

Yb/p-Si Schottky Diyotlarının Elektriksel Karakteristiklerinin İncelenmesi

Havva Elif LAPA^{1*}, Ali KÖKCE², Ahmet Faruk ÖZDEMİR²

ÖZET: Yb/p-Si Schottky diyotları termal buharlaştırma yöntemiyle imal edilmiştir. Bu diyotların akım-gerilim (I - V) ve kapasitans-gerilim (C - V) ölçümleri karanlıkta ve oda sıcaklığında alınmıştır. I - V verileri kullanılarak idealite faktörü (n), sıfır-beslem engel yüksekliği (Φ_{bo}) ve seri direnç (R_s) parametreleri hesaplanırken C^2 - V karakteristiğinden Fermi enerji seviyesi (E_F), alıcı atomların yoğunluğu (N_A) ve engel yüksekliği [$\Phi_{b(C-V)}$] gibi bazı elektriksel parametreler hesaplanmıştır. Doğru beslem I - V karakteristiklerinden n değeri 1.59 olarak hesaplanırken Φ_{bo} değeri 0.75 eV olarak hesaplanmıştır. C^2 - V karakteristiğinden E_F , N_A ve $\Phi_{b(C-V)}$ değerleri, sırasıyla, 0.15 eV, $5.27 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ve 0.67 eV olarak bulunmuştur. Ayrıca, n , Φ_b ve R_s değerleri Cheung ve Norde fonksiyonlarından da elde edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, Yb/p-Si Schottky diyotlarının düşük sızıntı akımına, iyi bir doğrultma oranına ve yüksek engel yüksekliğine sahip olması, Yb'un kaliteli Schottky diyot elde etmek için cazip bir element olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Metal/yarıiletken kontaklar, Yb/p-Si Schottky diyotlar, elektriksel karakteristik

Investigation of Electrical Characteristics of Yb/p-Si Schottky Diodes

ABSTRACT: Yb/p-Si Schottky diodes were fabricated by thermal evaporation method. The measurements of current-voltage (I - V) and capacitance-voltage (C - V) of these diodes were carried out at room temperature and dark. The parameters such as ideality factor (n), zero-bias barrier height (Φ_{bo}) and series resistance (R_s) of these diodes were obtained by using I - V data whereas some electrical parameters such as Fermi energy level (E_F), density of acceptor atoms (N_A) and barrier height [$\Phi_{b(C-V)}$] were calculated by using C^2 - V characteristics. The value of n was calculated as 1.59 while the value of Φ_{bo} was determined as 0.75 eV from forward bias I - V characteristic. The values of E_F , N_A ve $\Phi_{b(C-V)}$ were obtained as 0.15 eV, $5.27 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and 0.67 eV from C^2 - V characteristic, respectively. Also, the values of n , Φ_b and R_s were calculated from the functions of Cheung and Norde. According to the findings, Yb/p-Si Schottky diodes have low leakage current, good rectifier rate and high barrier height. These results showed that Yb is an attractive element to obtain high quality Schottky diode.

Keywords: Metal/semiconductor contacts, Yb/p-Si Schottky diodes, electrical characteristic

¹ Havva Elif LAPA (Orcid ID: 0000-0002-5706-4641), Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Ali KÖKCE (Orcid ID: 0000-0001-9814-830X), Ahmet Faruk ÖZDEMİR (Orcid ID: 0000-0001-9879-9209), Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Isparta, Türkiye

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Havva Elif LAPA, e-mail: h.eliflapa@gmail.com

GİRİŞ

İnorganik yarıiletkenler, uzun ömürlü, verimli ve küçük boyutlu olmaları sebebiyle elektronik sanayinde temel devre elemanlarının bileşeni olarak kullanılmaktadır (Neamen, 2003). Böyle devre elemanları arasında yer alan metal-yarıiletken (MS) kontaklar/Schottky engel diyotları, düşük gerilimlerde hızlı anahtarlama yapabilme ve doğrultucu özelliklerinden dolayı günümüz teknoloji sahasında artan bir öneme sahiptir (Rhoderick ve Williams, 1988; Temirci ve ark., 2010; Ejderha ve ark., 2017; Das ve ark., 2018). Yüksek performanslı ve kaliteli Schottky diyot üretebilmek için metal ve yarıiletkende kusurların bulunmaması, metal ve yarıiletken yüzeylerin kirliliklerden arındırılmış olması, omik ve Schottky kontakların kaliteli yapılması şarttır (Rhoderick ve Williams, 1988). M/S arayüzeyinde doğal ya da depolanarak oluşturulan arayüzeyin kalitesi ve kalınlığı Schottky engel diyotların elektriksel karakteristikleri üzerinde büyük rol oynar (Lapa ve ark., 2017; Karabulut ve ark., 2017; Kınacı, 2017; Uslu Tecimer ve ark., 2018; Tecimer, 2018). Performans ve güvenilirlik açısından kaliteli bir Schottky engel diyotunun en önemli özellikleri geniş engel yüksekliğine, düşük sızıntı akımına ve iyi bir doğrultma oranına sahip olmasıdır. Schottky diyotlarda istenen bu özelliklerin metalin iş fonksiyonuna bağlı olduğu bilinmektedir. *p*-tipi yarıiletken kullanılan Schottky engel diyotlarda en iyi aygıt performansını sağlamak için düşük iş fonksiyonlu metal kullanılması beklenmektedir (Çankaya ve Uçar, 2004). Takami ve ark., (1984), ultra yüksek saflıktaki *p*-Si arka yüzeyine Au omik kontak ve ön yüzeyine 11 farklı metal (Pd, Ag, Au, Ni, Bi, Pb, Sn, Al, Mn, Mg, ve Sm) buharlaştırarak MS kontaklar imal etmişlerdir. Metal iş fonksiyonu değeri azaldıkça engel yüksekliği değerinin arttığını rapor etmişlerdir. Son zamanlarda, Yb (2.60 eV), Gd (3.10 eV) ve Er (3.12 eV) gibi nadir toprak

