






# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Mo/n-Si Schottky Diyotların Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Karakteristiklerinin Analizi

 Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ<sup>a,\*</sup>,  Ahmet Faruk ÖZDEMİR<sup>a</sup>,  Durmuş Ali ALDEMİR<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Fizik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, 32260, Isparta, Türkiye

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: cigdem.s.guclu@gmail.com

### ÖZET

Bu çalışmada Mo/n-Si Schottky diyotların bazı elektriksel özellikleri incelendi. Diyotlar, Molibdenin (Mo) *n*-tipi Silisyum (Si) üzerine manyetik saçırma yöntemi kullanılarak biriktirilmesiyle üretildi. Akım-voltaj (*I-V*) ve kapasite-voltaj (*C-V*) ölçümleri oda sıcaklığında alındı. İdealite faktörü ( $n=1,48$ ), sıfır beslem engel yüksekliği ( $\Phi_{b0}=0,72$  eV), seri direnç ( $R_s=2,02$  k $\Omega$ ) gibi temel diyot parametreleri *I-V* verileri kullanılarak elde edildi. Ayrıca engel yüksekliği ve katkılama yoğunluğu ( $N_D$ ) değerleri 1kHz-3MHz frekans aralığında *C-V* ölçümlerinden belirlendi. *I-V* ve *C-V* ölçümlerinden elde edilen  $\Phi_b$  değerleri karşılaştırıldı. Her iki yöntemden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin farklılığı, engel yüksekliğinin homojen olmayışı olgusuna ve geleneksel *I-V* ve *C-V* yöntemlerinin farklı tabiatına atfedildi.

**Anahtar Kelimeler:** Schottky diyot, İdealite faktörü, Engel yüksekliği, Seri direnç

## Analysis of Current-Voltage and Capacitance-Voltage Characteristics of Mo/n-Si Schottky Diodes

### ABSTRACT

In this work, we have investigated the some electrical properties of Mo/n-Si Schottky diodes in detail. These diodes were fabricated by magnetic sputtering of Mo on n-Si. The current-voltage (*I-V*) and capacitance-voltage (*C-V*) measurements were taken at room temperature. Basic parameters such as ideality factor ( $n=1,48$ ), zero-bias barrier height ( $\Phi_{b0}=0,72$  eV), series resistance ( $R_s=2,02$  k $\Omega$ ) values were obtained by using *I-V* data. Also, barrier height and doping concentration ( $N_D$ ) values were determined from *C-V* measurements between 1 kHz and 3 MHz frequency values. The barrier height values obtained from *I-V* and *C-V* measurements were found as different. This case attributed to barrier height inhomogeneity and different natures of conventional *I-V* and *C-V* methods.

**Keywords:** Schottky diode, Ideality factor, Barrier height, Series resistance

## I. GİRİŞ

Yarıiletken tabanlı cihazların devre elemanı olarak kullanılması elektronik ve optoelektronik endüstrisinin en önemli ticari uygulamalarından biridir. Schottky engel diyotları (SBDs) temelde metal ile yarıiletkenin birbiriyle yüksek sıcaklık, düşük basınç ortamında mümkün olan en az dirençle -ki bu idealde sıfırdır- yakın kontak edilmesiyle oluşturulur. Metal-yarıiletken (MS) ve metal – yalıtkan-yarıiletken (MIS) tipi Schottky bariyer diyotlar; güneş pilleri (SCs), fotodedektörler, hızlı anahtar (switching) uygulamaları, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilimle değişen kondansatörler), alan etkili transistörler (AET/FETs) ve mikrodalga devre elemanları gibi birçok elektronik aygıtın temelini oluşturur [1]. Yarıiletken elektroniğindeki hızlı gelişmeler göz önüne alındığında bu çalışmanın da konusu olan MS kontaklar birer entegre devre elemanı olarak yoğun ilgi görmektedir.

Bütün yarıiletken cihazların kararlılığında ve güvenilirliğinde ortaya çıkabilecek problemlerin çoğu yüzey koşullarıyla ilgili olduğu için MS kontaklar yardımıyla yüzey fiziğini anlamak aygıt uygulamalarında büyük önem taşır. Literatürde MS ve MIS yapılarla ilgili farklı çalışmalar olmasına rağmen muhtemel akım-iletim mekanizmaları, kapasitör özellikleri, M/S ara yüzeyinde oluşan engelin biçimi, yapısı ve elektriksel karakterizasyonu ile ilgili hala bilinmeyen ve iyileştirilmesi gereken özellikler bulunmaktadır [1-19]. Bunun için, Schottky engel diyotların akım iletim mekanizmalarının özellikle geniş frekans, sıcaklık ve voltaj aralıklarında incelenmesi önemlidir.

Bugün elektronik cihazlarda en sık kullanılan yarıiletken malzeme Silisyumdur. Silisyum aynı zamanda silikon olarak bilinmekte ve yaygın olarak elektronik çip üretiminde kullanılmaktadır. Tedarik edilmesi kolay, maliyeti düşük bir yarıiletken malzeme olarak göze çarpar.

Molibden saf halde gümüşümsü beyaz renkli ve çok serttir. Yüksek erime ve kaynama noktasına sahip oluşu onu yüksek ısı enerjisine karşı dayanıklı kılar. Bir geçiş metali olarak diğer elementlerle kolaylıkla bileşik oluşturabilir. Çoğu ticari uygulamada diğer elementlere az miktarda Molibden ilaveleriyle mukavemet, elektriksel iletkenlik veya korozyona karşı dirençli alaşımlar elde edilebilmektedir.

Literatürde Si yarıiletken tabanlı MS kontaklarla ilgili birçok çalışma mevcutken Mo/Si MS Schottky kontaklarla ilgili çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Fonash vd. [2] tarafından ortaya konan çalışmada tek kristal Si üzerine iyon demeti saçtırma yöntemi ile üretilen Mo/Si Schottky engel diyotlardaki anormal doğrultma davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada, literatürün aksine Mo/*p*-Si yapısının doğrultma davranışı sergilediği; Mo/*n*-Si yapısının ise omik davranış gösterdiği rapor edilmiştir. Diğer bir çalışmada, Mo/*n*-Si Schottky engel diyotlarının frekans-iletkenlik karakteristikleri Miyamoto [3] tarafından diyotun AC küçük sinyal eşdeğer devresi kullanılarak incelenmiştir. Burada Si yüzeyinde hasara uğramış bir tabakanın oluştuğu ve hasarlı tabakadaki derin seviyelerin elektronlar için bir yakalama merkezi görevi üstlendiği görülmüştür. Diğer bir çalışmada ise <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -ışınlarına maruz bırakılmış Mo/*n*-Si diyotların *I-V* karakteristikleri 120-330K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Sıfır-beslem engel yüksekliği, idealite faktörü ve ters beslem akım değerleri doz miktarıyla düzenli bir değişim sergilememiştir. Farklı radyasyon dozlarına maruz kalan numunelerin farklı *I-V* mekanizmaları sergilediği sonucuna varılmıştır [4]. Bazı araştırmalar sonucunda Mo-Si, Pt-Si ve Hf-Si sistemlerinin Schottky engelinin manyetik saçtırma yöntemiyle oluşturulabileceği rapor edilmiştir [3, 5] Bu yöntem yüksek biriktirme oranı ve alttaş üzerinde iyi bir kristal film oluşturabilme özelliğine sahiptir. Ayrıca Schottky engel yapımı için kullanılan Tungsten [6], Vanadyum [7], ve Molibden [8-10] gibi metallerin yüksek sıcaklıklarda Au/Si sistemlerine göre daha güvenilir ve daha esnek olabileceği beklenir [11-12].

