.** ITO kaplı cam elektrot üzerinde PbS filmine ait soğurma spektrumu ve soğurma-enerji değişimi

PbS oldukça küçük bant aralığı enerjisine sahip (0,41 eV) bir yarı iletken materyaldir. Bu yarı iletken materyalin bant aralığı enerji değeri, sadece bu materyalin boyutları değiştirilerek birkaç eV'a kadar artırılabilir (Chen *et al.* 2000). Alanyalıoğlu 2006 yılında yapmış olduğu çalışmada PbS film kalınlığının 30,5 nm'den 1,1 nm'ye değişimi ile enerji aralığı değerlerinin 0,41 eV ile 1,85 eV arasında değişmekte olduğunu gözlemlemiştir. Şekil 3.11'de soğurma-enerji diyagramından elde edilen doğrunun enerji eksenine ekstrapole edilerek hesaplanan bu enerji değeri 1,42 eV'dur.

### 3.11. Schottky Kontak Yapımı

Bu aşamadan sonra Buharlaştırma, SILAR ve Elektrokimyasal yöntemleri ile PbS ince film oluşturulan numuneler ile Referans numuneye Schottky kontak yapmak için vakum cihazına kimyasal olarak temizlenen ısıtıcı yerleştirildi ve oksitlenme türü kirliliklerden arındırmak için yakıldı. Schottky kontak için Au metali kimyasal temizlemeden sonra ısıtıcı üzerine yerleştirildi. Numunelerin PbS kaplı tarafı çapları 1 mm olan maskenin üzerine aşağı bakacak şekilde yerleştirildi. Basınç yaklaşık olarak  $10^{-5}$  torr değerine düşünce buharlaştırma işlemi gerçekleştirildi. Buharlaştırma işleminin ardından kısa bir süre bekledikten sonra sisteme hava verilip, numuneler vakum cihazından çıkarıldı. Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni, Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni, Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni ve Au/n-SiC/Ni yapıları elde edildi. Hazırlanan diyotların Şekil 3.12’de gösterilen numune tutucuya yerleştirilerek *I-V* ve *C-V* ölçümleri oda sıcaklığında alındı.



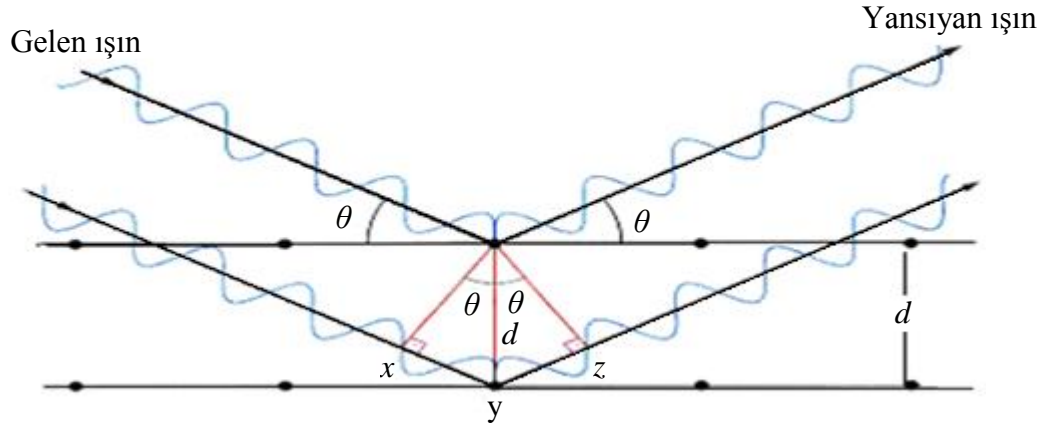
Şekil 3.12. Numune ile birlikte numune tutucunun kesit görüntüsü

### 3.12. X-ışını Kırınım Metodu

X-ışınları kırınımı metodu kristal malzemelerin karakteristiği için oldukça önemli bir metottür. Birbirlerine paralel ve eş mesafeli atomik düzlemler eşdeğer düzlemler takımını teşkil eder. Bir kristal üzerine X-ışınları düştüğü zaman kristali teşkil eden

atomlar tarafından saçılır. Saçılan ışınların yapıcı girişim meydana getirmesi için düzgün olarak sıralanmış olan bu atomlardan saçılan dalgaların birbirlerini kuvvetlendirmeleri gerekir. İki dalganın birbirini kuvvetlendirmesi içinde aynı fazda olmaları veya aralarındaki faz farkının dalga boyunun tam katlarına eşit olması gerekir. Ayrıca geliş açısının ve yansıma açısının eşit olması ve ardışık iki düzlem arasındaki mesafenin uygun olması gerekir.

X-ışınlarının paralel olarak tek kristale doğru yönlendirildiklerini düşünelim. Bu X-ışınları kristaldeki ilerleyebildikleri doğrultudaki tüm atomlar ile etkileşirler. Paralel düzlemlerden ilki ile olan etkileşim sonucu yansıma açısı  $\theta$  olan bir yansıma bileşeni oluşacaktır. İkinci düzlemde yansımaya maruz kalan X-ışını şuasının birinci düzlemde yansıyan ışına göre  $2d\sin\theta$ 'lık fazla bir yol alacağı Şekil 3.13'de görülmektedir.



**Şekil 3.13.** X-ışınlarının atomik düzlemlerden kırınımı

Her bir yansıyan bileşen eğer düzlemler arası mesafe dalga boyunun tam katları ise yapıcı bir girişimle birleşecektir. İki ayrı düzlemde yansıyan X-ışınlarının arasındaki yol farkı;

$$xy + yz = d\sin\theta + d\sin\theta = n\lambda \quad (3.4)$$

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3.5)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıya Bragg kanunu adı verilir. Burada  $n$  bir tamsayıdır, şayet  $n=1$  ise fark bir dalga boyu olup kırınımın birinci mertebeden olduğu söylenir (Freiser and Nancolas 1987). Genel olarak tek dalga boylu X-ışınları kristale doğru rastgele bir açıyla geldiklerinde yapıcı bir girişim oluşturmayacakları açıktır. Bragg kanununun gerçekleştirilebilmesi için hem dalgaboyu hem de açı değiştirilebilir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Giriş

Bu bölümde, Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni, Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni ve Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyotları ile arayüzeysiz Referans Au/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı akım-voltaj ( $I-V$ ) ve oda sıcaklığında 50 kHz'de kapasite-voltaj ( $C-V$ ) ölçümleri bulunmaktadır. PbS arayüzey tabakası, Buharlaştırma, SILAR ve Elektrokimyasal yöntemleriyle oluşturulmuştur. Ayrıca elde edilen bu verilerin değerlendirilmesinde kullanılan metotlar ve değişimlerin değerlendirilmesi sonucu PbS arayüzeyli Schottky diyotların elektriksel karakterizasyonu için gerekli olan temel diyot parametrelerinin bazıları ve XRD ölçümü ile alınan spektrumlar yer almaktadır.

### 4.2. Akım-Gerilim ( $I-V$ ) Ölçüleri ile Diyot Parametrelerinin Hesaplanması

Referans ve arayüzey tabakalı Au/n-SiC/Ni diyotların sıcaklığa bağlı  $I-V$  karakteristikleri için bilgisayar kontrolünde çalışan KEITHLEY 487 Picoammeter/Voltage Source cihazı, oda sıcaklığında 50 kHz'de  $C-V$  karakteristikleri için yine bilgisayar kontrolünde çalışan Hewlett Packard firmasının HP 4192A LF Impedance Analyzer cihazı kullanıldı. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi; bahsedilen değişimlerin elde edilmesi için deney düzeneği kurulup, 80 K sıcaklığına ulaşıp denge sağlandıktan sonra bu sıcaklık değerinden başlanarak 20 K'lık adımlarla 80-300 K sıcaklık aralığında akım-voltaj ( $I-V$ ) ölçüleri alınmıştır. Numune sıcaklığı Lake Shore 340 sıcaklık kontrol ünitesi yardımıyla  $\pm 0,01$  K hassasiyetle kontrol edildi. Ayrıca X-ışını kırınımı için Rigaku marka X-ışını kırınım cihazı kullanıldı.

( $I-V$ ) ölçülerinden hareketle diyodun doğru beslem tarafındaki değişiminden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. İdealite faktörünü hesaplamak için kullanılan eşitlik;

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

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

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

şeklinde olur, (4.2.) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınıp, sonra da  $V$ 'ye göre türevi alınır, idealite faktörü için (4.3) eşitliği elde edilir.

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

Doğru beslem akım-voltaj ölçümleri kullanılarak elde edilen idealite faktörü ( $n$ ), diyodun ideal özelliklerden sapmasını gösteren boyutsuz bir parametredir. İdeal bir diyot için  $n=1$  dir.  $n$  değeri "1" 'den uzaklaştıkça diyot ideal olmayan bir davranış sergiler.  $\ln I$ - $V$  grafiği çizildiğinde doğru beslem kısmındaki lineer bölgeye bir doğru fit edilerek bu doğrunun eğiminden  $dV/d(\ln I)$  değeri elde edilir. Bulunan bu değerle birlikte  $e$  (elektronun yükü= $1,6 \times 10^{-19}$  C),  $k$  (Boltzmann sabiti= $8,625 \times 10^{-5}$  eV/K) ve  $T$  (Kelvin cinsinden ortamın sıcaklığı (K)) terimleri (4.3) ifadesinde yerine yazılarak her bir sıcaklığa karşılık gelen idealite faktörü değerleri hesaplandı. Fit edilen doğrunun  $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta  $I_0$  doyma akım yoğunluğunu verir. (4.2) eşitliğindeki  $I_0$  doyma akım yoğunluğu,

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

eşitliğiyle verilir. (4.4) eşitliğinden, engel yüksekliği ifadesi elde edilir;

$$e\Phi_{ap} = kT \ln \left( \frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.5)$$

Bu ifadeye  $A$ , diyodun etkin alanı ( $A=7,854 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ),  $A^*$ , Richardson sabiti olup, n-SiC için  $A^*=156 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  dir (Im *et al.* 2001).

İnhomojen engel yüksekliği söz konusu olduğunda, engel yüksekliğinin numune sıcaklığına bağlı değişiminin Gaussian dağılımına uyup uymadığına bakılabilir. Böyle bir durumda, engel yüksekliği,

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_b - \frac{e\sigma_s^2}{2kT} \quad (4.6)$$

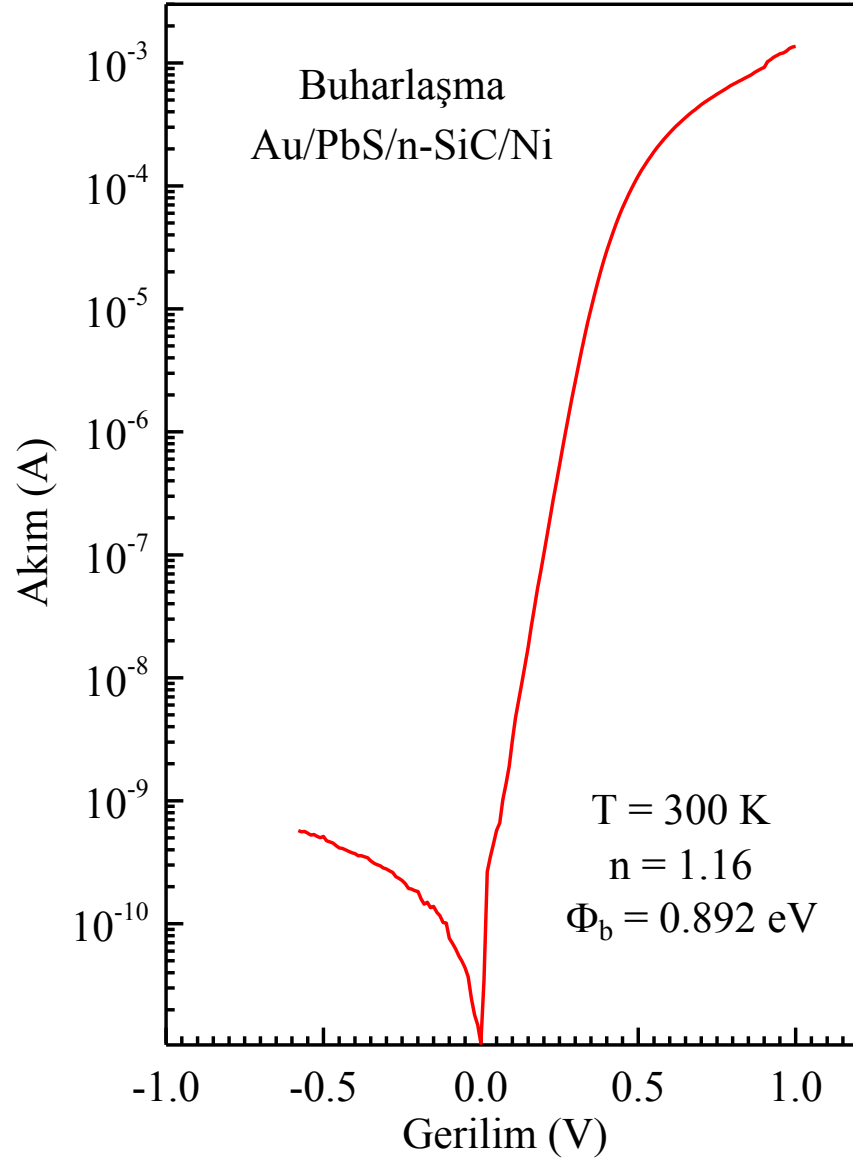
eşitliğiyle verilir (Song *et al.* 1986; Chand and Kumar 1997). Standard sapma ( $\sigma_s$ ) engel homojenliğinin bir ölçüsüdür. Bu ifadeye  $\Phi_{ap}$ , deneysel engel yüksekliğidir,  $\sigma_s$ 'nin sıcaklığa bağımlılığı genellikle küçüktür ve sıcaklıkla değişimi ihmal edilebilir. Modelde idealite faktörünün sıcaklıkla gözlemlenen değişimi aşağıdaki eşitlikle verilir (Werner and Güttler 1991):

$$\left( \frac{1}{n_{ap}} - 1 \right) = -\rho_2 + \frac{e\rho_3}{2kT}, \quad (4.7)$$

Bu ifadeye,  $n_{ap}$  deneysel olarak hesaplanmış idealite faktörü;  $\rho_2$  ve  $\rho_3$  ise engel yüksekliği dağılımının voltaj deformasyonunu tanımlar.

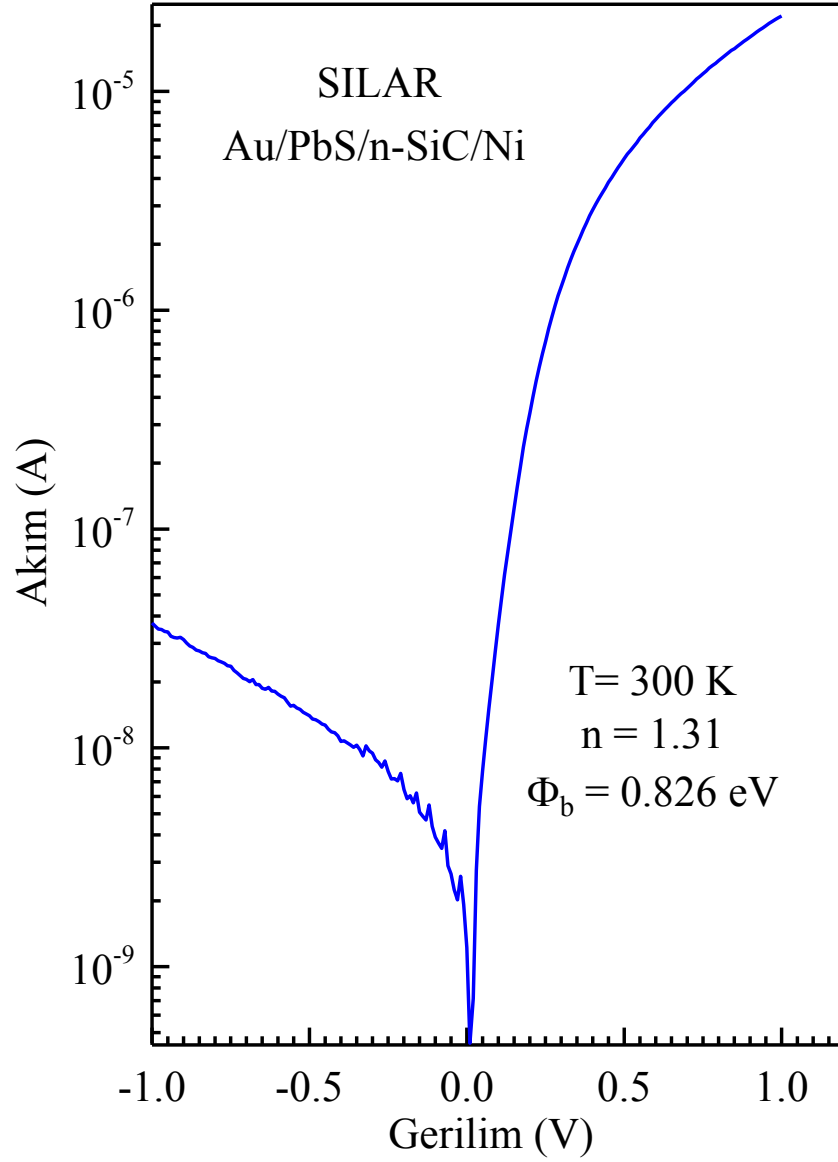
Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'de, sırasıyla, oda sıcaklığında Buharlaştırma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlar için düz ve ters beslem ( $I$ - $V$ ) grafikleri verilmiştir.





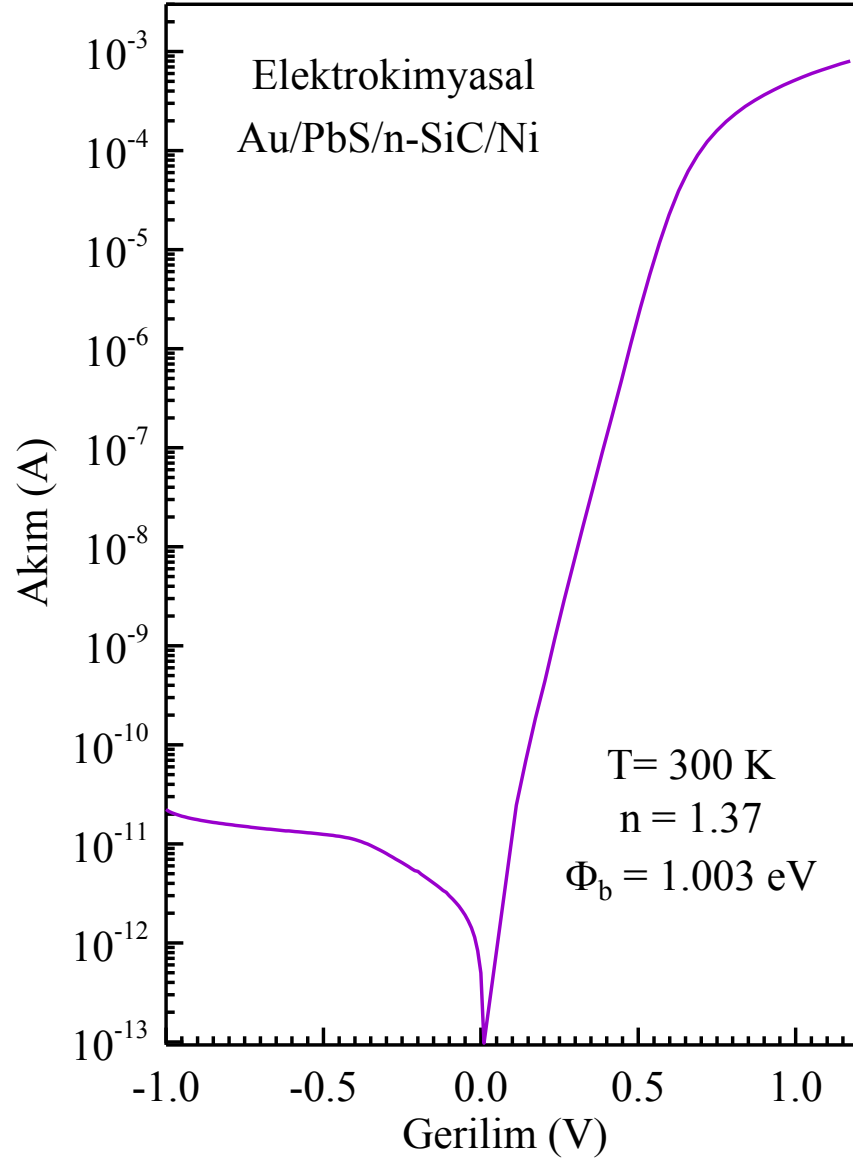
**şekil 4.1.** Au/PbS(Buharlaşma)/n-6H-SiC/Ni diyodun oda sıcaklığında ( $I$ - $V$ ) karakteristiği

Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun  $I$ - $V$  ölçümlerinden idealite faktörü  $n=1,16$  ve engel yüksekliği  $\Phi_b=0,892 \text{ eV}$  olarak hesaplanmıştır.



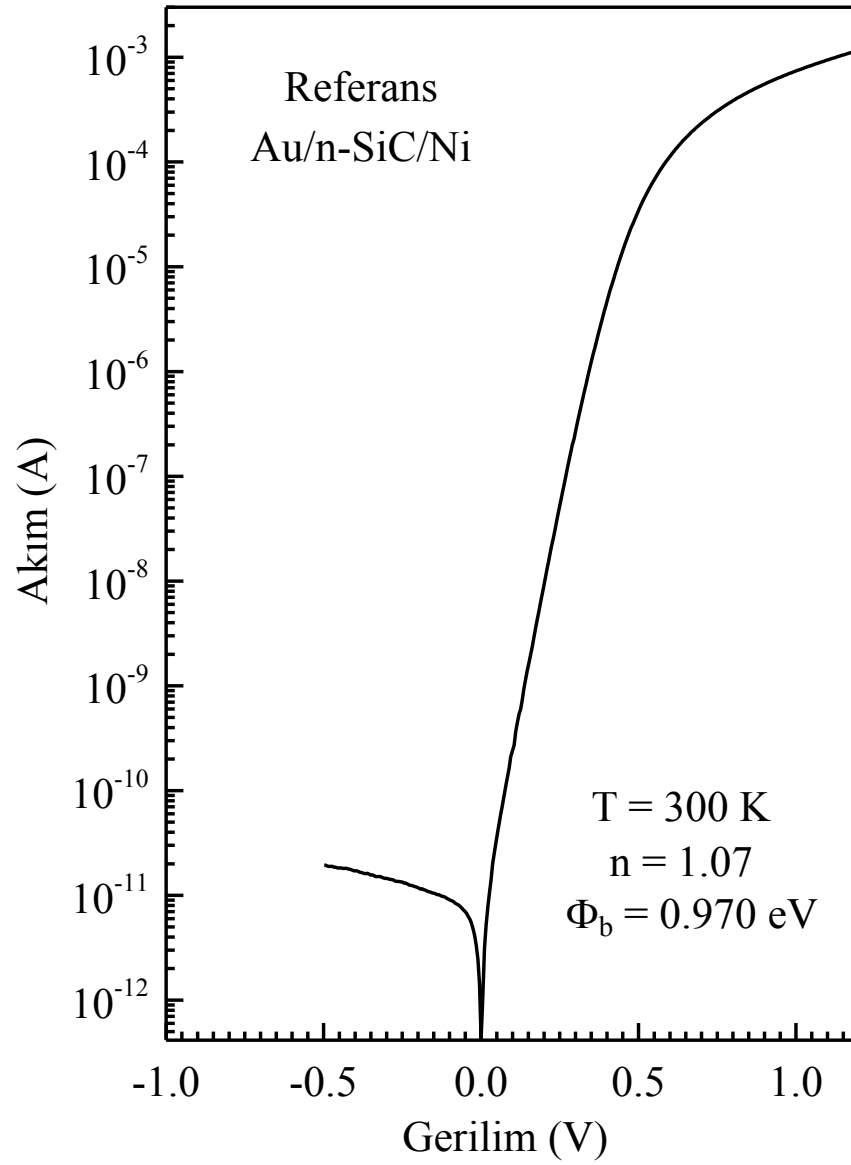
**Şekil 4.2.** Au/PbS(SILAR)/n-6H-SiC/Ni diyodun oda sıcaklığında ( $I$ - $V$ ) karakteristiği

Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun  $I$ - $V$  ölçümlerinden idealite faktörü  $n=1,31$  ve engel yüksekliği  $\Phi_b=0,826$  eV olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.3.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-6H-SiC/Ni diyodun oda sıcaklığında ( $I$ - $V$ ) karakteristiği

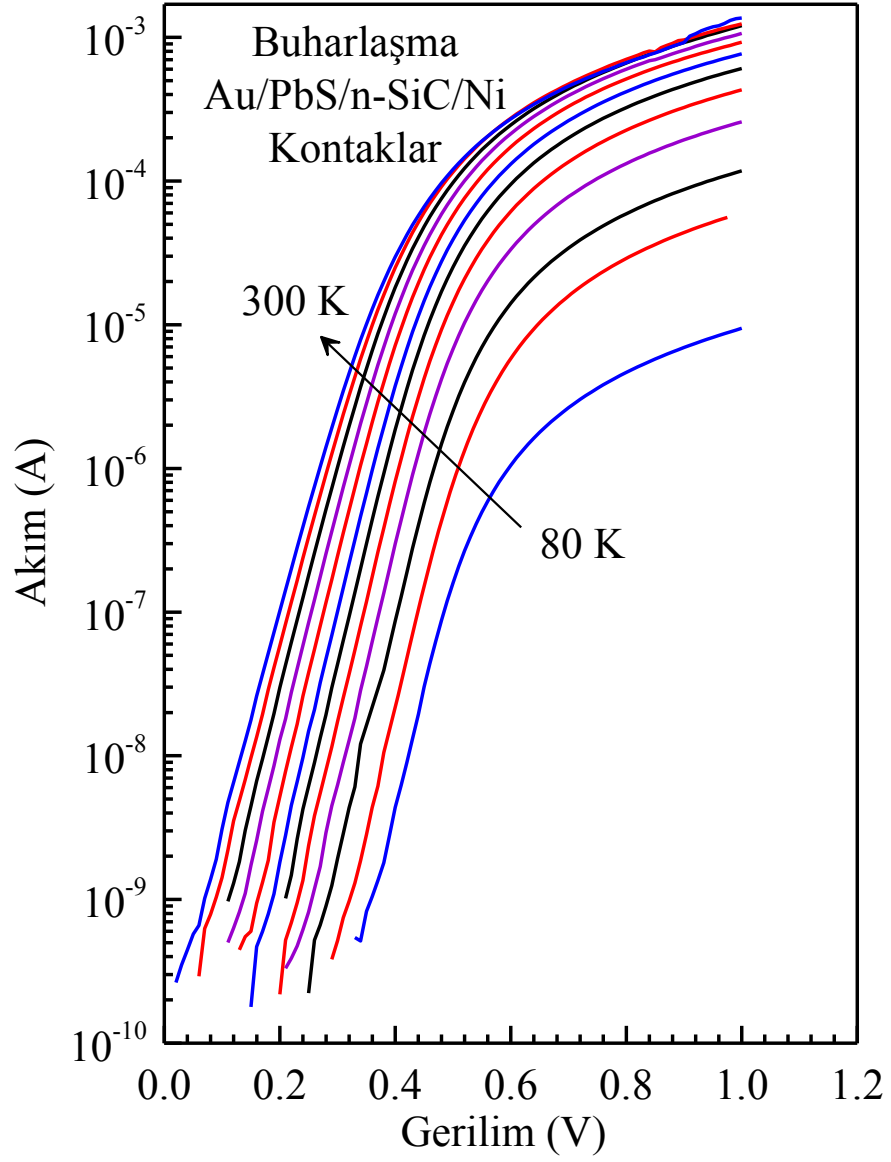
Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun  $I$ - $V$  ölçümlerinden idealite faktörü  $n=1,37$  ve engel yüksekliği  $\Phi_b=1,003$  eV olarak hesaplanmıştır.



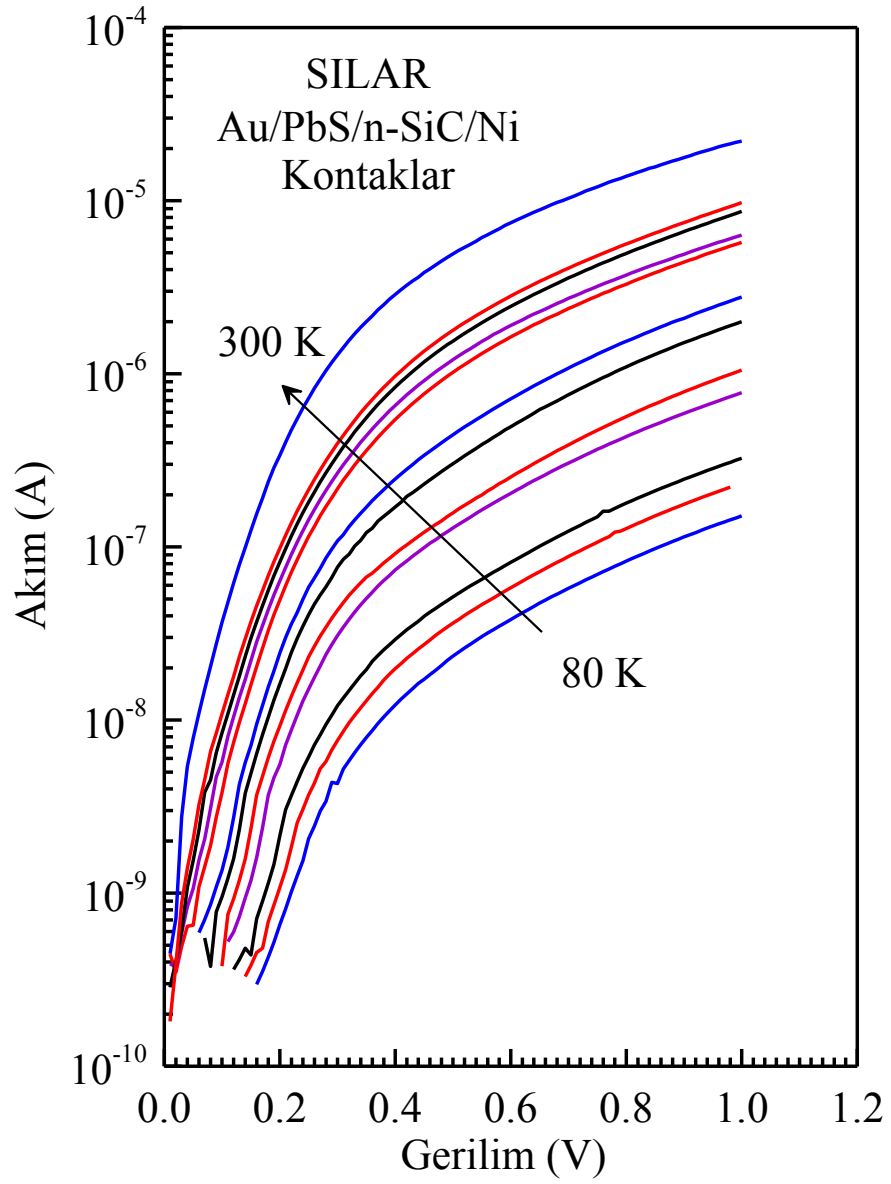
**Şekil 4.4.** Referans Au/n-SiC/Ni diyodun oda sıcaklığında ( $I$ - $V$ ) karakteristiği

Referans Au/n-SiC/Ni diyodun  $I$ - $V$  ölçümlerinden idealite faktörü  $n=1,07$  ve engel yüksekliği  $\Phi_b=0,970 \text{ eV}$  olarak hesaplanmıştır.