metalleri düşük iş fonksiyonuna sahip olmalarından dolayı dikkat çekici olmuştur. Literatürde, Yb ve *p*-tipi yarıiletken kullanılarak elde edilen MS kontakların iyi bir doğrultma davranışı ve yüksek engel yüksekliği sergilediği görülmüştür (Reinhardt ve ark., 1988; Chen ve ark., 2012; Reddy ve ark., 2013).

Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerini incelemek için akım-gerilim (*I-V*) ve kapasitans-gerilim (*C-V*) ölçümleri alınır. Bu ölçümlerden idealite faktörü (*n*), engel yüksekliği (Φ_b), seri direnç (R_s), Fermi enerji seviyesi (E_F) ve alıcı atomların yoğunluğu (N_A) gibi bazı diyot parametreleri hesaplanabilir. Schottky engeli, M/S arayüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı oluşur ve diyot boyunca akım iletimini kontrol eder. İdeal diyot için $n=1$ 'dir. $n>1$, diyotun ideallikten saptığının göstergesidir (Rhoderick ve Williams, 1988). R_s , Schottky diyotlarının elektriksel karakteristiklerini etkileyen önemli parametrelerden biridir. R_s 'nin değerini belirlemek için Norde ve Cheung fonksiyonları kullanılabilir (Norde, 1979; Bohlin, 1986; Cheung ve Cheung, 1986).

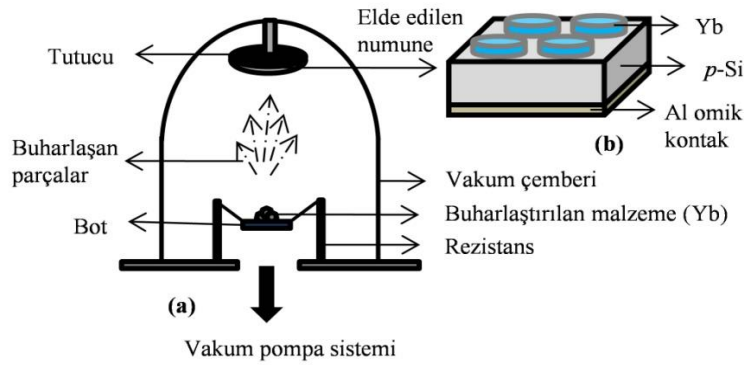
Bu çalışmada, yüksek engel yüksekliğine ve düşük sızıntı akımına sahip ideal bir diyot üretmek amaçlanmıştır. Bu amaçla, Yb/*p*-Si/Al Schottky diyotları termal buharlaştırma yöntemiyle imal edilmiştir. Üretilen diyotların *I-V* ve *C-V* ölçümleri karanlıkta ve oda sıcaklığında alınmıştır. Diyotların yarı-logaritmik *I-V* karakteristiklerinden *n* ve Φ_{bo} değerleri bulunmuştur. *n*, Φ_b ve R_s değerleri Norde ve Cheung yöntemleriyle de elde edilmiştir. C^2-V karakteristiklerinden V_o , E_F , N_A ve $\Phi_{b(C-V)}$ parametreleri hesaplanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

[100] yönelimli ve 1 $\Omega \cdot \text{cm}$ öz dirence sahip *p*-tipi Si yarıiletken alttaş, yüzeyindeki oksit tabakadan, organik ve inorganik kirliliklerden arındırılması için ıslak kimyasal temizleme işlemine (wet chemical cleaning procedure) tabi

tutulmuştur. *p*-Si yarıiletken alttaş ilk olarak asetonda 70 °C’de 10 dk kaynatıldı ve metanolde 5 dk bekletildi. Ardından, NH₄OH+H₂O₂+5H₂O (1:1:5) içerisinde 70 °C’de 5 dk ve HCl+H₂O₂+5H₂O (1:1:5) içerisinde 70 °C’de 10 dk kaynatıldı. Son olarak, %2’lik sulu HF çözeltisi içerisinde 2 dk bekletildi. Temizlenen *p*-Si yarıiletken alttaşın arka yüzeyine 200 nm kalınlıkta Al buharlaştırıldı. Ardından, numune N₂ ortamında 575 °C’de 3 dk boyunca tavlansak omik kontak yapıldı. Yapının ön yüzeyine 1.5 mm çapa sahip maske yerleştirilerek Şekil 1 a.’da gösterildiği gibi tutucuya yerleştirildi. Bu