Bu çalışmada, Mo/*n*-Si metal-yarıiletken (Schottky) kontakın oda sıcaklığında elektriksel *I-V*, *C-V* ve ters beslem *C<sup>2</sup>-V* karakteristikleri kullanılarak belirli diyot parametreleri elde edilip karşılaştırılmıştır.

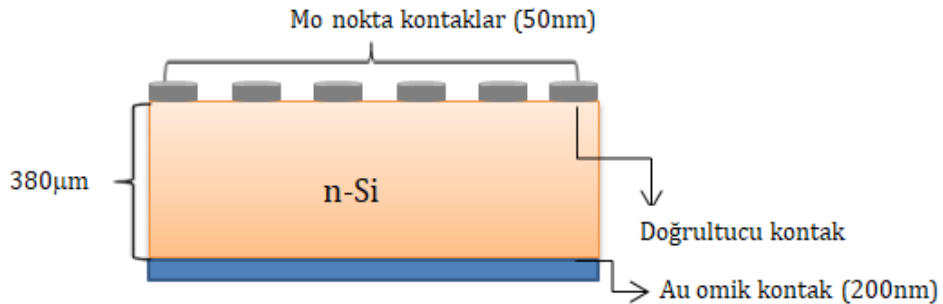
Bunun için farklı yöntemlerden yararlanılmış olup  $C$ - $V$  karakteristikleri 1 kHz-3 MHz gibi geniş bir frekans aralığında incelenmiştir.

## II. MATERYAL VE METOT

Schottky engeli, yarıiletken taban üzerine ince bir metal tabakanın biriktirilmesiyle meydana getirilebilir. Doğru standartlarda bir kontak, uygun metalin ince film tabakası oluşturacak şekilde; ara yüzey tabakasız ve metal atomlarının yarıiletken içine difüze olmadan tutunması ile meydana gelir. Pratikte ise fabrikasyon sürecindeki çevre şartları, kimyasal temizleme işlemi ve üretimde oluşan istenmeyen kirlilikler kontakın kalitesini etkiler [1, 13, 17].

Bu çalışmada Mo/ $n$ -Si Schottky diyot üretmek için (100) doğrultusunda büyütülmüş, 380  $\mu$ m kalınlığında Fosfor (P) katkılı  $n$ -tipi Si dilimi kullanılmıştır. Kontak alınmadan önce  $n$ -tipi Si numune sırasıyla; 5 dakika asetona ve metanola daldırılmıştır. Sonra  $\text{NH}_4\text{OH}+\text{H}_2\text{O}_2+6\text{H}_2\text{O}$  içinde 10 dakika kaynatılarak kimyasal olarak temizlenmiş, daha sonra da 10 dakika 60 °C' de  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2+6\text{H}_2\text{O}$  içerisinde kaynatılmıştır. Bu işlemler sırasında ön yüzde oluşan doğal oksit tabakasını kaldırmak için numune 30 saniye  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$  (1:10) çözeltisinde bekletilmiştir. Omik kontak yapımından önceki her bir standart temizleme adımından sonra numune 30 saniye de-iyonize suda durulanmış, azot gazı ile kurutulmuştur.  $N$ -tipi Si kristali temizlendikten sonra vakum kaplama cihazına alınarak omik kontak için arka yüzeylerine  $10^{-5}$  Torr basınç altında %99.999 saflıkta Altın (Au) metali buharlaştırılmıştır. Oluşan  $n$ -Si/Au yapısı 580 °C' de  $\text{N}_2$  ortamında 3 dakika tavlansmıştır. Bir sonraki aşamada numune vakum ortamına alınmıştır. Schottky (doğrultucu) kontak gerçekleştirmek için %99.999 saflıktaki Mo bir maske yardımıyla 50 nm kalınlıkta ve 1,0 mm çapında nokta kontaklar oluşturacak şekilde manyetik saçtırma yöntemiyle Si numunenin ön yüzeyine biriktirilmiştir. Diyotun şematik modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.

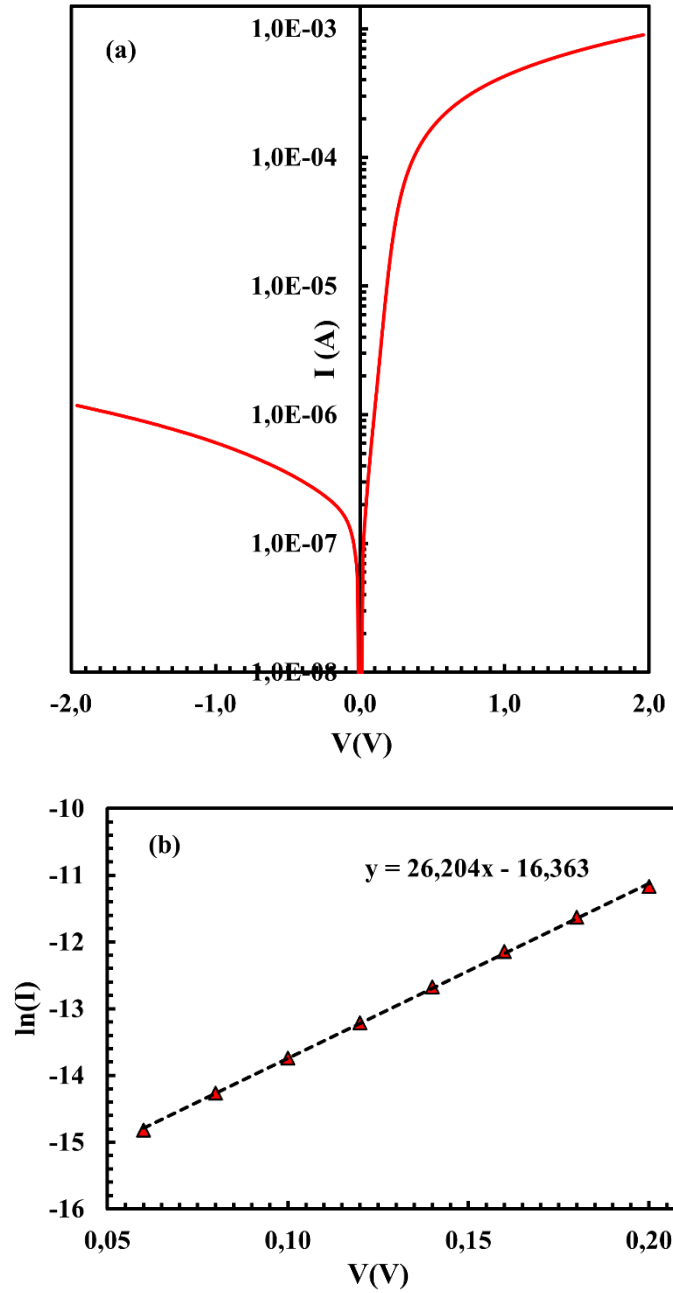
Mo/ $n$ -Si Schottky diyotun  $I$ - $V$  ölçümleri için "Keithley 2400 SourceMeter" cihazı, frekansa bağlı  $C$ - $V$  ölçümleri için ise "Hewlett Packard 4192A LF impedance analyzer" cihazı kullanılmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve karanlık ortamda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Mo/ $n$ -Si Schottky diyotun şematik modeli

### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Numunenin diyot karakteristiklerini belirlemek amacıyla  $\pm 2$  V aralığında, doğru ve ters beslem  $I$ - $V$  ölçümleri alınmış ve grafikleri Şekil 2 (a) ve (b)' de gösterilmiştir. Numunenin  $I$ - $V$  karakteristiğinden görüldüğü gibi arayüzeyde bir potansiyel engeli vardır ve doğrultucu özellik sergilemektedir [16]. Doğrultma oranı ( $RR=I_F/I_R$ ) ters beslem akımının doyuma ulaştığı 1 V'da ters ve doğru beslem akımları arasında ortaya çıkan orandan 705,78 olarak belirlenmiştir. Uygulanan gerilimin yüksek değerlerine doğru diyotun seri direncinden dolayı grafikte bir bükülme meydana gelmiştir. Bu durum diyot akımını sınırlandırmıştır (Şekil 2a).



Şekil 2. (a) Mo/n-Si Schottky diyotun oda sıcaklığında yarı logaritmik ters ve doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristikleri (b) Mo/n-Si Schottky diyotun 0,05V-0,20V aralığındaki  $\ln(I)$ - $V$  karakteristiği

Termoionik emisyon teorisine göre bir Schottky engelinden akan akım ile kontağa uygulanan gerilim arasındaki ilişki seri direnç ( $R_s$ ) etkisi de göz önüne alındığında Eş. 1 ile verilir:

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Burada  $n$  idealite faktörüdür ve ideal bir diyotta değeri 1' dir.  $V > 3kT/q$  için eşitlikte parantez içindeki 1 değeri ihmal edilebilir. İfadede  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı ve  $I_0$  ekstrapole edilmiş doyma akımı değeridir.

Burada,

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

şeklinde verilir.  $q$  elektronik yük ( $=1,6 \times 10^{-19}$  C),  $V$  uygulanan voltaj,  $A$  diyot alanı ( $7,85 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>),  $\Phi_{b0}$  sıfır beslem engel yüksekliği ve  $A^*$  etkin Richardson sabitidir.  $n$ -Si için  $A^*=112$  A cm<sup>-2</sup>K<sup>-2</sup>, dir [1, 17]. Diyotların idealite faktörlerini hesaplamak için Eş. 1 kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilebilir.

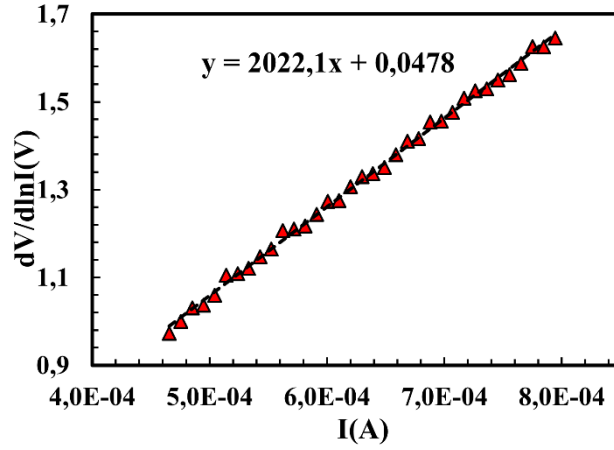
$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3)$$

Bu ifadede  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  teriminin değeri,  $\ln I$ - $V$  grafiğinin doğru beslem tarafındaki lineer kısmın eğiminden elde edilmiştir (Şekil 2b). Eş. 2 yeniden düzenlenirse, sıfır beslem engel yüksekliği için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$q\Phi_{b0} = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4)$$

Buraya kadar geleneksel  $I$ - $V$  yöntemi olarak adlandırılan yöntemle Şekil 2b'den görüldüğü gibi  $\ln I$ - $V$  grafiğine lineer bir fit uygulanmış; eşitlikler (2), (3) ve (4) yardımıyla  $n$ ,  $\Phi_{b0}$  ve  $I_0$  diyot parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler sırasıyla 1,48; 0,72 eV ve  $7,83 \times 10^{-8}$  A olarak bulunmuştur.

Mo/ $n$ -Si ara yüzeyinde kaçınılmaz olarak var olan oksit tabaka  $n$ -Si üzerine Mo biriktirilmesinden hemen önce havaya maruz kalmasından kaynaklanır. Çok iyi temizlenmiş Si yüzeyinde bile 5Å civarında bir oksit tabaka oluşumu kaçınılmazdır [1, 13]. Bu yalıtkan oksit tabakanın varlığı ve ara yüzeyin homojen olmayışı birden büyük idealite faktörü değerine neden olur. Ayrıca tükenim bölgesindeki taşıyıcıların rekombinasyonundan kaynaklanan akımlar ya da tünelleme etkisi gibi nedenler idealite faktörünün 1' den büyük olmasının genel sebepleri olarak gösterilebilir [1, 17, 19]. Bunun yanı sıra engel yüksekliğindeki inhomojenite de ideal durumdan uzaklaşmanın nedenleri arasındadır [20-22].