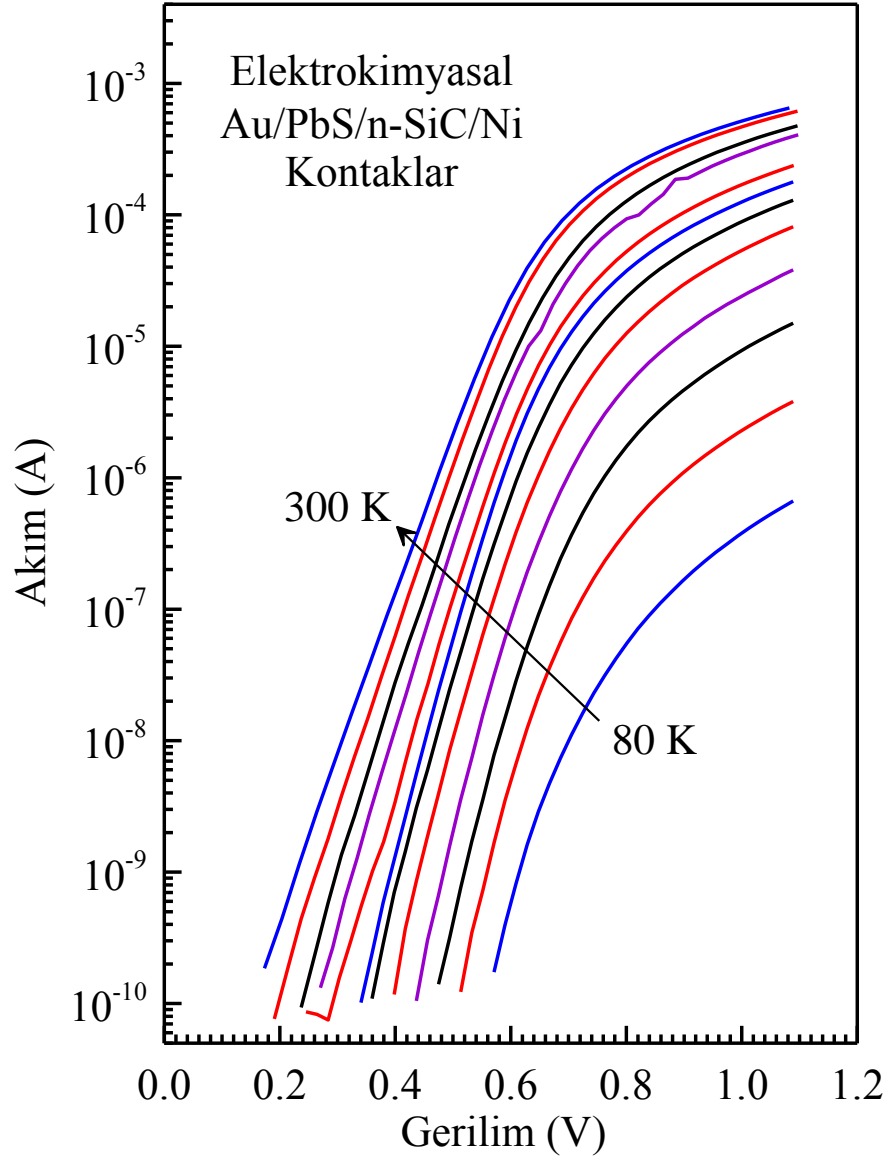
Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de, sırasıyla, Buharlaşma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlar için sıcaklığa bağlı olarak ( $I$ - $V$ ) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.5. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı ( $I$ - $V$ ) karakteristiği

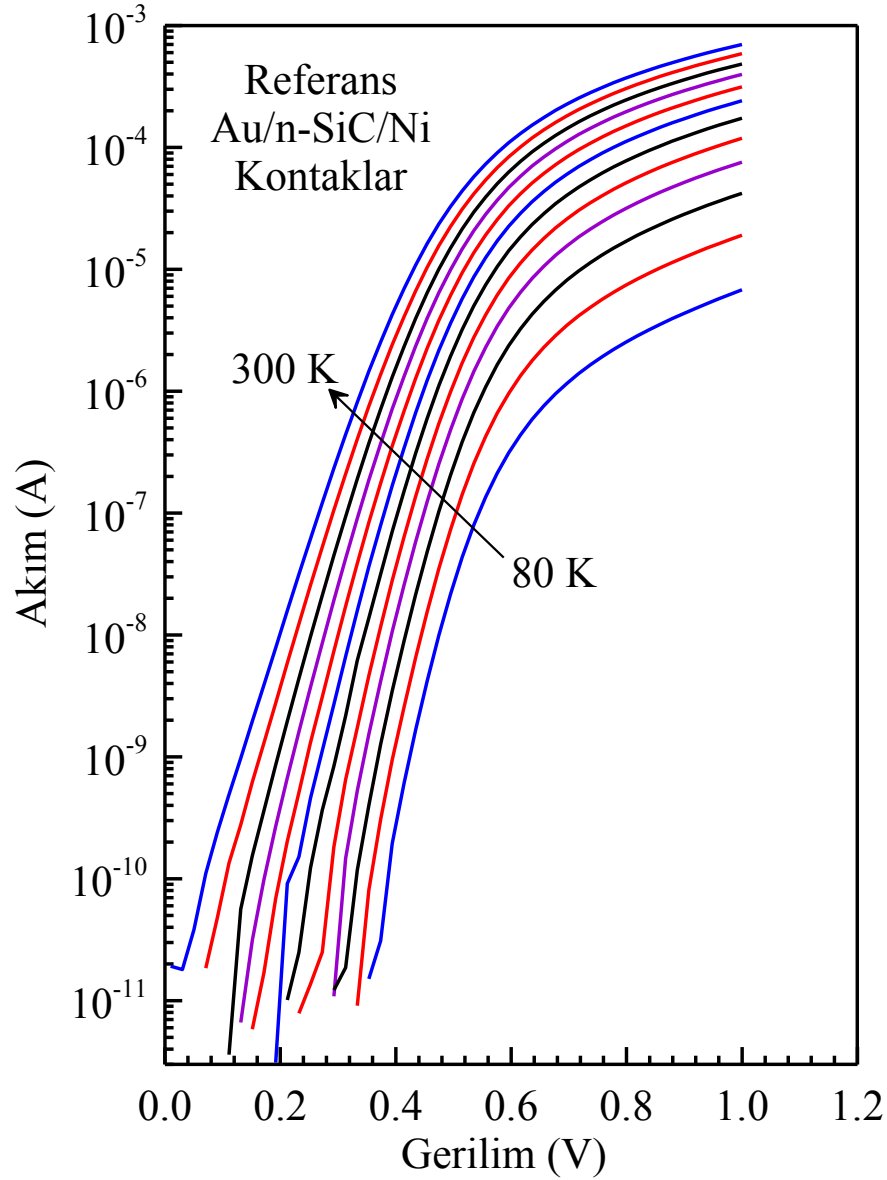


Şekil 4.6. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı ( $I$ - $V$ ) karakteristiği



**Şekil 4.7.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı ( $I$ - $V$ ) karakteristiği

Deneysel olarak doyma akım yoğunluğu,  $\ln I$ - $V$  grafiğindeki eğrinin doğru kısmının düşey eksenini kestiği noktadan tespit edilmiştir. ( $I$ - $V$ ) eğrileri, azalan sıcaklık ile daha yüksek beslem tarafına kaymıştır.



**Şekil 4.8.** Referans Au/n-SiC/Ni diyodun sıcaklığa bağlı ( $I$ - $V$ ) karakteristiği

Diyot için her bir sıcaklıkta idealite faktörü ( $n$ ) ve engel yüksekliğinin ( $\Phi_{ap}$ ) deneysel değerleri, (4.3) ve (4.5) denklemlerine göre, sırasıyla, düz beslem  $\ln I$ - $V$  grafiklerinin doğru kısmının eğim ve düşey ekseni kestiği noktanın değerlerinden tayin edilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve doyma akımı ( $I_0$ ) değerleri gibi bazı parametreler Buharlaşma numunesi için Çizelge 4.1’de, SILAR numune için ise Çizelge 4.2’de, Elektrokimyasal numune için Çizelge 4.3’de ve Referans numune için Çizelge 4.4’de verilmiştir.



**Çizelge 4.1.** Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait sıcaklığa bağlı  $\ln I-V$  grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	İdealite Faktörü	Engel Yüksekliği (eV)	$(n^{-1}-1)$	$I/(2kT)$ (eV) <sup>-1</sup>	$I_0$ (A)
80	4,02	0,311	-0,751	72,464	$2,605 \times 10^{-15}$
100	3,05	0,383	-0,672	57,971	$5,459 \times 10^{-15}$
120	2,60	0,442	-0,615	48,309	$2,927 \times 10^{-14}$
140	2,19	0,504	-0,543	41,407	$8,011 \times 10^{-14}$
160	1,88	0,566	-0,468	36,231	$1,597 \times 10^{-13}$
180	1,70	0,621	-0,411	32,206	$4,680 \times 10^{-13}$
200	1,54	0,675	-0,350	28,985	$1,094 \times 10^{-12}$
220	1,43	0,721	-0,300	26,350	$3,340 \times 10^{-12}$
240	1,39	0,759	-0,280	24,154	$1,260 \times 10^{-11}$
260	1,29	0,805	-0,224	22,297	$2,779 \times 10^{-11}$
280	1,27	0,842	-0,212	20,704	$7,892 \times 10^{-11}$
300	1,16	0,892	-0,137	19,324	$1,170 \times 10^{-10}$

**Çizelge 4.2.** Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait sıcaklığa bağlı  $\ln I-V$  grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	İdealite Faktörü	Engel Yüksekliği (eV)	$(n^{-1}-1)$	$I/(2kT)$ (eV) <sup>-1</sup>	$I_0$ (A)
80	7,07	0,254	-0,858	72,464	$1,111 \times 10^{-11}$
100	6,19	0,310	-0,838	57,971	$2,636 \times 10^{-11}$
120	5,13	0,367	-0,805	48,309	$4,184 \times 10^{-11}$
140	3,62	0,427	-0,723	41,407	$4,596 \times 10^{-11}$
160	2,99	0,485	-0,665	36,231	$5,782 \times 10^{-11}$
180	2,62	0,538	-0,618	32,206	$9,582 \times 10^{-11}$
200	2,40	0,589	-0,583	28,985	$1,550 \times 10^{-10}$
220	2,13	0,636	-0,530	26,350	$2,909 \times 10^{-10}$
240	1,93	0,689	-0,481	24,154	$3,839 \times 10^{-10}$
260	1,78	0,739	-0,438	22,297	$5,194 \times 10^{-10}$
280	1,45	0,789	-0,310	20,704	$4,890 \times 10^{-10}$
300	1,31	0,826	-0,236	19,324	$1,456 \times 10^{-9}$

**Çizelge 4.3.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait sıcaklığa bağlı  $\ln I-V$  grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	İdealite Faktörü	Engel Yüksekliği (eV)	$(n^{-1}-1)$	$I/(2kT)$ (eV) <sup>-1</sup>	$I_0$ (A)
80	4,71	0,336	-0,787	72,464	$5,536 \times 10^{-18}$
100	3,44	0,422	-0,709	57,971	$6,197 \times 10^{-18}$
120	2,63	0,513	-0,619	48,309	$5,221 \times 10^{-18}$
140	2,18	0,593	-0,541	41,407	$1,084 \times 10^{-17}$
160	1,97	0,652	-0,492	36,231	$9,074 \times 10^{-17}$
180	1,79	0,714	-0,441	32,206	$4,127 \times 10^{-16}$
200	1,64	0,782	-0,390	28,985	$9,982 \times 10^{-16}$
220	1,59	0,827	-0,371	26,350	$6,964 \times 10^{-15}$
240	1,46	0,882	-0,315	24,154	$2,108 \times 10^{-14}$
260	1,44	0,924	-0,305	22,297	$1,044 \times 10^{-13}$
280	1,38	0,970	-0,275	20,704	$3,377 \times 10^{-13}$
300	1,37	1,003	-0,270	19,324	$1,602 \times 10^{-12}$

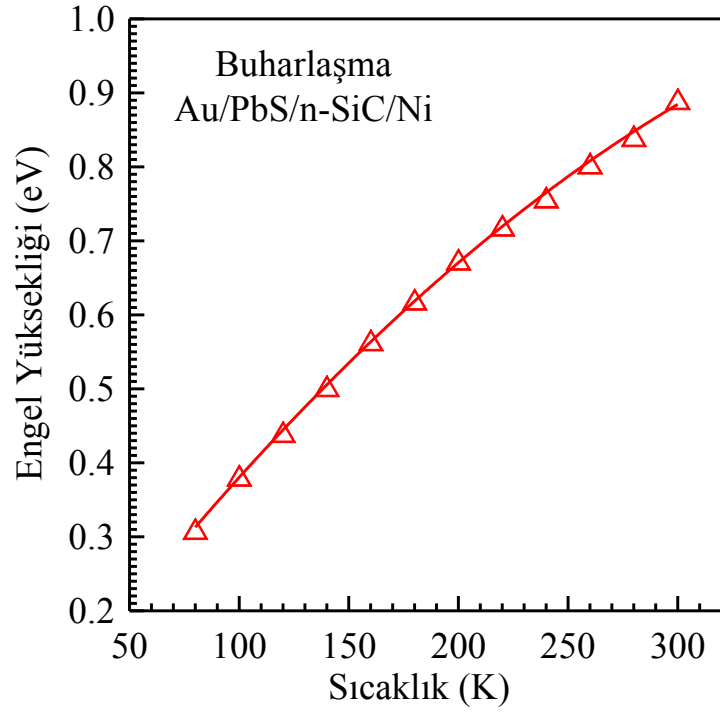
**Çizelge 4.4.** Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait sıcaklığa bağlı  $\ln I-V$  grafiklerinden elde edilen temel diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	İdealite Faktörü	Engel Yüksekliği (eV)	$(n^{-1}-1)$	$I/(2kT)$ (eV) <sup>-1</sup>	$I_0$ (A)
80	3,11	0,342	-0,678	72,464	$2,463 \times 10^{-18}$
100	2,48	0,420	-0,596	57,971	$9,169 \times 10^{-18}$
120	2,02	0,500	-0,504	48,309	$2,015 \times 10^{-17}$
140	1,69	0,577	-0,408	41,407	$4,205 \times 10^{-17}$
160	1,42	0,656	-0,295	36,231	$7,084 \times 10^{-17}$
180	1,31	0,713	-0,236	32,206	$4,546 \times 10^{-16}$
200	1,29	0,753	-0,224	28,985	$5,385 \times 10^{-15}$
220	1,20	0,808	-0,166	26,350	$1,937 \times 10^{-14}$
240	1,17	0,850	-0,145	24,154	$1,007 \times 10^{-13}$
260	1,15	0,888	-0,130	22,297	$5,105 \times 10^{-13}$
280	1,14	0,922	-0,122	20,704	$2,544 \times 10^{-12}$
300	1,07	0,970	-0,065	19,324	$6,599 \times 10^{-12}$

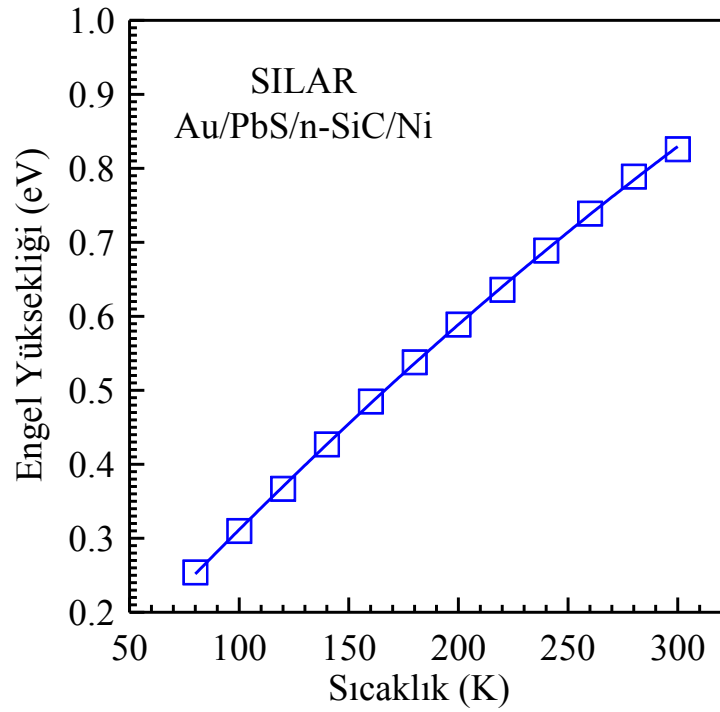
$\Phi_{ap}$ 'nin deneysel değerleri, sırasıyla, Buharlaştırma için 80-300 K sıcaklık aralığında 300 K'de 0,892 eV'tan 80 K'de 0,311 eV'a kadar ve idealite faktörü ise 300 K'de 1,16'dan 80 K'de 4,02'ye kadar değişim göstermiştir. SILAR'lı numune için 80-300 K sıcaklık aralığında 300 K'de 0,826 eV'tan 80 K'de 0,254 eV'a kadar ve idealite faktörü ise 300 K'de 1,31'den 80 K'de 7,07'ye kadar değişim göstermiştir. Elektrokimyasal numune için 80-300 K sıcaklık aralığında 300 K'de 1,003 eV'tan 80 K'de 0,336 eV'a kadar ve idealite faktörü ise 300 K'de 1,37'den 80 K'de 4,71'e kadar değişim göstermiştir. Referans numune için 80-300 K sıcaklık aralığında 300 K'de 0,970 eV'tan 80 K'de 0,342 eV'a kadar ve idealite faktörü ise 300 K'de 1,07'den 80 K'de 3,11'e kadar değişim göstermiştir. Azalan sıcaklıkla idealite faktörünün artması ve engel yüksekliğinin azalması, metal yarıiletken ara yüzeyindeki atomik yapının homojensizliğinin ve arayüzeydeki PbS tabakasının ve arayüzey hallerinin varlığına atfedilebilir. Bu homojensizlik, metal-yarıiletken ara yüzeyine ait yüzey kusurlarının oluşmasından meydana gelebilir. Buharlaştırma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlar içinde, bileşik-yarıiletken arasındaki atomik homojen olmayan engelle açıklanabilir. Burada yine homojensizliğin nedeni farklı atomik fazlar, yüzey kusurları veya ara yüzeyin etkisine atfedilebilir (Werner and Güttler 1991, 1993).

Buharlaştırma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotların  $I-V$  ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi sırası ile Şekil 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12'de verilmiştir ve bu grafiklerde görüldüğü gibi, azalan sıcaklıkla  $\Phi_b$  engel yüksekliği değerleri azalmaktadır.

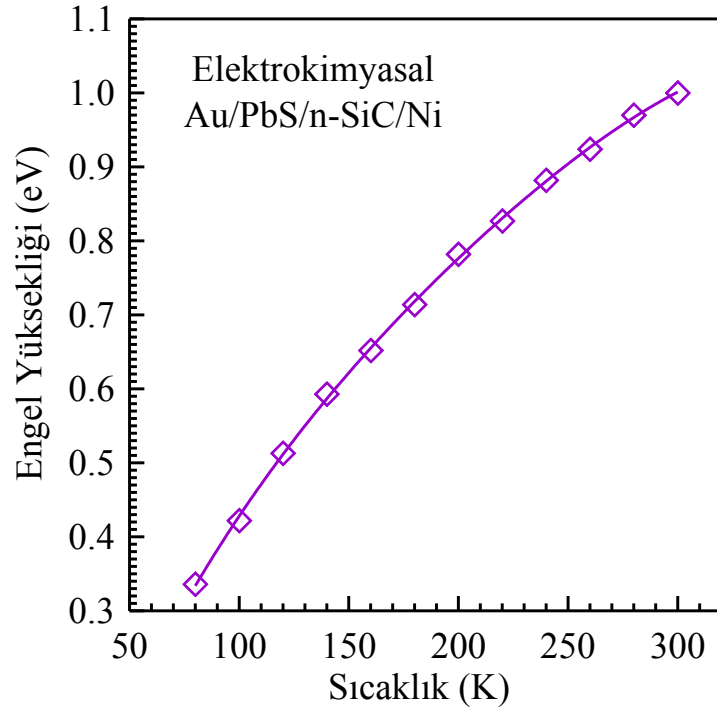
Şekil 4.13, 4.14, 4.15 ve 4.16'da sırası ile Buharlaştırma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotların  $I-V$  ölçümlerinden hesaplanan idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi verilmiştir, bu grafiklere göre azalan sıcaklıkla idealite faktörü değerleri artmaktadır.



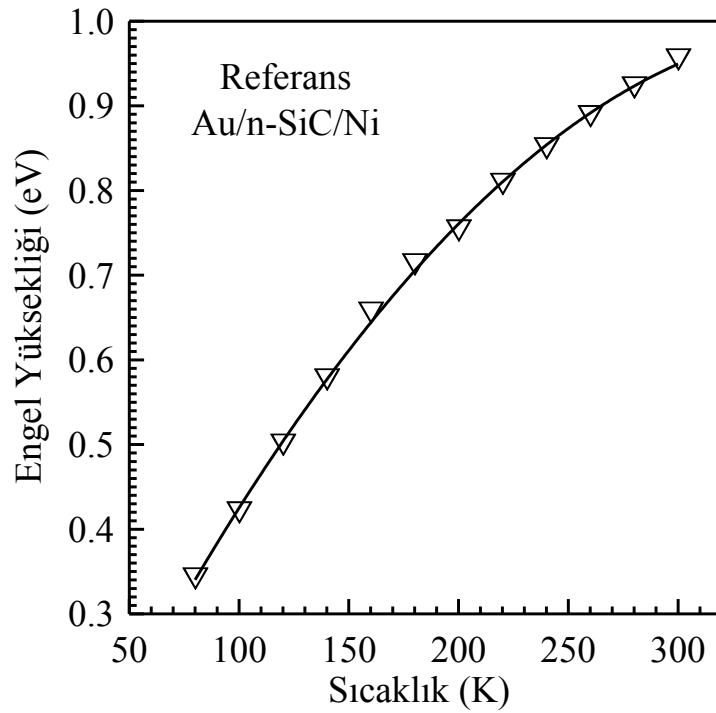
şekil 4.9. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi



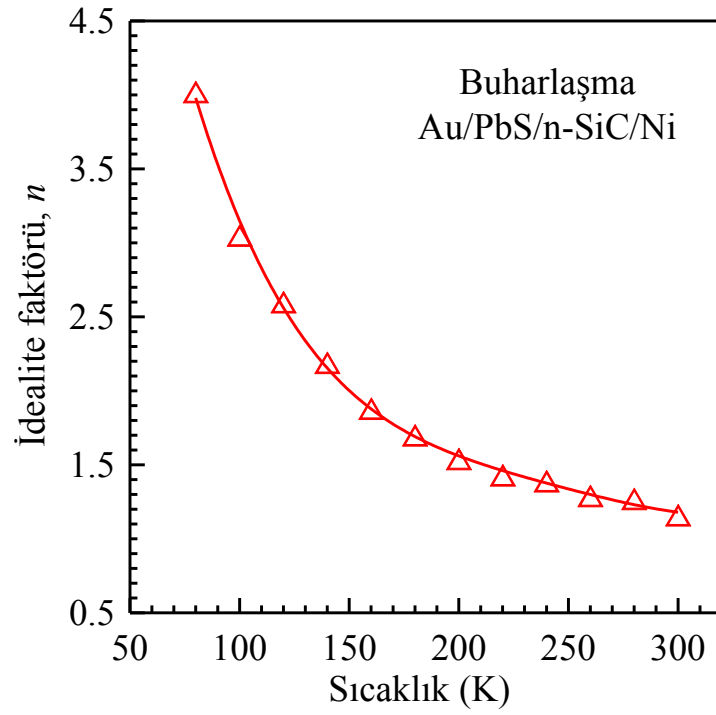
şekil 4.10. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi



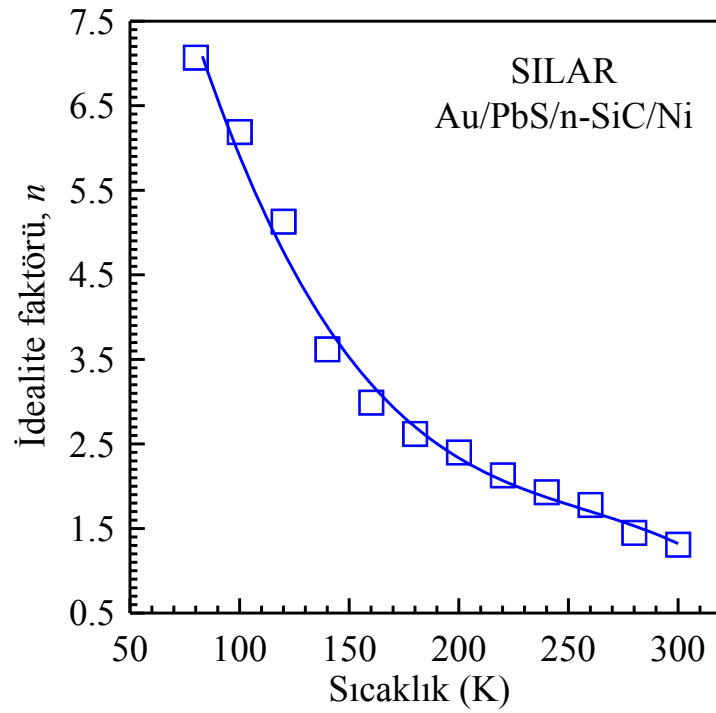
Şekil 4.11. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi



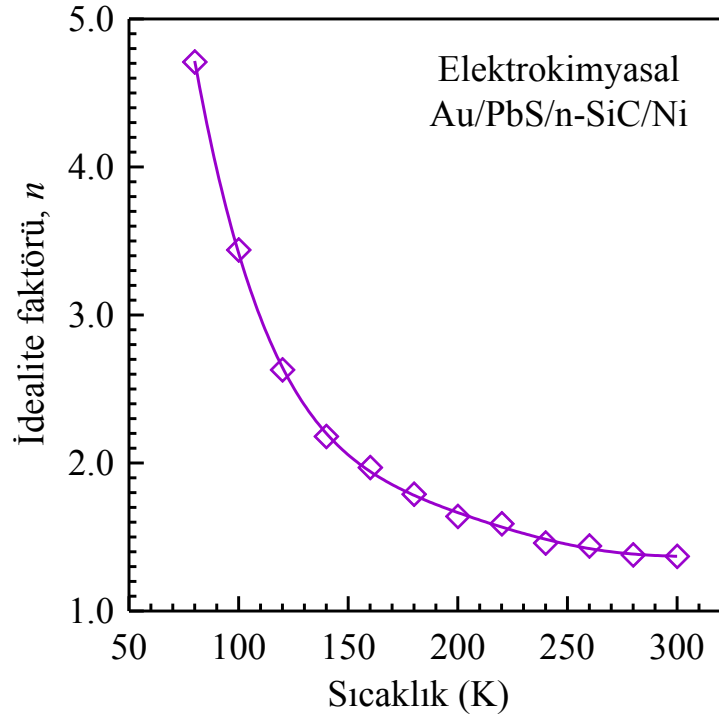
Şekil 4.12. Referans Au/n-SiC/Ni diyodun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi



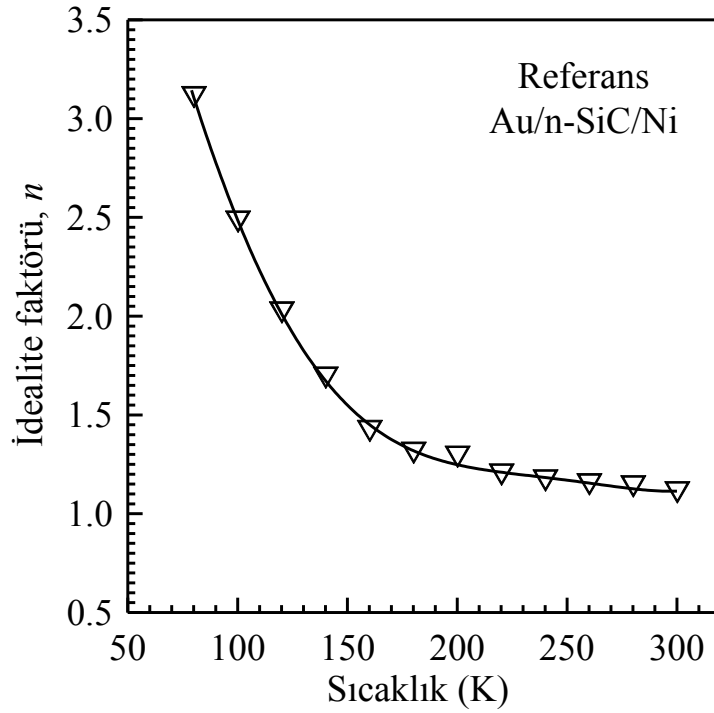
Şekil 4.13. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.14. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.15. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 4.16. Referans Au/n-SiC/Ni diyodun idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi

Çizelge 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4’de sırasıyla, bu diyotlar içinde  $I - V$  grafiğinden elde edilen engel yüksekliğinin ( $\Phi_b$ ) idealite faktörüne ( $n$ ) göre değişimi verilmiştir. Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi, 300 K’den başlayarak 80 K’e kadar 20 K’lik adımda engel yüksekliği ortalama 0,052 eV kadar azalırken idealite faktörü 1,16’dan 4,02’ye kadar artmıştır. Çizelge 4.2’de ise engel yüksekliğindeki ortalama bu azalış yine 0,052 eV iken idealite faktörü 1,31’den 7,07’ye kadar çıkmıştır. Çizelge 4.3’de ise engel yüksekliğindeki ortalama bu azalış 0,055 eV iken idealite faktörü 1,37’den 4,71’e kadar çıkmıştır. Çizelge 4.4’de ise engel yüksekliğindeki ortalama bu azalış 0,051 eV iken idealite faktörü 1,07’den 3,11’e kadar çıkmıştır.

Buharlaştırma, SILAR ve Elektrokimyasal yöntemlerle oluşturulan PbS arayüzey tabakası ve ayrıca isteğimizin dışında SiC’in yüzeyinde oluşan tabii oksit tabakası, diyodu ideallikten uzaklaştırırsa da her üç yöntemde de deneysel yolla bulunan idealite faktörünün 1’den çok büyük olmaması (oda sıcaklığında yaklaşık 2) oluşturulan PbS ve tabii oksit tabakalarının çok ince olduğunu göstermektedir.

