



## Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

### Ti/ p-Si Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi için I – V Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Hatice ASIL UĞURLU\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta OSB MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

Hatice ASIL UĞURLU, ORCID No: 0000-0002-1114-3627

\*Sorumlu yazar e-posta: haticeasil@isparta.edu.tr

#### Makale Bilgileri

Geliş: 16.01.2022  
Kabul: 15.04.2022  
Online Nisan 2022  
DOI:10.53433/yyufbed.1058643

#### Anahtar Kelimeler

Schottky diyot,  
Engel yüksekliği,  
Norde fonksiyonu,  
Cheung- Cheung  
fonksiyonları,  
I-V yöntem,  
Sıcaklık bağımlılık

**Öz:** Ti/p-Si Schottky diyotun elektriksel özellikleri 80 K- 300 K sıcaklık aralığında ve 20 K'lik adımlarla sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. İdealite faktörü (n), engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) gibi temel diyot parametreleri akım-gerilim (I-V) karakteristiği özelliklerinden faydalanarak geleneksel I-V yöntemi, Norde yöntemi ve Cheung fonksiyonlarından hesaplanmıştır. 300 K sıcaklığında engel yüksekliği değerleri I-V, Cheung ve Norde yöntemlerinden sırasıyla 0.738 eV, 0.658 eV ve 0.782 eV olarak bulunmuştur. İdealite faktörü ise I-V yöntemde 1.43 (300 K) ve Cheung yönteminde 3.33 (300 K) olarak hesaplanmıştır. 80 K- 300 K sıcaklık aralığında farklı yöntemlerden hesaplanan parametrelerin değerleri birbiriyle kıyaslanmıştır. Artan sıcaklık ile idealite faktörünün azalması ve engel yüksekliğinin artması, diyot parametrelerinin sıcaklığa güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir.

### Comparison of I – V Methods for Determination of Ti/ p-Si Schottky Diode Parameters

#### Article Info

Received: 16.01.2022  
Accepted: 15.04.2022  
Online April 2022  
DOI:10.53433/yyufbed.1058643

#### Keywords

Schottky diode,  
Barrier height,  
Norde function,  
Cheung-Cheung functions,  
I-V method,  
Temperature dependence

**Abstract:** The electrical properties of the Ti/p-Si Schottky diode were investigated as a function of temperature within the temperature interval of 80 K-300 K and in 20 K steps. Fundamental diode parameters such as ideality factor (n), barrier height ( $\Phi_b$ ) and series resistance ( $R_s$ ) were calculated making use of the conventional I-V method, the Norde method and Cheung functions by utilizing the current-voltage (I-V) characteristics. The barrier height values at 300 K temperature were found to be 0.738 eV, 0.658 eV and 0.782 eV from I-V, Cheung and Norde methods, respectively. The ideality factor was calculated as 1.43 (300 K) in the I-V method and 3.33 (300 K) in the Cheung method. The values of the parameters calculated from different methods in the temperature range of 80 K- 300 K were compared with each other. The decrease in ideality factor and increase in barrier height with increasing temperature show that diode parameters are strongly dependent on temperature.

## 1. Giriş

Metal-yarıiletken (MS) Schottky diyotlar entegre cihaz teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Schottky diyotlar elektronik ve optoelektronik uygulamalarda (foto dedektör, güneş pilleri, transistör, gaz sensörü, anahtarlama devreleri) yaygın olarak kullanılırlar (Rhoderick & Williams, 1988; Aydın ve ark., 2008). Schottky diyotları içeren elektronik devrelerin analizi ve tasarımı için diyot parametreleri hakkında bilgi sahibi olmak çok önemlidir. Bu yüzden MS Schottky diyotlar üzerinde sürekli olarak deneysel ve teorik çalışmalar yapılmaktadır. Schottky diyotun elektriksel davranışı idealite faktörü ( $n$ ), engel yüksekliği ( $\Phi_b$ ), seri direnç ( $R_s$ ) ve doyma akımı ( $I_o$ ) gibi parametreler yardımıyla incelenmektedir. Sadece oda sıcaklığında Schottky diyotların akım-gerilim ( $I - V$ ) özelliklerinin analizi, MS arayüzündeki engel oluşumunun doğası veya iletim süreçleri hakkında ayrıntılı bilgi vermez. Bu nedenle engel ve iletim mekanizmasının doğasını anlamak için MS kontakların geniş bir sıcaklık aralığında diyot parametrelerinin belirlenmesi gereklidir. Bu parametreleri belirlemek için ileri beslem akım-gerilim ( $I - V$ ) verileri kullanılarak termioyonik emisyon teorisine dayalı birçok yöntem geliştirilmiştir (Norde, 1979; Cheung & Cheung, 1986; Rhoderick & Williams, 1988). Bu yöntemlerden en yaygın olanı geleneksel I-V yöntemidir (Rhoderick & Williams, 1988) ve bu yöntemde  $\ln I$ 'ya karşılık  $V$  eğrisinin lineer bölgesinin eğimi kullanılarak diyot parametreleri bulunur. Yüksek seri direnç nedeniyle  $\ln I - V$  grafiği dar bir lineer bölgeye sahip olur ve bu durum yöntemi güvenilir hale getirir (Norde, 1979). Norde'nin geliştirdiği yöntemle engel yüksekliği ve seri direncin güvenilir değerleri belirlenebilir. Norde yöntemi (Norde, 1979)  $\ln I - V$  eğrisindeki tüm verilere uygulanır ve eğriden bulunan minimum değerler dikkate alınarak diyot parametreleri hesaplanır. Ancak bu yöntem, ideal Schottky diyot parametrelerini belirlemek için uygundur, ideal olmayan Schottky diyotları için, Norde'nin yöntemi Bohlin tarafından genelleştirilmiştir (Aldemir ve ark., 2017). Diğer bir yöntem olan Cheung yöntemi ise, ileri beslem  $\ln I - V$  eğrisinin aşağı doğru eğrilik bölgesindeki verilere veya lineer bölgeye uygulanır ve Cheung fonksiyonları ile diyot parametreleri bulunabilir. (Cheung & Cheung, 1986).

