

Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky Bariyer Diyotların Üretimi ve Temel Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

Gülçin ERSÖZ DEMİR^{1*}

ÖZET: Bu çalışmada, Metal-Yarıiletken (Au/p-Si) diyotlar, polimer arayüzey malzemesinin diyotların elektriksel özellikleri üzerine etkisini araştırmak ve geliştirmek için; saf polivinil alkol (PVA) arayüzeyli (Au/PVA/p-Si) ve %3 Grafen katkılı PVA arayüzeyli (Au/PVA:Gr/p-Si) olmak üzere üç farklı tip Schottky Bariyer diyot üretildi. Hazırlanan diyotların elektriksel özelliklerinin yanı sıra PVA ve PVA:Gr arayüzey malzemesinin etkisi araştırıldı. Her bir diyotun akım-gerilim karakteristiği oda sıcaklığında incelendi. Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky Bariyer diyotların seri direnç (R_s), bariyer yüksekliği (Φ_{B0}), arayüz durum yoğunluğu (N_{ss}) ve idealite faktörü (n) gibi temel elektriksel parametreleri akım-gerilim verileri kullanılarak Termiyonik Emisyon (TE) teorisinden elde edildi. Termiyonik Emisyon teorisi ile elde edilen R_s ve Φ_{B0} parametrelerini karşılaştırmak amacıyla Norde metodu da kullanıldı. TE teorisi ile elde edilen n , R_s ve Φ_{B0} değerleri, Au/p-Si için sırasıyla 14.46, 275.33 Ω , 0.66 eV, Au/PVA/p-Si için 4.98, 155.58 Ω ve 0.72 eV olarak bulunurken, Au/PVA:Gr/p-Si için ise sırasıyla 5.61, 432.43 Ω ve 0.77 eV olarak hesaplandı. Norde metodu ile elde edilen R_s ve Φ_{B0} değerleri ise, Au/p-Si için 362.39 Ω ve 0.70 eV, Au/PVA/p-Si için 175.07 Ω ve 0.75 eV olarak elde edilirken, Au/PVA:Gr/p-Si için 525.21 Ω ve 0.76 eV (PVA:Gr) olarak bulundu. Norde ve Termiyonik Emisyon teorisi yöntemleriyle bulunan değerler birbiri ile uyumludur. Deneysel sonuçlar, PVA:Gr arayüzeyinin MPY yapıların elektriksel parametrelerinde iyileştirme sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Akım-gerilim özellikleri, Arayüzey durum yoğunluğu, MPY Schottky Diyot

The Fabrication of Au/p-Si, Au/PVA/p-Si and Au/PVA:Gr/p-Si Schottky Barrier Diodes and The Investigation of Their Basic Electrical Properties

ABSTRACT: In this study, three different types of Schottky Barrier diodes were fabricated: Metal-Semiconductor (Au/p-Si) diodes, and pure polyvinyl alcohol (PVA) interface (Au/PVA/p-Si) and 3% Graphene doped PVA interface (Au/PVA:Gr/p-Si) in order to investigate and develop the effect of polymer interface material on the electrical properties of diodes. The electrical properties of the prepared diodes besides the effect of PVA and PVA:Gr interfacial material was investigated. The current-voltage characteristics of each diodes were examined at room temperature. Basic electrical parameters of Au/p-Si, Au/PVA/p-Si, and Au/PVA:Gr/p-Si Schottky Barrier diodes such as series resistance (R_s), barrier height (Φ_{B0}), interface state density (N_{ss}) and ideality factor (n) was obtained from Termionic Emission (TE) theory by using current-voltage data. Norde method was also used to compare the R_s and Φ_{B0} parameters obtained by the Thermionic Emission theory. The values of n , R_s , and Φ_{B0} obtained by TE method were found as 14.46, 275.33 Ω , and 0.66 eV for Au/p-Si, 4.98, 155.58 Ω , and 0.72 eV for Au/PVA/p-Si, while it was calculated as 5.61, 432.43 Ω , and 0.77 eV for Au/PVA:Gr/p-Si, respectively. The R_s and Φ_{B0} values obtained by the Norde method were obtained as 362.39 Ω and 0.70 eV for Au/p-Si, 175.07 Ω and 0.75 eV for Au/PVA/p-Si, while it was found as 525.21 Ω and 0.76 eV for Au/PVA:Gr/p-Si. Values found with Norde and Termionic Emission methods are compatible with each other. Experimental results show that the PVA:Gr interface provides an improvement in the electrical parameters of MPYs.