### 4.3. Homojen Olmayan Engel Yüksekliği Analizi

Düşük sıcaklıklarda sıfır beslem engel yüksekliğindeki azalma ve idealite faktöründeki artış, ara yüzey yüklerinin tek düze olmayışı, ara yüzey tabakasının kompozisyonu ve kalınlığındaki değişimden ötürü engel yüksekliği homojensizliğinden kaynaklanmaktadır (Song *et al.* 1986). Ortalama engel yüksekliğinin ( $\Phi_b$ ) ve onun standart sapmasının karesinin ( $\sigma_s^2$ ) sırasıyla,

$$\bar{\Phi}_b = \bar{\Phi}_{b0} + \rho_2 V \quad (4.8)$$

ve

$$\sigma_s^2 = \sigma_{s0}^2 + \rho_3 V \quad (4.9)$$



şeklinde uygulama potansiyeliyle lineer değiştiği kabul edilerek geliştirilen bir teori ile açıklanmıştır (Werner and Güttler 1991). (4.8) ifadesindeki  $\bar{\Phi}_{bo}$  sıfır beslemdeki ortalama engel yüksekliği,  $\sigma_{s0}^2$  engel yüksekliği için standart sapma;  $\rho_2$  ve  $\rho_3$  ise voltaj katsayılarıdır. Buna göre, (2.5) ve (2.6) ifadelerinde  $\Phi_{bo}$  engel yüksekliği ve  $n$  idealite faktörü yerine sırasıyla  $\Phi_{ap}$  ve  $n_{ap}$  görünen sıfır beslem engel yüksekliği ve görünen idealite faktörü yazılarak diyot denklemi;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{n_{ap}kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (4.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda  $J_0$  akım yoğunluğu ise

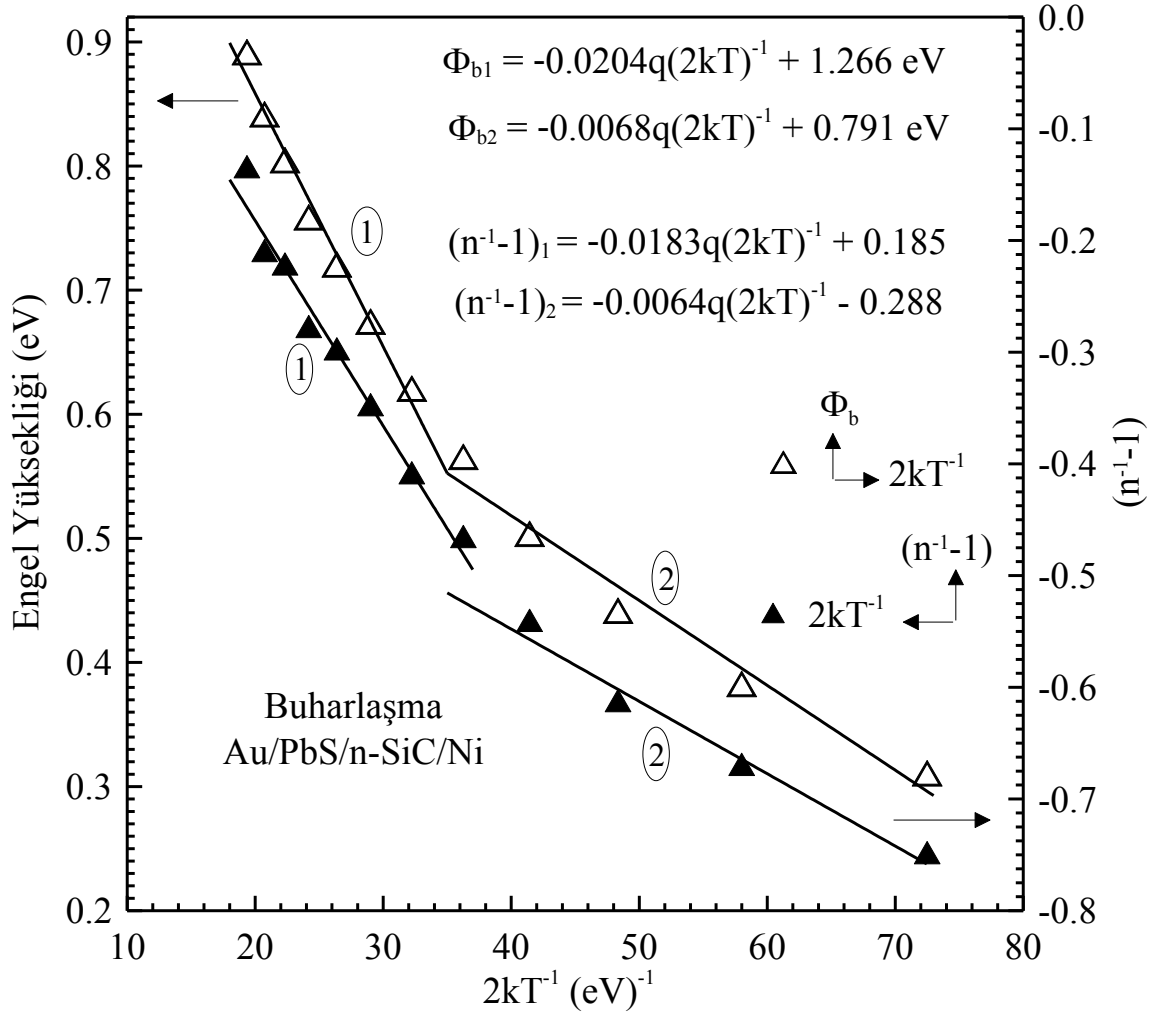
$$J_0 = \frac{I_0}{A} = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{ap}}{kT}\right) \quad (4.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Teorik olarak, görünen sıfır beslem engel yüksekliği ( $\Phi_{ap}$ ) ve görünen idealite faktörü ( $n_{ap}$ ) için sırasıyla,

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{bo} - \frac{q\sigma_{s0}^2}{2kT} \quad (4.12)$$

$$1/n_{ap}(T) - 1 = -\rho_1(T) = -\rho_2 + \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (4.13)$$

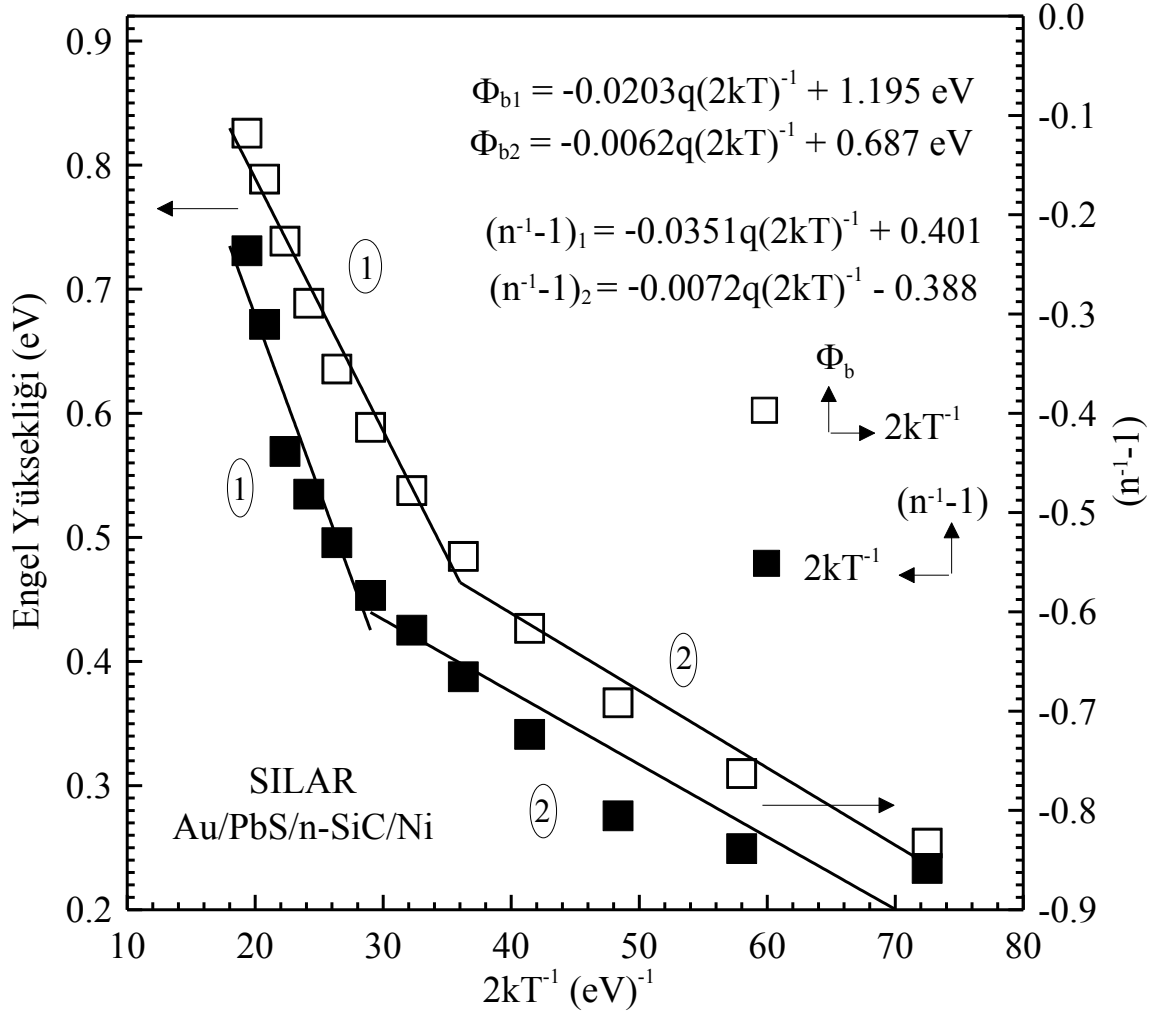
ifadeleri kullanılabilir (Werner and Güttler 1991, 1993).



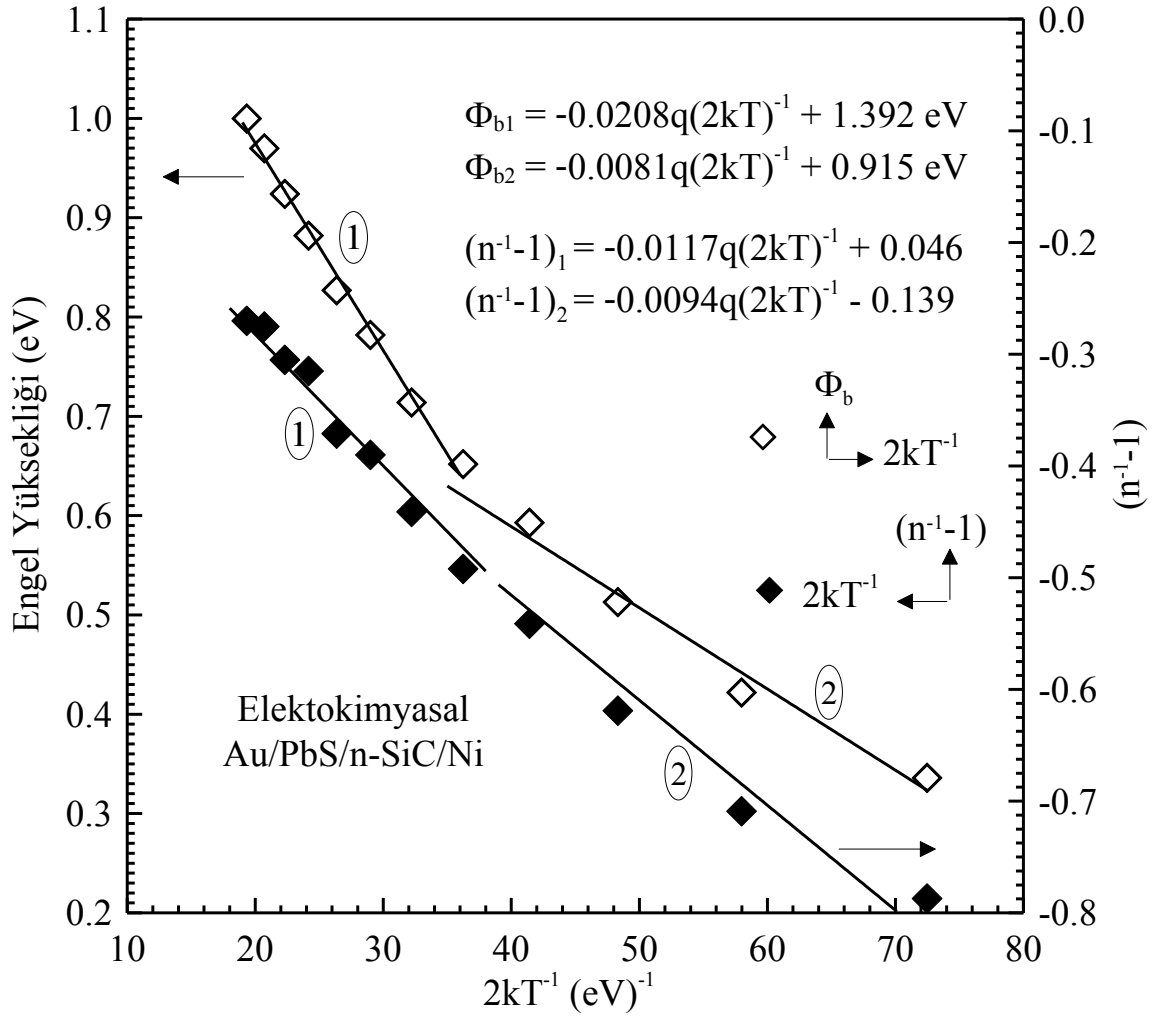
**Şekil 4.17.** Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun  $(n^{-1}-1)$  ve engel yüksekliğinin  $1/2kT$ 'ye bağlı değişimi

Şekil 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20,  $I-V$  grafiğinden elde edilen idealite faktörleri ve engel yükseklikleri ile elde edilmiştir.  $\Phi_b$ 'nin  $2kT^{-1}$ 'e karşı çizilen grafiğe fit edilen iki farklı doğru denkleminde Buharlaşma için  $(\bar{\Phi}_{b1}) = 1,266$ ,  $(\bar{\Phi}_{b2}) = 0,791 \text{ eV}$ ,  $\sigma_{01} = 0,142$ ,  $\sigma_{02} = 0,082 \text{ V}$  ve SILAR için  $(\bar{\Phi}_{b1}) = 1,195$ ,  $(\bar{\Phi}_{b2}) = 0,687 \text{ eV}$ ,  $\sigma_{01} = 0,142$ ,  $\sigma_{02} = 0,078 \text{ V}$  olarak bulundu.  $n_{ap} \sim (T)^{-1}$  grafiğinde lineer çizgilerin eğimi ve düşey eksen kesim noktaları, sırasıyla, voltaj katsayıları olan  $\rho_3$  ve  $\rho_2$  verir. Buharlaştırma için, deneysel  $n_{ap} \sim (T)^{-1}$  grafiğinden  $\rho_2 = 0,185$ ,  $\rho_2 = 0,288$ , SILAR'lı numune için  $\rho_2 = 0,401$ ,  $\rho_2 = 0,388$  değerleri elde edilmiştir. Eğimlerden elde edilen  $\rho_3$  değerleri de Buharlaştırmalı

numune için  $\rho_3 = -0,0183$  V ve  $\rho_3 = -0,0064$  V SILAR'lı numune için  $\rho_3 = 0,0351$ ,  $\rho_3 = 0,0072$  değerleri elde edilmiştir.

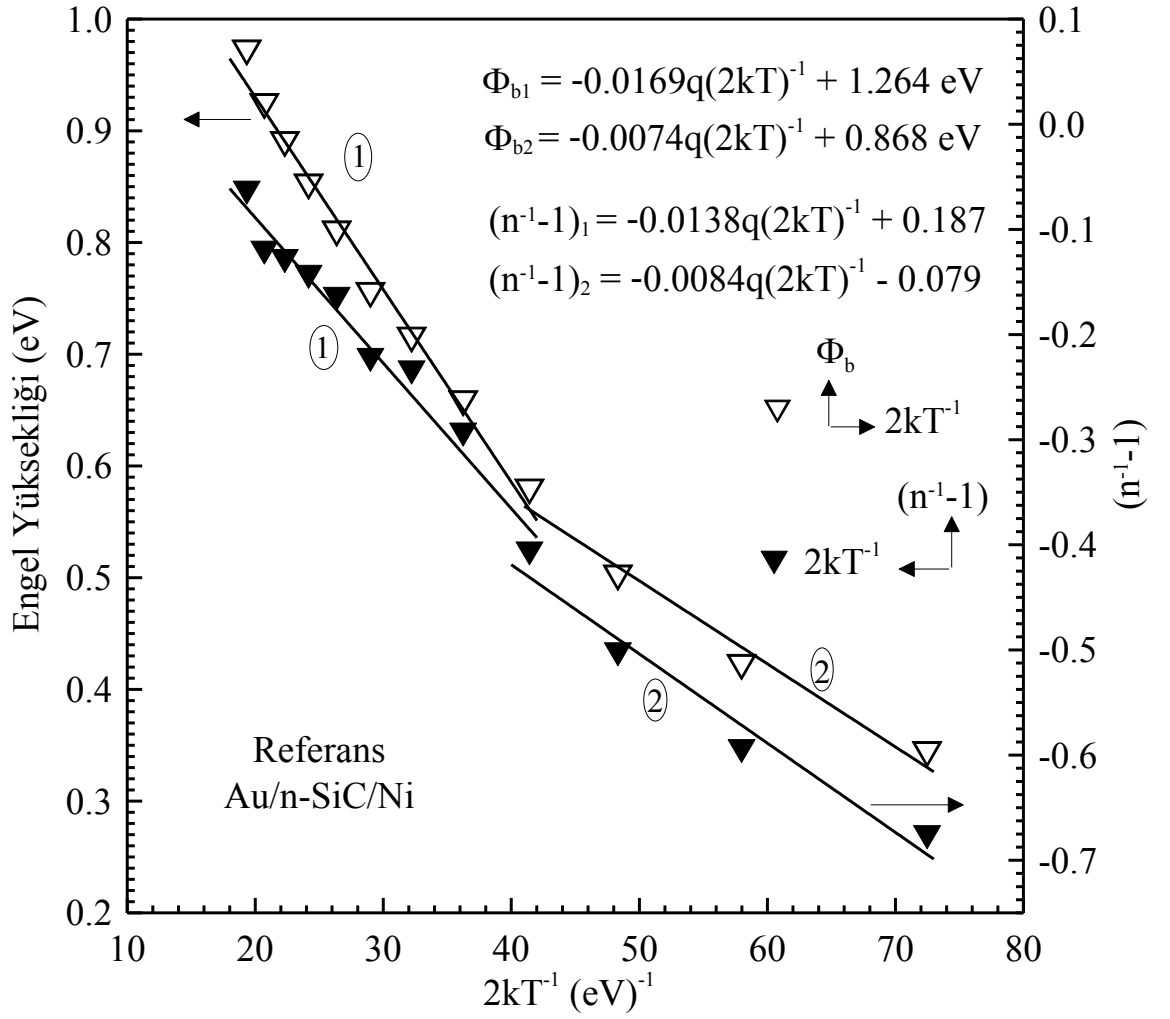


**Şekil 4.18.** Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun  $(n^{-1}-1)$  ve engel yüksekliğinin  $1/2kT$ 'ye bağlı değişimi



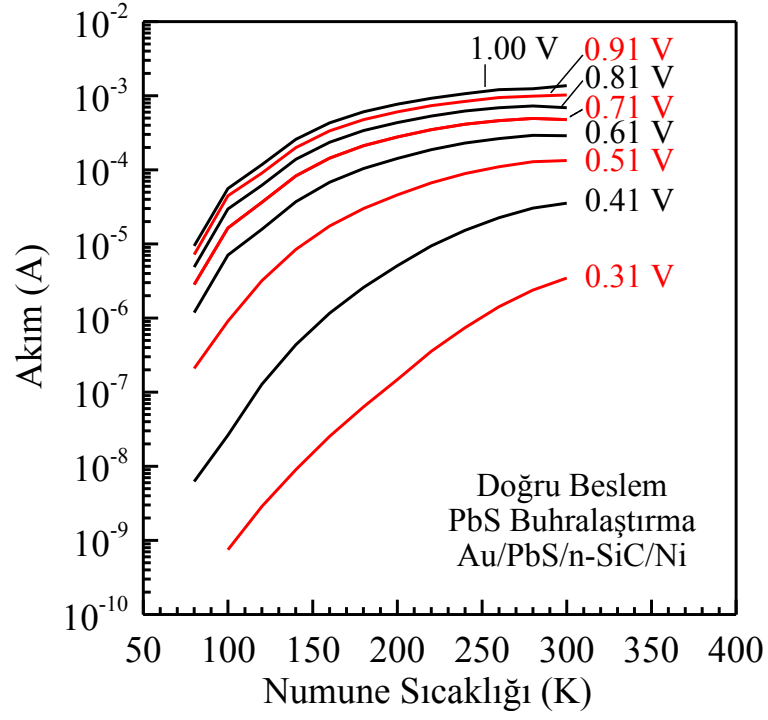
**Şekil 4.19.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun  $(n^{-1}-1)$  ve engel yüksekliğinin  $1/2kT$ 'ye bağlı değişimi

Şekil 4.19 ve 4.20'de ise Elektrokimyasal yöntem ile arayüzeyi oluşturulan numune ve Referans için iki farklı doğru denklemin den Elektrokimyasal'lı için  $(\bar{\Phi}_{b1})=1,392$ ,  $(\bar{\Phi}_{b2})=0,915$  eV,  $\sigma_{01} = 0,144$ ,  $\sigma_{02} = 0,09$  V ve Referans diyot için  $(\bar{\Phi}_{b1})=1,264$ ,  $(\bar{\Phi}_{b2})=0,868$  eV,  $\sigma_{01} = 0,130$ ,  $\sigma_{02} = 0,086$  V değerleri bulundu. Elektrokimyasal'lı diyot için, deneysel  $n_{ap} \sim (T)^{-1}$  grafiğinden  $\rho_2 = 0,046$ ,  $\rho_2 = 0,139$ , Referans numune için  $\rho_2 = 0,187$ ,  $\rho_2 = 0,079$  değerleri elde edilmiştir. Eğimlerden elde edilen  $\rho_3$  değerleri de Elektrokimyasal'lı numune için  $\rho_3 = -0,0117$  V  $\rho_3 = -0,0094$  V ve Referans numune için  $\rho_3 = 0,0138$ ,  $\rho_3 = 0,0084$  değerleri elde edilmiştir.

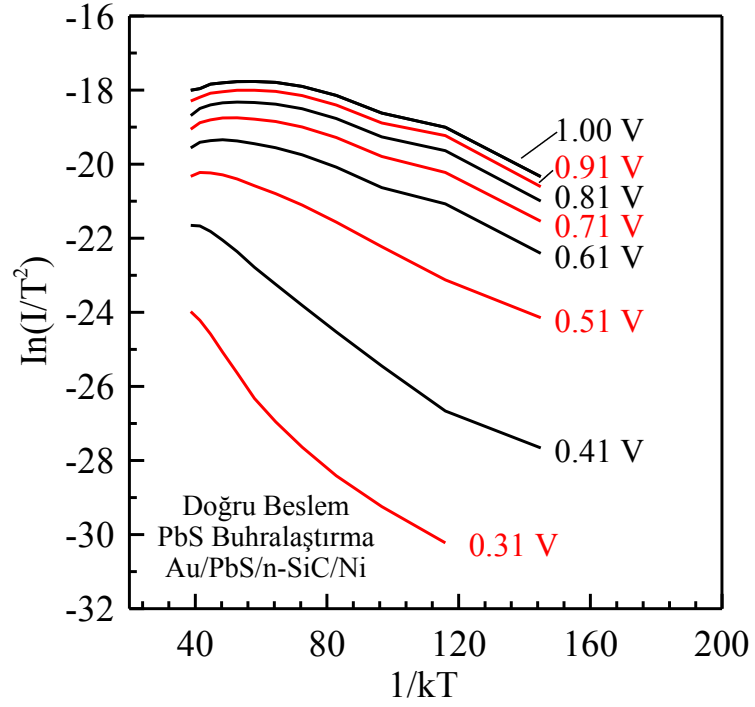


**Şekil 4.20.** Referans Au/n-SiC/Ni diyodun  $(n^{-1}-1)$  ve engel yüksekliğinin  $1/2kT$ 'ye bağlı değişimi

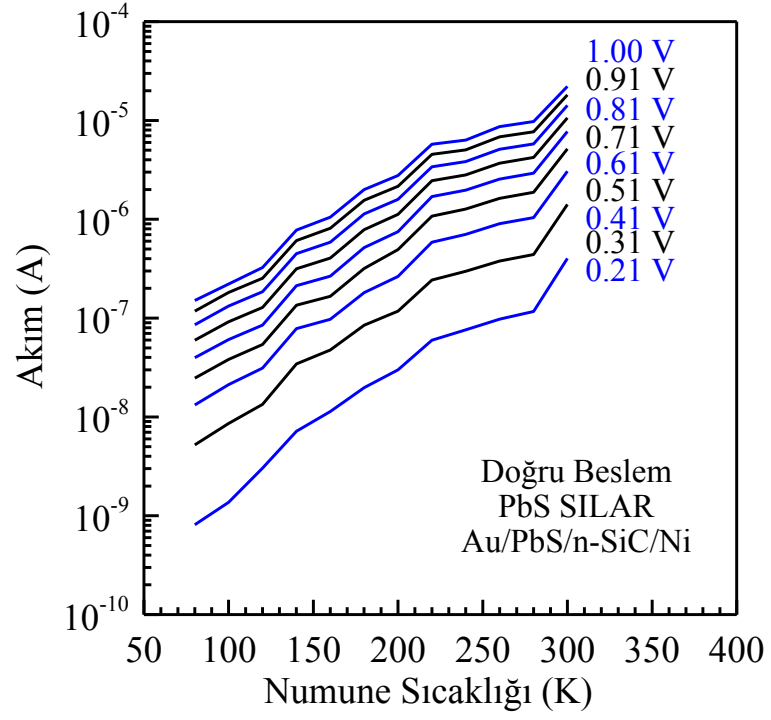
Şekil 4.21, 4.23, 4.25 ve 4.27 diyotların bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akım değişimini ve Şekil 4.22, 4.24, 4.26 ve 4.28 diyotların bazı doğru beslem gerilimlerinde  $\ln I/T^2$ 'nin  $1/kT$ 'ye karşı değişimini gösterir.



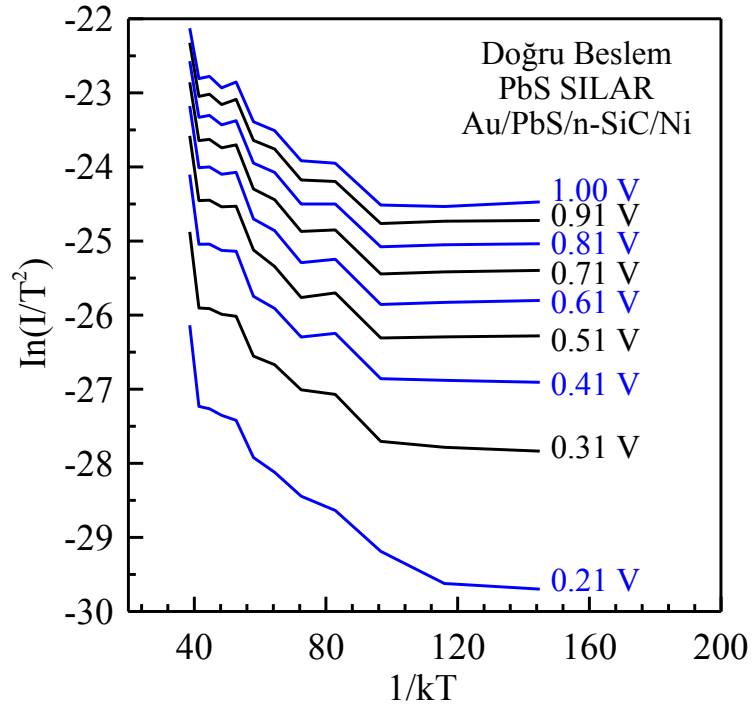
Şekil 4.21. Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodunun bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akımın değişimi



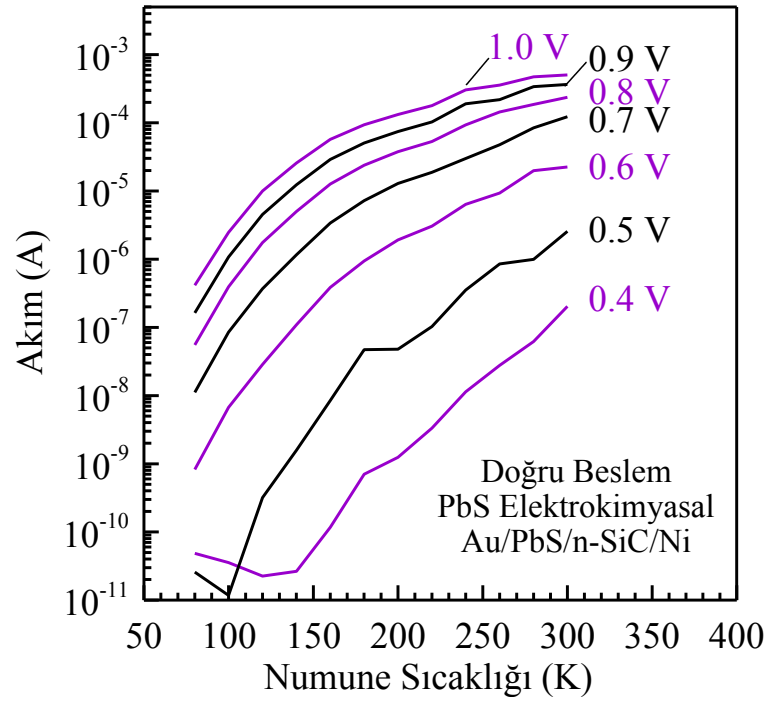
Şekil 4.22. Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodun  $\ln(I/T^2)$ 'nin  $1/kT$ 'ye karşı değişimi



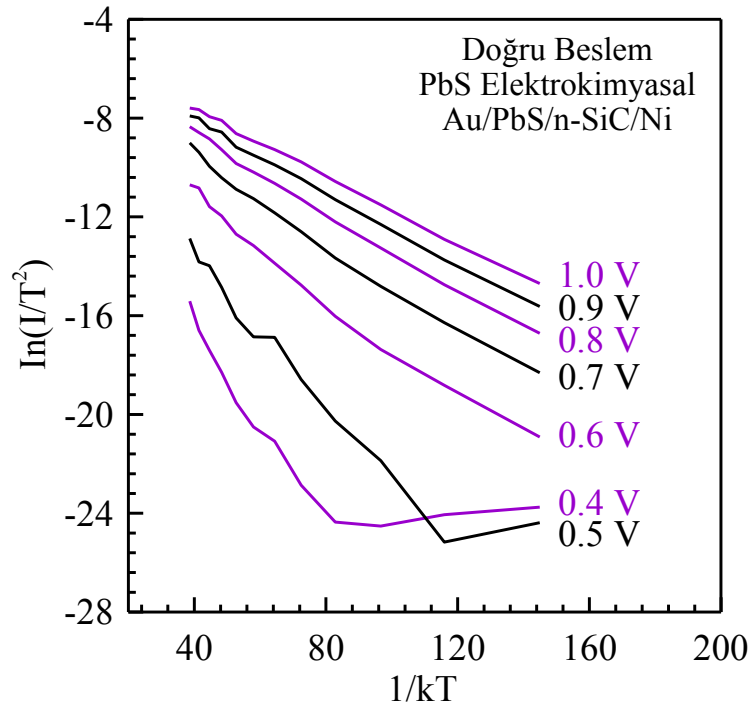
**Şekil 4.23.** Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodunun bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akımın değişimi



**Şekil 4.24.** Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun  $\ln(I/T^2)$ 'nin  $1/kT$ 'ye karşı değişimi

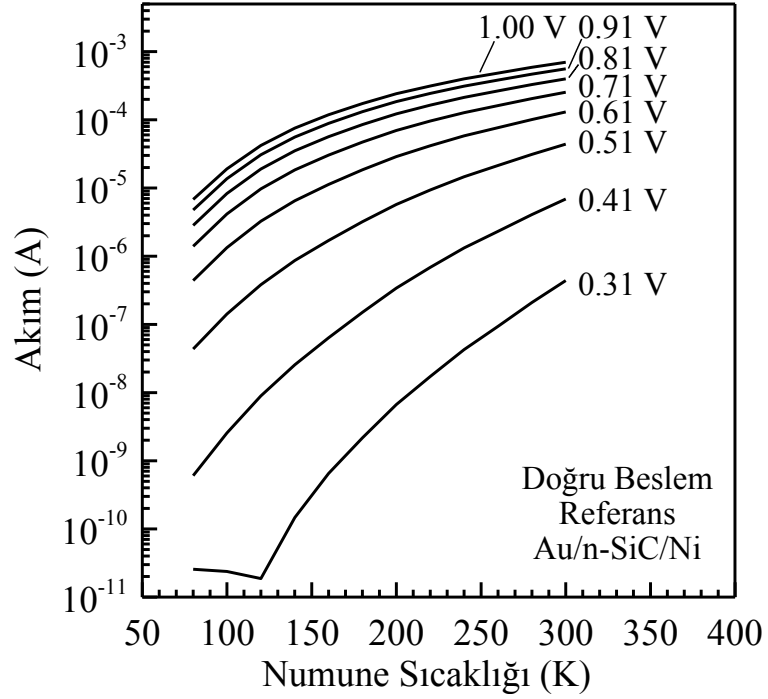


Şekil 4.25. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodunun bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akımın değişimi

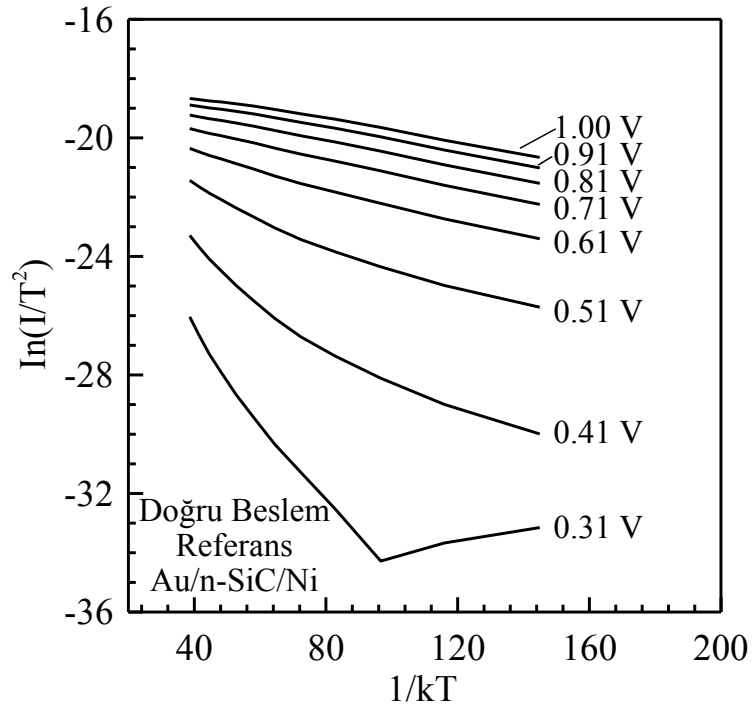


Şekil 4.26. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun  $\ln I/T^2$ 'nin  $1/kT$ 'ye karşı değişimi