Çetin ve ark. (2004) Ti/p-Si Schottky diyotları üretilen bu diyotların Gaussian dağılımıyla engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerlerini araştırmışlardır. MS Ti/p-Si ve MIS Ti/p-Si Schottky diyotların elektriksel parametreleri karşılaştırılmalı olarak da başka bir çalışmada incelenmiştir (Çetin ve ark., 2005). Literatürde Ti /p-Si Schottky diyotlarına tavlamanın etkisini ele alan çalışmalarda mevcuttur (Liauh ve ark., 1993; Asıl ve ark., 2021). Chattopadhyay ve ark. (1997) Si üzerine Ti metali buharlaştırarak Schottky diyot üretmişler ve bu diyotun 200 K-300 K aralığında idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini incelemişlerdir.

Bu çalışmada, Ti / p-Si Schottky diyotlarının ileri beslem  $I - V$  ölçümleri, 80–300 K gibi geniş bir sıcaklık aralığında alınmıştır. Alınan  $I - V$  ölçüm sonuçları kullanılarak diyotlar için önemli olan idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç parametreleri farklı yöntemler yardımıyla hesaplanmıştır. Farklı yöntemlerle elde edilen parametrelerin sıcaklığa bağımlılığı hakkında bilgiler sunulmakta ve yöntemler arasındaki uyumluluk ve tutarsızlıklar açıklanmaya çalışılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Ti / p-Si Schottky diyotu, (100) yönelimine ve 5-10  $\Omega$  cm öz dirence sahip p-tipi Si yarıiletken malzeme kullanılarak üretilmiştir. Diyot yapılmadan önce yarıiletken malzeme yüzeyindeki organik ve inorganik kirliliklerden temizlemek için;  $\text{NH}_4^+ \text{H}_2\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinde 10 dakika kaynatma ve ardından  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinde 10 dakika kaynatma işlemleri yapılmıştır. Yüzeyde oluşan oksit tabakasını yok etmek için de  $\text{HF} : \text{H}_2\text{O} (1:10)$  çözeltisine ve son olarak da deiyonize suya 30 saniye boyunca daldırılmıştır. Daha sonra azot gazı ile kurutma işlemi yapılmıştır. p-Si yarıiletkeni yüzeyine omik kontak oluşturmak için Al metali buharlaştırılmıştır. Yarı iletken üzerinde oluşan omik kontak kalınlığı yaklaşık 1500 Å'dir. Buharlaştırma işleminden sonra 570 °C'de 3 dakika süresince ve  $\text{N}_2$  gazı ortamında tavlama işlemi uygulanmıştır. Schottky kontak oluşturmak için Si yarıiletkeni yüzeyine Ti metali buharlaştırılmıştır ve oluşturulan diyotlar 1.0 mm çapında ve yaklaşık 1500 Å kalınlığındadır. Bütün buharlaştırma işlemleri yaklaşık  $10^{-6}$  Torr basınç altında vakum kaplama ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Akım-Gerilim karakteristiği, karanlık ortamda 20 K' lik adımlarla 80-300 K sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri sıcaklık kontrollü Leybold Heraeus kapalı-devre helyum kriyostat ve Keithley 487 Picoammeter/Voltage kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 2.1. I-V Yöntem

Schottky kontaklarda akım iletimi çoğunluk taşıyıcılardan kaynaklanmaktadır ve arayüzey engeli üzerindeki termoiyonik emisyon ile tanımlanabilir. Doğru beslemede termoiyonik emisyon akımı ve doyma akımı ifadeleri Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'deki gibi yazılabilir (Rhoderick & Williams, 1988).

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

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

Burada;  $q$  elektronun yükü,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık,  $A$  diyot alanı,  $A^*$  Richardson sabiti ve p-Si için  $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ 'dir  $\Phi_{b0}$  engel yüksekliği,  $n$  idealite faktörüdür. Schottky diyotun engel yüksekliğini belirlemek için  $I_0$  değeri kullanılır ve  $I_0$  değeri ln I-V grafiğinin doğru beslem kısmında  $V=0$  da eksenini kestiği noktadan belirlenir. Eşitlik (2) tekrar yazılırsa,

$$\Phi_{b0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (3)$$

engel yüksekliği ifadesi için Eşitlik (3) elde edilir. İdealite faktörü ( $n$ ), ln I-V grafiğinin doğru beslem bölgesindeki lineer kısmının eğiminden bulunur ve Eşitlik (4) ifadesi ile verilir.