Şekil 3. Mo/n-Si Schottky diyotunun oda sıcaklığında  $dV/d(\ln I)$ -I grafiği

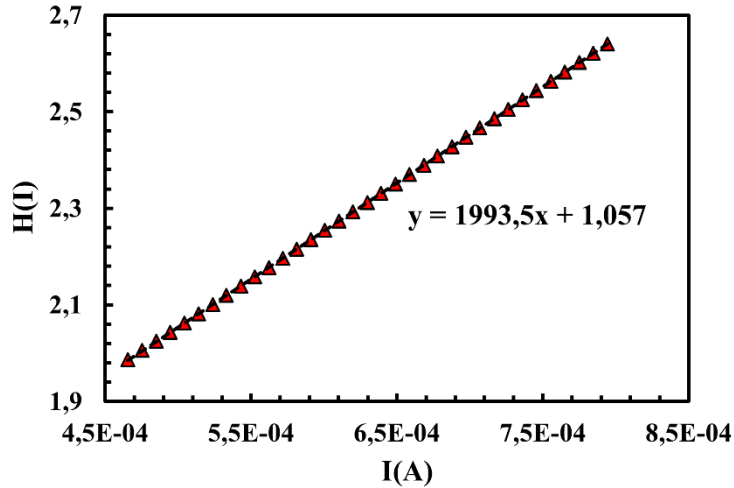
Temel akım eşitliği (1) göz önünde bulundurularak elde edilen (5) ve (6) eşitlikleri literatürde Cheung fonksiyonları olarak adlandırılır [18]. Bu eşitlikler yardımıyla  $R_s$ 'nin yanı sıra,  $n$  ve  $\Phi_b$  değerleri yeniden elde edilmiştir.

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

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

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (6b)$$

Numunenin Cheung fonksiyonlarına ait  $dV/d(\ln I)$ -I grafiği Şekil 3'te gösterilmiştir. Burada Eşit. 5'ten de açıkça görüldüğü gibi doğrunun eğimi  $R_s$  değerini, doğrunun düşey eksenini kestiği nokta ise  $nkT/q$  değerini verir. Bu yolla diyotun  $n$  değeri 1,85;  $R_s$  değeri 2,02 k $\Omega$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Mo/n-Si Schottky diyotunun oda sıcaklığında  $H(I)$ -I grafiği

Şekil 3 ve Şekil 4'te, Mo/n-Si Schottky diyotunun  $I$ - $V$  eğrisinin lineer olmayan bölgesindeki verilerden elde edilen Cheung fonksiyonu eğrileri analiz edilmiştir. Eşitlik (6a)'daki Cheung fonksiyonu göz önünde bulundurularak diyota ait  $H(I)$ - $I$  grafiği çizilmiştir. Şekil 4'te görülen  $H(I)$ - $I$  grafiğine lineer bir fit uygulanmış ve Eşitlik (6b) yardımıyla  $\Phi_b$  ve  $R_s$  değerleri elde edilmiştir. Buradan sırasıyla engel yüksekliği değeri 0,57 eV ve seri direnç değeri 1,99 k $\Omega$  bulunmuştur.

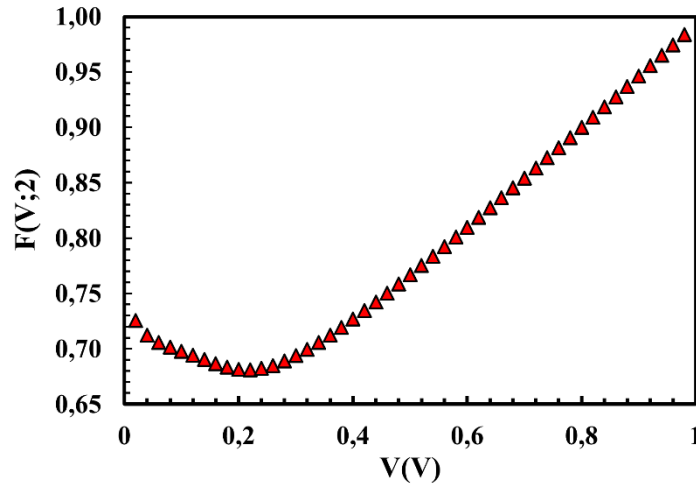
Schottky diyotun kontak parametrelerinin belirlenmesi için uygulanan diğer bir yöntem Norde [23] metodudur. Norde metodu, metal ile yarıiletken arasındaki kontakın ideal olduğunu varsaydığı için ideal olmayan ( $n>1$ ) durumlarda kontak parametrelerini bulmak için uygun değildir. Bu sebepten Bohlin [24] bu metodu ideal olmayan durumlar için modifiye etmiştir. Bohlin'in genelleştirilmiş metodu, sabit sıcaklıkta alınan tek bir  $I$ - $V$  ölçümünden  $\Phi_b$  ve  $R_s$  değerlerinin hesaplanmasını mümkün kılar. Bu metot; modifiye edilmiş Norde fonksiyonunu aşağıdaki şekilde tanımlar;

$$F(V; \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (7)$$

Burada  $\alpha$  idealite faktöründen daha büyük keyfi bir sabittir. Norde fonksiyonu için ideal olmayan durumlarda Schottky diyotların voltaja bağlı akım ifadesi olan Eş. 1 kullanılarak türetilen diğer parametre ifadeleri de Eş. 8 ve 9'da sırasıyla verilmiştir.

$$\Phi_b = F_{min}(V, \alpha) + \left( \frac{\alpha-n}{n} \right) \left( \frac{V_{min}}{\alpha} - \frac{kT}{q} \right) \quad (8)$$

$$R_s = \frac{kT(\alpha-n)}{qI_{min}} \quad (9)$$



**Şekil 5.** Mo/n-Si Schottky diyotun oda sıcaklığında  $I$ - $V$  verilerinden elde edilmiş  $F(V;2)$ - $V$  eğrisi

Şekil 5'te Mo/n-Si Schottky diyotun  $F(V; \alpha)$ - $V$  eğrisinin minimum noktası hassas bir biçimde tespit edilerek bu noktaya karşılık gelen  $V_{min}$ ,  $I_{min}$  ve  $F_{min}$  değerleri belirlenmiştir. Buradan  $R_s$  ve  $\Phi_b$  parametreleri elde edilerek Tablo 1'e kaydedilmiştir.  $R_s$  ve  $\Phi_b$  parametreleri belirlenirken geleneksel metottan elde edilen  $n=1,48$  değeri kullanılmıştır. Tablo 1'den görüldüğü gibi bu metottan elde edilen  $R_s=0,64$  k $\Omega$  değeri Cheung fonksiyonlarından elde edilenlerden farklıdır. Literatürde bu durumun sebebi Norde fonksiyonunun diyotun  $I$ - $V$  karakteristiğinin doğru beslem kısmının tamamına uygulanmasıyla açıklanır. Cheung fonksiyonları ise  $I$ - $V$  karakteristiğinin lineer olmayan bölgesine uygulanır. Grafiğin dönüm noktası belirlenirken yapılacak hata  $R_s$  değerini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Genel olarak Norde'den elde edilen seri direnç değerleri Cheung fonksiyonlarından elde edilenlerden küçüktür. Bizim çalışmamızda olduğu gibi literatürde de küçük olduğu durumlar rapor edilmiştir [25, 26]. Böyle bir durumum literatürdeki sonuçlar da göz önüne alındığında çok yüksek seri direncin varlığından ileri geldiği söylenebilir.