ön yüzeye termal buharlaştırma sisteminde 60 nm kalınlığında Yb buharlaştırıldı. Böylece, Yb/*p*-Si/Al Schottky diyotlarının üretimi tamamlandı (Şekil 1 b.). İmal edilen diyotun *I*-*V* verileri ±2 V aralığında Keithley 2400 SourceMeter cihazı ile alınırken *C*-*V* verileri 1 MHz frekans için 4192A LF empedans analizörü ile ölçülmüştür. Tüm ölçümler, mikrokompitör programı kullanılarak bilgisayara takılan bir AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda ve kontrol edilerek karanlık ortamda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. (a) Termal buharlaştırma sistemi (b) Yb/*p*-Si Schottky diyotunun yapısı

BULGULAR VE TARTIŞMA

Akım iletiminin termiyonik emisyon (TE) tarafından domine edildiği durumda Schottky diyotları için akım ve gerilim arasındaki ilişki (Rhoderick ve Williams, 1988)

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

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

eşitlikleriyle verilebilir. Burada, I_o ters beslem doyma akımı, A kontak alanı, A^* etkin Richardson sabiti (*p*-Si için 32 Acm⁻²K⁻²) (Neamen, 2003), k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, q elektronun yükü, Φ_{bo} sıfır beslem engel yüksekliği ve R_s seri dirençtir. n değeri;

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

eşitliğinde verildiği gibi yarı-logaritmik *I*-*V* grafiğinin doğru beslem bölgesindeki lineer kısmının eğiminden ve I_o değeri, aynı grafiğin doğru beslem bölgesinde lineer kısmının $V=0$ için I eksenini kestiği noktadan belirlenebilir. Φ_{bo} değeri, I_o , A^* ve A değerleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir (Rhoderick ve Williams, 1988).

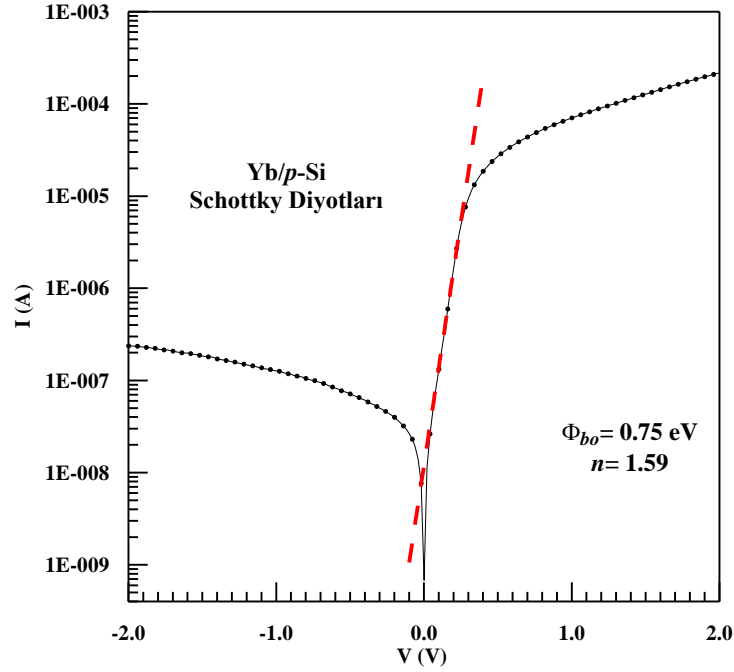
$$\Phi_{bo} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (4)$$

Şekil 2’de, Yb/*p*-Si Schottky diyotlarının doğru ve ters beslem yarı-logaritmik *I*-*V* grafiği verilmiştir. Yb/*p*-Si kontaklarının *I*-*V* karakteristikleri geniş bir akım değerinde

doğrusal olduğu için bu kontaklarda akım iletimi için baskın mekanizmanın TE olduğu söylenebilir. Şekil 2'den görüleceği gibi, I - V grafiği iyi bir doğrultma oranına ($DO=I_{doğru}/I_{ters}$) sahiptir.

Ancak, akım akışını sınırlayan R_s 'nin varlığı doğru beslem I - V eğrisinde bükülmeye neden olmuştur. Yb/p-Si diyotları için I - V karakteristiğinden elde edilen n , Φ_{bo} , I_o , sızıntı akımı ve DO gibi bazı elektriksel parametreler Çizelge 1'de verilmiştir. n değerinin ideal durumdan büyük elde edilmesi, M/S arasında

ince yalıtkan bir arayüzey tabakasının varlığına, homojen olmayan engel yüksekliğine, engel yüksekliğinin beslem voltajına bağlılığına, arayüzeyde üretim kaynaklı kusurlara, imaj-kuvveti etkisine, arayüzeyde yüklerin yeniden birleşmesine-yeniden üretilmesine ve olası bir tünelleme mekanizmasının varlığına atfedilebilir (Rhoderick ve Williams, 1988; Lapa ve ark., 2017; Dobrescu ve ark., 2001; Reddy ve ark., 2003; Neamen, 2003; Kınacı, 2017; Tecimer, 2018).