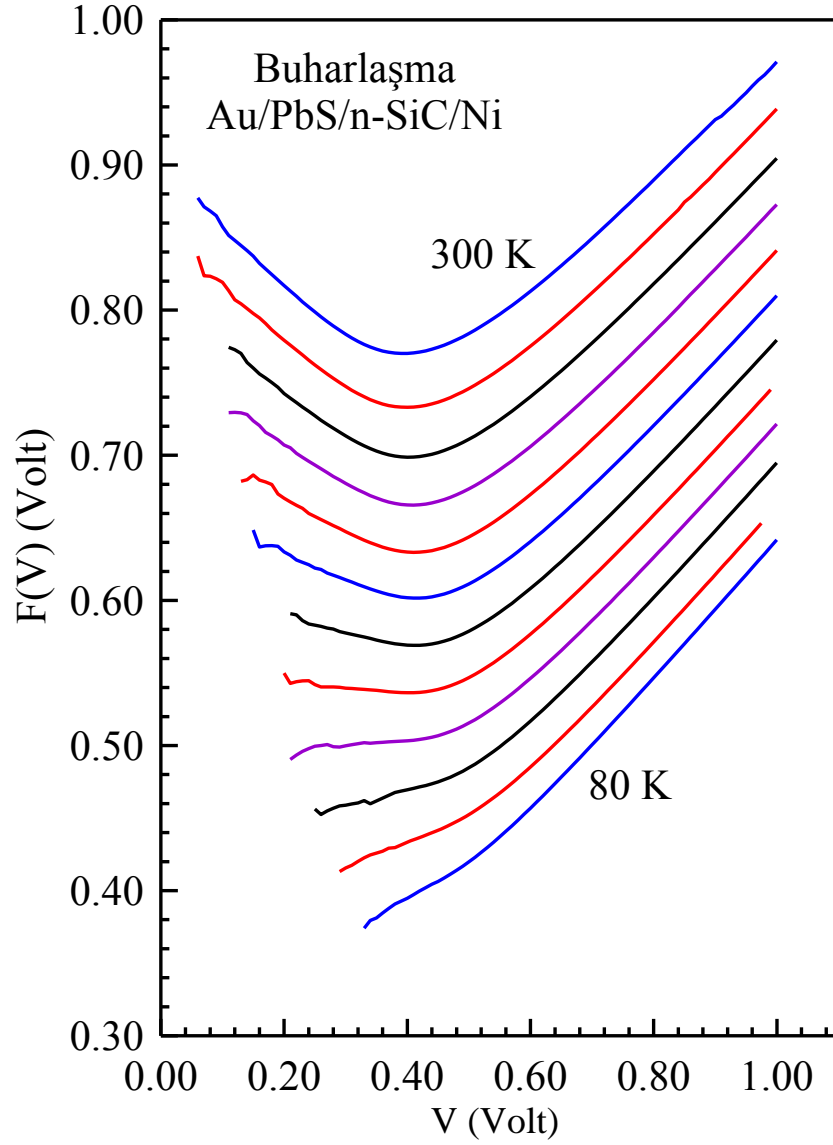




Şekil 4.27. Referans Au/n-SiC/Ni diyodunun bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akımın değişimi



Şekil 4.28. Referans Au/n-SiC/Ni diyodun  $\ln I/T^2$ 'nin  $1/kT$ 'ye karşı değişimi



**Şekil 4.29.** Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait numune sıcaklığına bağlı Norde eğrileri

Çalışmanın bu kısmında, üretilen arayüzeyli ve referans diyotların seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde Fonksiyonları (Norde 1979) kullanılarak hesaplandı. Norde foksionu;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.17)$$

eşitliğiyle önceki bölümde verilmişti. Burada  $A$  diyodun alanı,  $A^*$  modifiye edilmiş Richardson sabiti,  $e$  elektronik yük olmak üzere  $\beta=e/kT$ 'dir.  $F(V)$  fonksiyonunun minimum noktası düşünüldüğünde, minimum  $V_{\min.}$  voltajına karşılık gelen  $F(V_{\min.})$  değeri kullanılarak engel yüksekliği değeri (2.31) eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$\phi_b = F(V_{\min.}) + \frac{V_{\min.}}{2} - \frac{kT}{q} \quad (2.31)$$

Seri direnç değeri  $V_{\min.}$ 'a karşılık gelen  $I_{\min.}$  değeri kullanılarak;

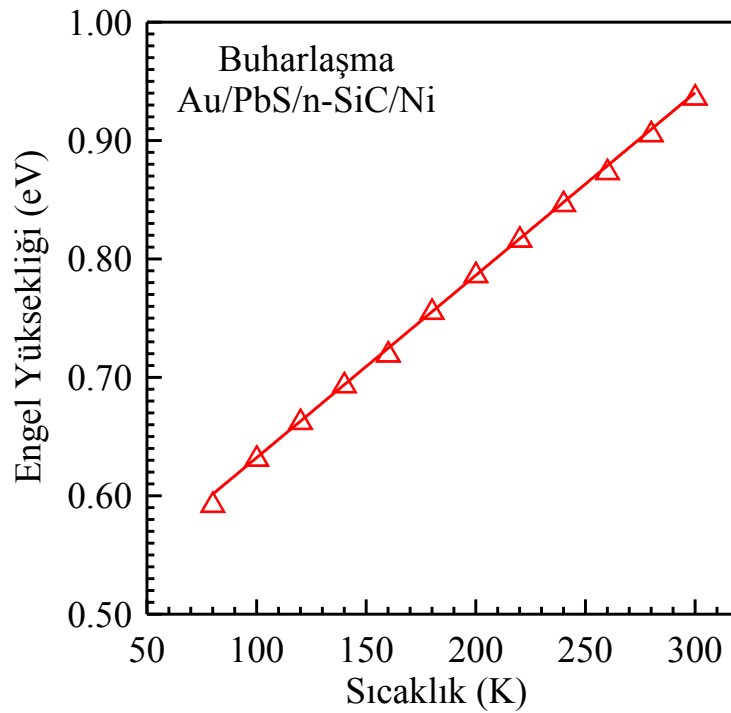
$$R = \frac{kT}{qI_{\min.}} \quad (2.30)$$

formülü ile hesaplanmıştır.

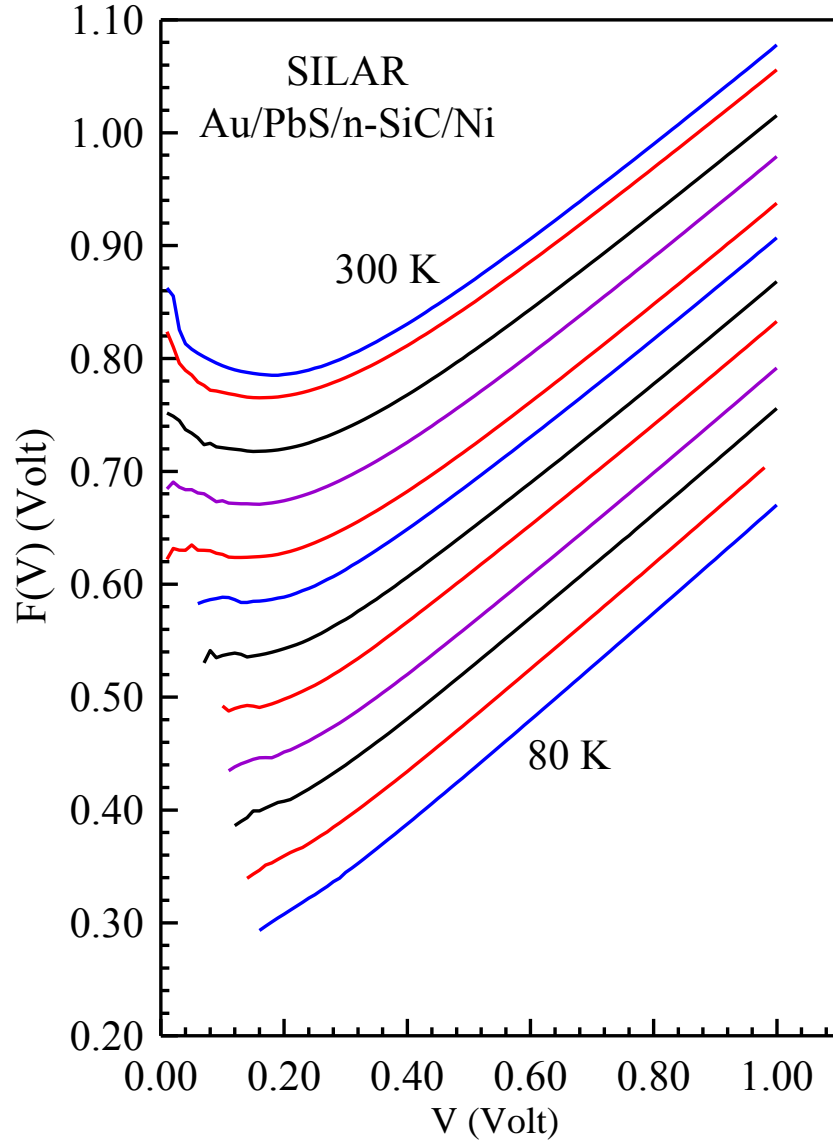
Şekil 4.29, 4.31, 4.33 ve 4.35'de sırası ile Buharlaştırma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlarına ait  $F(V)$ - $V$  grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi yine aynı diyotlar için sırası ile Şekil 4.30, 4.32, 4.34 ve 4.36'da verilmiştir. Bu engel yüksekliği değerleri ve seri direnç değerleri ise Çizelge 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait Norde eğrilerinden elde edilen Engel yüksekliği ve Seri direnç değerleri

Sıcaklık (K)	Engel Yüksekliği (eV)	Seri direnç ( $\Omega$ )
80	0,595	1086091
100	0,634	210204
120	0,665	32338,7
140	0,696	2239696
160	0,722	2035,398
180	0,758	1790,697
200	0,789	1558,939
220	0,819	1146,221
240	0,849	826,59
260	0,876	875,302
280	0,908	706,593
300	0,939	887,577



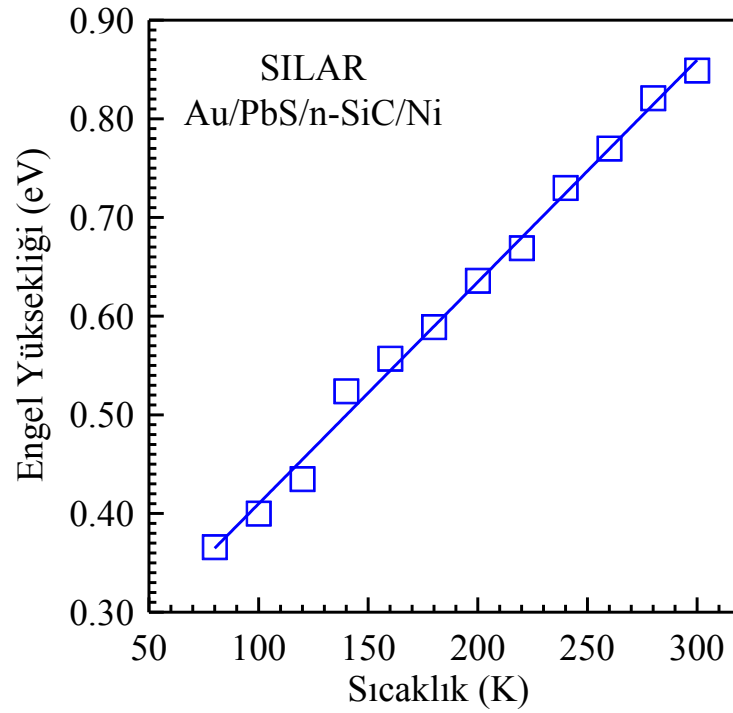
**Şekil 4.30.** Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi



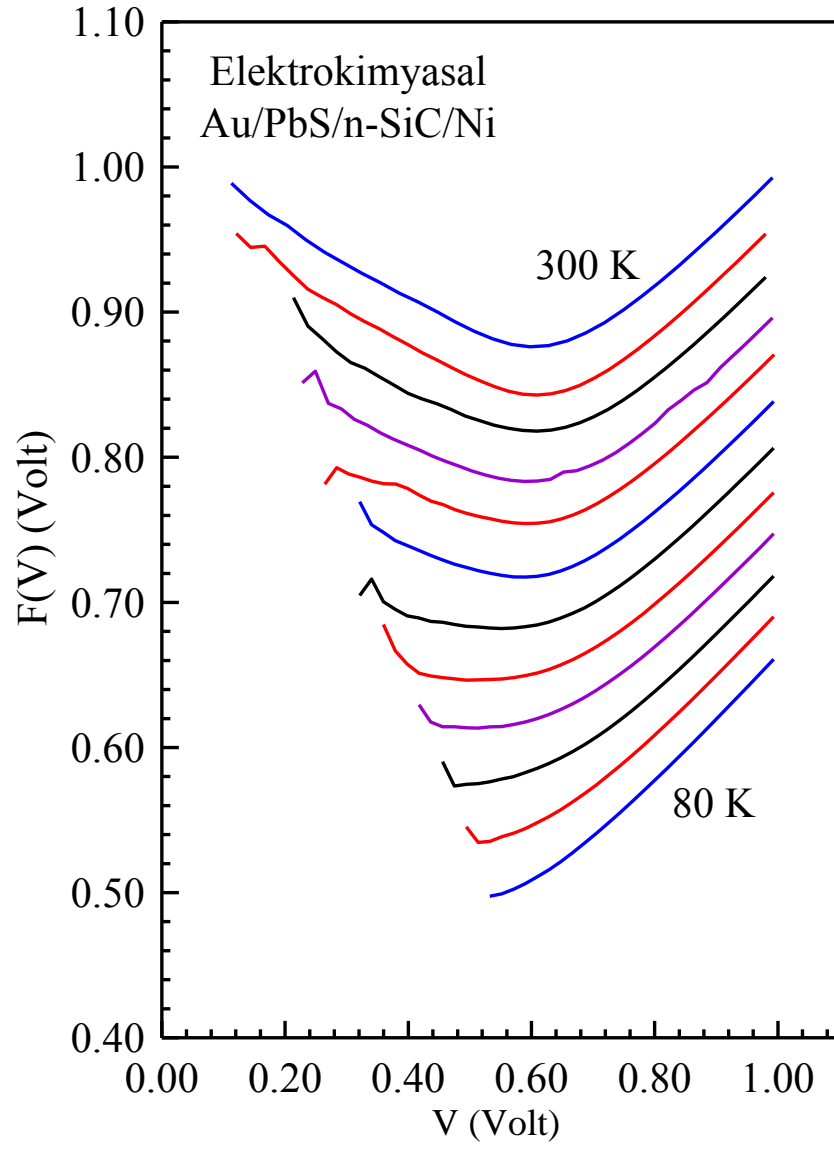
**Şekil 4.31.** Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait numune sıcaklığına bağlı Norde eğrileri

**Çizelge 4.6.** Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait Norde eğrilerinden elde edilen Engel yüksekliği ve Seri direnç değerleri

Sıcaklık (K)	Engel Yüksekliği (eV)	Seri direnç ( $\Omega$ )
80	0,366	21584260
100	0,4	21187150
120	0,435	24867440
140	0,524	1247553
160	0,557	37520,39
180	0,589	1563610
200	0,636	1822504
220	0,669	1707673
240	0,73	51328,374
260	0,77	166144,675
280	0,821	290264,423
300	0,849	75173,684



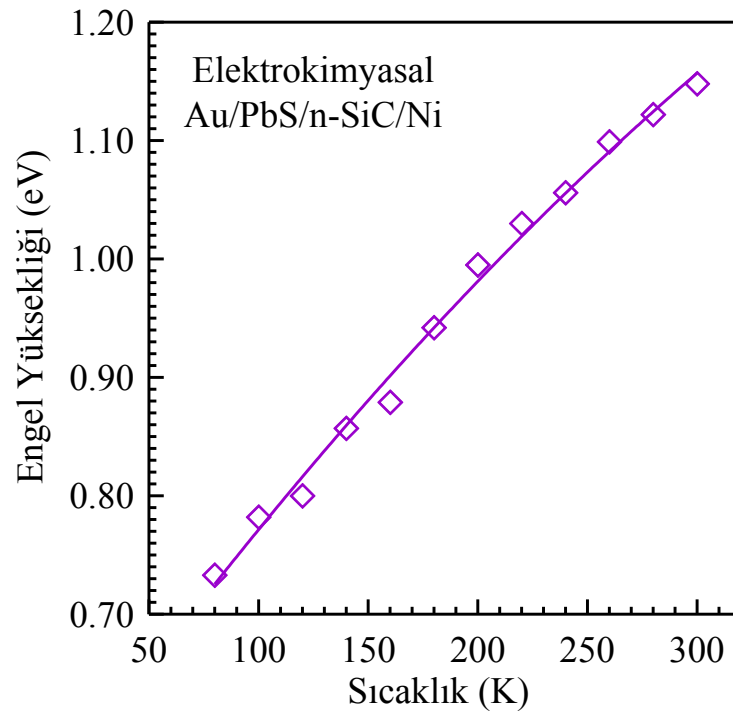
**Şekil 4.32.** Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodun Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.33. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait numune sıcaklığına bağlı Norde eğrileri

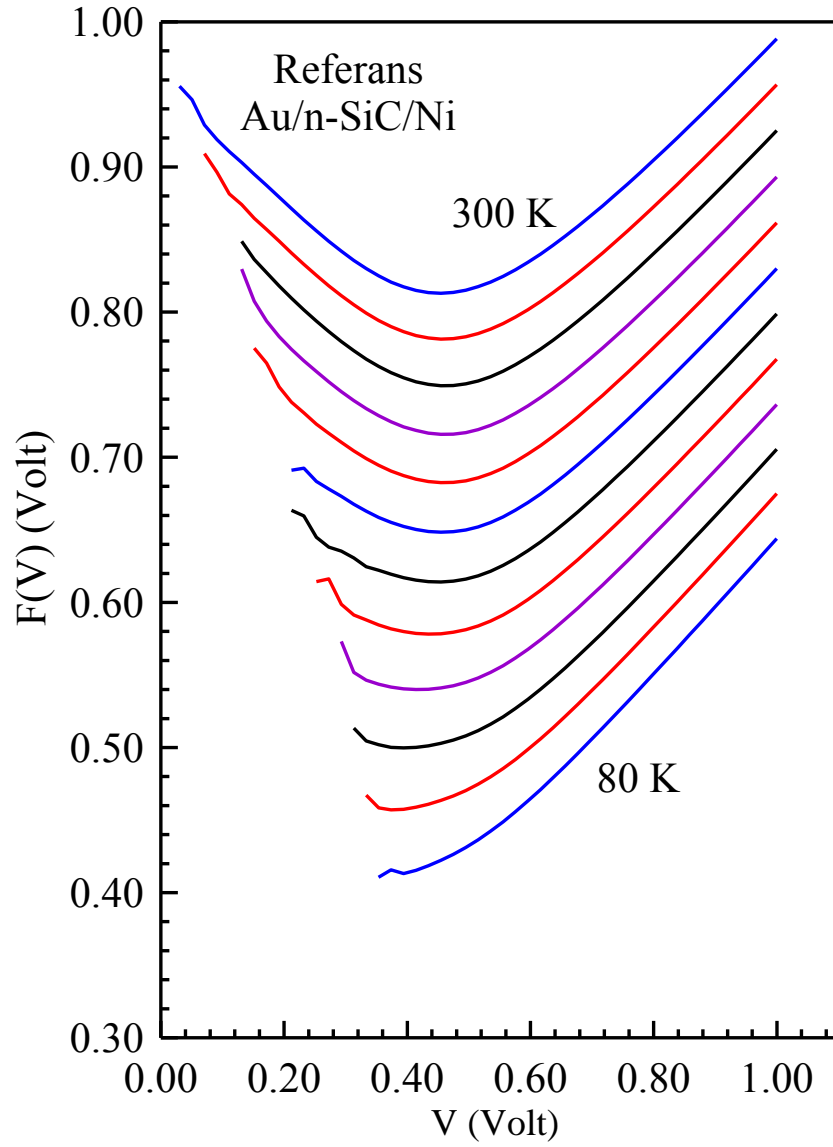
**Çizelge 4.7.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait Norde eğrilerinden elde edilen Engel yüksekliği ve Seri direnç değerleri

Sıcaklık (K)	Engel Yüksekliği (eV)	Seri direnç ( $\Omega$ )
80	0,733	47405830
100	0,782	39332250
120	0,8	27314550
140	0,857	2778978
160	0,879	48936,17
180	0,942	18932
200	0,995	5470
220	1,03	4173
240	1,056	2894
260	1,099	1349
280	1,122	753
300	1,148	723



**Şekil 4.34.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi

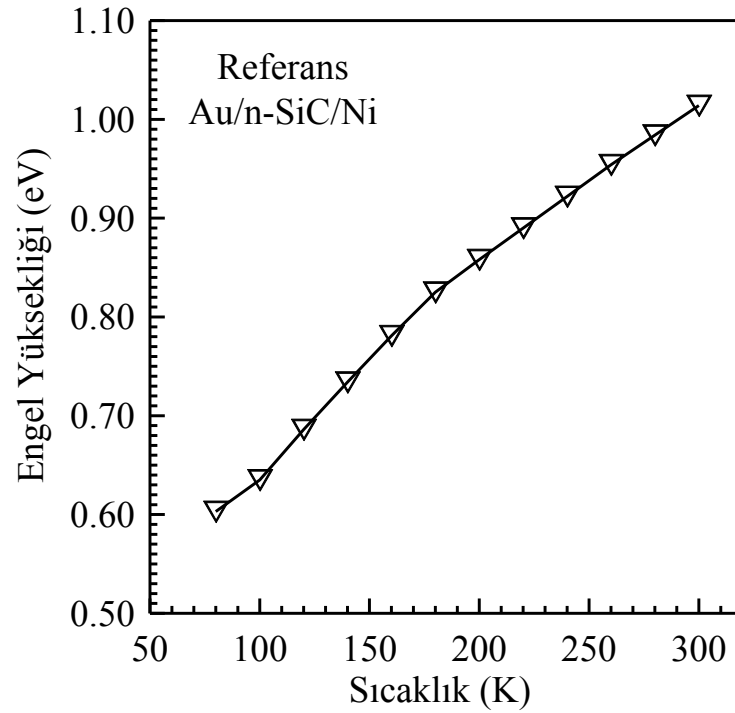




Şekil 4.35. Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait numune sıcaklığına bağlı Norde eğrileri

**Çizelge 4.8.** Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait Norde eğrilerinden elde edilen Engel yüksekliği ve Seri direnç değerleri

Sıcaklık (K)	Engel Yüksekliği (eV)	Seri direnç ( $\Omega$ )
80	0,603	31492310
100	0,635	14604360
120	0,686	2916331
140	0,734	14649,551
160	0,781	58508,771
180	0,825	17824,043
200	0,858	9973,534
220	0,89	6731,707
240	0,922	4327,707
260	0,954	2963,042
280	0,984	1995,675
300	1,014	1416,282



**Şekil 4.36.** Referans Au/n-SiC/Ni diyodun Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi

#### 4.4. C-V (Kapasite-Gerilim) Ölçümleri ile Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Schottky diyotlarda uzay yükü bölgesine ait kapasite ölçümleri metal/yarıiletken arayüzeyinin oluşumu hakkında önemli bilgiler verir. Kapasitenin ters beslem gerilimine bağlı olarak ölçülmesi durumunda, doğrultucu kontakta ait engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi hesaplanabilir (Wilmsen 1985).

Buharlaştırma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlarına ait Schottky kontakları dairesel olup, bu dairesel kontakların çapı 1 mm yani diyodun etkin alanı  $7,854 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 'dir. Ölçümler -3 Volt ile +1 Volt aralığında 50 mV adımlarla HP 4192 A, LF Impedence Analyzer cihazı ile yapıldı. Elde edilen ölçüler (4.15) eşitliği düzenlenerek değerlendirildi. Her bir diyot içinde 300 K'de 50 kHz için C-V ölçümleri sırası ile Şekil 4.37, 4.38, 4.39 ve 4.40'da,  $C^{-2}$ -V grafikleri ise Şekil 4.41, 4.42, 4.43 ve 4.44'de verilmiştir. Schottky diyotlar için kapasite-gerilim eşitliği;

$$C = A \left( \frac{\epsilon_s \epsilon_0 e N_d}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left( V_d - \frac{kT}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.14)$$

ifadesiyle verilir. Bu ifadede  $\epsilon_s$ ; yarıiletkenin dielektrik sabiti (SiC için 9,66; Pearton *et al.* 1999),  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$  olup, boşluğun elektriksel geçirgenliği,  $e$ ; elektronun yükü ( $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),  $V_d$ ; difüzyon potansiyeli,  $k$ ; Boltzmann sabiti ( $k = 8.625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ),  $N_d$ ; donör konsantrasyonu ve  $T$ ; Kelvin (K) cinsinden ortamın sıcaklığıdır. (4.14) eşitliği düzenlenecek olursa,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.15)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede  $V$  uygulama gerilimidir. ( $C^{-2}$ - $V$ ) grafiği çizildiğinde, grafiğe yapılacak lineer fit ile  $C^{-2}=0$  için  $V_d=V$  olur. Böylece difüzyon potansiyeli  $V_d$

elde edilir. Buharlaşma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlarına ait difüzyon potansiyelleri sırası ile 1,64, 1,79, 2,08 ve 1,76 eV olarak hesaplanmıştır.

(4.15) ifadesinin  $V$ 'ye göre türevi alınırsa,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \quad (4.16)$$

elde edilir. Bu ifadeden  $N_d$  çekilirse,

$$N_d = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.17)$$

bağıntısı elde edilir. Yine Buharlaşma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlarına ait oda sıcaklığında ( $C^2$ - $V$ ) grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonları sırası ile  $4,73 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $1,18 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2,06 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ve  $5,52 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Termal denge durumunda n-tipi bir yarıiletken için serbest taşıyıcı konsantrasyonu,

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.18)$$

ile verilmektedir. Bu ifadede,

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (4.19)$$

termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğudur. n-SiC için  $N_c = 8,9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dür. n-tipi bir yarıiletken için  $N_d \gg n_i$  olacağı için  $n_0 \approx N_d$  olur (Neamen 1992). Burada  $n_i$ , asal elektron konsantrasyonudur. Bu durumda (4.19) ifadesi,

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.20)$$

olarak elde edilir. (4.20) ifadesinin tabii logaritması alınır ve  $E_c=0$  yani iletkenlik bandı referans seviye olarak kabul edilirse, Fermi enerjisi;

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (4.21)$$

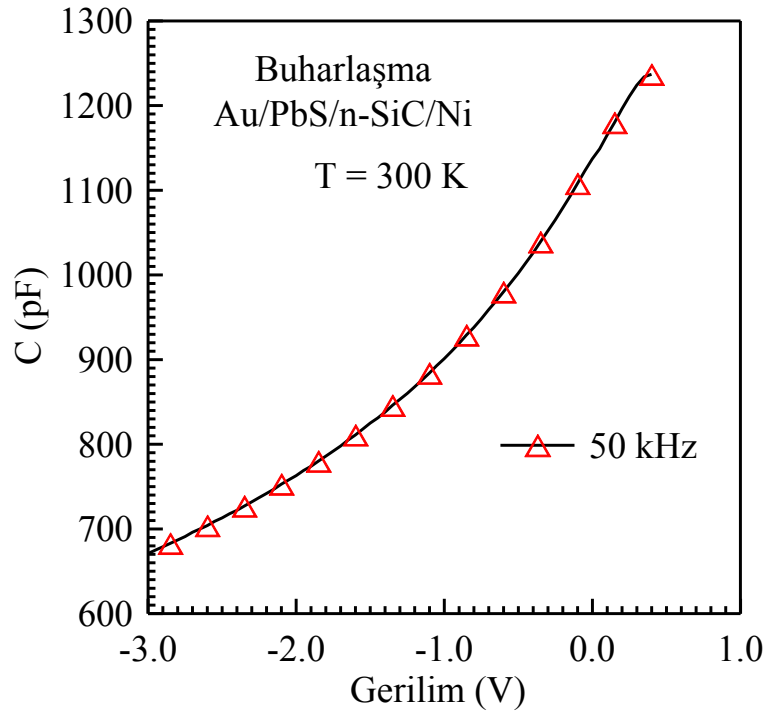
olarak elde edilir. Buharlaşma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlarına ait Fermi enerjileri sırası ile 0,084, 0,120, 0,110 ve 0,080 eV olarak bulunmuştur.  $C-V$  çiziminden elde edilecek engel yüksekliği,

$$\Phi_b = E_f + V_d \quad (4.22)$$

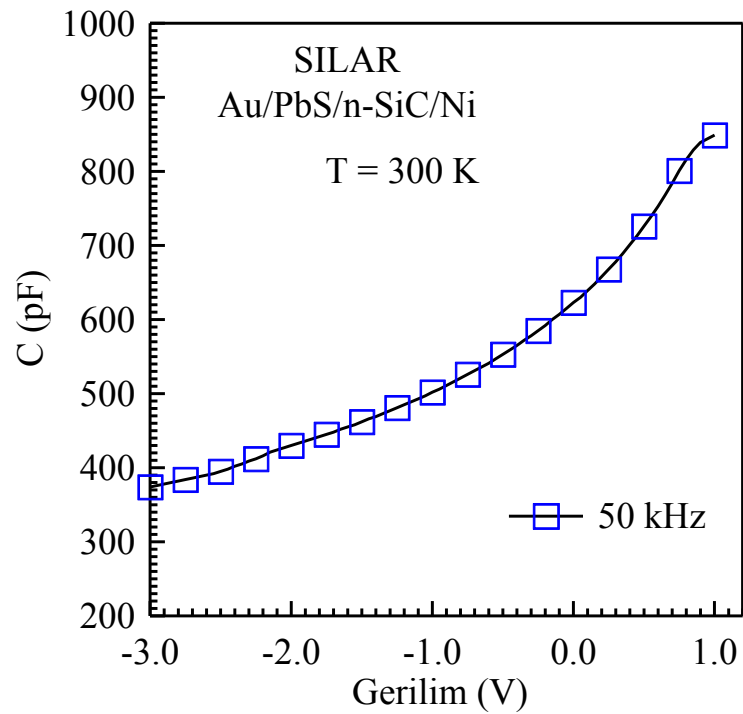
ile verilir. (4.22) ifadesi ideal bir diyot içindir. İdeal olmayan durum için bu ifade,

$$\Phi_b = \frac{V_d}{n} + E_f \quad (4.23)$$

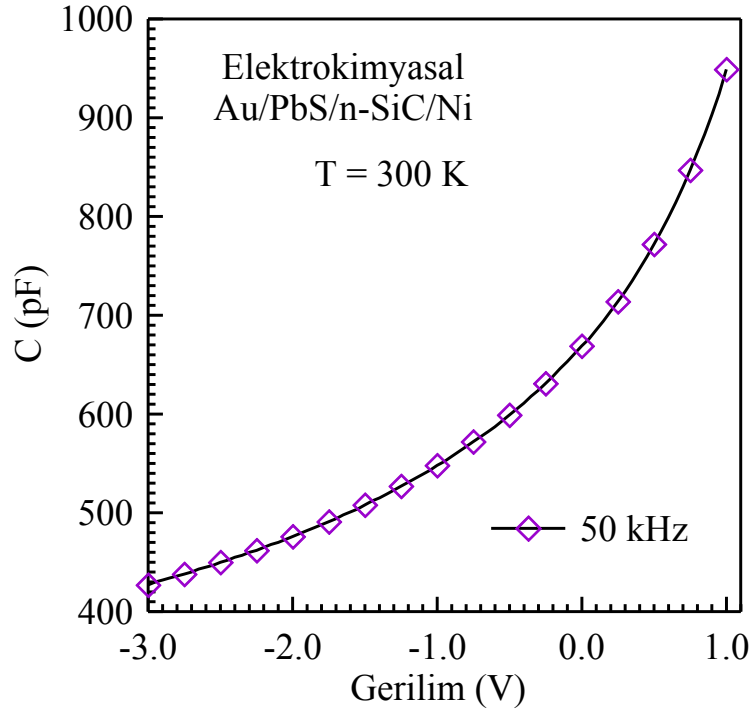
ile verilir. Son verilen ifadede elde edilen engel yüksekliği değerleri, düzeltilmiş engel yükseklikleri olarak adlandırılır. Buradaki  $n$  değeri,  $I-V$  grafiğinden elde edilen idealite faktörüdür. Yine elde edilen diyotlar için engel yüksekliği değerleri 1,73, 1,91, 2,18 ve 1,84 eV olarak bulunmuştur.