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (4)$$

## 2.2. Cheung yöntem (Cheung fonksiyonları)

Literatürdeki diyot parametrelerinin hesaplamak için kullanılan yöntemlerden bir diğeri ve en yaygın olanı Cheung yöntemidir (Cheung & Cheung, 1986). Cheung fonksiyonları şu şekilde açıklanabilir:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (5)$$

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (6)$$

$$H(I) = IR_s + n\Phi_b \quad (7)$$

Eşitlik (5), yarı logaritmik doğru beslem I-V karakteristiğinin doğrusal olmayan kısmının verileri için düz bir çizgi verir. Bu nedenle, y eksenini kestiği noktadan idealite faktörü ( $n$ ) ve grafiğin eğiminden de seri direnci ( $R_s$ ) değerleri bulunur.  $H(I)$  ve  $I$  grafiklerinin y eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği ve eğiminden  $R_s$  değerleri belirlenir.

## 2.3. Norde yöntem

Norde (Norde, 1979) seri direnç ve engel yüksekliğini değerlerini belirlemek için alternatif bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde Eşitlik (1)'i ve diyot üzerindeki voltajın  $3kT/q$ 'dan büyük olduğu durumları dikkate alarak Norde fonksiyonları tanımlamıştır. Norde fonksiyonları (Norde, 1979; Bohlin, 1986) Eşitlik (8)'de verilmiştir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (8)$$

Burada  $I(V)$ ,  $I$ - $V$  eğrisinden elde edilen akım değerleridir,  $\gamma$  ideallik faktörü  $n$ 'den büyük olan ilk tam sayıdır.  $F(V)$  ile  $V$  arasındaki grafikten, Schottky diyotunun  $\Phi_b$  değeri Eşitlik (9)'daki ifadede belirlenebilir.

$$\Phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (9)$$

Burada  $F(V_{min})$  değeri,  $F(V)$ 'nin minimum değeridir ve bu değere karşılık gelen voltaj da  $V_{min}$ 'dir. Ayrıca, bir Schottky diyotunun  $R_s$  (seri direnci) ise Eşitlik (10) ifadesi kullanılarak belirlenir.

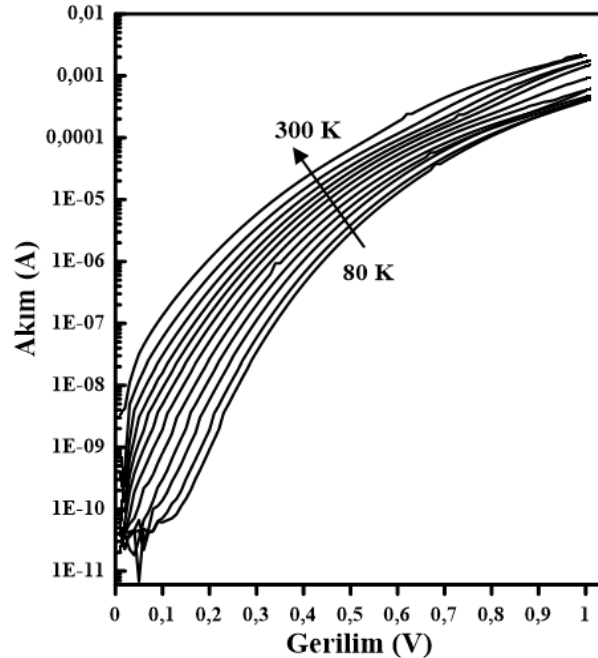
$$R_s = \frac{(\gamma-n)kT}{qI_{min}} \quad (10)$$

$I_{min}$  ve  $V_{min}$  değerleri,  $F(V)$  grafiğinin minimum noktasındaki ( $F(V_{min})$ ) akım ve gerilim değerleridir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. I-V Yöntem

Ti/p-Si Schottky diyotun 20 K'lık adımlar ile 80-300 K sıcaklık aralığındaki doğru ve ters beslem akım-gerilim karakteristiği Şekil 1'de gösterilmiştir. Engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün deneysel değerleri Eşitlik (2) ve (3) kullanılarak belirlenmiştir ve Çizelge 1'de hesaplanan değerler verilmiştir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri 300 K için 1.43 ve 0.738 eV, 80 K için ise 3.77 ve 0.267 eV olarak bulundu. İdealite faktörünün 1'den büyük olma sebepleri, arayüzey durumları, seri direnç, metal ve yarı iletken arasındaki ince arayüzey doğal oksit tabakasının varlığı ve metal-yarı iletken arayüzeyindeki engelin homojensizliği olarak ifade edilebilir (Aydoğan ve ark., 2009; Dere ve ark., 2020). Sıcaklığın artması ile idealite faktörü azalmış ve engel yüksekliği ise artmıştır. Bu hem idealite faktörünün hem de engel yüksekliğinin sıcaklığa kuvvetli bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. 80 K- 300 K sıcaklık aralığında Ti/p-Si Schottky diyotun yarı-logaritmik I-V karakteristiği.