Şekil 2. Yb/p-Si Schottky diyotlarının oda sıcaklığında ve karanlıktaki doğru ve ters beslem yarı-logaritmik I - V karakteristikleri

Çizelge 1. Yb/p-Si Schottky diyotlarının yarı-logaritmik I - V karakteristiklerinden elde edilen elektriksel parametreler

Numune	n	Φ_{bo} (eV)	I_o (A)	Sızıntı Akımı (A)	
				(-2V)	DO (± 1 V)
Yb/p-Si	1.59	0.75	1.20×10^{-8}	2.37×10^{-7}	554.27

Elde edilen n değerinin ideal Schottky diyottan ziyade metal-yalıtkan tabaka-yarıiletken (MIS) tipi yapılara uyduğu görülmektedir. Bu ideal olmayan davranış R_s 'nin etkisinden ve M/S arayüzeyde yarıiletkenle dengede olan arayüzey durumlarından da

kaynaklanabilir (Kınacı, 2017; Karabulut ve ark., 2017; Uslu Tecimer ve ark., 2018; Tecimer, 2018). Ayrıca, Si yüzeylerinin normal parlatma ve kimyasal temizleme ile hazırlandığı durumlarda, Si yüzeyinin kaçınılmaz olarak, yüzey hazırlama yöntemine bağlı yaklaşık 10-30

Å kalınlığında ince bir oksit yalıtkan film ile kaplandığı bilinmektedir (Rhoderick ve Williams, 1988). Bu nedenle de n değerinde ideallikten sapma meydana gelebilir. Schottky engel yüksekliği, MS kontaklarda elektrik iletimi için doğrultucu engeldir ve Schottky tabanlı yarıiletken bir aygıtın başarılı çalışması için büyük öneme sahiptir. Engel yüksekliği, TE akımını kontrol eder ve arttığında doğru beslem akımı azalır. Engel yüksekliği artışının alan emisyonunu arttırması ve kaçak akımı azaltması gibi avantajlarından dolayı fotovoltaik ve yüksek frekans uygulamaları için daha yüksek engel yüksekliği değerleri tercih edilir (Kundu ve ark., 2012). Yb/p-Si diyotları için elde edilen parametreler literatürde ki bulgularla karşılaştırıldığında Yb'un istenilen özelliklerde Schottky kontak elde etmek için cazip bir

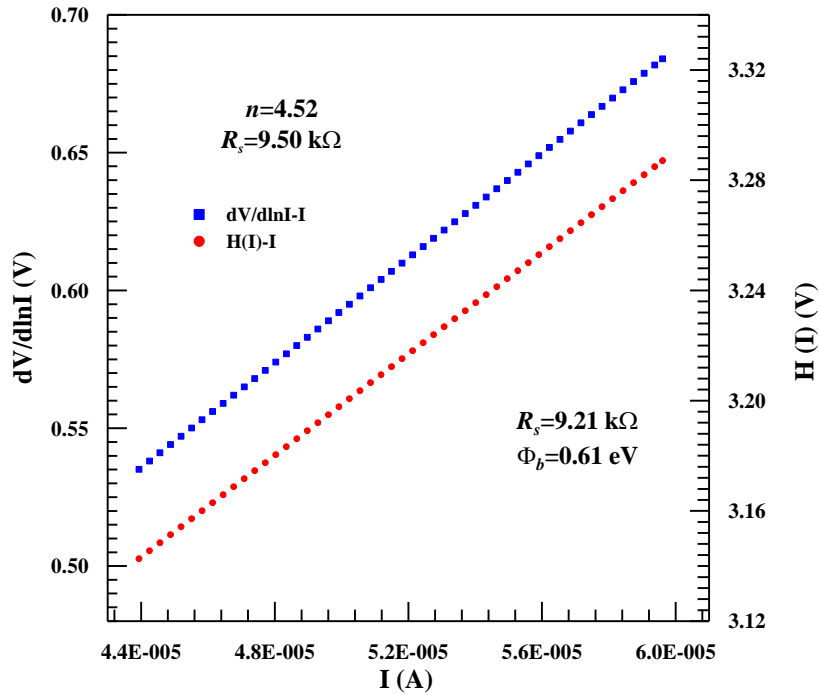
element olduğu görülmüştür (Chen ve ark., 2012; Reddy ve ark., 2013; Taşcıoğlu ve ark., 2014; Ejderha ve ark., 2017).

Cheung fonksiyonları yardımıyla R_s , n ve Φ_b değerleri hesaplanabilir. Cheung fonksiyonları aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir (Cheung ve Cheung, 1986).

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

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) = n\Phi_b + IR_s \quad (6)$$

Eşitlik 5. ve 6. kullanılarak Yb/p-Si Schottky diyotlarının $dV/d\ln I$ ve $H(I)$ değerleri hesaplanmıştır. Yb/p-Si Schottky diyotlarının $dV/d\ln I-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Yb/p-Si Schottky diyotlarının $dV/d\ln I-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri

Yb/p-Si Schottky diyotları için $dV/d\ln I-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri lineer bir doğru sergilemektedir. Bu grafiklerde $I=0$ için $dV/d\ln I$ eksenini kestiği noktadan diyotun n değeri ve aynı grafiğin eğiminden R_s değeri hesaplanmıştır. $I=0$ için $H(I)$ eksenini kestiği

noktadan da daha önce bulunan n değeri kullanılarak Φ_b değeri ve grafiğin eğiminden de R_s değeri bulunmuştur. Cheung fonksiyonları yardımıyla Yb/p-Si Schottky diyotları için hesaplanan n , R_s ve Φ_b değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Yb/p-Si Schottky diyotları için Cheung fonksiyonlarından elde edilen elektriksel parametreler