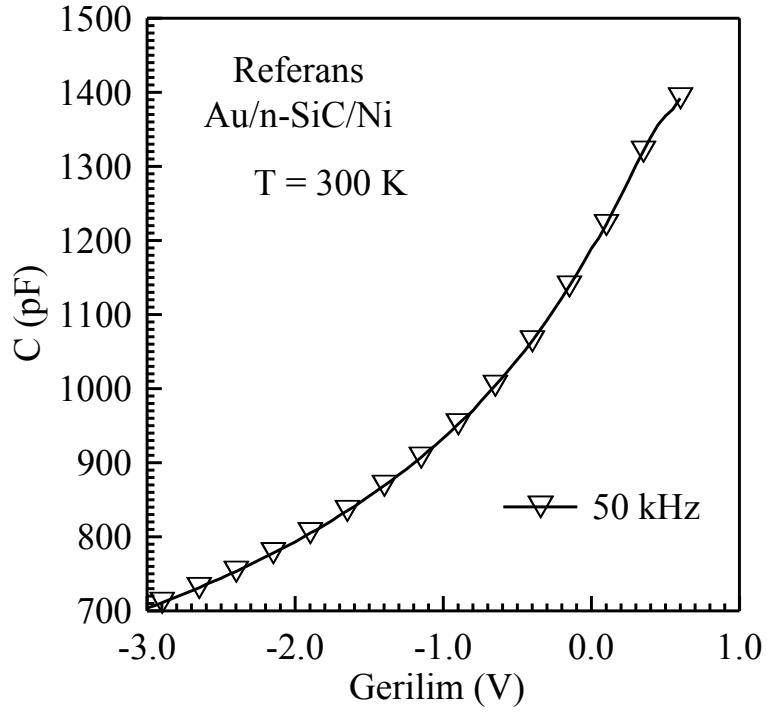
Şekil 4.37. Au/PbS (Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de C-V grafiği



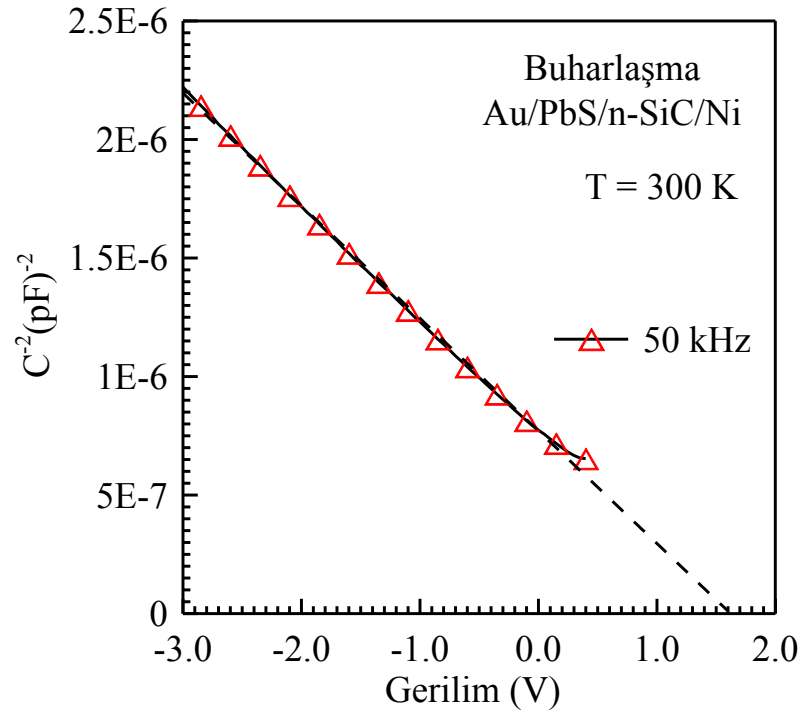
Şekil 4.38. Au/PbS (SILAR)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de C-V grafiği



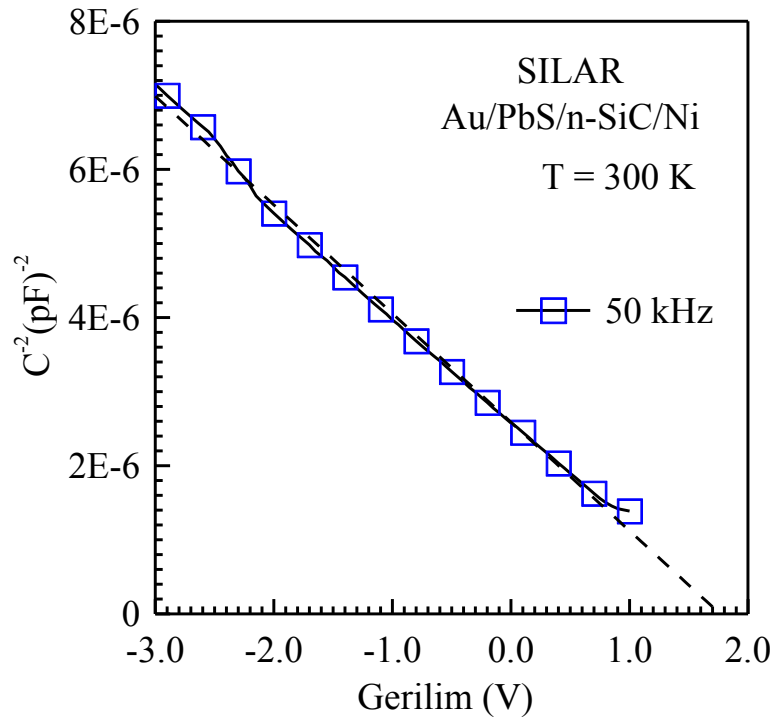
Şekil 4.39. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz’de C-V grafiği



Şekil 4.40. Referans Au/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz’de C-V grafiği

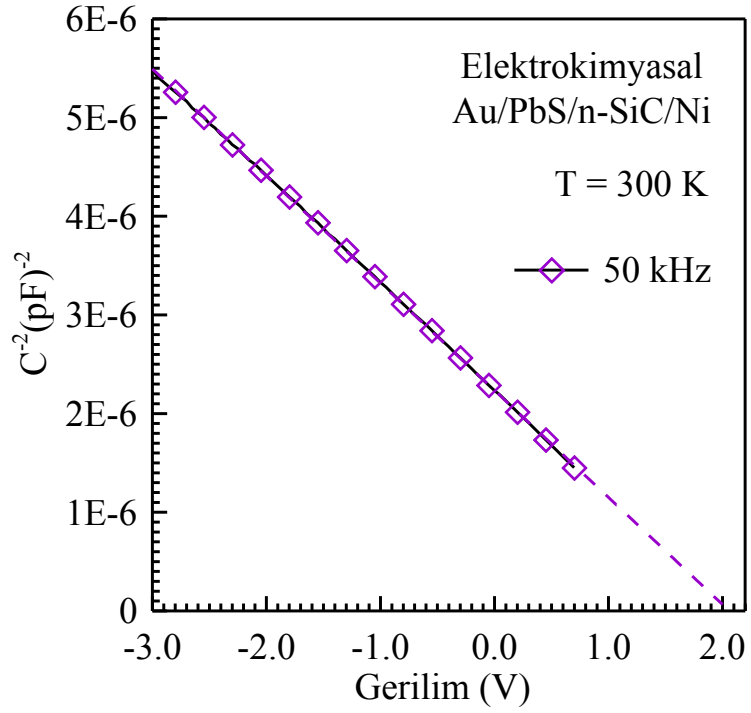


Şekil 4.41. Au/PbS (Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz’de  $1/C^2$ -V grafiği

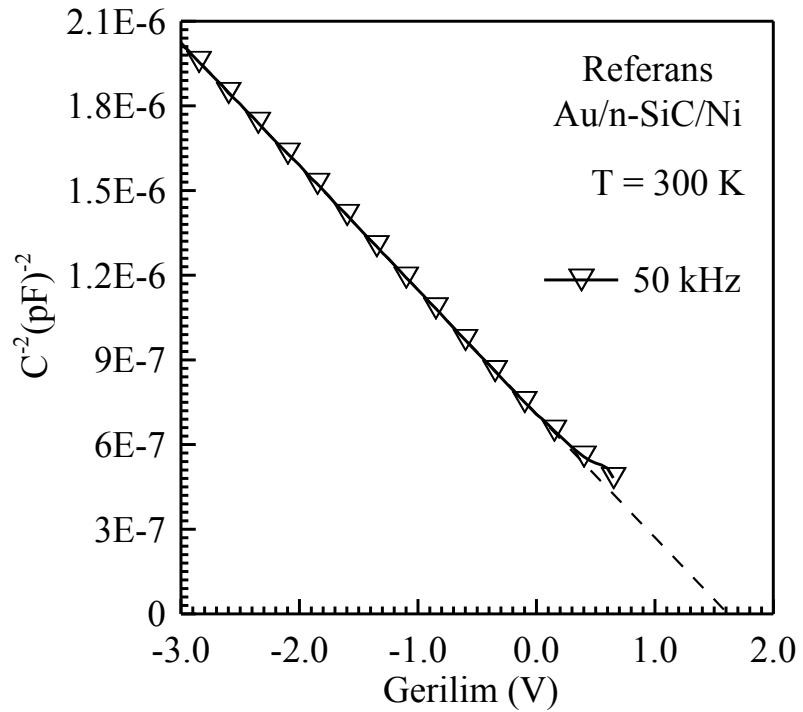


Şekil 4.42. Au/PbS (SILAR)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz’de  $1/C^2$ -V grafiği





Şekil 4.43. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de  $1/C^2$ -V grafiği



Şekil 4.44. Referans Au/n-SiC/Ni diyodun 50 kHz'de  $1/C^2$ -V grafiği

#### 4.5. Akım Gerilim Karakteristiklerinde Cheung Fonksiyonlarının Kullanılması

Cheung fonksiyonları kullanılarak, diyotların nötral bölge seri dirençlerinin yanı sıra idealite faktörleri ve engel yükseklikleri de sıcaklığa bağlı olarak elde edilmiştir.

$dV/d(\ln I)$ 'nın akıma karşı çizilen grafiği bir doğru vermektedir, bu doğrunun eğimi ve ordinat eksenini kesim noktası sırasıyla seri direnci ( $R_s$ ) ve idealite faktörü ( $n$ ) değerlerini verir. Ayrıca,  $H(I)-I$  grafiği de bir doğru vermektedir.  $dV/d(\ln I)-I$ 'den elde edilen idealite faktörü kullanılarak,  $H(I)-I$  grafiğindeki doğrunun  $I=0$  iken düşey eksenini kestiği nokta, diyodun Schottky engel yüksekliğini verir. Bu doğrunun eğimi ise yine seri direnç değerini vermektedir. Buharlaşma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlarına ait 300 K için  $dV/d(\ln I)-I$  ve  $H(I)-I$  çizimleri sırası ile Şekil 4.45, 4.46, 4.47 ve 48'de verilmiştir. Bu çizimlerden elde edilen idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerleri Buharlaşma ve SILAR'lı diyotlar için Çizelge 4.9'da, Elektrokimyasal ve Referans diyotlar için ise Çizelge 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.49, 4.50, 4.51 ve 4.52'de ise Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörünün, sıcaklığa bağlı değişimleri verilmiştir. Yine Şekil 4.53, 4.54, 4.55 ve 4.56'da ise Cheung fonksiyonlarından elde edilen engel yüksekliklerinin, sıcaklığa bağlı değişimleri verilmiştir. Ayrıca, bu çizimlerde geleneksel  $I-V$  çizimlerinden elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimleri ve Norde fonksiyonlarından elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimlerine de yer verilmiştir.

Bu çizimlerden görüldüğü gibi Cheung fonksiyonlarından elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi,  $I-V$  eğrilerinden elde edilenlerle benzer karakter göstermektedir.

Çizelge 4.9 ve 4.10'da Buharlaşma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotları için Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen seri direncin sıcaklıkla değişim değerleri görülmektedir. Her bir diyot içinde  $dV/d(\ln I)-I$ 'den elde edilen  $R_s$  değerleri  $H(I)-I$ 'den elde edilen  $R_s$  değerleri ile paralellik göstermektedir. Yine her bir diyot içinde oda

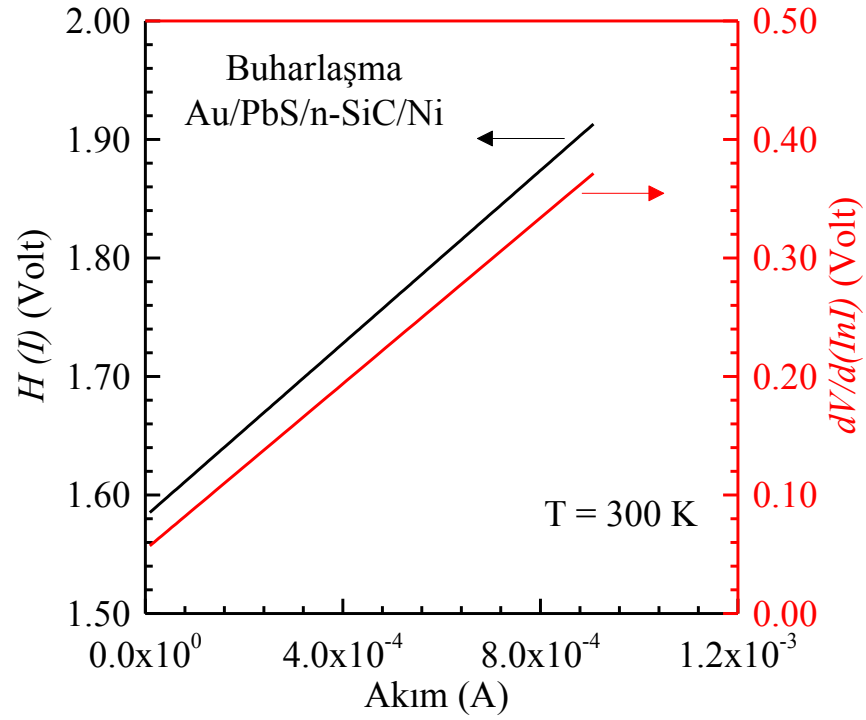
sıcaklığından düşük sıcaklıklara doğru inildikçe  $R_s$  değerinin artmakta olduğu görülmektedir. İdealite faktörü ve engel yükseklikleri ise geleneksel  $I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen değişime paralel bir karaktere sahiptir. Bu çizelgeler, değişik değerlendirme metotlarının arasında uyum olduğunu gösterir.

**Çizelge 4.9.** Au/PbS (Buharlaştırma)/n-SiC/Ni ve Au/PbS (SILAR)/n-SiC/Ni diyotlarına ait Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen diyot parametreleri

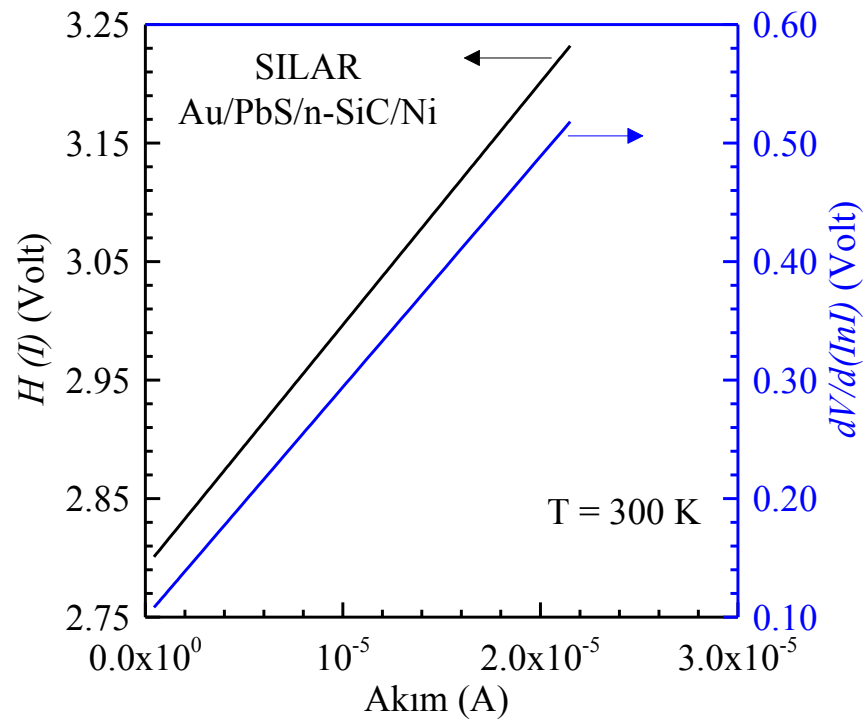
T (K)	Buharlaştırma Au/PbS/n-SiC/Ni				T (K)	SILAR Au/PbS/n-SiC/Ni			
	$dV/d\ln(I)$		$H(I)-I$			$dV/d\ln(I)$		$H(I)-I$	
	$n$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_b$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )		$n$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$\Phi_b$ (eV)	$R_s$ ( $\Omega$ )
300	2,08	349,77	0,760	363,77	300	3,85	$1,944 \times 10^4$	0,725	$2,046 \times 10^4$
280	2,12	326,60	0,720	342,15	280	4,65	$3,603 \times 10^4$	0,693	$3,941 \times 10^4$
260	2,19	339,59	0,680	351,13	260	4,95	$4,001 \times 10^4$	0,645	$4,391 \times 10^4$
240	2,21	382,80	0,645	388,84	240	5,27	$5,847 \times 10^4$	0,597	$6,309 \times 10^4$
220	2,26	430,07	0,609	441,01	220	5,90	$6,065 \times 10^4$	0,547	$6,579 \times 10^4$
200	2,45	501,88	0,562	514,35	200	7,44	$1,059 \times 10^5$	0,501	$1,168 \times 10^5$
180	2,64	619,87	0,516	636,17	180	8,26	$1,428 \times 10^5$	0,454	$1,562 \times 10^5$
160	2,91	851,41	0,468	874,17	160	9,91	$2,507 \times 10^5$	0,406	$2,810 \times 10^5$
140	3,28	1385,23	0,418	1423,93	140	10,87	$3,781 \times 10^5$	0,355	$4,188 \times 10^5$
120	3,86	2966,20	0,364	3051,70	120	12,83	$8,592 \times 10^5$	0,311	$9,533 \times 10^5$
100	4,47	5590,80	0,314	5772,10	100	14,32	$1,281 \times 10^6$	0,261	$1,416 \times 10^6$
80	6,01	35843	0,252	36963	80	18,65	$1,908 \times 10^6$	0,208	$2,074 \times 10^6$

**Çizelge 4.10.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni ve Referans Au/n-SiC/Ni diyotlarına ait Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen diyot parametreleri

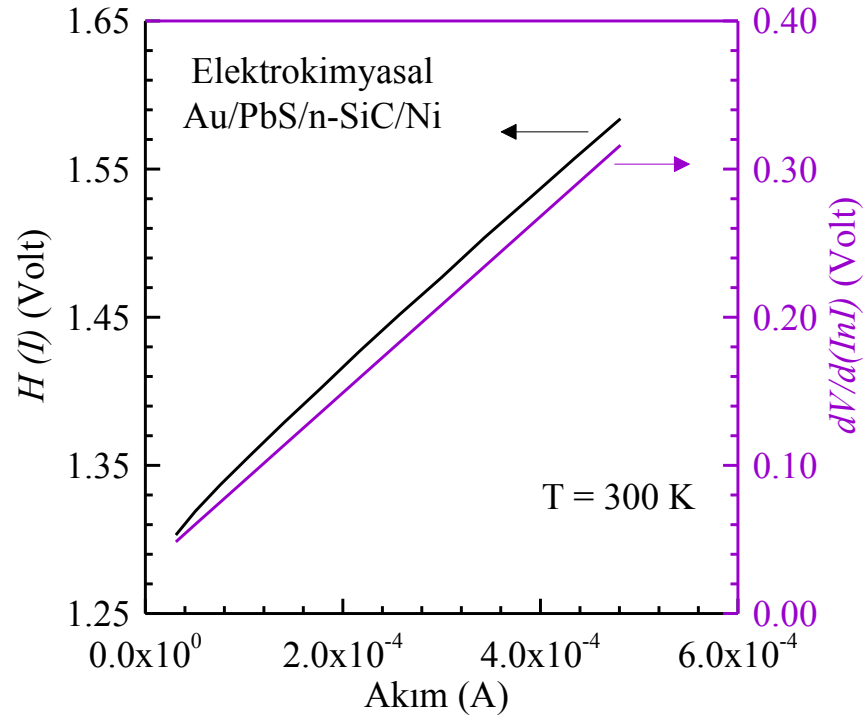
T (K)	Elektrokimyasal Au/PbS/n-SiC/Ni				T (K)	Referans Au/n-SiC/Ni			
	dV/dln(I)		H(I)-I			dV/dln(I)		H(I)-I	
	n	R <sub>s</sub> (Ω)	Φ <sub>b</sub> (eV)	R <sub>s</sub> (Ω)		n	R <sub>s</sub> (Ω)	Φ <sub>b</sub> (eV)	R <sub>s</sub> (Ω)
300	1,16	594,52	1,111	619,34	300	1,78	531,13	0,848	555,45
280	1,31	629,10	1,013	651,35	280	1,87	616,34	0,804	645,89
260	1,59	730,82	0,908	777,10	260	2,03	719,75	0,751	745,48
240	2,08	1203,77	0,780	803,63	240	2,14	853,49	0,706	900,82
220	2,26	1256,81	0,725	1362,08	220	2,37	1,035×10 <sup>3</sup>	0,650	1,099×10 <sup>3</sup>
200	2,56	1631,92	0,655	1779,28	200	2,59	1,304×10 <sup>3</sup>	0,598	1,389×10 <sup>3</sup>
180	2,71	2156,73	0,610	2402,91	180	2,85	1,744×10 <sup>3</sup>	0,546	1,872×10 <sup>3</sup>
160	3,12	3213,34	0,545	3636,81	160	3,26	2,452×10 <sup>3</sup>	0,487	2,645×10 <sup>3</sup>
140	3,51	6668,35	0,491	7577,15	140	3,81	3,698×10 <sup>3</sup>	0,427	4,010×10 <sup>3</sup>
120	4,23	1,57×10 <sup>4</sup>	0,424	1,81×10 <sup>4</sup>	120	4,59	6,383×10 <sup>3</sup>	0,366	6,959×10 <sup>3</sup>
100	5,40	5,83×10 <sup>4</sup>	0,355	6,81×10 <sup>4</sup>	100	5,60	1,356×10 <sup>4</sup>	0,308	1,494×10 <sup>4</sup>
80	6,82	3,05×10 <sup>5</sup>	0,295	3,50×10 <sup>5</sup>	80	7,60	3,548×10 <sup>4</sup>	0,245	3,964×10 <sup>4</sup>



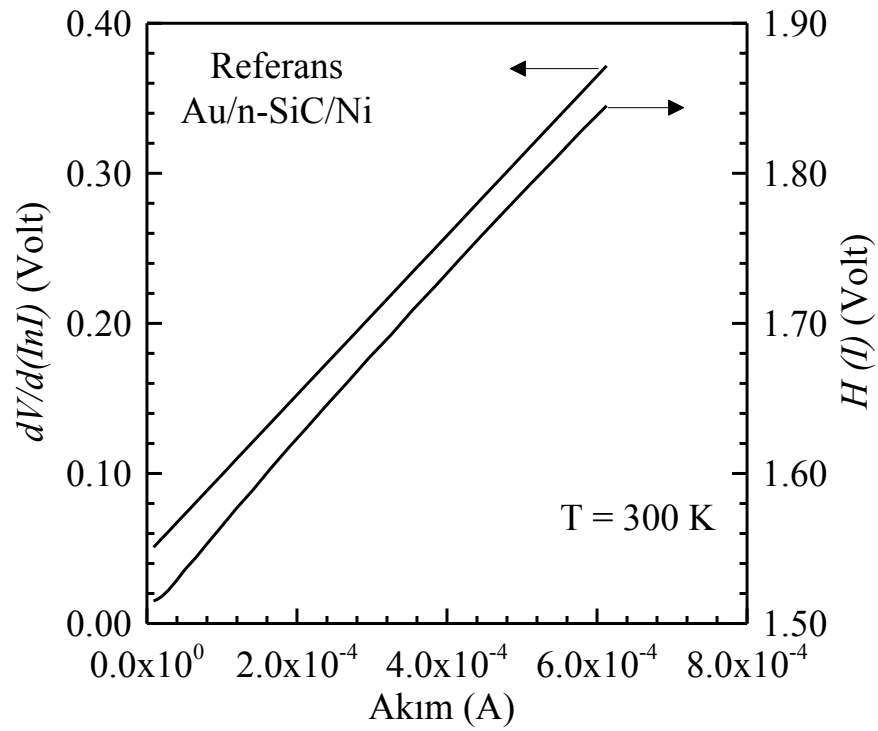
Şekil 4.45. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri



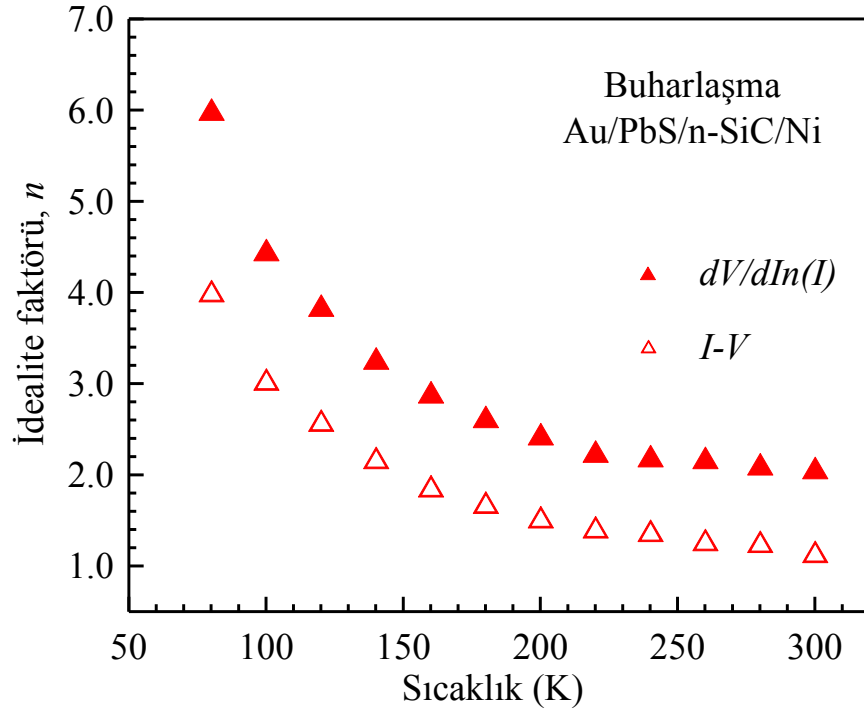
Şekil 4.46. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri



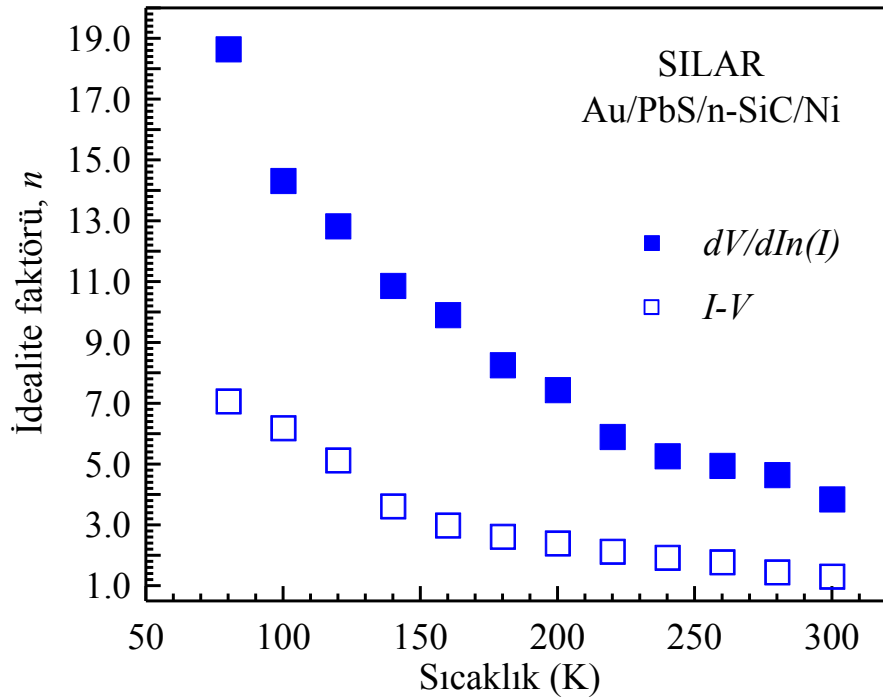
Şekil 4.47. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri



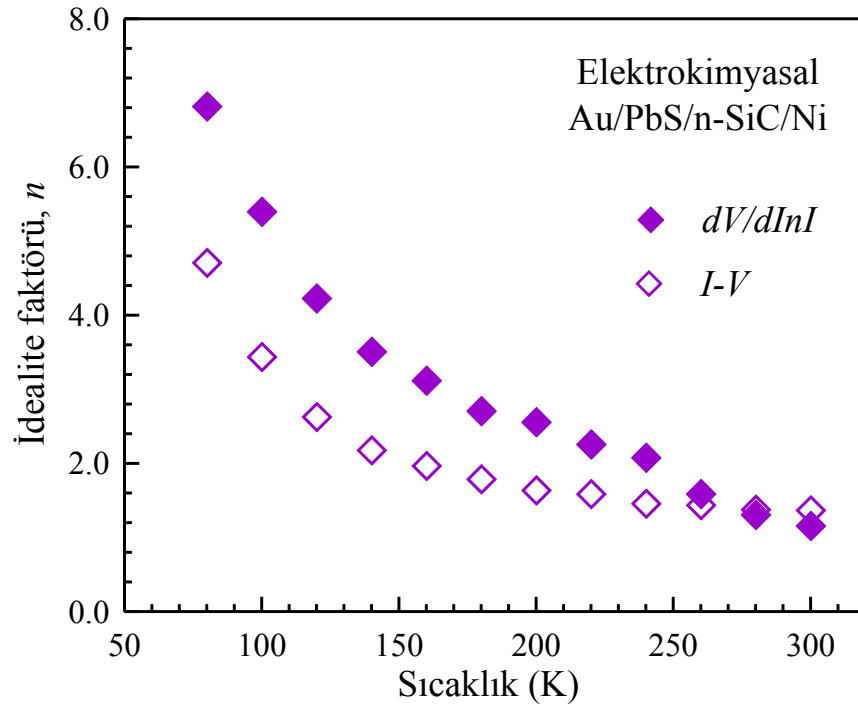
Şekil 4.48. Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait  $dV/d(\ln I)$ - $I$  ve  $H(I)$ - $I$  grafikleri



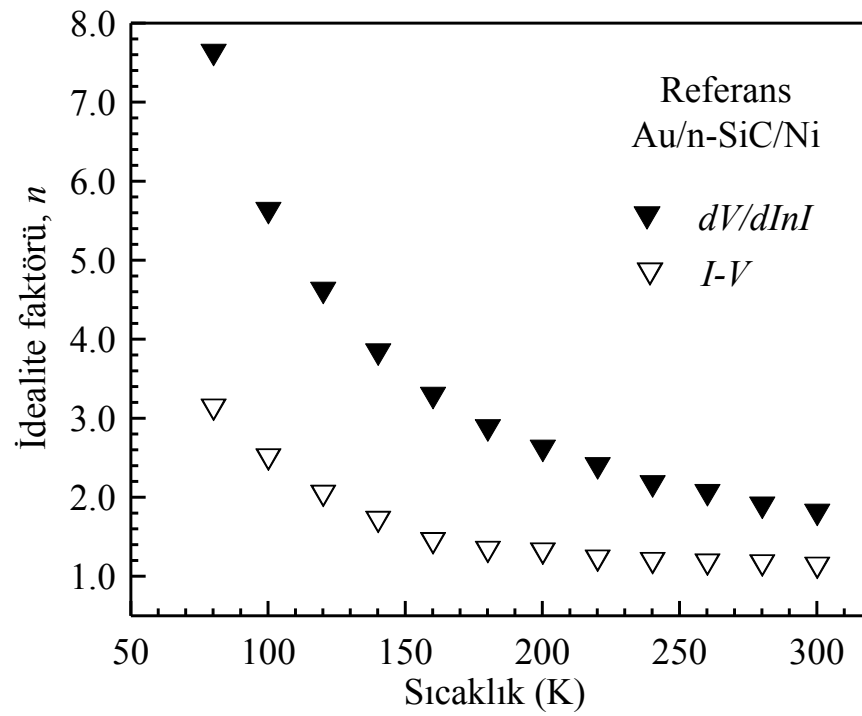
Şekil 4.49. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $I-V$  karakteristikleri ve Cheung fonksiyonundan elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.50. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $I-V$  karakteristikleri ve Cheung fonksiyonundan elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi

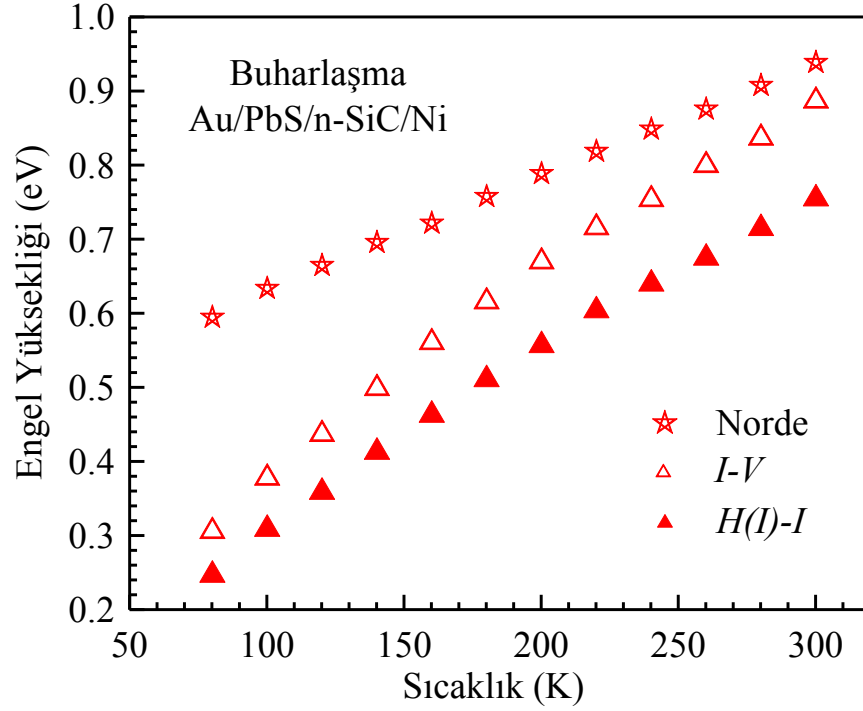


**Şekil 4.51.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $I-V$  karakteristikleri ve Cheung fonksiyonundan elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi

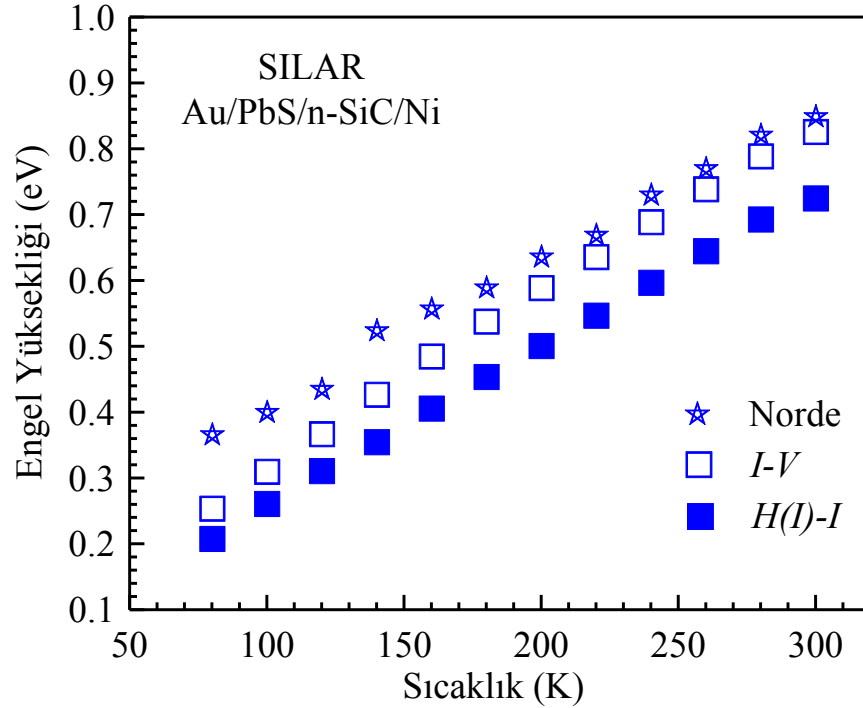


**Şekil 4.52.** Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait  $I-V$  karakteristikleri ve Cheung fonksiyonundan elde edilen idealite faktörlerinin sıcaklıkla değişimi

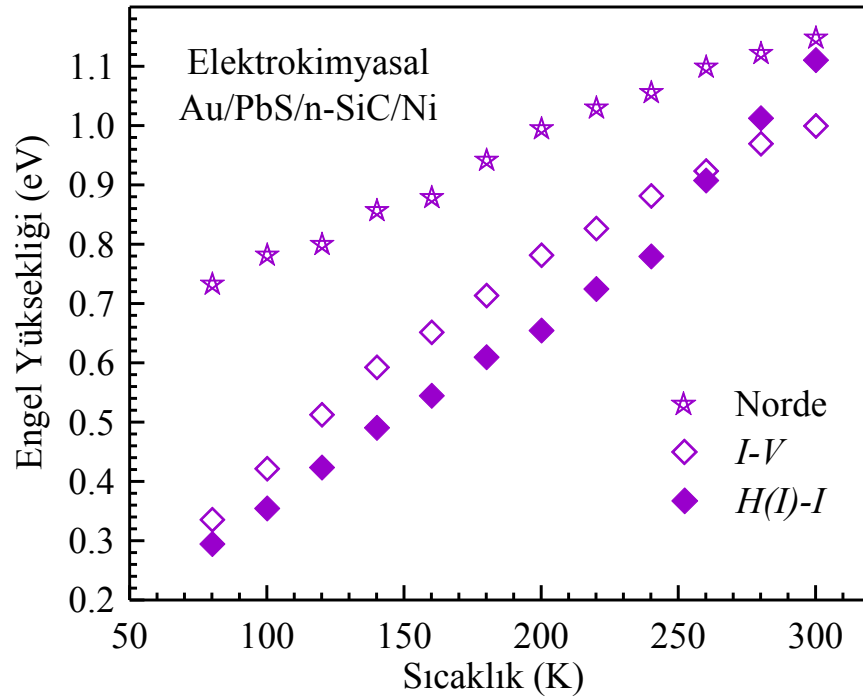




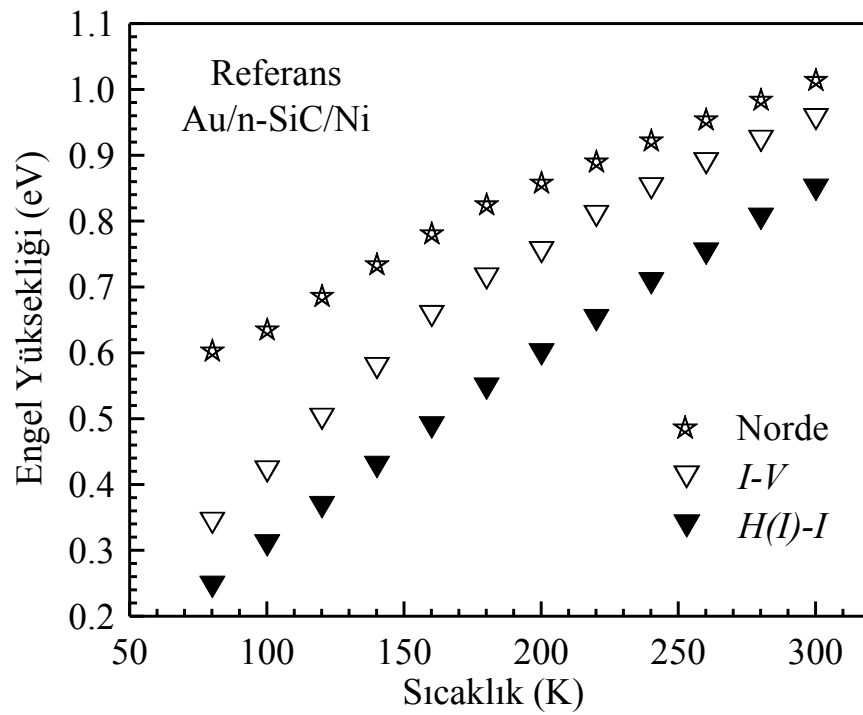
Şekil 4.53. Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $I-V$  karakteristikleri, Norde ve Cheung fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.54. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $I-V$  karakteristikleri, Norde ve Cheung fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.55. Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait  $I-V$  karakteristikleri, Norde ve Cheung fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.56. Referans Au/n-SiC/Ni diyoduna ait  $I-V$  karakteristikleri, Norde ve Cheung fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklıkla değişimi

#### 4.6. Arayüzey Hal Yoğunluğunun Hesaplanması

Yarıiletken kullanılarak üretilen Schottky diyotlarda metal-yarıiletken arasında kalınlığı 5~20Å olan ince ve yalıtkan bir oksit tabakası bulunur. Oluşan yapı metal-yarıiletken-den ziyade metal-yalıtkan-yarıiletken olarak adlandırılır. Yalıtkan tabaka boyunca potansiyel düşmesi nedeni ile sıfır beslem engel yüksekliği, ideal bir diyottakinden daha farklıdır. Schottky diyodun karakteristikleri üzerinde arayüzey durumlarının yoğunluğu önemli rol oynar. Bunun için, Buharlaşıma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans diyotlarına ait arayüzey durum yoğunlukları incelenmiştir. Arayüzey hal yoğunlukları, arayüzey enerjisinin fonksiyonu olarak  $I-V$  karakteristiklerinden hesaplandı. İdealite faktörünün gerilime bağlı değerinde seri direnç ifadesi de dikkate alınınca (Rhoderick and Williams 1988)

$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[ \frac{\varepsilon_s}{d} + qN_{ss}(V - IR_s) \right] \quad (4.24)$$

olur. Burada,  $\varepsilon_i$  ve  $\varepsilon_s$  sırası ile arayüzey tabakasının ve yarıiletkenin dielektrik sabitleri dir.  $d$ , uzay yükü bölgesi kalınlığı,  $N_{ss}$  ise yarıiletkenle dengede olan arayüzey hallerinin yoğunluğu olup,

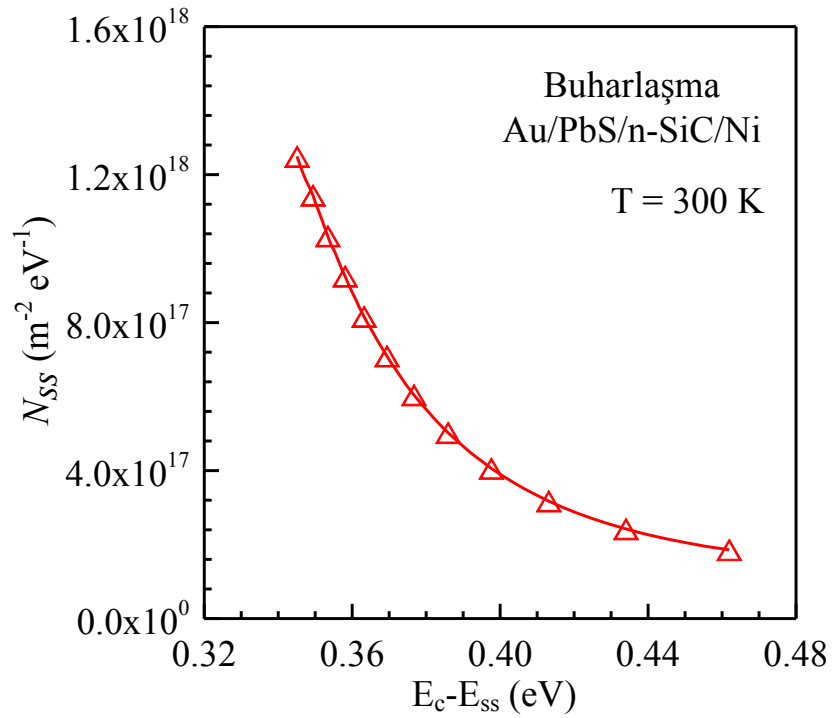
$$N_{ss} = \frac{1}{q^2} \left[ (n-1) \frac{\varepsilon_i}{\delta} \right] \quad (4.25)$$

denklemleri ile verilir. n-tipi bir yarıiletkende, iletkenlik bandı tabanına ( $E_c$ ) göre, arayüzey hallerinin enerjileri;

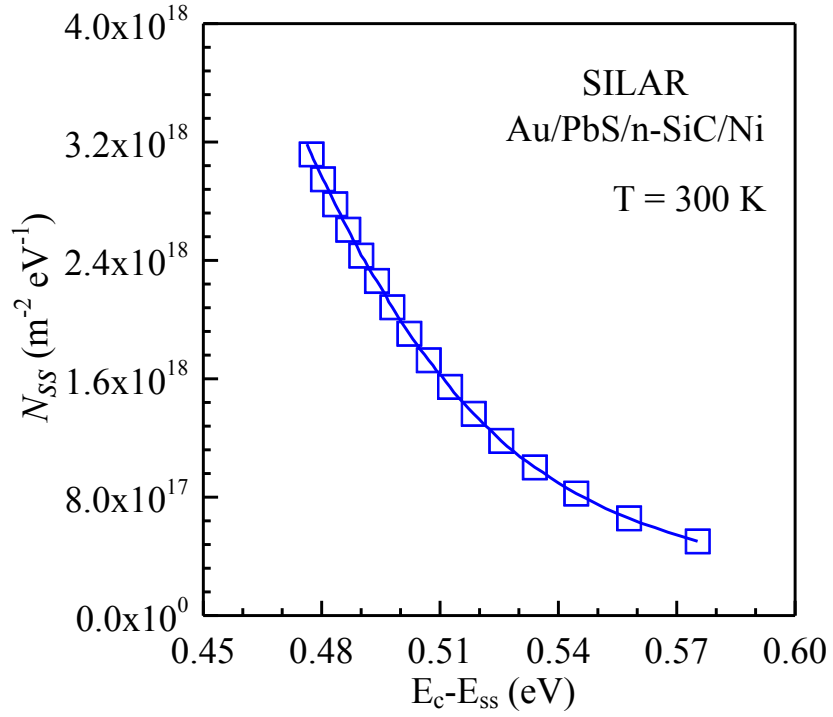
$$E_c - E_{ss} = q\Phi_e - q(V - IR_s) \quad (4.26)$$

olur. Böylece, Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'de verilen düz beslem  $I-V$  grafiklerinin deneysel verilerinden (4.25) ve (4.26) denklemleri kullanılarak, arayüzey hal yoğunlukları ve arayüzey hallerinin enerji dağılımları elde edilebilir (Şekil 4.57, 4.58, 4.59 ve 4.60).

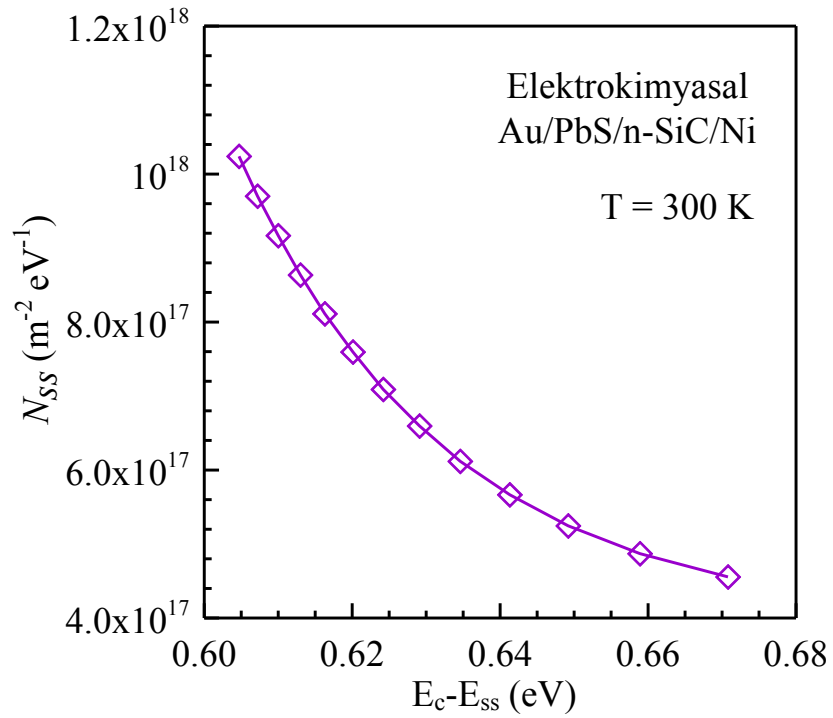
Elde edilen bu grafiklere göre Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait minimum arayüzey durum yoğunluğu 0,462 eV'ta  $1,86 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ , maximum arayüzey durum yoğunluğu 0,345 eV'ta  $1,25 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ . Bu değerler Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodu için minimum arayüzey durum yoğunluğu 0,575 eV'ta  $5,02 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ , maximum arayüzey durum yoğunluğu 0,476 eV'ta  $3,18 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ . Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodu için minimum arayüzey durum yoğunluğu 0,671 eV'ta  $4,55 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ , maximum arayüzey durum yoğunluğu 0,605 eV'ta  $1,02 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ . Son olarak referans diyot için minimum arayüzey durum yoğunluğu 0,489 eV'ta  $2,25 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ , maximum arayüzey durum yoğunluğu 0,384 eV'ta  $1,14 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ . Her bir diyoda ait en küçük ve en büyük arayüzey hal yoğunluğu ve karşılık gelen enerji değerleri Çizelge 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.



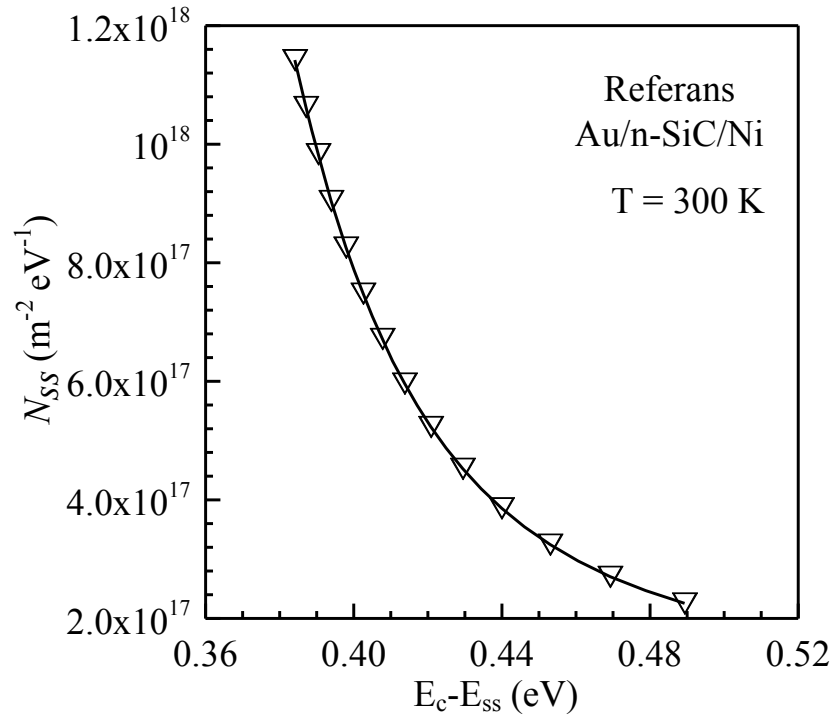
**şekil 4.57.** Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC/Ni diyoduna ait arayüzey durum yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimi



**Şekil 4.58.** Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyoduna ait arayüzey durum yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimi



**Şekil 4.59.** Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyoduna ait arayüzey durum yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimi



**Şekil 4.60.** Referans Au/n-SiC/Ni dioduna ait arayüzey durum yoğunluğunun arayüzey hal enerjisi ile değişimi

**Çizelge 4.11.** Au/PbS (Buharlaşma)/n-SiC/Ni ve Au/PbS (SILAR)/n-SiC/Ni diyotlarına ait en küçük ve en büyük arayüzey hal yoğunluğu ve karşı gelen enerji değerleri.

T (K)	Au/PbS(Buharlaşma)/n-SiC				Au/PbS(SILAR)/n-SiC			
	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )
	$X_{min.}$	$Y_{max.}$	$X_{max.}$	$Y_{min.}$	$X_{min.}$	$Y_{max.}$	$X_{max.}$	$Y_{min.}$
300	0,345	$1,25 \times 10^{14}$	0,462	$1,86 \times 10^{13}$	0,476	$3,18 \times 10^{14}$	0,575	$5,02 \times 10^{13}$
280	0,326	$1,37 \times 10^{14}$	0,436	$2,88 \times 10^{13}$	0,455	$3,36 \times 10^{14}$	0,546	$7,50 \times 10^{13}$
260	0,290	$1,47 \times 10^{14}$	0,390	$3,33 \times 10^{13}$	0,428	$3,80 \times 10^{14}$	0,515	$9,32 \times 10^{13}$
240	0,268	$1,73 \times 10^{14}$	0,365	$4,22 \times 10^{13}$	0,396	$4,20 \times 10^{14}$	0,472	$1,15 \times 10^{14}$
220	0,241	$1,80 \times 10^{14}$	0,332	$4,76 \times 10^{13}$	0,360	$4,58 \times 10^{14}$	0,428	$1,36 \times 10^{14}$
200	0,211	$1,94 \times 10^{14}$	0,292	$5,94 \times 10^{13}$	0,333	$5,21 \times 10^{14}$	0,390	$1,72 \times 10^{14}$
180	0,191	$2,18 \times 10^{14}$	0,265	$7,63 \times 10^{13}$	0,301	$5,80 \times 10^{14}$	0,356	$1,87 \times 10^{14}$
160	0,169	$2,46 \times 10^{14}$	0,236	$9,59 \times 10^{13}$	0,271	$6,77 \times 10^{14}$	0,319	$2,26 \times 10^{14}$
140	0,154	$2,93 \times 10^{14}$	0,214	$1,28 \times 10^{14}$	0,238	$7,95 \times 10^{14}$	0,276	$3,01 \times 10^{14}$
120	0,135	$3,55 \times 10^{14}$	0,183	$1,71 \times 10^{14}$	0,219	$1,03 \times 10^{15}$	0,252	$4,39 \times 10^{14}$
100	0,115	$4,12 \times 10^{14}$	0,156	$2,20 \times 10^{14}$	0,183	$1,22 \times 10^{15}$	0,212	$5,48 \times 10^{14}$
80	0,100	$5,90 \times 10^{14}$	0,128	$3,25 \times 10^{14}$	0,143	$1,51 \times 10^{15}$	0,163	$7,18 \times 10^{14}$

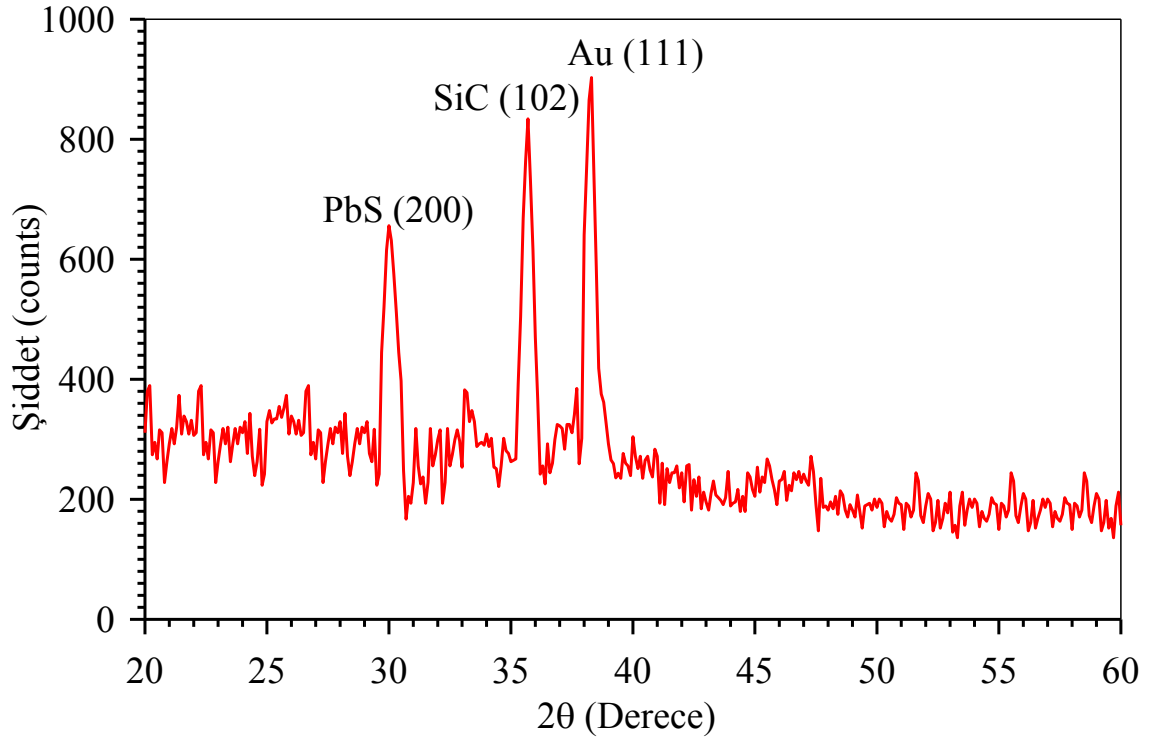
**Çizelge 4.12.** Au/PbS (Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni ve Referans Au/n-SiC/Ni diyotlarına ait en küçük ve en büyük arayüzey hal yoğunluğu ve karşı gelen enerji değerleri.

T (K)	Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni				Referans Au/n-SiC/Ni			
	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )	$E_c-E_{ss}$ (eV)	$N_{ss}$ ( $eV^{-1}cm^{-2}$ )
	$X_{min.}$	$Y_{max.}$	$X_{max.}$	$Y_{min.}$	$X_{min.}$	$Y_{max.}$	$X_{max.}$	$Y_{min.}$
300	0,605	$1,02 \times 10^{14}$	0,671	$4,55 \times 10^{13}$	0,384	$1,14 \times 10^{14}$	0,489	$2,25 \times 10^{13}$
280	0,506	$9,98 \times 10^{13}$	0,581	$4,36 \times 10^{13}$	0,342	$1,15 \times 10^{14}$	0,436	$2,52 \times 10^{13}$
260	0,418	$1,06 \times 10^{14}$	0,497	$5,15 \times 10^{13}$	0,289	$1,19 \times 10^{14}$	0,374	$2,78 \times 10^{13}$
240	0,297	$1,12 \times 10^{14}$	0,376	$5,43 \times 10^{13}$	0,250	$1,22 \times 10^{14}$	0,344	$2,73 \times 10^{13}$
220	0,272	$1,27 \times 10^{14}$	0,339	$6,72 \times 10^{13}$	0,205	$1,28 \times 10^{14}$	0,288	$3,31 \times 10^{13}$
200	0,215	$1,34 \times 10^{14}$	0,271	$7,32 \times 10^{13}$	0,176	$1,41 \times 10^{14}$	0,256	$4,16 \times 10^{13}$
180	0,205	$1,55 \times 10^{14}$	0,275	$8,77 \times 10^{13}$	0,133	$1,46 \times 10^{14}$	0,210	$4,43 \times 10^{13}$
160	0,171	$1,77 \times 10^{14}$	0,232	$1,07 \times 10^{14}$	0,100	$1,63 \times 10^{14}$	0,165	$5,72 \times 10^{13}$
140	0,148	$2,02 \times 10^{14}$	0,200	$1,31 \times 10^{14}$	0,087	$2,01 \times 10^{14}$	0,140	$8,51 \times 10^{13}$
120	0,132	$2,57 \times 10^{14}$	0,170	$1,81 \times 10^{14}$	0,073	$2,50 \times 10^{14}$	0,115	$1,21 \times 10^{14}$
100	0,126	$3,56 \times 10^{14}$	0,154	$2,67 \times 10^{14}$	0,064	$3,22 \times 10^{14}$	0,101	$1,68 \times 10^{14}$
80	0,123	$5,10 \times 10^{14}$	0,136	$4,32 \times 10^{14}$	0,048	$4,24 \times 10^{14}$	0,074	$2,41 \times 10^{14}$

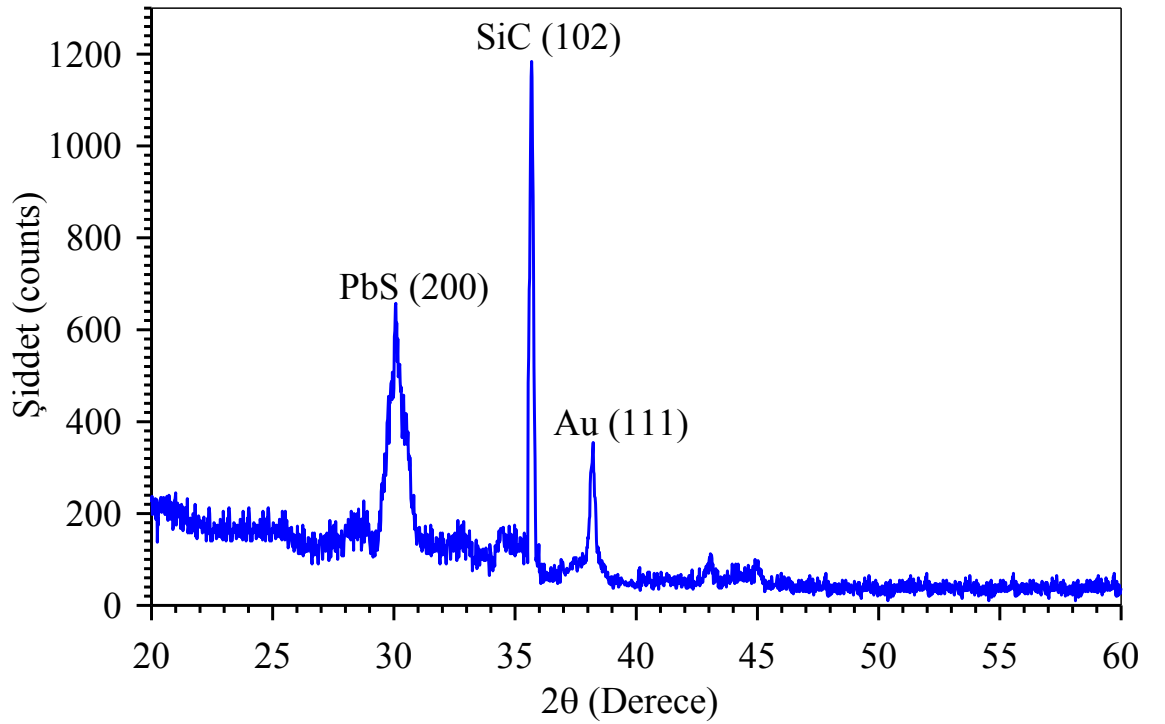
#### 4.7. PbS Arayüzeyli Diyotların XRD Ölçümleri

Buharlaştırma, SILAR ve Elektrokimyasal yöntemler ile oluşturulan PbS ince filmlerinin kristal yapı tayinleri, Cu  $K\alpha$  ( $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$ ) dalga boyuna sahip X-ışını kullanan Rigaku marka X-ışını kırınım cihazı ile  $2\theta = 20 - 60^\circ$  aralığında alındı. Numunelere ait XRD sonuçları sırası ile Şekil 4.61, 4.62 ve 4.63’de verilmiştir. Bu piklere ait şiddet ve açı değerleri Çizelge 4.13’de verilmiştir.  $2\theta$  ile gösterilen değerler, ilgili film ve metalden kaynaklanan yansıma açılarını vermektedir.  $d$ , yansıma düzlemleri arasındaki uzaklıktır. Şiddet ise saniye başına sayma (cps) biriminde verilmektedir.