Keywords: Current-voltage characteristics, Interface state density, MPY Schottky Diode.

¹Gülçin ERSÖZ DEMİR (Orcid ID: 0000-0003-2636-3291), Selçuk Üniversitesi, Beyşehir Ali Akkanat İşletme Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Gülçin ERSÖZ DEMİR, e-mail: gulcin.ersozdemir@selcuk.edu.tr

GİRİŞ

Literatürde, Schottky Bariyer Diyotları (SBD) ile ilgili Metal-Yarıiletken arasına kaplanan arayüzey tabakalı (Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MY)/Metal-Polimer-Yarıiletken (MPY)) veya arayüzey tabakasız (Metal-Yarıiletken (MY)) çok çeşitli çalışmalar mevcuttur (Yücedağ, 2009; Mikhelashvili ve ark., 2010; Jiang ve ark., 2018; Mirzanezhad-Aslb ve ark., 2019; Raj ve ark., 2020; Ramadan ve Martin-Palma, 2020). SBD'lerin elektrik/elektronik devre teknolojilerindeki kullanım alanı oldukça fazla olduğundan, akım-iletim mekanizmalarının anlaşılması büyük önem taşımaktadır (Ersöz ve ark., 2017; Greco ve ark., 2020). Akım-iletim mekanizmalarının anlaşılmasında ileri besleme voltajının düşüklüğü ve yüksek anahtarlama hızları önemli parametrelerdir ve bu üstünlükler, yüksek frekanslı uygulamalar ve anahtarlama güç kaynaklarında tercih edilecek çıkış cihazları için ideal üstünlüklerdir (Singh ve ark., 2009; Çetinkaya ve ark., 2015; Buzio ve ark., 2020). MY, MPY ve MYY yapıların akım-gerilim karakteristikleri; üretim yöntemleri, arayüzey malzemesinin türü, arayüzey tabakasının oluşumu, cihaz sıcaklığı ve uygulanan ön gerilim voltajı gibi çeşitli parametrelerden etkilenir (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams, 1988; Ersöz ve ark., 2016). Bu bağlamda, geleneksel MY yapıların elektronik ve yük taşınım özellikleri, MY arayüzeyine organik arayüzey katmanı oluşturularak kontrollü bir şekilde değiştirilmektedir. İnorganik arayüzey yerine organik/polimerik arayüzey tabakasının kullanılmasının diyotun doğrultma davranışına katkıda bulunduğu son araştırmalardan anlaşılmaktadır (Özdemir ve ark., 2007; Altındal ve ark., 2014; Baraz ve ark., 2017). Polimerler kolay işlenebilirlikleri nedeniyle en çok tercih edilen arayüzey malzemeleridir. Bu polimerler arasından PVA polimeri suda çözünürlüğü, düşük toksikolojik etkileri, zayıf iletkenliği (veya güçlü izolasyonu), iyi kristallığı, iyi dielektrik sabiti, iyi yük depolama özellikleri, pürüzsüz ve homojen film oluşumu ve diğer fiziksel özellikler açısından arayüz polimeri olarak oldukça fazla tercih edilen bir malzemedir (Reddy ve ark., 2006; Uslu ve ark., 2011). Bir polimere, çeşitli miktarlarda ve formlarda Zn, Co, Ni, Cu ve Fe gibi geçiş elementleri katıldığında iletkenliği arttırması beklenebilir (Peppas ve Merril, 1977; Garrel ve ark., 1991; Altındal ve ark., 2014; Padma ve ark., 2016). Katkı malzemesinin polimerin içine difüze olması iletim sürecinde önemli bir rol oynar. MPY yapıların performansı, film homojenliği, arayüz yoğunluğu, seri direnç, üretim yöntemi, frekans ve katkı konsantrasyonu gibi birçok parametreye bağlıdır. Ayrıca katkılama işlemi polimerlerin kimyasal yapısını, kristallığını ve elektrik iletkenliğini etkiler (Wöhrle ve Meissner, 1991; Güneş ve ark., 2007). Bu nedenle, polimere katılanacak maddenin özellikleri çok önemlidir. Grafen (Gr), çevresel etki, UV spektrumunda yüksek şeffaflık, kolay kullanılabilirlik, yüksek mobilite ($15 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$), yüksek dayanıklılık, geniş yüzey alanı (yaklaşık $2600 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) ve yarı iletken ile yüksek uyumluluk gibi özellikleri sayesinde ideal bir katkı malzemesi olarak tercih edilir (Novoselov ve ark., 2004; Li ve ark., 2014). Grafen, yarı iletkenlerin yanı sıra polimerlerle de uyumlu olduğundan, polimer-kompozit malzemeler üretmek için oldukça uygundur. Grafenin, polimer malzemeye katılanması ile metal-yarıiletken yüzeyinde biriken yüklerin sayısı azalmakta ve elektrik alanın azalması önlenmektedir. Bu şekilde, daha uzun menzil ve daha uzun ömür ile iletim mekanizması ve gevşeme mekanizmasına daha fazla yük katılabilmektedir (Uslu ve ark., 2011; Cicek ve ark., 2018). Bu çalışmada, Metal-Yarıiletken (MY) ve Metal-Polimer-Yarıiletken (MPY) diyotların temel elektriksel özelliklerini araştırmak ve karşılaştırmak için, Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si olmak üzere 3 tip Schottky diyot üretildi. PVA arayüzey polimeri içerisine Gr katılanmasının amacı, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzey durum yoğunluğunu azaltmak ve yük geçişlerini düzenlemektir. Bu yüzden Gr katkı maddesinin arayüzey polimerinin pasifizasyon özelliklerini iyileştirmesi ve MPY diyotların performansına etkilerinin araştırılması bu çalışmanın odak noktası olmuştur. Her bir diyot akım-gerilim (I-V) ölçümlerinden elde edilen elektriksel parametrelerine göre karşılaştırıldığında, Au/