Metal ve yarı iletken arayüzeyi boyunca akım iletimi, sıcaklıkla aktive olan bir süreç olduğundan, düşük sıcaklıklardaki taşıyıcılar, daha düşük engelleri aşabilir. Bu sebeple engel yüksekliği azaldıkça idealite faktörü artar. Eğer sıcaklık artarsa taşıyıcılar yeterli enerjiye sahip olur ve engeli aşan

taşıyıcı sayısı artar. Taşıyıcı sayısının artması engel yüksekliğinin artmasına neden olur ve böylece idealite faktörü de azalır (Gümüş ve ark., 2002; Çetin & Ayyıldız, 2005; Janardhanam ve ark., 2009; Asıl ve ark., 2013; Kumar ve ark., 2019). Düşük sıcaklıklarda engel yüksekliğinin azalmasının ve idealite faktörünün artmasının bir başka nedeni de arayüzey tabaka kalınlığının homojen olmaması ve düzensiz yük dağılımı olarak gösterilebilir (Aydoğan ve ark. 2005; Demircioğlu ve ark., 2011).

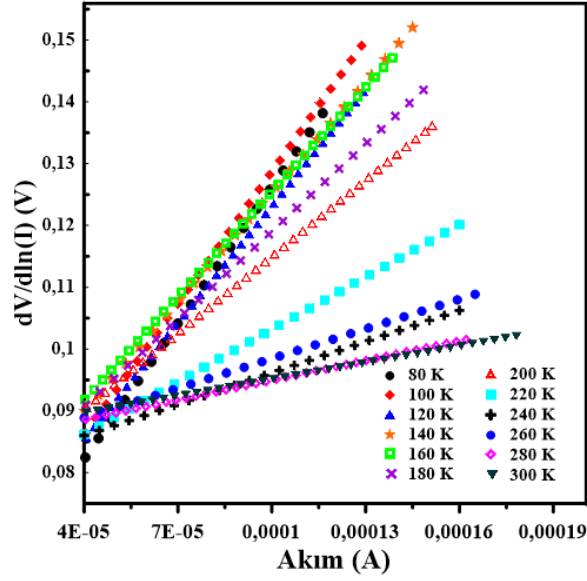
### 3.2. Cheung yöntem (Cheung fonksiyonları)

Şekil 1’deki yarı logaritmik I-V karakteristiğinin doğru beslem bölgesinde doğrusallıktan saptığı kısım, artan seri direnç etkisine bağlanabilir. Yarı iletkenler için akım iletimi önemlidir ve bunu etkileyen parametrelerden biri de seri dirençtir. Literatürde yarı iletkenlerin seri direncini hesaplamak için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olanı Cheung yöntemidir (Cheung & Cheung, 1986). Aynı zamanda Cheung yöntemi ile engel yüksekliği ve idealite faktörü de belirlenebilir.

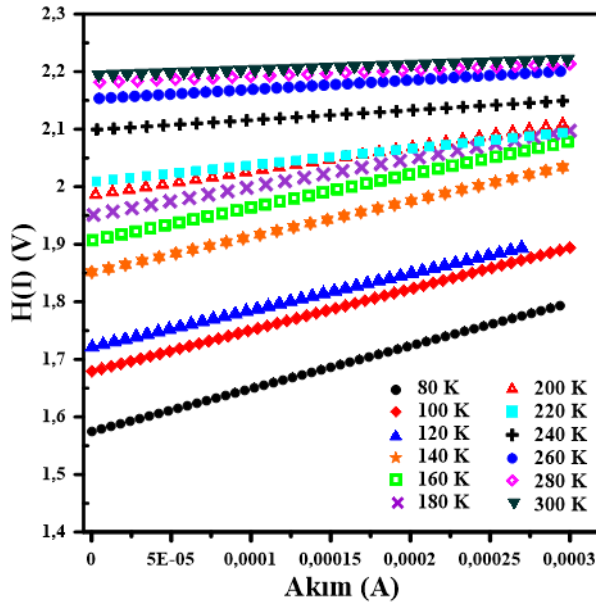
Çizelge 1. I-V karakteristiği kullanılarak farklı yöntemlerden elde edilen Ti/p-Si diyotun elektriksel parametreleri

Sıcaklık (K)	I-V Yöntem			Norde Yöntem		Cheung Yöntem			
	$I_0$ (A)	n	$\Phi_b$ (eV)	$\Phi_b$ (eV)	$R_s$ (kohm)	dV/dlnI-I		H(I)-I	
						n	$R_s$ (ohm)	$\Phi_b$ (eV)	$R_s$ (ohm)
300	8.89E-09	1.43	0.738	0.782	16.17	3.33	89.83	0.658	93.22
280	4.16E-09	1.57	0.704	0.729	19.38	3.49	105.96	0.624	108.21
260	1.79E-09	1.59	0.669	0.699	23.5	3.68	160.12	0.585	162.92
240	7.14E-10	1.55	0.633	0.669	32.7	3.83	168.81	0.548	170.55
220	3.94E-10	1.69	0.588	0.623	43.54	3.95	282.99	0.508	289.03
200	1.45E-10	1.68	0.549	0.587	59.41	4.28	412.68	0.464	416.3
180	9.92E-11	2.04	0.497	0.532	68.3	4.62	472.6	0.421	490.07
160	2.43E-11	2.07	0.459	0.495	105.19	5.01	562.64	0.38	575.52
140	6.80E-12	2.19	0.412	0.459	127.08	5.48	592.22	0.337	617.74
120	3.43E-12	2.66	0.357	0.398	154.56	5.81	630.14	0.297	638.87
100	1.18E-12	3.15	0.304	0.344	193.91	6.68	711.14	0.251	716.92
80	4.49E-13	3.77	0.267	0.286	266.13	7.66	734.12	0.205	744.48