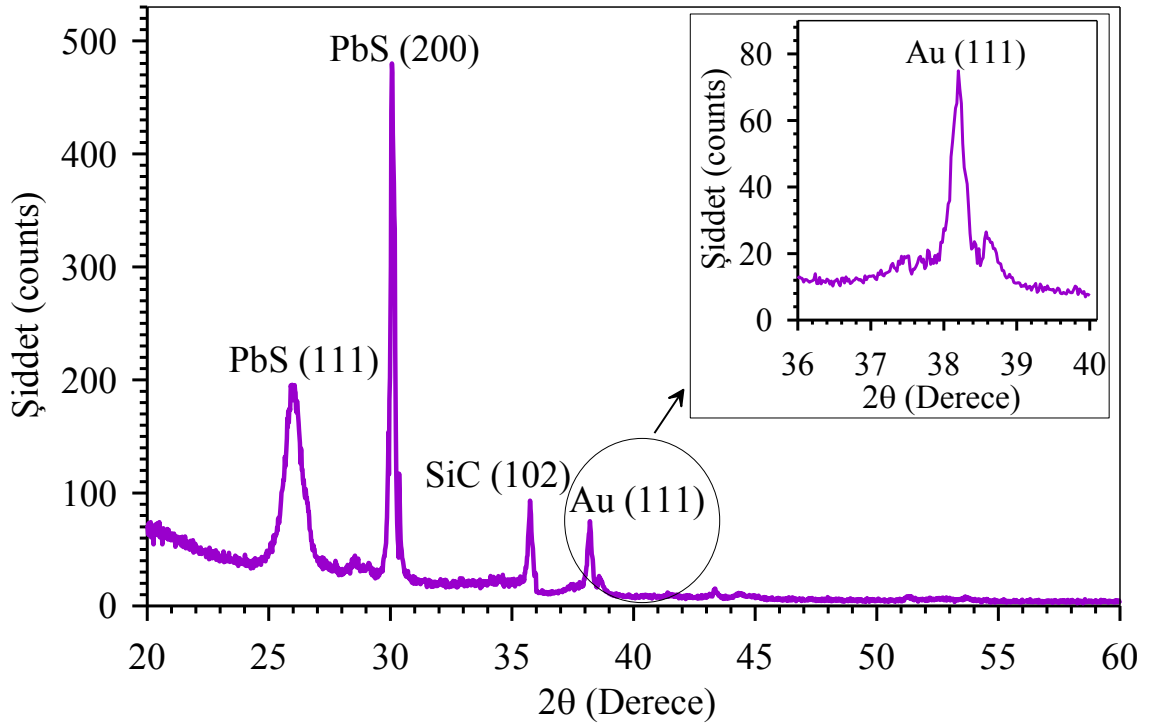




Şekil 4.61. Buharlaştırma ile PbS arayüzeyi oluşturulan diyoda ait XRD sonucu



Şekil 4.62. SILAR ile PbS arayüzeyi oluşturulan diyoda ait XRD sonucu



Şekil 4.63. Elektrokimyasal ile PbS arayüzeyi oluşturulan diyoda ait XRD sonucu

Çizelge 4.13. PbS ince filmlerine ve Schottky metaline ait X-ışını kırınım verileri

Numune	2θ (Ölçülen)	$d(\text{Å})$ Standart	$d(\text{Å})$ Ölçülen	$hkl$	Şiddet Ölçülen
PbS (Buharlaşma)	30,100	2,9690	2,9663	200	632
PbS (SILAR)	30,080	2,9690	2,9682	200	1184
PbS (Elektrokimyasal)	25,960	3,4290	3,4290	111	196
	30,060	2,9690	2,9702	200	480
PbS (Buharlaşma)	35,700	2,5162	2,5128	102	834
PbS (SILAR)	35,680	2,5162	2,5142	102	1184
PbS (Elektrokimyasal)	35,740	2,5162	2,5101	102	93
Au (Buharlaşma)	38,300	2,3550	2,3480	111	902
Au (SILAR)	38,220	2,3550	2,3527	111	354
Au (Elektrokimyasal)	38,200	2,3550	2,3554	111	75

Numunelerin X-ışını kırınım verileri  $2\theta=20-60^{\circ}$  aralığında alındı. Choudhury and Sarma yapmış oldukları çalışmada PbS ince filmin  $2\theta=30,11^{\circ}$ 'de (200) düzleminden yansıma elde etmişlerdir ve  $d=2,97 \text{ \AA}$  olarak bulmuşlardır (Choudhury and Sarma 2009). Ayrıca, Şekil 4.63'de PbS'ün  $2\theta=25,96^{\circ}$ 'de (111) düzleminden yansıma elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatürde verilen sonuçlarla uyum içindedir (Chaudhuri *et al.* 2005; Seghaier *et al.* 2006). Her bir numune için de XRD ölçümlerinden SiC kristaline ait  $d$  değerleri sırası ile 2,513; 2,514 ve 2,510  $\text{\AA}$  olarak elde edilmiştir. Bu değerler literatürde verilen  $d(\text{\AA})=2,5162$  değer ile uyuşmaktadır (JCPDS Card No. 29-1128). Ayrıca, Şekil 4.61, 4.62 ve 4.63'de  $2\theta$  sırası ile 38,3000, 38,2200 ve 38,2000'de (111) düzleminden yansıma elde edilmiştir ve bu düzlemler arası mesafe  $d=2,3480, 2,3527$  ve  $2,3554 \text{ \AA}$  olarak bulunmuştur. Bu değerler de literatürde verilen  $d=2,355 \text{ \AA}$  değeri ile uyuşmaktadır (JCPDS Kart No. 4-0784). Çizelge 4.13'den görüleceği gibi düzlemler arası mesafelerde çok küçük farklılıklar vardır. Buna büyütme esnasında meydana gelen kusurların neden olduğunu söyleyebiliriz. Yine düzlemler arası mesafelerdeki farklılıklar yapıda bulunan kusurlara atfedilebilmektedir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Elektronik devre elemanlarının temelini teşkil eden Schottky diyotlar, genelde hızlı anahtarlama uygulamaları, güneş pilleri ve çeşitli dedektörler için kullanılmaktadırlar. Schottky diyotların karakteristikleri sıcaklık, tavlama, plastik deformasyon ve hidrostatik basınç gibi etkilerle değişebilir. İstenen Schottky engel yüksekliği, aygıtın dış etkenlere karşı kararlılığı, idealite faktörü ve seri direnç gibi parametrelerin kullanım alanına göre istenilen özellikte ve değerde oluşturulması gerekir.

Schottky diyotların istenen özelliklerde olması için gerek fabrikasyon aşamasından kaynaklanan, gerekse de kullanılan metal ve yarıiletkenlerin özelliklerinden kaynaklanan tüm etkiler ayrı birer araştırma konusu olmuştur. Elektronik devre aygıt tasarımındaki gelişmeler fabrikasyon teknikleri ve kullanılan malzemelerin elektriksel özelliklerinin önemini ortaya koymuştur. Bu bakımdan diyot üretiminde, diyodun kullanılacağı şartlara bağlı olarak, uygun malzemeyi ve uygun üretim tekniğini seçmek gerekmektedir. Kontak özelliklerinin yeniden oluşturulabilmesi ve bu özelliklerin kararlılığı, yüksek kalitede Schottky diyotların üretilmesine imkân sağlamaktadır. Seçilen malzemeyle birlikte üretimde kullanılan metodun da diyot performansı açısından önemi büyüktür.

Düşük sızıntı akımı, yüksek kırılma elektrik alan, iyi termal iletkenlik ve yüksek termal kararlılık SiC'in bazı avantajlarıdır. Bu avantajlar SiC yarıiletkenini yüksek sıcaklık ve yüksek voltaj uygulamalarında oldukça etkin kılmaktadır. SiC-altlıklı aygıtlarda metal/yarıiletken (MY) kontak önemli bir konudur. Yenilenebilir aygıtlar elde etmek için MY arayüzeyinin anlaşılma ve kontrol edilebilmesi gerekmektedir.

Buharlaştırma, SILAR ve Elektrokimyasal yöntemleri ile PbS arayüzeyli ve arayüzeysiz Referans diyotlar imal edildi. Bu diyotların imali için  $330 \pm 25$  µm kalınlıklı n-tipi 6H-SiC

kristali kullanıldı. 2 inç çaplı dilimden kesilen yaklaşık  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  boyutlarındaki kristaller 3. Bölüm’de belirtilen kimyasal işlemler ile temizlendikten sonra, numunenin omik kontak yapılacak mat yüzeyine, metal kaplama vakum sistemi içerisinde ısıtıcı üzerine yerleştirilmiş olan Ni metali buharlaştırıldı. Numune  $950^{\circ}\text{C}$ ’ye ayarlanmış fırında 5 dakika tavlandı. Daha sonra omik kontaklı numunelerden birinin parlak yüzeyine PbS buharlaştırıldı ve kapalı bir kap içerisine yerleştirildi. Diğer iki numune ise yine 3. Bölüm’de belirtildiği gibi numune tutucuya yerleştirilerek kenarları wax ile kaplandı, SILAR ve Elektrokimyasal işlemleri için hazır hale getirildi. SILAR ve Elektrokimyasal yöntemleri ile numunenin parlak yüzeyinde PbS film tabakası oluşturuldu. PbS iletkenliği hakkında bilgi edinmek için, ITO kaplı cam elektrot üzerine ince bir PbS filmi kaplandı ve soğurma ölçümleri yapıldı. PbS filminin soğurma spektrumu ve soğurma-enerji değişimi Şekil 3.11’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, PbS filminin yasak enerji aralığı  $E_g=1,42 \text{ eV}$  olarak hesaplanmıştır. PbS,  $0,41 \text{ eV}$  kadarlık oldukça küçük bant aralığı enerjisine sahip bir yarıiletken materyaldir. Bu yarıiletken materyalin bant aralığı enerji değeri, PbS filminin kalınlığı değiştirilerek birkaç eV’a kadar artırılabilir (Chen *et al.* 2000; Alanyalıoğlu *et al.* 2009). Bazı araştırmacılar tarafından PbS’nin yasaklanmış enerji bant aralığının film kalınlığına bağlı değişimi çalışılmıştır (Chen *et al.* 2000; Alanyalıoğlu 2006; Alanyalıoğlu *et al.* 2009). Film kalınlığına bağlı olarak PbS’nin yasaklanmış enerji bant aralığının artan film kalınlığıyla azaldığını deneysel olarak gözlenmiştir. Soğurma verileriyle çizilen enerjiye karşı soğurma grafiğinden, 30 nm için  $0,42 \text{ eV}$  ve 5 nm için yaklaşık olarak  $1,75 \text{ eV}$  değerlerini bulmuşlardır (Chen *et al.* 2000; Alanyalıoğlu *et al.* 2009).

Elde edilen PbS tabakalı ve Referans (PbS tabakasız) Au/6H-*n*-tipi SiC Schottky kontakların numune sıcaklığına bağlı olarak akım-voltaj ölçümleri yapıldı. Akım-voltaj karakteristiklerinin sadece oda sıcaklığında incelenmesi, metal yarıiletken arayüzeyinde Schottky diyotların engel yüksekliğinin ve akım iletim mekanizmasının doğasının tam olarak anlaşılması için yeterli bilgiyi sağlamaz. Diyotların 300 K’den başlayarak 20 K’lik adımlarla 80 K’e kadar her sıcaklıkta *I-V* ölçümlerinin *lnI-V* grafikleri Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12’de sıcaklıkla engel yüksekliğinin değişimi verilmiştir. Bu diyotlara ait her bir sıcaklığa karşılık gelen idealite faktörü değerleri *lnI-V*

grafiklerinin lineer bölgelerinin eğiminden hesaplanmıştır. Elde edilen idealite faktörünün sıcaklığa göre değişimi Şekil 4.13, 4.14, 4.15 ve 4.16'da verilmiştir. Ayrıca, hesaplanan diyot parametreleri, Çizelge 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'de verilmiştir.

İdealite faktörü ve engel yüksekliği diyottan diyota değişmektedir. Bu durum, engel yüksekliğinin yanal olarak inhomojen olmasından, PbS filminin kalınlığı ve inhomojenliğinden kaynaklanabilir. Böyle durumlarda, metal-yarıiletken kontak boyunca akan akım, Schottky engel yüksekliği inhomojenliğinin varlığından kuvvetli bir şekilde etkilenebilir. Özellikle, buharlaştırma ile oluşturulan PbS arayüzeyli diyodun arayüzey yapısının homojenliği nedeni ile idealite faktörü ideal duruma yaklaşmaktadır. İdeal Schottky diyotların  $I-V$  karakteristikleri ideal termiyonik emisyon teorisine uyarlar.

Numunelerin, numune sıcaklığına bağlı olarak ölçülen  $I-V$  karakteristiklerine bakıldığında, engel yüksekliği değerlerinin azalan ölçüm sıcaklığıyla azaldığı ve buna karşılık idealite faktörü değerlerinin arttığı gözlemlendi. Oda sıcaklığında Buharlaşma ve SILAR'lı numunenin engel yüksekliği referans diyodunkine nisbeten daha düşük bir değerdeyken, elektrokimyasal olarak hazırlanan numunenin engel yüksekliği referans diyodunkine nazaran daha büyük değerde olduğu görülmüştür. Metal-yarıiletken arayüzeyinde düşük sıcaklıklarda elektronlar düşük engeli tercih eder. Yani, sıcaklık ve uygulama voltajı arttıkça daha fazla elektron yüksek engeli aşabilecek enerjiye sahip olur. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda idealite faktörünün artması ve engel yüksekliğinin azalması arayüzey yüklerinin düzgün dağılmaması ve inhomojenlik gibi diğer bazı sebeplere atfedilebilir (Zhu *et al.* 1999). Çok dikkatli hazırlanan diyotlarda bile engel yüksekliğindeki inhomojenlik ve bazı istenilmeyen durumların ortaya çıkması kaçınılmazdır. Düşük engel yüksekliğine sahip Schottky diyotlar, kritik sıcaklıklarda infrared dedektör ve sensör yapımında kullanılmıştır. Böylece, geniş sıcaklık aralığında Schottky engel diyotların akım-voltaj karakteristiklerinin incelenmesi, yalnız iletim süreçleri hakkında bilgiyi değil aynı zamanda metal-yarıiletken ara yüzeyde engel oluşumu hakkında ve iletim mekanizmasının sıcaklığa bağlılığı hakkında da bilgi verir.

Doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerleriyle çizilen  $\Phi_b$ 'nin  $2kT^{-1}$ 'ye karşı grafiklerin eğimlerinden ortalama engel yüksekliği ( $\bar{\Phi}_b$ ), standart sapma ( $\sigma_0$ ) ve voltaj katsayıları  $\rho_2$  ve  $\rho_3$  değerleri hesaplanmıştır. Buharlaşmayla ilgili Şekil 4.17'den görüldüğü gibi,  $\Phi_b$ 'nin  $2kT^{-1}$  grafiği iki Gaussiyen dağılım bölgesi göstermektedirler. Bu bölgelerden,  $\sigma_{01} = 142$  mV,  $\sigma_{02} = 82$  mV ve ( $\bar{\Phi}_{b1}$ )=1.266 eV, ( $\bar{\Phi}_{b2}$ )=0.791 eV; SILAR'lı numune için  $\sigma_{01} = 142$  mV,  $\sigma_{02} = 78$  mV ve ( $\bar{\Phi}_{b1}$ )=1.195 eV, ( $\bar{\Phi}_{b2}$ )=0.687 eV ve Elektrokimyasal'lı numune için  $\sigma_{01} = 144$  mV,  $\sigma_{02} = 90$  mV ve ( $\bar{\Phi}_{b1}$ )=1.392 eV, ( $\bar{\Phi}_{b2}$ )=0.915 eV; Referans numune için  $\sigma_{01} = 130$  mV,  $\sigma_{02} = 68$  mV ve ( $\bar{\Phi}_{b1}$ )=1.264 eV, ( $\bar{\Phi}_{b2}$ )=0.868 eV değerleri hesaplanmıştır. Ortalama engel yüksekliği ve standart sapma değerleri birbirleri ile kıyaslandığında, sırasıyla standart sapmanın ortalama engel yüksekliğinin  $\approx$ %10,88, %11,69, %10,14 ve referans numune için %9,28'i olduğu görülmektedir. Standart sapma, engel yüksekliğinin homojenliğinin bir ölçüsüdür. Yaklaşık %10'oran, inhomojen diyotlar için literatürde ki değerlerle uyum içindedir (Dobrocka and Osvold 1994; Chand and Kumar 1997; Karataş *et al.* 2003). Standart sapma ne kadar küçük olursa, engel yüksekliği homojenliği o kadar artar. İfade edilen bu homojensizlik ve potansiyel dalgalanmaları düşük sıcaklıkta akım-voltaj karakteristiklerine etki eder (Song *et al.* 1986; Zhu *et al.* 1999).

Yine Şekil 4.17'de  $[(1/n)-1]$ 'in  $1/2kT$ 'ye karşı grafiğinden elde edilen eğriye fit edilen doğru denkleminde de  $\rho_2$  voltaj katsayıları Buharlaştırma, SILAR, Elektrokimyasal ve Referans için sırasıyla, birinci bölge  $\rho_{21} = 0,185$  V,  $\rho_{21} = 0,401$  V,  $\rho_2 = 0,046$  V,  $\rho_{21} = 0,123$  değerleri elde edilmiştir, ikinci bölge için  $\rho_{22} = 0,288$  V,  $\rho_{22} = 0,388$  V, referans için  $\rho_{22} = 0,079$  değerleri elde edilmiştir. Eğimlerden elde edilen  $\rho_3$  değerleri sırası ile birinci bölge için  $\rho_{31} = - 0,0183$  V,  $-0,0351$  V,  $-0,0117$  V,  $-0,0114$  V. İkinci bölge için  $\rho_{32} = - 0,0064$  V,  $-0,0072$  V, referans için  $-0,0084$  V olarak bulundu. Bilindiği gibi,  $\rho_2$ , uygulanan gerilime bağlı olarak ortalama engel yüksekliğinin voltaj katsayısı ve  $\rho_3$ , standart sapmanın voltaj katsayısıdır. Bu katsayılar sıcaklıktan bağımsızdırlar.  $\rho_2$  voltaj katsayısı negatifse, uygulanan doğru beslemin artmasıyla engel yüksekliği azalır.  $\rho_3$  voltaj katsayısı negatifse, uygulanan doğru beslemin artmasıyla engel yüksekliği artar (Werner and Gütter 1991; Dobrocka and Osvold 1994; Chand and Kumar 1997; Karataş

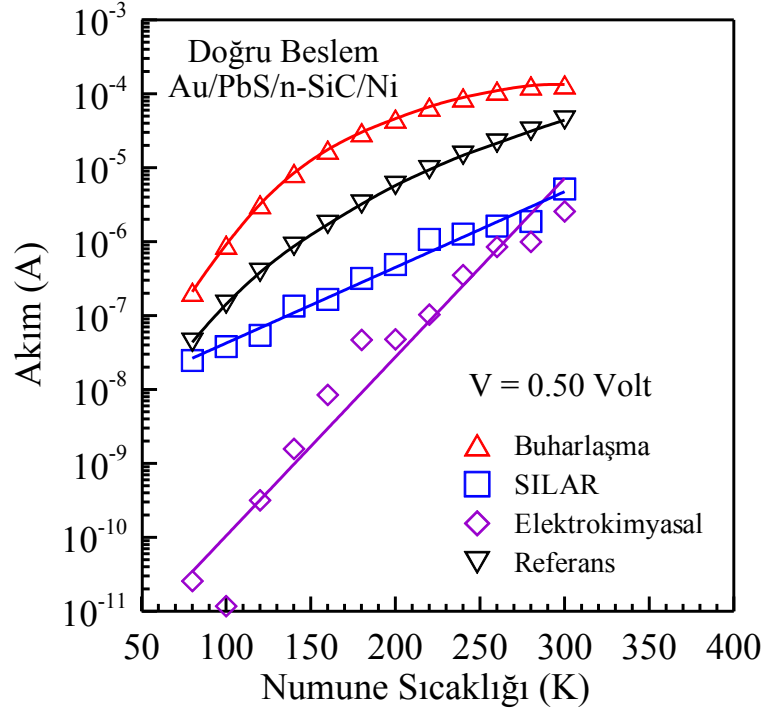
*et al.* 2003; Yıldırım and Türüt 2009). (4.13) ifadesi dikkate alındığında azalan sıcaklıkla idealite faktörünün artışıdaki baskın rolün  $\rho_3$  voltaj katsayısının negatif değerli olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Şekil 4.21, 4.23, 4.25 ve 4.27’de diyotların bazı doğru beslem gerilimlerinde sıcaklığa karşı akım değişimi ve Şekil 4.22, 4.24, 4.26 ve 4.28’de diyotların bazı doğru beslem gerilimlerinde  $\ln I/T^2$ ’nin  $1/(kT)$ ’ye karşı değişimini verilmiştir. Au/PbS(Buharlaştırma)/n-SiC/Ni diyodu için verilen Şekil 4.21’den görüldüğü gibi, yüksek doğru beslem gerilimlerine göre, düşük doğru beslem gerilimlerinde artan sıcaklıkla akım keskin bir artış göstermektedir, fakat 0,61 V’den 1,0 volta kadar olan akım-sıcaklık eğrilerinde akım yavaş bir şekilde artmakta ve yüksek sıcaklıklarda doyuma ulaşmaktadır. Bilindiği gibi,  $\ln I/T^2$ ’nin  $1/kT$ ’grafiklerinden etkin engel yüksekliği veya aktivasyon enerjisi hesaplanır. Yine, bu diyot için,  $\ln I/T^2 \sim 1/kT$  (Şekil 4.22) grafiği dikkate alındığında, sadece düşük gerilimlerdeki eğrilerden aktivasyon enerjisi hesaplanabileceği görülmektedir, fakat 0,61 V’den 1,0 volta kadar olan eğrilerde lineer bir değişim gözlenmediğinden, bunlardan aktivasyon enerjisi hesaplamak biraz zordur, ancak, 0,91 V eğrisine lineer bir fit yapılabilir. Au/PbS(SILAR)/n-SiC/Ni diyodu için verilen Şekil 4.23’den görüldüğü gibi, her doğru beslem geriliminde artan sıcaklıkla akım lineer bir artış göstermektedir. Bu diyot için,  $\ln I/T^2 \sim 1/kT$  (Şekil 4.24) grafiği dikkate alındığında, bu eğrilerde lineer bir değişim gözlenmemektedir.

Au/PbS(Elektrokimyasal)/n-SiC/Ni diyodu için verilen Şekil 4.25’de 0,60 V’den 1,0 volta kadar olan eğrilerde akım sıcaklıkla yavaş bir şekilde artmakta ve yüksek sıcaklıklarda doyuma ulaşmaktadır. Bu diyot için verilen  $\ln I/T^2 \sim 1/kT$  (Şekil 4.26) grafiğinden görüldüğü gibi, 0,60 V’den 1,0 volta kadar olan eğrilerde lineer bir değişim gözlenmektedir, bunlardan aktivasyon enerjisi gayet kolay bir şekilde hesaplanabilir. Referans diyoda ait Şekil 4.27’den görüldüğü gibi, 0,60 V’den 1,0 volta kadar olan eğrilerde akım sıcaklıkla yavaş bir şekilde artmakta ve yüksek sıcaklıklarda doyuma ulaşmaktadır. Bu diyot için verilen  $\ln I/T^2 \sim 1/kT$  (Şekil 4.28) grafiğinden görüldüğü gibi, 0,51 V’den 1,0 volta kadar olan eğrilerde lineer bir değişim gözlenmektedir, bunlardan aktivasyon enerjisi hesaplanabilir.

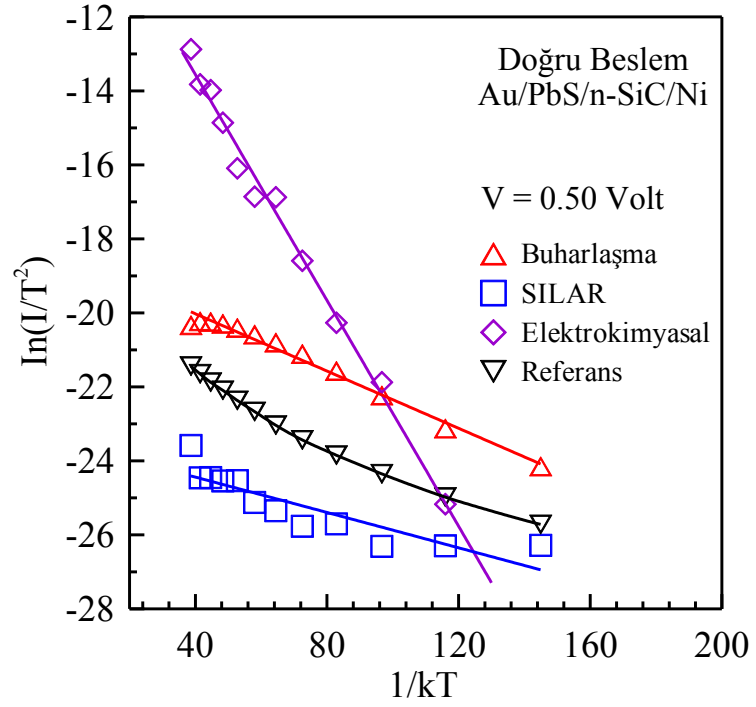


Her bir diyot için verilen sıcaklığa karşı akım ve  $(1/kT)$ 'ye karşı  $\ln I/T^2$ 'nin değişimini birbirleriyle karşılaştırmak için, aşağıda şekillerde 0,50 V ve 0,90 V'da sıcaklığa bağlı akım ve  $\ln I/T^2$  grafikleri verilmiştir.

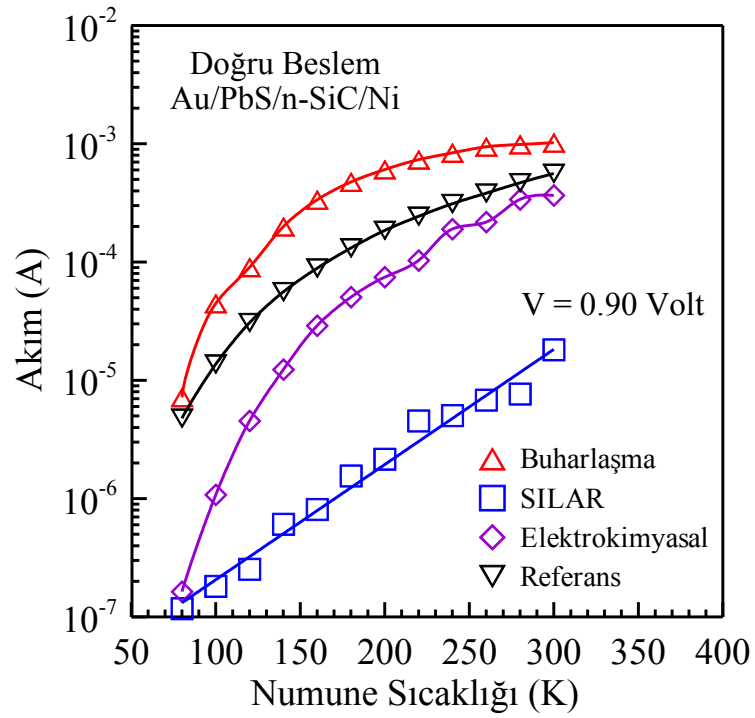


**Şekil 5.1.** Au/PbS/n-SiC/Ni diyotların 0,50 V doğru beslem geriliminde sıcaklığa karşı akımın değişimi

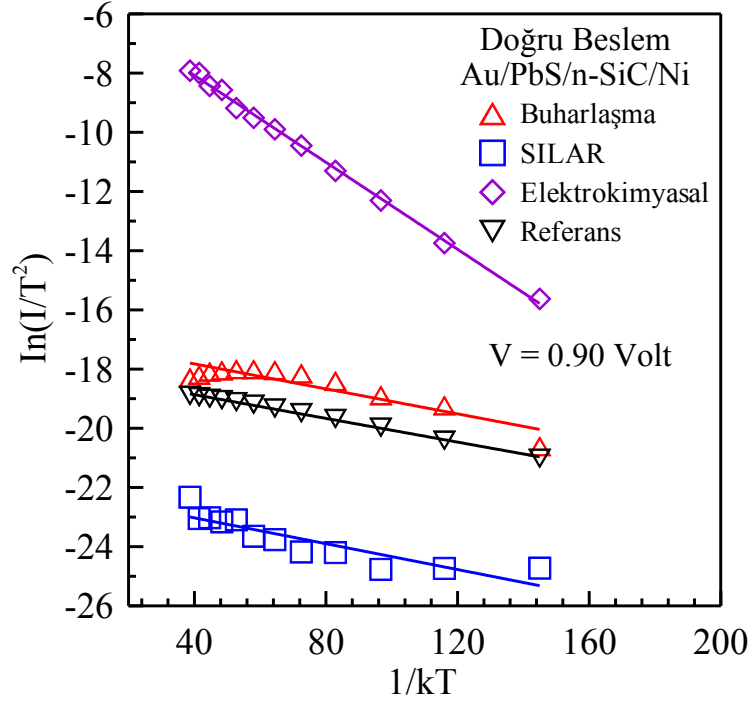
Şekil 5.2 ve Şekil 5.4'e bakıldığında, hem 0,50 Volt hem de 0,90 Volt için Au/PbS/n-SiC/Ni diyotlarının  $(\ln I/T^2)$ 'nin  $1/(kT)$ 'ye karşı değişimlerinde, Buharlaşma, SILAR ve Referans diyotlar sıcaklığa bağlı olarak paralel bir değişim gösterirlerken, Elektrokimyasal olarak hazırlanan numunenin, aynı sıcaklık aralığında, sıcaklığa bağlılığının daha geniş bir akım aralığında değiştiği göze çarpmaktadır. Bu değişim, Elektrokimyasal numune için, yaklaşık olarak, 0,50 V'da  $10^{-6}$  A ile  $10^{-11}$  A ve 0,90 V'da  $10^{-3}$  A ile  $10^{-7}$  A aralığına karşılık gelmektedir.



Şekil 5.2. Au/PbS/n-SiC/Ni diyotların 0,50 Volt'ta  $\ln I/T^2$ 'nin  $1/kT$ 'ye karşı değişimi

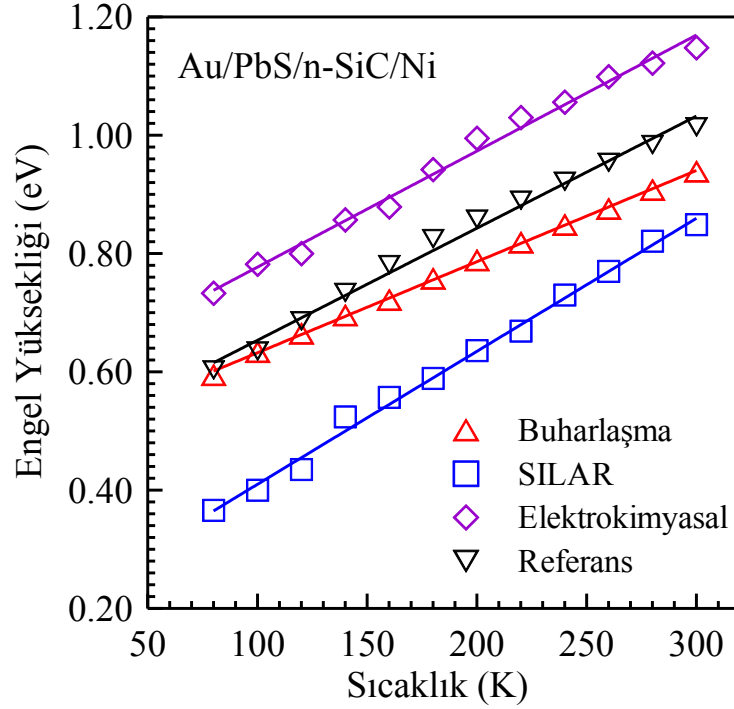


Şekil 5.3. Au/PbS/n-SiC/Ni diyotların 0,90 V doğru beslem geriliminde sıcaklığa karşı akımın değişimi



Şekil 5.4. Au/PbS/n-SiC/Ni diyotların 0,90 Volt'ta  $\ln I/T^2$ 'nin  $1/kT$ 'ye karşı değişimi

Düşük voltajlarda  $\ln I-V$  grafiğinde Schottky diyotların akım-gerilim karakteristikleri lineerdir. Ancak seri direnç ve arayüzey tabakasının varlığından dolayı, yüksek voltajlarda metal-yarıiletken doğrultucu kontaktların akım-gerilim karakteristiklerinde lineerlikten bir sapma gözlenir (Aydın *et al.* 2006). Diyotlarımızın seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde modeline göre, Şekil 4.33, 4.35, 4.37 ve 4.39'da doğru beslem deneysel  $I-V$  karakteristiklerinden  $F(V)-V$  grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen engel yüksekliklerinin ölçüm sıcaklığına bağlı çizilen grafiklerinden, ölçüm sıcaklığı arttıkça ölçülen engel yüksekliği lineer olarak artmıştır. Bu sonuçlar, Şekil 4.34, 4.36, 4.38 ve 4.40'da açıkça görülmektedir. Çizelge 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de görüldüğü gibi arayüzeyli ve referans diyotların Norde fonksiyonlarından hesaplanan seri direnç değerleri sıcaklık arttıkça azalmıştır. Böylece diyotta seri dirence neden olan, nötral bölgenin haricinde, metal yarıiletken arayüzeyinde kasten oluşturulan PbS arayüzey tabakası, istenmeden oluşan oksit tabakası ve safsızlıklar gibi etkiler de seri direnci önemli ölçüde arttırmıştır.