PVA:Gr/p-Si tipi SBD'nin Au/PVA/p-Si ve Au/p-Si tipi SBD'lere göre daha iyi doğrultma özelliklerine sahip olduğu sonucuna varıldı. Her bir SBD için, idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_{B0}), kaçak akım (I_0), arayüz durumlarının yoğunluğu (N_{ss}), seri direnç (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) gibi temel elektriksel parametrelerin özellikle arayüzey tabakası ve katkı malzemesinin türünden etkilendiğini göstermektedir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky Bariyer diyotların üretiminde yarıiletken olarak; (100) yönelimli, 350 mikrometre kalınlıklı ve $4.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ taşıyıcı yoğunluklu p-Si alttaşı kullanıldı. Yarıiletken yüzeyindeki kirlilikleri önlemek için p-Si alttaşı öncelikle aseton ve metil alkol içerisinde 5 dakika süreyle ultrasonik titreştirici ile temizlendi. Her teknik solvent temizleme işleminden sonra p-Si alttaşı deiyonize su ($18 \text{ M}\Omega$) içerisinde çalkalanarak yıkandı. Bu aşamadan sonra, p-Si alttaşın mat yüzeyine ultra yüksek saflıkta Au (% 99.995) yaklaşık 10^{-6} Torr basınçta metal buharlaştırma sistemi kullanılarak buharlaştırıldı. Daha iyi kontak oluşturmak için, p-Si alttaşı fırına yerleştirilerek $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de, saf azot ortamında, 5 dakika boyunca tavlandı. Omik kontak oluşturulan p-Si alttaşlardan birisinin parlak yüzüne saf altın metali 1 mm çapında delikleri olan maske kullanılarak metal buharlaştırma sistemi ile 10^{-6} Torr basınçta buharlaştırıldı ve Au/p-Si SBD için 1500 \AA kalınlığında doğrultucu kontaklar elde edildi. Arayüzey katmanını oluşturmak için ise PVA ve ağırlıkça %3 Gr katkılı PVA çözeltileri saf suda çözülürülerek hazırlandı. Hazırlanan her iki çözelti Elektrosipin tekniği ile p-Si'nin parlak yüzeyine kaplandı. Oluşturulan arayüzey katmanlarının üzerine saf altın metali 1 mm çapında delikleri olan maske kullanılarak metal buharlaştırma sistemi ile 10^{-6} Torr basınçta buharlaştırıldı ve 1500 \AA kalınlığında doğrultucu kontaklar elde edildi. Böylece Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky Bariyer diyotların üretim işlemi tamamlandı. İleri ve geri beslem I-V ölçümleri, Keithley 2400 kaynak ölçer cihazı kullanılarak $\pm 6 \text{ V}$ gerilim aralığında ve oda sıcaklığında incelendi.