Numune	dV/dlnI-I		H(I)-I	
	n	R _s (kΩ)	R _s (kΩ)	Φ _b (eV)
Yb/p-Si	4.52	9.50	9.21	0.61

Çizelge 2'den görüleceği gibi, n değeri ideal durumdan ve I - V karakteristiğinden elde edilen n değerinden büyüktür. Bu durum, I - V karakteristiğinden bulunan değerlerin grafiğın linear bölgesinden Cheung fonksiyonlarından elde edilen değerlerin ise grafiğın yüksek voltaj değerlerinde grafiğın bükülen kısmından elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu farklılığın diğer bir sebebi, n değerinin uygulanan voltaja bağlı olmasıdır (Ayyıldız ve ark., 1996; Sağlam ve ark., 1996; Soylu, 2011).

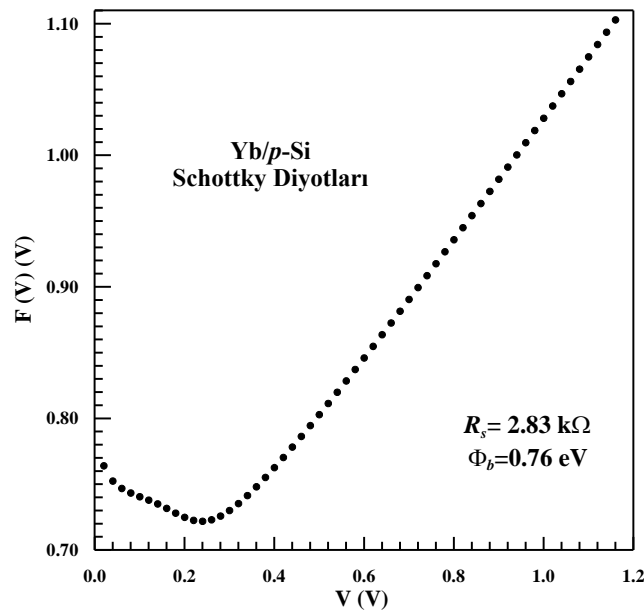
Modifiye Norde fonksiyonu, Bohlin tarafından Φ_b ve R_s değerlerini sabit bir sıcaklıkta sadece tek bir gerilime bağlı akım ölçümünden hesaplamak için önerilmiştir. Norde fonksiyonları aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Norde, 1979; Bohlin, 1986).

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

$$\Phi_b = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (8)$$

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

Eşitlik 7. kullanılarak Yb/p-Si Schottky diyotları için $F(V)$ fonksiyonu hesaplanmıştır ve Şekil 4'te $F(V)$ - V grafiğı gösterilmiştir. Φ_b ve R_s parametrelerini belirlemek amacıyla bu diyotun I - V karakteristiğı ile bulunan n değerinden büyük bir sayı ($\gamma=2$) belirlenmiştir. $F(V)$ - V grafiğından $F(V)$ 'nin minimum $F_{\min}(V)$ noktasına karşılık gelen minimum voltaj değeri V_{\min} ve minimum akım değeri I_{\min} elde edilmiştir. Bu değerler, Eşitlik 8. ve 9. da yerine yazılarak Φ_b ve R_s parametreleri hesaplanmıştır. F_{\min} , V_{\min} ve I_{\min} değerleri, hesaplanan Φ_b ve R_s parametreleri Çizelge 3'te verilmiştir.

**Şekil 4.** Yb/p-Si Schottky diyotlarının $F(V)$ - V grafiğı

I - V değerlerinden elde edilen Φ_{bo} değeri ile Norde fonksiyonları ile elde edilen Φ_b değeri uyumludur. Norde fonksiyonundan elde edilen R_s değerinin Cheung fonksiyonlarından elde edilen R_s değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. Bu durum, Cheung fonksiyonlarının doğru beslem I - V karakteristiklerinin yüksek voltaj bölgesinde lineer olmayan bölgeye uygulanırken Norde fonksiyonlarının I - V karakteristiklerinin doğru beslem kısmının tümüne uygulanması ile

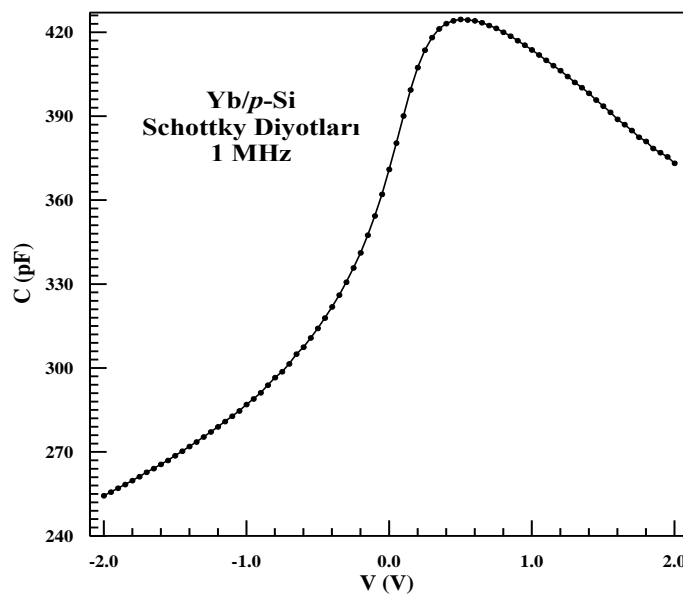
açıklanabilir (Güllü ve ark., 2008; Soylu, 2011). Hem Cheung hem de Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen R_s değerinin hayli yüksek olduğu görülmektedir. R_s 'nin bu yüksek değerleri, prob telinin kapıya (gate) kontak yapılmasından, omik kontağın kaliteli olmamasından, organik kirliliklerden, arayüzey durumlarından ve kullanılan yarıiletkenin gövde direncinden kaynaklanabilir (Nicollian ve Brews, 1982).