Tablo 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. Bir diyotta seri direnç farklı kaynaklardan ortaya çıkabilir. Yarıiletken direnci, yarıiletken üzerine biriktirilen metallerin kontak direnci, ara yüzey hallerinin dağılımı, metal-yarıiletken arasındaki yalıtkanın varlığı bu sebeplerden bazılarıdır.

Tablo 1’de  $dV/d\ln I-I$  grafiğinden elde edilen  $n=1,85$  değeri geleneksel metottan elde edilenden daha büyüktür. Bu farklılığın sebeplerinden biri Cheung fonksiyonlarının  $I-V$  eğrisinin farklı bir bölgesini ele almasıdır. Cheung fonksiyonları  $I-V$  karakteristiğinin lineer olmayan bölgesinin verilerini kullanır. Lineer bölgede sadece ara yüzey halleri ve ara yüzey tabakası etkinken, lineer olmayan bölgede bunlara ilave olarak seri direnç etkisi de göze çarpar. Diğer sebep, idealite faktörünün uygulanan beslem voltajıyla artmasıdır. Tabloda  $H(I)-I$  eğrisinden elde edilen  $\Phi_b$  değerinin geleneksel metottan elde edilenden küçük olduğu görülmektedir. Bu uyumsuzluk literatürdeki metotların  $I-V$  eğrisinin farklı bölgelerini kullanmasıyla açıklanmaktadır.

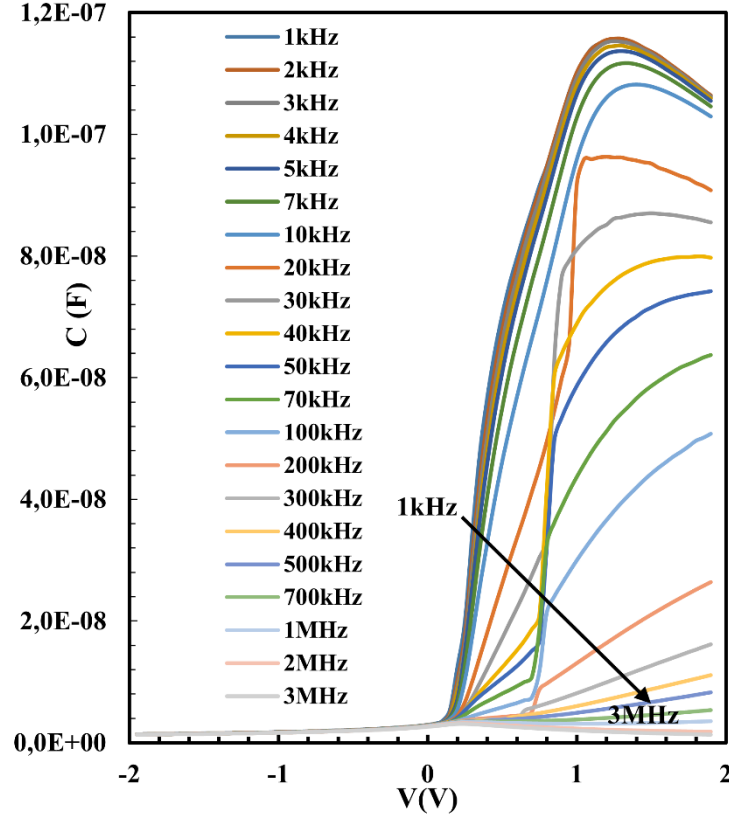
**Tablo 1.** Farklı metotlardan elde edilen kontak parametrelerinin karşılaştırılması

Metot		$n$	$\Phi_b$ (eV)	$R_s$ (k $\Omega$ )	$I_0$ (A)
Geleneksel	$I-V$	1,48	0,72		$7,83 \times 10^{-8}$
Cheung	$dV/d\ln I-I$	1,85		2,02	
	$H(I)-I$		0,57	1,99	
Norde	$F(V)-V$		0,71	0,64	

Metal ve katkılanmış bir yarıiletken, ikisinin komşuluğunda tüketim tabakası meydana getirecek şekilde kontak haline getirildiğinde, uygulanan gerilim ile kapasitesi değişen bir kondansatör gibi davranır [27]. Kontak kapasitesi, yarıiletkendeki iyonlaşmış vericilerin ara yüzey hallerinin ya doğal ya da yapay arayüzey oksit/yalıtkan tabakasının etkisi altındadır. Bu sebepten voltaja bağlı kapasite eğrileri farklı frekans değerlerinde incelenmiştir.

Şekil 6’da Mo/ $n$ -Si Schottky diyotun  $\pm 2V$  aralığında  $C-V$  karakteristiği çizilmiştir. Diyotun  $C-V$  eğrisi belirtilen voltaj aralığında tersinim (inversion), tüketim (depletion) ve yığılım (accumulation) olmak üzere üç farklı bölgeye sahiptir.  $C$  değerleri artan frekansla azalmıştır. Bu durum literatürde farklı yaşam ömürlerine sahip ara yüzey durumlarının ( $N_{ss}$ ) varlığına atfedilir [28-31]. Ara yüzey durumları, düşük frekanslarda dışarıdan uygulanan AC sinyalinin takip edebilirken yüksek frekanslarda ( $f \geq 1$  MHz) takip edemez. Düşük frekanslarda periyot değeri tuzaklardaki yükün yaşam ömründen daha yüksek olduğu için AC sinyali rahatlıkla takip edebilir. Bu durumda kapasitansın yüksek değerleri, Mo/ $n$ -Si ara yüzeyindeki doğal oksit tabakasının durum yoğunluğundan kaynaklanan ilave (excess) kapasitansa atfedilir [32-35]. Uygulanan AC sinyalinin 1 MHz ve daha büyük olduğu durumlarda ara yüzey durumları kontak kapasitesine katkıda bulunamayacağı için ince ara yüzey tabakalı metal- yarıiletken kontaklar için kontak kapasitesi sadece tüketim tabakasındaki yüklerin hareketinden kaynaklanacaktır [36-38].