**Şekil 5.5.** Au/PbS/n-SiC/Ni diyotların Norde eğrilerinden elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi

Norde fonksiyonlarıyla ilgili olarak, Şekil 5.5’de Au/PbS/n-SiC/Ni diyotlar için verilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişiminden görüldüğü gibi, Elektrokimyasal, SILAR ve Referans diyotlar sıcaklığa bağlı olarak birbirleriyle paralel bir değişim gösterirlerken Buharlaştırmayla hazırlanan numunenin, aynı sıcaklık aralığında, sıcaklığa bağlılığı diğer diyotlara nazaran farklı ve küçük bir eğimle gerçekleşmiştir. 80-300 K aralığında, her bir sıcaklıkta, Elektrokimyasal, SILAR ve Referans diyotların engel yükseklikleri arasındaki fark aynı değerde kalmaktadır. Bu bir sistematik değişime karşılık gelmektedir. Bilindiği gibi, Schottky diyotlarda engel yüksekliğinin oluşumu ve değişimi metal-yarıiletken kontak arasında ki arınma bölgesinde mevcut uzay yükünün yoğunluğuna ve değişimine bağlıdır. Uzay yükünün yoğunluğunun değişimi, metal-yarıiletken arayüzeyinde kasten oluşturulan arayüzey tabakaları, istenmeksizin oluşan oksit tabakası ve safsızlıklar gibi etkenlerle gerçekleştirilebilir. O halde, 80-300 K aralığında, her bir sıcaklıkta, Elektrokimyasal, SILAR ve Referans diyotların engel yüksekliklerinin değişimine neden olan uzay yükünün yoğunluğundaki değişim aynı

oranda olurken, bu numunelere nazaran, Buharlaştırmayla hazırlanan numunenin uzay yükünün yoğunluğunda daha az bir değişim vuku bulmaktadır.

50 kHz frekans değerinde Buharlaşıma, SILAR, Elektrokimyasal ile PbS arayüzeyi oluşturulan diyotlar ve Referans diyodun kapasite-voltaj ( $C-V$ ) verilerinin değerlendirilmesi sonucunda, bu yapıların oda sıcaklığındaki difüzyon potansiyelleri ve engel yüksekliği  $\Delta\Phi_b(C-V)$  aşağıdaki Çizelge 5.1’de verilmiştir. Buharlaşıma, SILAR, Elektrokimyasal taşıyıcı konsantrasyonlarının, Referans diyodunkinden farklı oluşu uzay yükünün değişiminin delilidir. Bu engel yüksekliklerinin Referans diyodun engel yüksekliğinden farklı değerlerde olmasının nedenidir.

**Çizelge 5.1.** Elde edilen diyotlar için 300 K’de  $C-V$ ’den elde edilen veriler

Metotlar	$V_o=V_d$ (Volt)	$\Phi_b(CV)$ (eV)	$E_f = eV_n$ (eV)	$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
Buharlaşıma	1,64	1,73	0,084	$4,73 \times 10^{17}$
SILAR	1,79	1,91	0,120	$1,18 \times 10^{17}$
Elektrokimyasal	2,08	2,18	0,110	$2,06 \times 10^{17}$
Referans	1,76	1,84	0,080	$5,52 \times 10^{17}$

Akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri birbirinden farklıdır.  $C-V$  ölçümlerinden elde edilen engel yükseklikleri ilgilenilen sıcaklıkta geleneksel  $I-V$  değişimlerinden ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen engel yüksekliklerinden daha büyüktür. Bu farklılık, yarıiletken gövdede derin safsızlık atomlarının seviyeleri, ara yüzeyde yalıtkan tabakanın varlığı, kuantum mekaniksel tünelleme, imaj kuvvet düşmesi ve kenar sızıntı akımları gibi sebeplerden kaynaklandığına dair literatürde çeşitli yorumlar mevcuttur (Ziel 1968; Sze 1981; Rhoderick and Williams 1988; Tung 1992). Engel yüksekliğindeki herhangi bir uzaysal değişim, akımın daha çok minimum engelden geçmesine neden olur. Bundan dolayı Schottky diyotlarında, kapasitans-voltaj karakteristiklerinden bulunan engel

yüksekliklerinin, akım voltaj karakteristiklerinden bulunan engel yüksekliklerinden daha büyük olması beklenir. Sullivan ve arkadaşlarına göre, yüksek konsantrasyonlar için bu fark daha yüksektir. Aynı zamanda, akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçüm tekniklerinin farklı tabiatından dolayı ölçülen engel yükseklikleri daima farklıdır (Sing *et al.* 1990).

Ayrıca, Cheung fonksiyonları kullanılarak  $H(I)-I$  ve  $dV/d\ln I-I$  eğrilerinden elde edilen seri direnç ( $R_s$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ) ve idealite faktörü ( $n$ ) değerleri ve bunların sıcaklıkla değişimleri hesaplandı. Geleneksel  $I-V$  karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi Cheung fonksiyonları ile elde edilen idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi ile paralellik göstermektedir. Ayrıca yine  $I-V$ , Norde ve Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen engel yükseklikleri karşılaştırıldı (Çizelge 5.2). Engel yüksekliği ve idealite faktörlerinin farklı metotlarla elde edilen sonuçlarında gözlenen paralellik değişik değerlendirme metotları arasındaki uyumun ve bu metotların uygulanabilirliğinin bir ölçüsü olarak değerlendirildi.

**Çizelge 5.2.** Elde edilen diyotlar için 300 K’de  $I-V$ , Norde,  $C-V$  ve Cheung yöntemleri ile hesaplanan engel yüksekliği değerleri

Yöntem 300 K	Buharlaşma $\Phi_b$ (eV)	SILAR $\Phi_b$ (eV)	Elektrokimyasal $\Phi_b$ (eV)	Referans $\Phi_b$ (eV)
$I-V$	0,892	0,826	1,003	0,970
Norde	0,939	0,849	1,148	1,014
$C-V$	1,622	1,764	2,060	1,616
Cheung	0,760	0,725	1,111	0,848

Herbir diyot için hesaplanan engel yüksekliği birbirinden farklıdır. Bu da engel yüksekliğinin iş fonksiyonundan bağımsız olduğunu göstermektedir. Özellikle bu durum SILAR ile büyütülen PbS’ün amorf yapıda olduğu gözle görüldü. Amorf yarıiletkenlerde belli bir düzenin olmamasından dolayı her diyot için bu enerji düzeylerinin yoğunluğu farklıdır. Bu da her diyot için engel yüksekliğinin farklı olduğunu söyler. Numunelerin X-ışını kırınım verileri  $2\theta=20^0-60^0$  aralığında alınmıştır.

Şekil 4.61, 4.62 ve 4.63'de X-ışını kırınım verilerini göstermektedir. Choudhury and Sarma yapmış oldukları çalışmada PbS ince filmin  $2\theta=30,11^{\circ}$ 'de (200) düzleminden yansıma elde etmişlerdir ve  $d=2,97$  Å olarak bulmuşlardır (Choudhury and Sarma 2009). Ayrıca yine Şekil 4.63'de PbS'ün  $2\theta=25,96^{\circ}$ 'de (111) düzleminden yansıma elde edilmiştir, bu sonuçlar literatürde verilen sonuçlarla uyum içindedir (Chaudhuri *et al.* 2005; Seghaier *et al.* 2006). SiC kristaline ait  $d$  değerleri sırası ile 2,5128, 2,5142 ve 2,5101 Å olarak bulunmuştur. Bu değerler literatürde verilen  $d=2,5162$  Å değer ile uyumaktadır (JCPDS Card No. 29-1128). Ayrıca yine Şekil 4.61, 4.62 ve 4.63'de sırası ile  $2\theta=38,3000$ ,  $38,2200$  ve  $38,2000$  de (111) düzleminden yansıma elde edilmiştir ve bu düzlemler arası mesafe  $d=2,3480$ ,  $2,3527$  ve  $2,3554$  Å olarak bulunmuştur ve bu değerler de literatürde verilen  $d=2,3550$  Å değeri ile uyumaktadır (JCPDS Kart No. 4-0784).

Sonuç olarak, kendi laboratuvarımızda imal ettiğimiz PbS arayüzeyle ve referans diyotların geniş bir sıcaklık aralığında  $I-V$  ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen diyot parametrelerinin sıcaklığa bağlı değişimleri incelenmiştir.  $I-V$  karakteristiğinden elde edilen idealite faktörünün artan sıcaklıkla azaldığı ve engel yüksekliğinin ise; artan sıcaklıkla arttığı gözlenmiştir. Böyle bir değişim metal/yarıiletken arayüzeyindeki atomik inhomojen engelin bir fonksiyonu olarak açıklanmıştır. Arayüzeyle diyotlar kendi aralarında mukayese edildiğinde; PbS arayüzeyinin farklı teknikler ile oluşturulması sonucu benzer yapılar elde edilmesine rağmen diyotlar farklı değerde engel yükseklikleri vermişlerdir. Bu tez çalışmasında karşılaştığımız sorunlardan birisi diyotların hazırlanması aşamasındadır. Diyotlar hazırlanırken kullanılan farklı metotların (Buharlaştırma, SILAR, Elektrokimyasal) birbiri ile kombine bir sistem olmamasından dolayı, diyotlar bir sistemden diğer sisteme alınırken atmosferle etkileşmektedir. Bu da hazırlanan filmin yüzeyinde istenmeyen bir oksit tabakasının oluşmasına neden olmaktadır. Bu sorunun kaldırılması için, PbS yarıiletken filmin hazırlandığı sistemi vakum ortamında gerçekleştirilmelidir. Böylece metal-yarıiletken eklem arasında atmosfer ile etkileşmeden dolayı oluşabilecek istenmeyen yalıtkan oksit tabakasından kurtulmuş oluruz.

**KAYNAKLAR**

- Aboelfotoh, M. O., Fröjdh, C., and Petersson, C. S. 2003. *Phys. Rev. B*, 67, 075312.
- Alanyalıoğlu, M. 2006. S, Se, Te'un Potansiyel altı Depozisyonu ve PbS, PbSe ve PbTe'un Yeni Bir Elektrodepozisyon Yöntemi ile Sentezi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alanyalıoğlu, M., Bayrakçeken, F., Demir, Ü, 2009, *Electrochimica Acta*, 54, 6554.
- Alexandrov, P., Pan, W. M., Weiner, M., Jiao, L., and Zhao, J. H. 2003. *Solid State Electron.*, 47, 263.
- Andrews, J. M., 1974. The role of metal-semiconductor interface in silicon integrated circuit technology, *J. Vac. Sci. Technol.*, 11, 972-984.
- Aydın, M. E., Yıldırım, N and Türüt ,A., 2007, Temperature dependent behavior of Ni/4H-nSiC Schottky Contacts.*J. Appl. Phys* 102.
- Aydoğan, Ş., 2004. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, (Yayınlanmamış).
- Babu, K. S., Kumar, T. R., Haridoss, P., Vijayan, C., 2005, Effect of the organic solvent on the formation and stabilization of CdS and PbS nanoclusters, *Talanta* 66, 160–165.
- Baliga, B. J. 1996. *Physics of Semiconductor Power Devices*, JMS Publishing, New York.
- Bardeen, J., 1947. Surface states and rectification at a metal semiconductor contact. *Phys. Rev.* 71(10), 717-727.
- Bandyopadhyay, S., Bhattacharyya, A., Sen, S. K. 1999. Measurements and modelling of the barrier heights and ideality factors in the metal/conducting polymer composite Schottky device. *J. Appl. Phys.* 85, 3671-3676.
- Basak, D., Mahanty, S., 2003. Ti/Ni/Ti/Au ohmic contact to n-type 6H-SiC. *Mater. Sci. Eng. B*, (98), 177-180.
- Bose, J. C., 1904. U.S. Patent 775-840.
- Braun, F., 1874. On the current conduction through metal sulphides (in German) *Ann. Phys. Chem.*, 153,556.
- Brillson, L., Brucker, C., Katnani, A., Stoffel, N., Daniels, R. and Margaritondo, G., 1982. *Physics and Chemistry of Semiconductor Interfaces Conference*, Asilomar, Calif.
- Brillson, L. J., 1993. *Contacts To Semiconductors*, Noyes Publications, New Jersey.
- Carter, C. H., Tsvetkov, V. F., Glass, R. C., Henshall, D., Brady, M., Müller, G., Kordina, O., Irvine, K., Edmond, J. A., Kong, H. S., Singh, R., Allen, S. T., and Palmour, J. M. 1999. *Mater. Sci. Eng. B*, 61-62, 1-8.
- Chand, S., and Kumar, J., 1997. Electron transport and barrier inhomogeneities in palladium silicide Schottky diodes. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, 65(4-5), 497-503.
- Chaudhuri, T., Saha, N., Saha, P., 2005. Deposition of PbS particles from a nonaqueous chemical bath at room temperature, *Materials Letters* 59, 2191–2193.
- Chen, S., Truax, L. A. and Sommers, J. M., 2000. Alkanethiolate-protected PbS nanoclusters: Synthesis, spectroscopic and electrochemical studies. *Chem. Mater.*, 12 (12), 3864-3870.



- Cheng, H., Wu, C. and Shy, J., 1990. Excellent thermal stability of cobalt-aluminum alloy Schottky contacts on GaAs substrates. *Solid-St. Electron.* 33, 863-867.
- Cheung, S. K., and Cheung, N. W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.* 49, 85-87.
- Choudhury, N. and Sarma, B. K., 2009. Structural Characterization of lead sulfide thin films by means of X-ray line profile analysis. *Bull. Mater. Sci.* 32, 43-47.
- Cowley, A. and Sze, S., 1965. Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *J. Appl. Phys.* 36(10), 3212-3220.
- Crofton, J., McMullin, P. G., Williams, J. R., and Bozack, J. 1995. *J. Appl. Phys.*, 77,1317.
- Crofton, J., Porter, L. M., and Williams, J. R. 1997a. *Phys. Stat. Sol. (B)*, 202, 581.
- Crofton, J., Beyer, L., Williams, J. R., Luckowski, E. D., Mohny, S. E., and Delucca, J. M. 1997b. *Solid State Electron.*, 41, 1725.
- Crofton, J., Mohny, S. E., Williams, J. R., and Smith, T. I. 2002. *Solid State Electron.*, 46, 109.
- Dobrocka, E., and Osvald, J., 1994. Influence of barrier height distribution on the parameters of Schottky diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 65 (5), 575-577.
- Doğan, S., Johnstone, D., Yun, F., Sabuktagin, S., Leach, J., Baski, A. A., and Markoç, H., 2004. The effect of hydrogen etching on 6H-SiC studied by temperature dependent current-voltage and atomic force microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 85, (9), 1547-1549.
- Elasser, A., Kheraluwala, M. H., Ghezzi, M., Steigerwald, R. L., Evers, N. A., Kretchmer, J., and Chow, T.P. 2003. *Transac. Industry Appl.*, 39, 915.
- Everaert, J. Van Meirhaeghe, R. Laflère W. and Cardon, F., 1990. Characterisation of CoSi<sub>2</sub>/-and TiSi<sub>2</sub>/n-GaAs Schottky barriers. *Semicond. Sci. Technol.* 5, 60-64.
- Fursin, L. G., Zhao, J. H., and Weiner, M. 2001. *IEEE Electron. Lett.*, 37, 1092.
- Freiser, H. and Nancolas, G. H., 1987, *IUPAC Compendium of Analytical Nomenclature: Definitive Rules*, 2nd., Blackwell Scientific, Oxford
- Ghandhi, S. K., 1998. *Semiconductor Power Devices*. Wiley, New York.
- Glass, R. C., Spellman, L. M., Tanaka, S., and Davis, R. F., 1992. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 10, 1625.
- Grant, R., Waldrop J. and Kowalczyk, S. 1981. Correlation of GaAs surface-chemistry and interface Fermi level position a single defect model interpretation. *J. Vac. Sci. Technol.* 19, 477-480.
- Ha, J. H., Kim, Y.K., Park, S. H., Kang, S. M., 2007. Fabrication and characteristics of bulk semi-insulating 6H-SiC semiconductor detector for an  $\alpha$  radiation at room temperature. *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res.*, A 579, 141-144.
- HA, J. H., Kang, S. M., Park, S. H., Kim, H. S., Cho, Y. H., Lee, J. H., Lee, N. H., Kim, J. B., Kim, Y. K., 2007. Annealing effect of the 6H-SiC semiconductor detector for alpha particles. *Radiation Measurements*, in press.
- Handbook of Chemistry and Physics, 66th edition 1985-1986, p. B-222.
- Hara, S., Teraji, T., Okushi, H., Kajimura, K., 1997. Control of Schottky and ohmic interfaces by unpinning Fermi level. *Applied Surface Science*, 117/118, 394-399.
- Hass, G., Thun, R.E. 1969 "Physics of Thin Films Advances in Research and Development", Academic Press, USA 5, 341.

- Henisch, H. K., 1957. Rectifying Semiconductor Contacts, Oxford at the Clarendon Pres., Oxford.
- Hiraki, A., Lugujo, E., Nicolet, M. A. and Mayer, J. W., 1971. Phys. Status Solid, A7, 401.
- Horváth, Zs. J., 1996. Comment on analysis of *I-V* measurements on CrSi<sub>2</sub>-Si Schottky structures in a wide temperature. Solid-St. Electron, 39, 176-178.
- Horváth, Zs. J., Ayyildiz, E., Rakovics, V., Cetin, H. and Podör, B. 2005. Schottky contacts to InP. Phys. Stat. Sol. (c) 2 (4), 1423-1427.
- Huang, T. and Yang, M. 1991. Interfacial reactions of Cr, Cr-Si, and Cr/Si films on GaAs. J. Appl. Phys. 70, 5675-5683.
- Huang, T. and Pang, J. 1997. Thermal stability of the Pd-Al alloy Schottky contacts to n-GaAs. Matt. Sci. Eng. B, 49, 144-151.
- Im, H. -J., Ding, Y., Pelz, J. P., Choyke, W. J., 2001. Nanometer-scale test of the Tung model of Schottky-barrier height inhomogeneity. Physical Review B, 64, 0,75310-9.
- Johnson, B. J. and Capano, M. A. 2003. Solid State Electron., 47, 1437.
- Jones, F. E., Wood, B. P., Myers, J. A., Hafer, C. D. and Lonergan, M. C. 1999. Current transport and the role of barrier inhomogeneities at the high barrier n-InP/poly(pyrrole) interface. J. Appl. Phys. 86 (11), 6431-6441.
- Kale, R. B., and Lokhande, C. D., 2004. Room temperature deposition of ZnSe thin films by successive ionic layer adsorption and reaction(SILAR) method. Mater. Res. Bull., 39, 1829-1839.
- Karataş, Ş., Altındal, Ş., Türüt, A. and Özmen A., 2003. Temperature dependence of characteristics parameters of the H-terminated Sn/p-Si(100) Schottky contacts. Applied Surface Science, 217, 250-260.
- Kirchner, P., Jackson, T., Petit, G. and Woodall, J., Freeouf, J. 1985. Low resistance nonalloyed ohmic contacts to Si-doped molecular-beam epitaxial GaAs. Appl. Phys. Lett. 47, 26-28.
- Kowalczyk, S., Waldrop, J. and Grant, R. 1981. Reactivity and interface chemistry during Schottky barrier formation metals on thin native oxides of GaAs investigated by x-ray photoelectron spectroscopy. Appl. Phys. Lett. 38, 167-169.
- Kuriplach J., Sob M., Grauer G., Anwand W., Nicht E.M., Coleman P.G., Wagner N., 1999. Phys. Rev. B 59, 3, 1948.
- Lahav, A., Eizenberg, M. and Komen, Y., 1986. Interfacial reactions between Ni films and GaAs. J. Appl. Phys. 60, 991-1001.
- Larkin, D. J., Neudeck, P. G., Powell, J. A., and Matus, L. G., 1994. Ins. Phys. Conf. Ser., 137,51.
- Larkin, D. J., 1997. Phys. Stat. Sol. B., 202, 305.
- Lau, S. Chen, W. Marshall, E. Pai, C. Tseng, W. and Kuech, T., 1985. Thermal and chemical stability of Schottky metallization on GaAs. Appl. Phys. Lett. 47, 1298-1303.
- Lee, S.-K., Zetterling, C.-M., Östling, M., Åberg, I., Magnusson, M. H., Deppert, K., Wernersson, L. -E., Samuelson, L., Litwin A., 2002. Reduction of the Schottky barrier height on silicon carbide using Au nano-particles. Solid-State. Electron., 46, 1433-1440.

- Lindroos, S., Arnold, A., Leskeliia, M., 2000. Growth of CuS thin films by the successive ionic layer adsorption and reaction method. *Applied Surface Science*. 158, 78-80.
- Lokhande, C. D., Pahtan, H. M., Sankapal, B. R., Desai, J. D., 2002. Preparation and characterization of nanocrystalline CdSe thin films deposited by SILAR method. *Materials Chemistry and Physics* 78, 11-14.
- Mead, C. A., 1966. *Solid State Electron*. 9, 1023.
- Mokhov, E. N., Gornushkina, E. D., Didik, V. A., and Kozlovskii, V. V. 1992. *Sov. Phys. Solid State*, 34, 1043.
- Morkoç, H., Strike, S., Gao, G. B., Lin, M. E., Sverdlov, B., and Burns, M. J. 1994. *Appl. Phys.*, 76, 1363.
- Morrison, D. J., Wright, N. G., Horsfall, A. B., Johnson, C. M., N'Neil, A. G., Knights, A. P., Hilton, K. P., Uren, M. J., 2000. Effect of post-implantation anneal on the electrical characteristics of Ni-4H-SiC Schottky barrier diodes termination using self-aligned argon ion implantation. *Solid-State Electron*. 44, 1879–1885.
- Mott, N. F., 1938. Note On The Contact Between A Metal and An Insulator or Semiconductor, *Proc. Cambridge Philos Soc.*, 34, 568.
- Müller, R., Feege, M., Weber, S. G., and Spaeth, S. M. 1993. *Semicond. Sci. Technol.*, 8, 1377.
- Neaman, D., 1992. *Semiconductor Physics and Devices*, R . R. Donneley & Sons Company, Sydney.
- Nicolau, Y. F., 1985. Solution deposition of thin solid compound films by a successive ionic- layer adsorption and reaction process. *Applied Surface Science*, 22-23 (2), 1061-1074.
- Nicolau, Y. F., and Menard J. C., 1988. Solution growth of ZnS, CdS and  $Zn_{1-x}Cd_xS$  thin films by the successive ionic-layer adsorption and reaction process; growth mechanism. *Journal of crystal growht*, volume 92, Issues 1-2.
- Nishino, S., Hazuki, Y., Matsunami, H., and Tanaka, T. 1980. *J. Electrochem. Soc.*, 127, 2764.
- Norde, H., 1979. *J. Appl. Phys.* 50, 5052.
- Oder T. N., Williams J. R., Bozack M. J., Iyer V., Mohney S. E., Crofton J., 1998. *Electron. Mater.* 27 (4), 324.
- Oskam, G., Searson, P. C., and Cole, M. W. 2000. *Appl. Phys. Lett.*, 76, 1300.
- Palmour, J. W., Kong, H. S., Waltz, E. D., Edmond, J. A., Carter, C. H. 1991. *Ist International High Temperature Electronics Conference*.
- Pecz, B. 2001. *Appl. Surf. Sci.*, 184, 287.
- Pensl, G. and Choyke, W. J. 1993. *Physica B*, 185, 264.
- Pearton S. J., Zolper J.C., Shul R.J., Ren F.; GaN: processing, defects, and devices. *J Appl Phys* 1999; 86: 1–78.
- Petrenko, T. L., Teslenko, V. V., and Mokhov, E. N. 1992. *Sov. Phys.-Semicond.*, 26, 874.
- Porter, L. M., Davis, R.F., Bow, J. S., Kim, M. J., Carpenter, R.W., 1995. *J. Mater. Res.*, 10, 26.
- Pickard, G. W., 1906. US patent no. 836531.
- Pierce, G. W., 1907. Understanding metal and semiconductor structures, *Phys. Rev.* 25, 31.

- Puišo, J., Lindroos, S., Tamulevičius, S., Leskelä, M., Snitka, V., 2003. Growth of ultra thin PbS films by SILAR technique. *Thin Solid Films*, 428, 223-226.
- Raynaud, C., Richier, C., Brounkov, P. N., Ducroquet, F., Guillot, G., Porter, L. M., Davis, R. F., Jaussaud, C., and Billon, T. 1995. *Mater. Sci. Eng. B*, 29, 122.
- Robinson, G. Y., 1985. *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces*, Edited by C. W. Wilmsen Newyork Plenium Pres.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R.H., 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*. 2<sup>nd</sup> ed. Clarendon, Oxford. 1-225.
- Rottner, K., Frischholz, M., Myrtveit, T., Mou, D., Nordgen, K., Henry, A., Hallin, C., Gustafsson, U., and Schöner, A. 1999. *Mater. Sci. Technol.*, B, 61-62, 330.
- Sağlam, M. and Türüt, A., 1997. Effect of thermal annealing in nitrogen on the *I-V* and *C-V* characteristics of Cr-Ni-Co alloy/LEC n-GaAs Schottky diodes. *Semicond. Sci. Technol.* 12, 1028-1031.
- Sands, T., Chan, W., Chang, C., Chase, E. and Keramidas V. 1988. NiAl/*n*-GaAs Schottky diodes: Barrier height enhancement by high temperature annealing. *Appl. Phys. Lett.* 52, 1338-1340.
- Sands, T. 1989. Compound semiconductor contacts metallurgy. *Matt. Sci. Eng. B* 1, 289-312.
- Sarpatwari, K., Passmore, L., Suliman, S.A., Awadelkarim, O.O., 2007. Analysis of current-voltage-temperature characteristics in SiC Schottky diodes using threshold-accepting simulated-annealing technique. *Solid-State Electron.* 51, 644-649.
- Seghaier, S., Kamoun, N., Brini, R., Amara, A.B., 2006, Structurel and optical properties of PbS thin films deposited by chemical bath deposition, *Materials Chemistry and Physics* 97, 71-80.
- Schottky, W., 1938. The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers, *Z. Phys.* 113, 367-414.
- Schöner, A., Nordell, N., Rottner, K., Helbig, R., and Pensl, G. 1996. *Ins. Phys. Conf. Ser.*, 142, 493.
- Schroder, D. K., 1998, *Semiconductor Material And Device Characterization*, John Wiley&Sons, Inc., New York, 760.
- Sing, A., Reinhardt, K. C. and Anderson, W.A., 1990. "Temperature Dependence of Electrical Characteristics of Yb/p-InP Tunnel Metal-Insulator-Semiconductor Junctions", *J.Appl. Phys.*, 68: 3475-3483
- Skoog, D. A., Holler, F. J., Nieman, T. A., 1998. *Principles of Instrumental Analysis*. Ed. Harbor Drive, part IV. Orlando, Florida.
- Song, Y. P., Van Meirhaeghe, R. L., Laf'ere, W, H, and Cardon, F., 1986. On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current voltage-temperature measurements on Al/P-InP schottky barriers. *Solid-State Electron.* 29(6), 633-638.
- Streetman, B.G., Banerjee, S., 2000, *Solid State Electronic Devices*, Prentice Hall International, Inc., New Jersey, 558.
- Strel'chuk, A. M., Rastegaeva M. G., 1997. Characterization Schottky barriers occurring at the metal-GH-SiC contact based on results of studies of current-voltage characteristics. *Materials Science and Engineering B* 46, 379.

- Sullivan, J., Tung, R., Pinto, M. and Graham W., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. *J. Appl. Phys.*, 70 (12), 7403-7424.
- Sze, S. M. 1981. *Physics of Semiconductor Device*, 2nd edn. (New York: Wiley)
- Troffer T., Peppermuller C., Pensl, G., Rottner, K., and Schöner, A. 1996 a. *J. Appl. Phys.*, 80, 3739.
- Tung, R., 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Phys. Rev. B*, 45 (23), 13509-13523.
- Tung, R. T. 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts. *Mater. Sci. Eng.*, 35(1-3), 1-138.
- Türkmen, C., 2006, *Kimyasal Biriktirme Yöntemi İle CdS, ZnS ve PbS Yarıiletken Yapıların Üretilmesi ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi.
- Türüt, A., Tüzemen, S., Yıldırım, M., Abay, B. and Sağlam, M. 1992. Barrier height enhancement by annealing Cr-Ni-Co alloy Schottky contacts on LEC GaAs. *Solid-State. Electron.* 35, 1423-1426.
- Uemoto, T. 1995. *Jpn J. Appl. Phys.*, 34, L7.
- Weber, S. G., Fegee, M., Spaeth, J. M., Kalabukhova, E. N., Lukin, S. N., and Mokhov, E. 1995. *Solid State Commun.*, 93, 393.
- Werner, J. H. and Güttler, H. H., 1991. Barrier inhomogeneities at Schottky contacts, *J. Appl. Phys.* 69,(3), 1522-1532.
- Werner, J. H. and Güttler, H. H., 1993. Temperature dependence of the Schottky barrier heights on silicon. *J. Appl. Phys.*, 73 (3), 1315.
- Weitzel, C. S., Palmour, J. W., Carter, C. H., Moore, K., Carter, K. J., 1997. *Proc. Int. Symp. Power Semiconductor Devices and ICs*, pp. 25-32.
- Wilmsen, C. W., 1985. *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interface* (New York: Plenum).
- Wilson, A. H., 1931. *Proc. Roy. Soc., A*, 133-458.
- Woodall, J., Freeouf, J., Petit, G., Jackson, T., and Kirchner, P. 1981. Ohmic contacts to normal-GaAs using graded band-gap layers of Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As grown molecular beam epitaxy. *J. Vac. Sci. Technol.* 19, 626-627.
- Venter, A., Samiji, M. E., Leitch, A. W. R., 2004. Formation of surface states during Schottky barrier fabrication on Al-doped p-type 6H-SiC. *Diamond and Related Materials*, 13, 1166-1170.
- Via, F. La., Roccaforte, F., Makhtari, A., Raineri, V., Musumeci, P., Calcagno, L., 2002. Structural and electrical characterisation of titanium and nickel silicide contacts on silicon carbide. *Microelectronic Engineering*, 60, 269-282.
- Yacobi, B. G. 2004. *Semiconductor Material*, Kluwer Academic Publishers, 228 p, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow.
- Yokoyama, N., Ohnishi, T., Odan, K., Onodera, H. and Abe, M. 1982. Tiw silicide gate self-alignment technology for ultra heigh-speed GaAs-MESFET LSI VLSIS. *IEEE Trans. Electron. Dev.* 29, 1541-1547.
- Yu, K., Cheung, S., Sands, T., Jaklevic, J., Cheung, N., and Haller, E., 1986. *J. Appl. Phys.* 60(9), 3235-3242.
- Zhang, S., Li, J., Wang, Y., Hu, G. 2004. Dissolution kinetics of galena in acid NaCl solutions at 25-75 degrees C. *Applied Geochemistry*, 19, 835.

- Zhu, S., Detavernier, C., Van Meirhaeghe, R. L., Detavernier, G. P. Ru, Li B. Z. and Cardon F. 1999. A BEEM study of the temperature dependence of the barrier height distribution in PtSi/n-Si Schottky diodes. *Solid-State Commun.* 112, 611.
- Ziel, A.V., 1968. *Solid State Physical Electronics*. Prentice-Hall International Inc., Minnesota, 108-144.

## ÖZGEÇMİŞ

Erzurum doğumlu olan Yasir GÜLEN, ilk ve orta öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 1998 yılında Atatürk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nü kazandı ve 2002 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans çalışmasına başladı. 2005 yılında Yüksek Lisans çalışmasını tamamlayıp aynı yıl Doktora'ya başladı ve 2010 yılında doktora öğrenimini tamamladı.