Çizelge 3. Yb/p-Si Schottky diyotları için Norde fonksiyonlarından elde edilen elektriksel parametreler

Numune	F (V_{min}) (V)	V_{min} (V)	I_{min} (A)	R_s (k Ω)	Φ_b (eV)
Yb/p-Si	0.72	0.24	4.10×10^{-6}	2.83	0.76

Şekil 5'te, Yb/p-Si Schottky diyotlarının oda sıcaklığında ve 1 MHz frekans için doğru ve ters beslem C - V karakteristiği uygulanan beslem voltajının fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Şekil 5'ten görüleceği gibi, Yb/p-Si Schottky diyotları arayüzey tabakalı (doğal ya da depolanarak oluşturulmuş) bir MIS tipi diyota benzer olarak birikim, tüketim ve terslenim bölgelerine

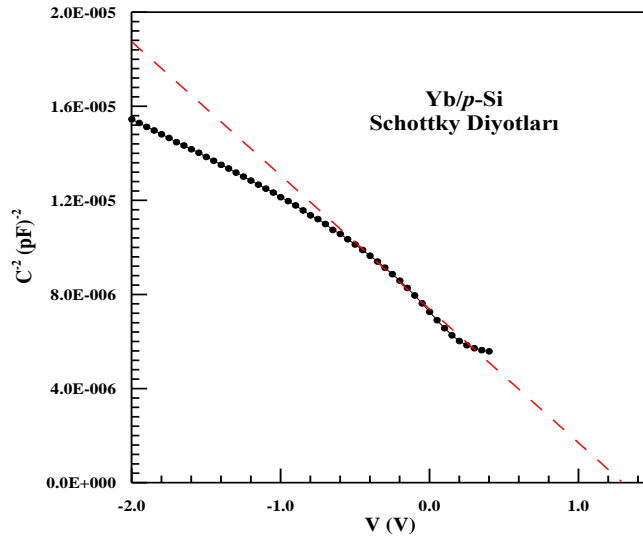
sahiptir. C değeri uygulanan beslem voltajının artması ile yaklaşık 0.5 V'a kadar artmakta ve bir pik davranışı sergilemektedir. Doğru beslem bölgesindeki bu pik davranışı arayüzey durumlarının özel dağılımına, seri dirence ve yüzey polarizasyonuna atfedilebilir (Nicollian ve Brews, 1982; Werner ve ark., 1987).



Şekil 5. Yb/p-Si Schottky diyotlarının 1 MHz için C - V grafiği

Oda sıcaklığında Yb/p-Si Schottky diyotlarının 1 MHz frekans için ters beslem C^{-2} - V grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'dan görüleceği gibi, C^{-2} - V grafiği geniş ters beslem aralığında lineer bir doğruya sahiptir. Yb/p-Si Schottky diyotlarının kesim voltajı (V_o), voltaj eksenine bu doğrunun ekstrapolasyonu ile elde

edilebilir. C^{-2} - V grafiğinin lineer davranışı, arayüzey durumlarının AC sinyali 1 MHz'de takip edemediği ve sonuç olarak bunların kapasiteye önemli ölçüde katkı sağlamadığı varsayımına dayandırılabilir (Nicollian ve Brews, 1982; Kınacı, 2017; Tecimer, 2018).



Şekil 6. Yb/p-Si Schottky diyotlarının 1 MHz için C^{-2} - V grafiği

Çizelge 4. Yb/p-Si Schottky diyotlarının 1 MHz için C^{-2} - V karakteristiğinden elde edilen parametreler

Numune	V_o (V)	E_F (eV)	N_A (cm ⁻³)	c_2	Φ_b (eV)
Yb/p-Si	1.30	0.15	5.27×10^{15}	3.79×10^{-1}	0.67

Yb/p-Si Schottky diyotlarının tüketim tabakası kapasitesi şu şekilde ifade edilebilir;

$$C^{-2} = \left[\frac{2(V_d + V)}{q\epsilon_s N_A A^2} \right] \quad (10)$$

Eşitlik 10. da, $V_d(=V_o+kT/q)$ sıfır beslemdeki difüzyon potansiyeli ve ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir ($\epsilon_s=11.7\epsilon_o$, $\epsilon_o=8.85 \times 10^{-14}$ F/cm boş uzayın dielektrik sabiti) (Neamen, 2003). Fermi enerjisi (E_F),