Şekil 6. Mo/n-Si Schottky diyotun oda sıcaklığında, 1 kHz-3 MHz frekans aralığındaki C-V grafikleri

Mo/n-Si Schottky diyotun oda sıcaklığında ve belirtilen frekans aralığındaki C-V eğrilerinden elde edilen  $C^{-2}$ -V ters beslem karakteristikleri de Şekil 7’de çizilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi ters beslem bölgesi boyunca  $C^{-2}$ -V karakteristikleri lineerdir. Her bir frekans değeri için bu lineer bölgeye doğrusal fit uygulanmasıyla  $V_0$  (V),  $V_d$  (V),  $N_D$  ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $\Phi_b$  (eV),  $E_f$  (eV), parametreleri aşağıda sırasıyla verilen uygun eşitlikler yardımıyla elde edilmiştir [29].

$$C^{-2} = \frac{2(V_d+V)}{\epsilon_s q A^2 N_D} \quad (10)$$

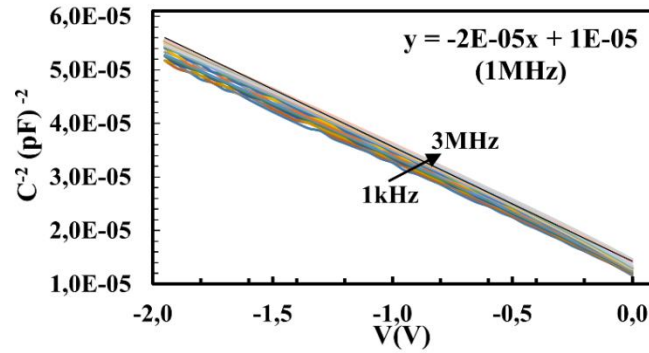
$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s q A^2 N_D} \quad (11)$$

$$\Phi_b(C - V) = V_d + E_f \quad (12)$$

$$E_f = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (13)$$

Eşitliklerde A diyot alanını,  $\epsilon_s$  yarıiletkenin elektriksel geçirgenliğini ( $n$ -Si için  $\epsilon_s=11,7\epsilon_0$ ),  $\epsilon_0$  boş uzayın elektriksel geçirgenliğini ( $8,85 \times 10^{-14}$  F/cm),  $N_D$  taşıyıcı (verici) yoğunluğunu,  $V_d$  sıfır beslem difüzyon potansiyelini,  $E_f$  Fermi enerji seviyesini,  $N_C$  iletkenlik bandının etkin durum yoğunluğunu ( $n$ -Si= $2,8 \times 10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$ ) ifade eder [17]. Eşit. 10’a göre  $C^{-2}$ -V grafiğinde  $C^{-2}=0$  iken doğrunun yatay eksenini (voltaj eksenini) kestiği nokta olan  $V_0$  kesme potansiyeli yardımıyla difüzyon potansiyeli tespit edilmiştir. Diğer parametreler de belirtilen uygun sabitler yerine yazılarak her bir frekans değeri için sırasıyla Eşitlikler (11), (12) ve (13)’ten bulunmuştur. Şekil 7 üzerinde 1 MHz’deki doğrusal fit gösterilmiştir. Bu fitten  $V_0=0,671$  V;  $V_d=0,697$  V;  $N_D=8,856 \times 10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$ ;  $\Phi_b=0,906$  eV ve  $E_f=0,209$

eV olarak bulunmuştur. Diğer frekanslardaki doğrusal fitler sonucu bulunan tüm parametreler ise Tablo 2’de listelenmiştir. Tablodan görüldüğü üzere verici yoğunluğu hemen hemen frekandan bağımsız iken difüzyon potansiyeli ve engel yüksekliği artan frekansla artmaktadır. Literatürde Schottky diyotları için benzer sonuçlar rapor edilmiştir [39-42]. Difüzyon potansiyelinin ve engel yüksekliğinin frekansla birlikte artması yalıtkan bir arayüzey tabakasının varlığına ve arayüzey hallerinin frekans bağımlılığına atfedilebilir [39].  $C-V$  ve  $I-V$  metodlarından bulunan engel yüksekliği değerlerindeki farklılıklar bir yalıtkan tabakanın varlığı veya M/S ara yüzeyindeki yüklerin oluşumu, imaj kuvvet engel düşmesi, derin kirlilik seviyeleri veya kenar sızıntı akımlarının varlığından dolayı olabilir [43]. Bununla birlikte uniform olmayan ara yüzey tabaka kalınlıkları, ara yüzey kompozisyonunun homojensizlikleri ve ara yüzey yüklerinin dağılımı da  $C-V$  ve  $I-V$  ölçümleri arasındaki farklılığa neden olabilmektedir [44, 45].



Şekil 7. Mo/n-Si Schottky diyotun oda sıcaklığında ters beslem altındaki  $C^2-V$  grafiği

Tablo 2.  $C^2-V$  karakteristiklerinden elde edilen diyot parametreleri

$f$ (kHz)	$V_o$ (V)	$V_d$ (V)	$N_d$ ( $10^{15} \text{cm}^{-3}$ )	$E_f$ (eV)	$\Phi_b$ (eV)
1	0,607	0,633	9,384	0,207	0,840
2	0,619	0,645	9,338	0,207	0,852
3	0,626	0,652	9,292	0,207	0,859
4	0,631	0,656	9,292	0,207	0,864
5	0,632	0,658	9,246	0,207	0,866
7	0,637	0,663	9,246	0,207	0,871
10	0,639	0,665	9,201	0,208	0,872
20	0,643	0,668	9,112	0,208	0,876
30	0,644	0,670	9,069	0,208	0,878
40	0,646	0,672	9,025	0,208	0,880
50	0,646	0,672	9,025	0,208	0,880
70	0,648	0,673	8,982	0,208	0,882
100	0,645	0,670	8,940	0,208	0,879
200	0,643	0,669	8,856	0,208	0,878
300	0,645	0,671	8,814	0,209	0,879
400	0,645	0,675	8,814	0,209	0,884
500	0,650	0,675	8,814	0,209	0,884
700	0,651	0,677	8,773	0,209	0,886
<b>1000</b>	<b>0,671</b>	<b>0,697</b>	<b>8,856</b>	<b>0,209</b>	<b>0,906</b>
2000	0,706	0,732	8,940	0,207	0,940
3000	0,759	0,784	9,292	0,207	0,992

Tablo 1 ve Tablo 2 birlikte incelendiğinde numunenin  $I$ - $V$  ve  $C$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinde farklılıklar olduğu görülmüştür. Schottky diyotta  $C$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen önemli diyot parametrelerinin frekans bağımlılığını detaylı ortaya koyabilmek için geniş bir frekans aralığı seçilmiştir.