80 K- 300 K sıcaklık aralığında Ti / p-Si Schottky diyotu için Eşitlik (5) ve Eşitlik (7) ifadeleri kullanılarak yapılan hesaplamalara göre  $dV/d(\ln I) - I$  ve  $H(I) - I$  deneysel grafikleri Şekil 2 ve Şekil 3’te verilmiştir. Eşitlik (5), yarı logaritmik doğru beslem I-V karakteristiğinin doğrusal olmayan kısmının verileri için düz bir çizgi verir. Bu nedenle, y eksenini kestiği noktadan idealite faktörü ( $n$ ) ve grafiğin eğiminden de seri direnci ( $R_s$ ) değerleri bulunur.  $H(I)$  ve  $I$  grafiklerinin y eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği ve eğiminden  $R_s$  değerleri belirlenir. Cheung fonksiyonlarından hesaplanan parametrelerin değerleri Çizelge 1’de verilmiştir.  $dV/d(\ln I)$  grafiğine göre seri direnç, 80 K’de 734.12  $\Omega$  olarak hesaplanırken, bu değer 300 K’da 89.83  $\Omega$ ’a düşmüştür.  $H(I) - I$  grafiğine göre ise seri direnç 80 K sıcaklıkta 744.48  $\Omega$  ve 300 K sıcaklıkta 93.22  $\Omega$  olarak hesaplanmıştır. Cheung fonksiyonları kullanılarak bulunan  $n$  ve  $\Phi_b$  değerleri 300 K sıcaklığında 3.33 ve 0.658 eV, 80 K için 7.66 ve 0.205 eV’tur.



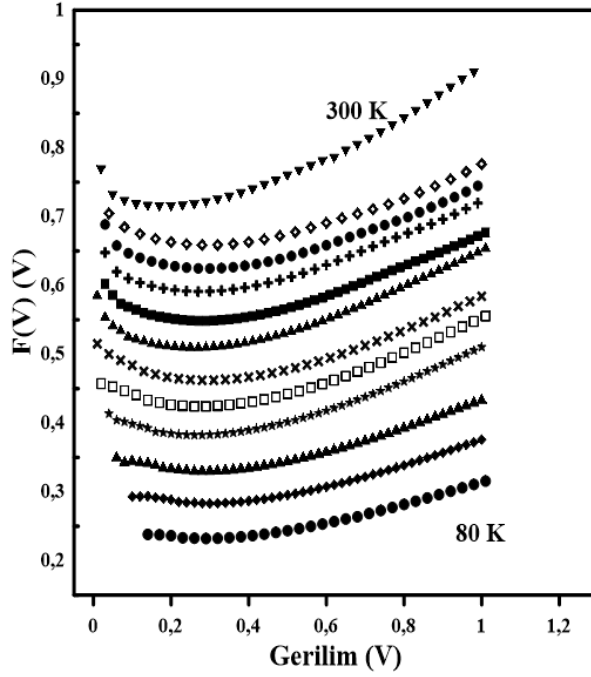
Şekil 2. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Ti/ p-Si Schottky diyotunun deneysel  $dV/d(\ln I) - I$  grafikleri.



Şekil 3. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Ti/ p-Si Schottky diyotunun deneysel  $H(I) - I$  grafikleri.

### 3.3. Norde yöntemi

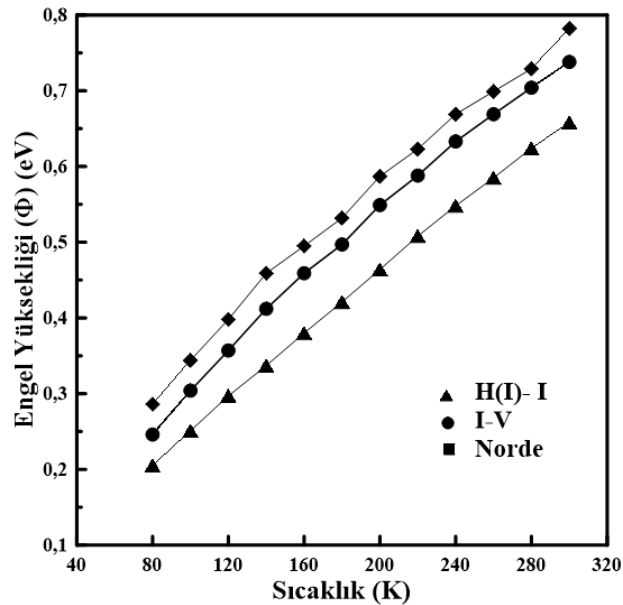
Farklı sıcaklıklardaki Ti / p-Si Schottky diyotu için  $F(V)$  ile  $V$  'nin grafiği Şekil 4'te gösterilmektedir.  $R_s$  ve  $\Phi_b$  parametreleri belirlenirken I-V yöntemden elde edilen idealite faktörü değerleri kullanılmıştır. Norde yöntemine göre hesaplanan seri direnç değerleri Çizelge 1'de gösterilmektedir. Norde fonksiyonlarından elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri, artan sıcaklıkla değişmiştir.  $F(V) - V$  grafiklerinden engel yüksekliği ve seri direnç değerleri 300 K sıcaklığı için 0.738 eV ve 16.17 k $\Omega$  ve 80 K için ise 0.286 eV ve 266.13 k $\Omega$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. 80 K- 300 K sıcaklık aralığında Ti/p-Si Schottky diyotunun  $F(V)$ -V grafiği.