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (11)$$

eşitliği ile elde edilebilir. Burada N_V , yarıiletkenin değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur ve

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (12)$$

ifadesi ile verilebilir (Karataş ve Altındal, 2005). Burada, $T=300$ K, hollerin etkin kütlesi $m_h^*=0.16m_o$ ve m_o , elektronun kalan kütlesi olmak üzere (Tataroğlu ve Altındal, 2006) $N_V=1.6 \times 10^{18}$ cm⁻³ olarak bulunmuştur. C^{-2} - V grafiği yardımıyla $\Phi_b(C-V)$ değeri,

$$\Phi_b(C-V) = c_2 V_o + \frac{kT}{q} + E_F \quad (13)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Elektriksel özellikleri etkileyen kapasitif özellikler nadiren büyük bir kesim voltajına sebep olabilir. Bu nedenle, Φ_b 'nin hesaplanmasında c_2 'nin $[\cong N_A$ (deneysel)]/ N_A

(teorik)] etkisi dikkate alınmalıdır. Elde edilen V_o , E_F , N_A , c_2 ve Φ_b parametreleri Çizelge 4'te gösterilmiştir. N_A değeri literatürde ki bulgularla uyumludur (Akkılıç ve ark., 2003; Çetin ve ark., 2005; Altındal ve ark., 2006). Yb/p-Si Schottky diyotlarının I - V karakteristiğinden elde edilen Φ_{bo} değeri C^2 - V karakteristiğinden elde edilen Φ_b değerinden büyüktür. Bu durum, seri direncin varlığından ve ideal olmayan omik kontakta kaynaklanabilir (Werner ve ark., 1987).

SONUÇ

Bu çalışmada, yüksek engel yüksekliğine ve düşük sızıntı akımına sahip ideal bir diyot imal etmek amacıyla Yb/p-Si Schottky diyotları üretilmiştir. Yb/p-Si Schottky diyotları için düşük sızıntı akımı, iyi bir doğrultma oranı ve yüksek engel yüksekliği değeri elde edilmiştir. Bu bulgular, Yb'un kaliteli Schottky kontak elde etmek için cazip bir element olduğunu göstermiştir. n değerinin ideal durumdan yüksek olması, Si yüzeyinin iyi temizlenememesinden kaynaklı kirliliklere ve arayüzeyde oluşabilecek ince yalıtkan oksit tabakanın varlığına ve engel yüksekliğinin beslem voltajı bağlılığına bağlanmıştır. Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen yüksek R_s değerleri, omik kontakın kaliteli olmamasına ve organik kirliliklere atfedilmiştir. 1 MHz için C - V karakteristiğinin pik davranışı arayüzey durumlarının özel dağılımına ve R_s 'ye atfedilmiştir. Sonuç olarak, yüksek engel yüksekliğine ve düşük sızıntı akımına sahip ideal Yb/p-Si Schottky diyotları elde edilebilir. Ancak, omik kontakın kaliteli yapılmasına ve yarıiletkenin parlatma ve organik kirlilerden arındırılmasına özen gösterilmelidir.

KAYNAKLAR

Akkılıç A, Türüt A, Çankaya G, Kılıçoğlu T, 2003. Correlation between Barrier Height and Ideality Factors of Cd/n-Si and Cd/p-Si Schottky Barrier Diodes. Solid State Communications, 125, 551-556.

- Altındal Ş, Dökme İ, Bülbül M M, Yalçın N, Serin T, 2006. The Role of the Interface Insulator Layer and Interface States on the Current-Transport Mechanisms of Schottky Diodes in Wide Temperature Range. Microelectronic Engineering, 83, 499-505.
- Ayyıldız E, Türüt A, Efeoğlu H, Tüzemen S, Sağlam M, Yoğurtçu Y K, 1996. Effect of Series Resistance on the Forward Current-Voltage Characteristics of Schottky Diodes in the Presence of Interfacial Layer. Solid-State Electronics, 39(1), 83-87.
- Bilkan Ç, Gümüş A, Altındal Ş, 2015. The Source of Negative Capacitance and Anomalous Peak in the Forward Bias Capacitance-Voltage Cr/p-Si Schottky Barrier Diodes (SBDs). Materials Science in Semiconductor Processing, 39, 484-491.
- Bohlin K E, 1986. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. Journal of Applied Physics, 60, 1223.
- Card H C, Rhoderick E H, 1971. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes. Journal of Physics D: Applied Physics, 4, 1589-1601.
- Chen J, Ku T C, Li M F, Chin A, 2012. Investigation of Schottky Junction and MOS Technology for III-V Compound Semiconductor MOSFET Application. 12th International Workshop on Junction Technology, Shanghai, May 14-15, 2012.
- Cheung S K, Cheung N W, 1986. Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics. Applied Physics Letters, 49 (2), 85.
- Çankaya G, Uçar N, 2004. Schottky Barrier Height Dependence on the Metal Work Function for p-Type Si Schottky Diodes. Verlag der Zeitschrift für Naturforschung, 795-798.
- Çetin H, Şahin B, Ayyıldız E, Türüt A, 2005. Ti/p-Si Schottky Barrier Diodes with Interfacial Layer Prepared by Thermal Oxidation. Physica B, 364, 133-141.
- Das M, Kumar A, Mandal B, Htay M T, Mukherjee S, 2018. Impact of Schottky Junctions in the Transformation of Switching Modes in Amorphous Y₂O₃-Based Memristive System. Journal of Physics D: Applied Physics, 51, 315102 (10pp).
- Dobrescu D, Rusu A, Udrea F, Dobrescu L, 2001. Image Force Effect on Forward Characteristic of a Rectifier Metal-Semiconductor Contact. IEEE, DOI: 10.1109/SMICND.2001.967500.
- Ejderha K, Karabulut A, Türkan N, Türüt A, 2017. The Characteristic Parameters of N/n-6H-SiC Devices Over a Wide Measurement Temperature Range. Silicon, 9, 395-401.