Şekil 7'den de açıkça görüldüğü gibi ters beslem bölgesi boyunca  $C^{-2}$ - $V$  karakteristikleri lineerdir. Belirlenen frekans aralığında difüzyon potansiyeli ( $V_d$ ) 0,633 V'dan 0,784 V'a; dolayısıyla engel yüksekliği  $\Phi_b$  ( $C$ - $V$ ) değeri 0,840 eV'dan 0,992 eV'a bir artış göstermiştir. Mo/ $n$ -Si ile ilgili önceki çalışmalarda engel yükseklikleri 0,55 ile 0,67 eV değerleri arasında rapor edilmiştir [3, 8-10, 12, 46].

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada Mo/ $n$ -Si Schottky diyotun  $I$ - $V$  karakteristiğinin elektriksel analizi ile  $C$ - $V$  karakteristiği üzerine frekans etkisi araştırıldı. Bunun için oda sıcaklığında  $I$ - $V$  ve  $C$ - $V$  ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak, idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnç ve difüzyon potansiyeli gibi bazı diyot parametreleri hesaplandı.

$I$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği ve idealite faktörü değerlerinin tutarlılığını kontrol etmek amacıyla bu parametrelerin tespitinde Cheung fonksiyonlarından da yararlanılmıştır. İdealite ve engel yüksekliği doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristiklerinden sırasıyla 1,48 ve 0,72 eV olarak bulunmuştur. Cheung fonksiyonlarından idealite değeri 1,85;  $R_s$  değeri 2,02 k $\Omega$  ve 1,99 k $\Omega$ ; engel yüksekliği değeri ise 0,57 eV olarak belirlenmiştir. Norde metodundan elde edilen  $R_s=0,64$  k $\Omega$  değeri Cheung fonksiyonlarından elde edilenden küçüktür. Norde metodundan elde edilen engel yüksekliği değeri ise 0,71 eV'dur.

Burada Silisyum yüzeyine düşen parçacıklar hasarlı bir tabaka meydana getirmiştir. Saçtırılan Molibden Silisyum yüzeyi içine doğru nüfuz ederek verici tipi kusurlara sebep olmuştur. Bu kusurlar engel yüksekliğini artırır veya azaltır. Aynı zamanda da 1'den büyük bir idealiteye neden olur. Uygulanan gerilim ara yüzey boyunca kısmen düşerek doğru beslem akımının azalmasına; dolayısıyla ideal  $I$ - $V$  özelliklerinden sapmaya neden olmuştur.

Frekansa bağlı  $C$ - $V$  karakteristiklerinde frekans arttıkça arayüzey durumları AC sinyalini takip edemediği için diyot kapasitesinin azaldığı görüldü. 1 MHz'de  $C^{-2}$ - $V$  karakteristiklerinden elde edilen engel yüksekliği 0,906 eV olarak hesaplandı. Bu karakteristiklerden difüzyon potansiyeli 0,697 V, verici yoğunluğu  $8,856 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , Fermi enerji seviyesi ise 0,209 eV olarak belirlendi.

**TEŞEKKÜR:** Bu çalışma 'MSNG-2018 (Materials Science and Nanotechnology for Next Generation-2018)' kongresinde sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

## V. KAYNAKLAR

- [1] E. H. Rhoderick, R. H. Williams, *Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd ed., Oxford Clarendon, 1988.
- [2] S. J. Fonash, S. Ashok, R. Singh, "Effect of ion-beam sputter damage on Schottky barrier formation in silicon," *Applied Physics Letters*, vol. 39, no. 5, pp. 423-425, 1981.
- [3] S. Miyamoto, "Frequency-conductance characteristic of the sputtered Mo-n/Si Schottky barrier," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 16, no. 1, pp. 101-109, 1977.
- [4] O. Y. Olikh, "Non-monotonic  $\gamma$ -Ray influence on Mo/n-Si Schottky barrier structure properties," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60, no. 1, pp. 394-401, 2013.
- [5] A. N. Saxena, "Hafnium-silicon Schottky barriers: Large barrier height on p-type silicon ohmic behavior on n-type silicon," *Applied Physics Letters*, vol. 19, no. 3, pp. 71-73, 1971.
- [6] C. R. Crowell, J. C. Sarace, S. M. Sze, "Tungsten-semiconductor Schottky barrier diodes," *Trans. Met. Soc. AIME*, vol. 233, pp. 478-481, 1965.
- [7] J.K. Miller, S. M. Sze, M. J. Griece, *Electrochemical Society, Spring Meeting, Electron Division*, vol. 4, pp. 1, 1965.
- [8] G. Kano, M. Inoue, J. Matsuno, S. J. J. Takayanagi, "Molybdenum-silicon Schottky barrier," *Journal of Applied Physics*, vol. 37, no. 8, pp. 2985-2987, 1966.
- [9] R. A. Zettler, A. M. Cowley, "PN-junction-Schottky barrier hybrid diode," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 16, no. 1, pp. 58-63, 1969.
- [10] K. Sato, Y. J. J. Yasumura, "Study of forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance," *Journal of Applied Physics*, vol. 58, no. 9, pp. 3655-3657, 1985.
- [11] A. G. Milnes, D. L. Feucht, *Metal-Semiconductor Junctions*, New York: McGrath Academic Press, 1973.
- [12] D. Kahng, "Conduction properties of the Au/n-type Si Schottky barrier," *Solid State Electronics*, vol. 6, no. 3, pp. 281, 1963.
- [13] C. R. Crowell, S. M. Sze, "Current transport in metal-semiconductor barriers," *Solid State Electronics*, vol. 9, no. 11-12, pp. 1035-1048, 1966.
- [14] M. S. P. Reddy, A. Ashok Kumar, V. Rajagopal Reddy, J. S. Jang, "Electrical transport characteristics of Ni/Pd/n-GaN Schottky barrier diodes as a function of temperature," *Thin Solid Films*, vol. 519, no. 11, pp. 3844-3850, 2011.
- [15] A. A. M. Farag, B. Gündüz, F. Yakuphanoglu, W. A. Farooq, "Controlling of electrical characteristics of Al/p-Si Schottky diode by tris ( 8-hydroxyquinolinato) aluminum organic film," *Synthetic Metals*, vol. 160, no. 23-24, pp. 2559-2563, 2010.
- [16] A. Tataroglu, "Comparative study of the electrical properties of Au/n-Si (MS) and Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si (MIS) Schottky diodes," *Chinese Physics B*, vol. 22, no. 6, pp. 068402, 2013.
- [17] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd ed., John Wiley&Sons, New York, 1981.