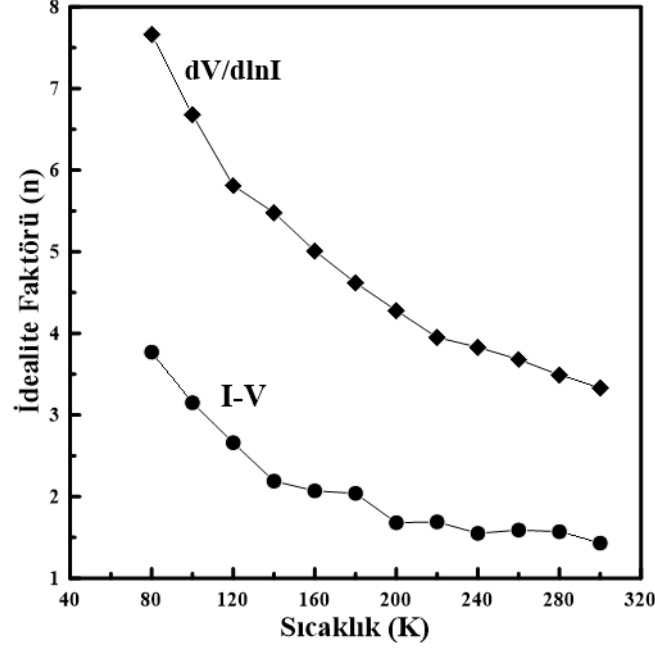
### 3.4. Yöntemlerin karşılaştırılması

Şekil 5'te farklı yöntemlerle elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa bağımlılığı gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, 3 yöntem kullanılarak hesaplanan engel yükseklikleri aynı sıcaklık bağımlılığını göstermektedir ve birbiriyle iyi uyum içindedir. Bununla birlikte, Cheung fonksiyonlarından hesaplanan  $\Phi_b$  değerleri, I-V ve Norde yöntemleri kullanılarak elde edilenlerden daha küçüktür. I-V yönteminde, I-V eğrisinin doğrusal bölgesindeki verileri kullanılarak parametreler hesaplanır. Oysaki Norde yönteminde I-V karakteristik eğrisinin tümündeki veriler kullanılır. Cheung yönteminde  $\Phi_b$  değerleri, I-V karakteristiğinin doğrusal olmayan bölgesinden alınan veriler kullanılarak elde edilir.

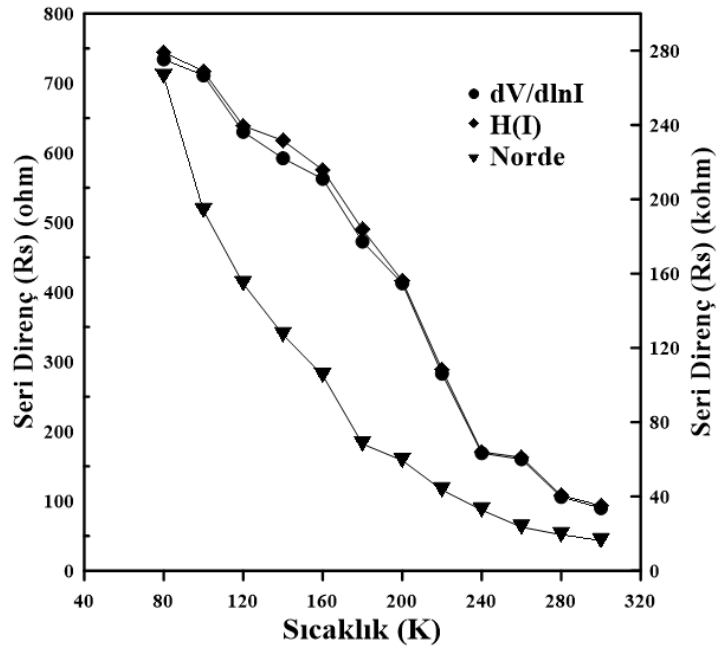


Şekil 5. 80 K- 300 K sıcaklık aralığında Ti/p-Si Schottky diyotunun hesaplanan engel yüksekliği değerleri.

Şekil 6’da  $dV/d\ln I$  ve  $\ln I-V$  grafiklerinden hesaplanan idealite faktörünün sıcaklıkla değişim grafiği verilmiştir.  $dV/d\ln I$  grafiğinde hesaplanan idealite faktörü değeri ile daha önce  $\ln I-V$  grafiğinden elde edilen değerler arasında çok fazla uyum yoktur. Bu, hesaplama tekniğindeki farklılıktan kaynaklanıyor olabilir. Her yöntem,  $\ln I-V$  karakteristiğinin farklı bölgelerini kullandığından,  $\Phi_b$  değerleri ve idealite faktörü değerleri arasında tutarsızlık oluşabilir.



Şekil 6. *p*-Si diyotunun *I-V* ve  $dV/d(\ln I) - I$  yöntemleri ile hesaplanan idealite faktörünün sıcaklığa bağlı grafiği.