BULGULAR VE TARTIŞMA

MY, MPY ve MYY Schottky bariyer diyotların temel elektriksel parametrelerini belirlemek için en çok kullanılan metotlardan birisi termiyonik emisyon (TE) teorisidir. TE teorisine göre, ileri beslem (pozitif gerilim) bölgesinde akım (I) ve gerilim (V) arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir (Ersöz ve ark., 2017):

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

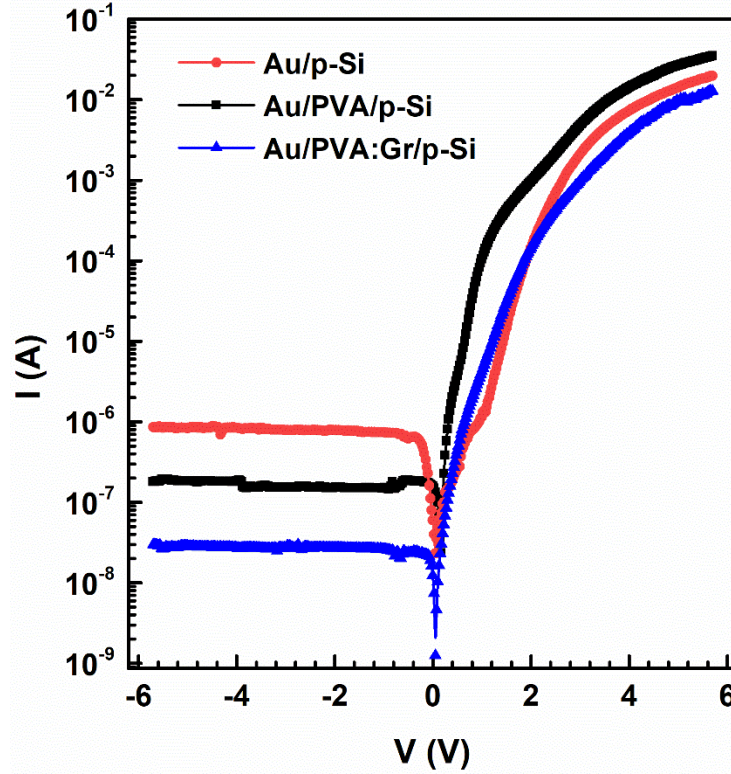
Eşitlik (1)'de I_0 ters doyum akımı, q elektron yükü, IR_s diyotun seri direnç karşısında voltaj düşüşü, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık, I akım ve V uygulanan gerilimdir (Sze, 1981; Ersöz ve ark., 2017). I_0 , ters doyum akımıdır ve sıfır gerilimde $\ln(I)$ - V grafiğinin doğrusal kısmının kesişiminden çıkartılır ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$I_0 = AA * T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de A kontağın alanı, Φ_{B0} sıfır gerilimde Schottky bariyer yüksekliği ve A^* etkin Richardson sabitidir. Hesaplamalarda p-Si için etkin Richardson sabitinin değeri $32 \text{ A K}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ olarak alınmıştır. Deneysel I-V verilerinin TE teorisinden sapmasını hesaba katmak için idealite faktörü (n)