- [18] S. K. Cheung and N. W. Cheung, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics," *Applied Physics Letters*, vol. 49, no. 2, pp. 85-87, 1986.
- [19] B. L. Sharma, *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, Plenum Press New-York, 1984, pp. 370.
- [20] S. Chand, J. Kumar, "Effects of barrier height distribution on the behavior of a Schottky diode," *Journal of Applied Physics*, vol. 82, no. 10, pp. 5005-5010, 1997.
- [21] H. J. Werner, H. H. Gütter, "Barrier inhomogeneities of Schottky contacts," *Journal of Applied Physics*, vol. 69, no. 3, pp. 1522-1533, 1991.
- [22] R. T. Tung, A. F. J. Levi, J. P. Sullivan, F. Schrey, "Schottky barrier inhomogeneity at epitaxial NiSi<sub>2</sub> interface on Si (100)," *Physical Review Letters*, vol. 66, no. 1, pp. 72-75, 1991.
- [23] H. Norde, "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance," *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 7, pp. 5052-5053, 1979.
- [24] K. E. Bohlin, "Generalized Norde plot including determination of the ideality factor," *Journal of Applied Physics*, vol. 60, no. 3, pp. 1223-1224, 1986.
- [25] S. Duman, B. Gürbulak, S. Doğan, A. Türüt, "Electrical characteristics and inhomogeneous barrier analysis of Au-Be/p-InSe:Cd Schottky barrier diodes," *Microelectron Engineering*, vol. 86, no. 1, pp. 106-110, 2009.
- [26] H. Uslu, Ş. Altındal, U. Aydemir, İ. Dökme, I. M. Afandiyeva, "The interface states and series resistance effects on the forward and reverse bias I-V, C-V and G/ω-V characteristics of Al-TiW-Pd<sub>2</sub>Si/n-Si Schottky barrier diodes," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 503, no. 1, pp. 96-102, 2010.
- [27] A. M. Goodman, "Metal-semiconductor barrier height measurement by the differential capacitance method-one carrier system," *Journal of Applied Physics*, vol. 34, no. 2, pp. 329-338, 1963.
- [28] İ. M. Afandiyeva, İ. Dökme, Ş. Altındal, M. M. Bülbül, A. Tataroğlu, "Frequency and voltage effects on the dielectric properties and electrical conductivity of Al-TiW-Pd<sub>2</sub>Si/n-Si structure," *Microelectronic Engineering*, vol. 85, no. 2, pp. 247-252, 2008.
- [29] A. Chelkowski, *Dielectric Physics*, Elsevier, Amsterdam, 1980, pp. 97-105.
- [30] P. S. Ho, E. S. Yang, H. L. Evans, and X. Wu, "Electronic states at silicide-silicon interfaces," *Physical Review Letters*, vol. 56, no. 2, pp. 177-180, 1986.
- [31] X. Wu, M. T. Schmidt, E. S. Yang, "Control of the Schottky barrier using an ultrathin interface metal layer," *Applied Physics Letters*, vol. 54, no. 3, pp. 268-270, 1989.
- [32] E. H. Nicollian, J. R. Brews, *MOS Physics and Technology*. Wiley, New York, 1982, pp. 255.
- [33] E. Özavcı, "Au/n-GaAs Schottky diyotların hazırlanması ve akım iletim mekanizmalarının geniş bir sıcaklık aralığında incelenmesi," Doktora Tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2014.
- [34] Ç. Bilkan, "Polimer ara yüzey tabakalı ve tabakasız Schottky engel diyotların elektriksel karakteristiklerinin karşılaştırılması," Doktora Tezi, Fizik Bölümü, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2016.

- [35] Ç. Ş. Güçlü, A. F. Özdemir, Ş. Altındal, "Double exponential I-V characteristics and double Gaussian distribution of barrier heights in (Au/Ti)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs (MIS) type Schottky barrier diodes in wide temperature range," *Applied Physics A*, vol. 22, pp. 1032, 2016.
- [36] A. Singh, "Characterization of interface states at Ni/nCdF<sub>2</sub> Schottky barrier type diodes and the effect of CdF<sub>2</sub> surface preparation," *Solid State Electronics*, vol. 28, no. 3, pp. 223-232, 1985.
- [37] E. H. Rhoderick, "Metal-semiconductor contacts," *Solid-State and Electron Devices*, vol. 129, no. 1, pp. 1, 1982.
- [38] P. Chattopadhyay and B. RayChaudhuri, "Frequency dependence of forward capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes," *Solid State Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 605-610, 1993.
- [39] M. M. Bülbül, S. Zeyrek, "Frequency dependent capacitance and conductance-voltage characteristics of Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-Si (100) MIS diodes," *Microelectronic Engineering*, vol. 83, no. 11-12, pp. 2522-2526, 2006.
- [40] A. F. Özdemir, D. A. Aldemir, A. Kökce, Ş. Altındal, "Electrical properties of Al/conducting polymer (P<sub>2</sub>ClAn)/p-Si/Al contacts," *Synthetic Metal*, Vol.159, no. 14, pp. 1427-1432, 2009.
- [41] D. Korucu, A. Türüt, R. Turan, Ş. Altındal, "Origin of forward bias capacitance peak and intersection behavior of C and G/ω of Ag/p-InP Schottky barrier diodes," *Material Science and Semiconductor Processing*, vol. 16, no. 2, pp. 344-351, 2013.
- [42] S. Zeyrek, E. Acaroğlu, Ş. Altındal, S. Birdoğan, M. M. Bülbül, "The effect of series resistance and interface states on the frequency dependent C-V and G/ω-V characteristics of Al/perylene/p-Si MPS type Schottky barrier diodes," *Current Applied Physics*, vol. 13, no.7, 1225-1230, 2013.
- [43] R. V. Reddy, A. Umapathi, L. D. Rao, "Effect of annealing on the electronic parameters of Au/poly(ethylmethacrylate)/n-InP Schottky diode with organic interlayer," *Current Applied Physics*, vol. 13, no. 8, pp. 1604-1610, 2013.
- [44] Y. P. Song, R. L. Van Meirhaeghe, W. H. Laflere, F. Carden, "On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers," *Solid State Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 633-638, 1986.
- [45] R. T. Tung, "Recent advances in Schottky barrier concepts," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 35, no. 1-3, pp. 1-138, 2001.
- [46] H. Takano, M. Kimura, T. Ando, S. Niemcharoen, Y. Yasumura, K. Sato, "Optical response of planar Mo/n-Si/Mo structures with long neutral region and Schottky barriers at both ends," *Solid-State Electronics*, vol. 44, no. 12, pp. 2161-2164, 2000.