Şekil 7. *p*-Si diyotu için farklı yöntemlerden hesaplanan seri direncin sıcaklığa karşı grafikleri.

Çizelge 1’den açıkça görüldüğü gibi  $dV/d\ln I - I$  ve  $H(I) - I$  doğrularından elde edilen  $R_s$  değerleri hemen hemen birbirine yakın bulunmuştur. Bu durum Cheung fonksiyonlarının uyumluluğunu gösterir. Norde ve Cheung fonksiyonlarından elde edilen seri direnç değerleri birbirinden farklı bulunmuştur (Şekil 7). Çoğu durumda, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen parametreler birbiriyle



uyumlu değildir. Genel olarak, Cheung fonksiyonlarından elde edilen değerler Norde yönteminden elde edilenlerden daha düşüktür. Çünkü Cheung fonksiyonları, yarı-logaritmik doğru beslem  $I-V$  grafiğinin yalnızca doğrusal olmayan bölgesine (yüksek voltaj bölgesi) uygulanır, halbuki Norde fonksiyonları, eklemnin doğru beslem  $I-V$  grafiğinin tümüne uygulanır (Asıl ve ark., 2021; Aydoğan ve ark., 2008; Demircioğlu ve ark., 2011).

Çizelge 1'den görülebileceği gibi, tüm yöntemlerde seri direnç değerleri artan sıcaklıkla azalmaktadır. Seri dirençteki düşüş, sıcaklık artışı ile idealite faktörünün azalmasına ve ayrıca daha yüksek sıcaklıklarda serbest taşıyıcı konsantrasyonunun artmasına bağlanabilir (Chand & Kumar, 1996; Doğan & Elagoz, 2014; Oruç & Altındal, 2018). Düşük sıcaklıklardaki seri direncin yüksek değerleri, taşıyıcıların düşük sıcaklıklarda donmasına bağlanabilir (Göksu ve ark., 2010; Durmuş ve ark., 2018; Sehkar ve ark., 2020).

#### 4. Sonuç

Ti/ p-Si diyotu 80-300 K sıcaklık aralığında  $I-V$  ölçümleri kullanılarak karakterize edildi. Diyotun  $I-V$  karakteristiği incelendiğinde, tüm sıcaklıklarda doğrultma davranışı göstermektedir. İdealite faktörü ( $n$ ), bariyer yüksekliği ( $\Phi_b$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) değerleri gibi temel parametreler üç farklı yöntem (geleneksel  $I-V$ ), Norde ve Cheung yöntemleri) kullanılarak belirlendi. Tüm yöntemler için, sıcaklıktaki artış ile engel yüksekliklerinin arttığı, idealite faktörünün ve seri direncin azaldığı hesaplanan sonuçlardan görülmektedir. Schottky engel yükseklikleri değerleri tüm yöntemlerde aynı sıcaklık bağımlılığına sahiptir. Cheung ve Norde fonksiyonlarından belirlenen  $R_s$  değerleri tutarsızlık sergilemektedir çünkü yöntemler  $I-V$  karakteristiğinin farklı bölgelerine uygulanmaktadır. Ayrıca Norde yöntemi seçilen  $\gamma$  değerine bağlıdır ve SBD parametrelerinin değerlerinin büyük ölçüde kullanılan yöntemle bağlı olduğu görülmüştür.

#### Kaynakça

- Aldemir, D. A., Kökçe, A., & Özdemir, A. F. (2017). The comparison of the methods used for determining of Schottky diode parameters in a wide temperature range. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(6), 1286-1292. doi: 10.16984/saufenbilder.279996
- Asıl, H., Çınar, K., Gür, E., Coşkun, C., & Tüzemen, S. (2013). Temperature dependent current-voltage characteristics of electrodeposited p-ZnO/n-Si heterojunction. *International Journal of Physical Sciences*, 8(10), 371-379. doi: 10.5897/IJPS2013.3851
- Asıl Uğurlu, H., Çınar Demir, K., & Coşkun, C. (2021). The effect of thermal annealing on Ti/p-Si Schottky diodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 15343–15351. doi: 10.1007/s10854-021-06084-1
- Aydın, M. E., Güllü, Ö., & Yıldırım, N. (2008). Temperature dependence of current–voltage characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts. *Physica B*, 403, 131–138. doi: 10.1016/j.physb.2007.08.089
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., & Türüt, A. (2005). On the barrier inhomogeneities of polyaniline/p-Si/Al structure at low temperature. *Applied Surface Science*, 250, 43–49. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.12.020
- Aydoğan, Ş., Sağlam, M., & Türüt, A. (2008). Some electrical properties of polyaniline/p-Si/Al structure at 300 K and 77 K temperatures. *Microelectronic Engineering*, 85, 278-283. doi: 10.1016/j.mee.2007.06.004
- Aydoğan, Ş., Çınar, K., Asıl, H., Coşkun, C., & Türüt, A. (2009). Electrical characterization of Au/n-ZnO Schottky contacts on n-Si. *Journal of Alloys and Compounds*, 476, 913-918. doi: 10.1016/j.jallcom.2008.09.131
- Bohlin, K. E. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics*, 60(3), 1223-1224. doi: 10.1063/1.337372
- Chand, S., & Kumar, J. (1996). Current transport in Pd<sub>2</sub>Si/n-Si(100) Schottky barrier diodes at low temperatures. *Applied Physics A*, 63, 171-178. doi: 10.1007/BF01567646
- Chattopadhyay, S., Bera, L. K., Maharatna, K., Chakrabarti, S., Dhar, S., Ray, S. K., & Maiti, C. K. (1997). Schottky diode characteristics of Ti on strained-Si. *Solid-State Electronics*, 41 (12), 1891-1893. doi:10.1016/S0038-1101(97)00143-3