- Güllü Ö, Aydoğan S, Türüt A, 2008. Fabrication and Electrical Characteristics of Schottky Diode Based on Organic Material. *Microelectronic Engineering*, 85, 1647-1651.
- Karabulut A, Efeoğlu H, Türüt A, 2017. Influence of Al₂O₃ Barrier on the Interfacial Electronic Structure of Au/Ti/n-GaAs Structures. *Journal of Semiconductors*, 38, 054003(10p).
- Karataş Ş, Altındal Ş, 2005. Zn/p-Si Schottky Diyotlarda Temel Elektriksel Parametrelerin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 26-30.
- Kınacı B, 2017. Effect on the Electrical Characterizations of Temperature and Frequency Depending on Series Resistance and Interface States in MS Structure. *Journal of Polytechnic*, 20(2), 313-318.
- Kundu S, Kumar A, Banerjee S, Banerji P, 2012. Electrical Properties and Barrier Modification of GaAs MIS Schottky Device Based on MEH-PPV Organic Interfacial Layer. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 12, 386-392.
- Lapa H E, Kökce A, Al-Dharob M, Orak İ, Özdemir A F, Altındal Ş, 2017. Interfacial Layer Thickness Dependent Electrical Characteristics of Au/(Zn-Doped PVA)/n-4H-SiC (MPS) Structures at Room Temperature. *The European Physical Journal Applied Physics*, 80, 10101 (8p).
- Neamen D A, 2003. *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*. McGraw-Hill Companies, pp. 326-359, New York.
- Nicollian E H, Brews J R, 1982. *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. John Wiley and Sons, pp. 71-235, New York.
- Norde H, 1979. A Modified Forward *I-V* Plot for Schottky Diodes With High Series Resistance. *Journal of Applied Physics*, 50 (7), 5052-5053.
- Reddy V R, Rao L D, Janardhanam V, Kang M S, Choi C J, 2013. Electrical Properties and Interface States of Rare-Earth Metal Ytterbium Schottky Contacts to *p*-Type InP. *Material Transactions*, 54 (12), 2173-2179.
- Reinhardt K C, Singh A, Anderson A, 1988. Ytterbium Metal-Insulator-Semiconductor Contacts to Indium Phosphide. *Solid-State Electronics*, 31 (10), 1537-1539.
- Rhoderick E H, Williams R H, 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*. Clarendon Press, pp. 89-179, New York. (2. Baskı).
- Sağlam M, Ayyıldız E, Gümüş A, Türüt A, Efeoğlu H, Tüzemen S, 1996. Series Resistance Calculation for the Metal-Insulator-Semiconductor Schottky Barrier Diodes. *Applied Physics A*, 62, 269-273.
- Soylu M, 2011. The Effect of Thickness of Organic Layer on Electronic Properties of Al/Rhodamine B/p-Si Structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14, 212-218.
- Takami Y, Shiraishi F, Hosoe M, 1984. Evaluation of Various Electrode Metals Ultra-High Purity *p*-Type Si Surface Barrier Detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 31(1); 340-343.
- Taşçioğlu İ, Farooq W A, Turan R, Altındal Ş, Yakuphanoglu F, 2014. Charge Transport Mechanisms and Density of Interface Traps in MnZnO/p-Si Diodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 590, 157-161.
- Tataroğlu A, Altındal Ş, 2006. Characterization of Current-Voltage (*I-V*) and Capacitance-Voltage-Frequency (*C-V-f*) Features of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky Diodes. *Microelectronic Engineering*, 83, 582-588.
- Tecimer H, 2018. Al/PVA (Zn-katkılı)/p-Si (MPS) Yapılarda Organik Arayüzey Tabaka Kalınlığının ve Seri Direncin *C-G/ω-V* Karakteristikleri Üzerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(3), 680-690.
- Temirci C, Gülcan M, Göksen K, Sönmez M, 2010. Ohmic and Rectifier Properties of Al/Ligand(N-APTH) and Al/Cu(II)Complex Contacts. *Microelectronic Engineering*, 87, 2282-2287.
- Uslu Tecimer H, Alper M A, Tecimer H, Tan S O, Altındal Ş, 2018. Integration of Zn-doped Organic Polymer Nanocomposites between Metal Semiconductor Structure to Reveal the Electrical Qualifications of the Diodes. *Polymer Bulletin*, 75, 4257-4271.
- Werner J, Levi A F J, Tung R T, Anzlowar M, Pinto M, 1987. Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts. *Physical Review Letters*, 60, 53-56.