- Cheung, S. K., & Cheung, N. W. (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49, 85-87. doi: 10.1063/1.97359
- Çetin, H., Şahin, B., Ayyıldız, E., & Türüt, A. (2004). The barrier-height inhomogeneity in identically prepared H-terminated Ti/p-Si Schottky barrier diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 19, 1113-1116. doi:10.1088/0268-1242/19/9/007
- Çetin, H., Şahin, B., Ayyıldız, E., & Türüt, A. (2005). Ti/p-Si Schottky barrier diodes with interfacial layer prepared by thermal oxidation. *Physica B: Condensed Matter*, 364, 133-141. doi: 10.1016/j.physb.2005.04.001
- Çetin, H., & Ayyıldız, E. (2005). Temperature dependence of electrical parameters of the Au/n-InP Schottky barrier diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 20, 625–631. doi: 10.1088/0268-1242/20/6/025
- Dere, A., Tataroğlu, A., Abdullah, G. Al-Sehemi, Eren, H., Soylu, M., Ahmed, A. Al-Ghamdi., & Yakuphanoglu, F. (2020). A temperature sensor based on Al/p-Si/ CuCdO<sub>2</sub>/Al diode for low temperature applications. *Journal of Electronic Materials*, 49, 2317–2325. doi: 10.1007/s11664-020-07989-z
- Demircioğlu, Ö., Karataş, Ş., Yıldırım, N., Bakkaloğlu, Ö. F., & Türüt, A. (2011). Temperature dependent current–voltage and capacitance–voltage characteristics of chromium Schottky contacts formed by electrodeposition technique on n-type Si. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 6433–6439. doi: 10.1016/j.jallcom.2011.03.082
- Demircioğlu, Ö., Karataş, Ş., Yıldırım, N., & Bakkaloğlu, Ö. F. (2011). Effects of temperature on series resistance determination of electrodeposited Cr/n-Si/Au–Sb Schottky structures. *Microelectronic Engineering*, 88, 2997–3002. doi: 10.1016/j.mee.2011.04.060
- Doğan, H., & Elagoz, S. (2014). Temperature-dependent electrical transport properties of (Au/Ni)/n-GaN Schottky barrier diodes. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 63, 186-192. doi: 10.1016/j.physe.2014.04.019
- Durmuş, H., Kılıç, H. Ş., Gezgin, S. Y., & Karataş, Ş. (2018). Analysis of current-voltage-temperature and capacitance-voltage-temperature characteristics of Re/n-Si Schottky Contacts. *Silicon*, 10, 361–369. doi: 10.1007/s12633-016-9456-2
- Göksu, T., Yıldırım, N., Korkut, H., Özdemir, A. F., Türüt, A., & Kökçe, A. (2010). Barrier height temperature coefficient in ideal Ti/n-GaAs Schottky contacts. *Microelectronic Engineering*, 87, 1781–1784. doi: 10.1016/j.mee.2009.10.012
- Gümüş, A., Türüt, A., & Yalçın, N. (2002). Temperature dependent barrier characteristics of CrNiCo alloy Schottky contacts on n-type molecular-beam epitaxy GaAs. *Journal of Applied Physics*, 9 (1), 245-250. doi: 10.1063/1.1424054
- Janardhanam, V., Ashok Kumar, A., Rajagopal Reddy, V., & Narasimha Reddy, P. (2009). Study of current–voltage–temperature (I–V–T) and capacitance–voltage–temperature (C–V–T) characteristics of molybdenum Schottky contacts on n-InP (1 0 0). *Journal of Alloys and Compounds*, 485, 467-472. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.05.141
- Kumar, A., Kumar, A., Sharma, K. K., & Chand, S. (2019). Analysis of anomalous transport mechanism across the interface of Ag/p-Si Schottky diode in wide temperature range. *Superlattices and Microstructures*, 128, 373-381. doi: 10.1016/j.spmi.2019.02.014
- Liauh, H. R., Chen, M. C., Chen, J. F., Chen, L. J. (1993). Electrical and microstructural characteristics of Ti contacts on (001)Si. *Journal of Applied Physics*, 74, 2590, doi:10.1063/1.354672.
- Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053. doi: 10.1063/1.325607
- Oruç, Ç., & Altındal, A. (2018). Comparative study of I–V methods to extract Au/FePc/p-Si Schottky barrier diode parameters. *Applied Physics A*, 124, 81. doi: 10.1007/s00339-017-1461-9
- Rhoderick, E. H., & Williams, R. H. (1988). *Metal-Semiconductor Contacts*. Second Edition, Clarendon Press, Oxford.
- Sehkar Reddy, P. R., Janardhanam, V., Shim, K. H., Reddy, V. R., Lee, S. N., Park, S. J., & Choi, C. J. (2020). Temperature-dependent Schottky barrier parameters of Ni/Au on n-type (001) -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diode. *Vacuum*, 171, 109012. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.109012