hesaplandı. İdealite faktörü arayüzey durumları, uygulanan gerilim ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Üretilen diyotların n değerleri yarı logaritmik I-V eğrisinin eğiminden Eşitlik (3) kullanılarak hesaplanmıştır (Sze, 1981; Ersöz ve ark., 2017):

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



Şekil 1. Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyotların yarı logaritmik I-V grafiği

Üretilen Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky Bariyer diyotlar için ileri ve geri beslem yarı logaritmik I-V karakteristikleri Şekil 1'de verilmiştir. Her bir diyotun yarı logaritmik I-V grafikleri, ± 6 V gerilim aralığında iyi bir doğrultma davranışı göstermektedir. Şekil 1'i incelediğimizde, I-V karakteristikleri ileri beslemde lineer bir artış göstermektedir ve yaklaşık 2 V'tan sonra seri direnç (R_s) ve arayüzey katmanı etkisinden dolayı lineerlikten sapma gösterir. (-6 V) - (-1 V) gerilim aralığında akımın voltaja bağımlılığının zayıf olduğu görülmektedir. Geri beslemde (-6 V ile 0 V gerilim aralığı) görülen doymamışlık davranışı, üretim-rekombinasyon ve ara katman varlığının sonucudur. ± 6 V'da Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyotun doğrultma oranı (RR) Au/PVA/p-Si Schottky diyota göre yaklaşık 2.5 kat ve Au/p-Si Schottky diyota göre yaklaşık 15 kat daha büyüktür. PVA:Gr arayüzey tabakasının doğrultma oranını ve şönt direnci (R_{sh}) arttırdığı, kaçak akımı ise azalttığı gözlenmiştir.

Sıfır gerilimdeki bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) değeri, aşağıda verilen Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanabilir (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams, 1988):

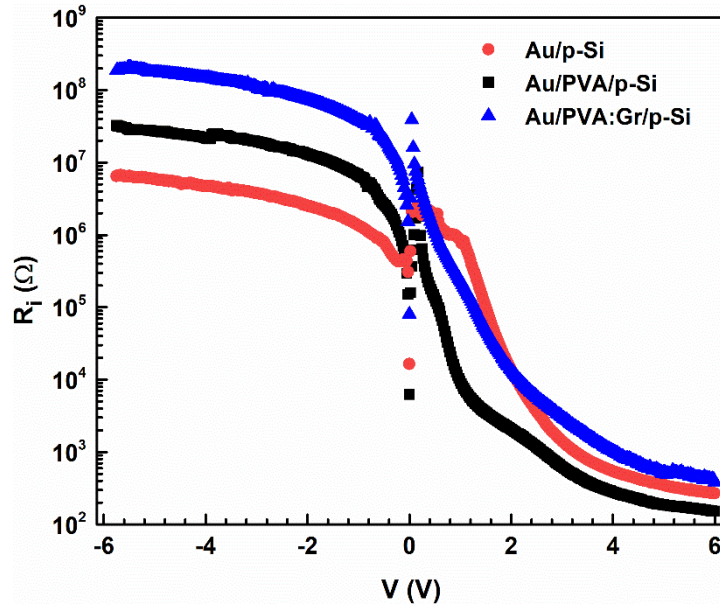
$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4)$$

Her bir diyot için, temel elektriksel parametre değerleri yukarıda verilen eşitliklerden hesaplanarak (I_0 , n , Φ_{B0}) Tablo 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky Bariyer diyotların I-V verilerinden elde edilen temel elektriksel parametreleri

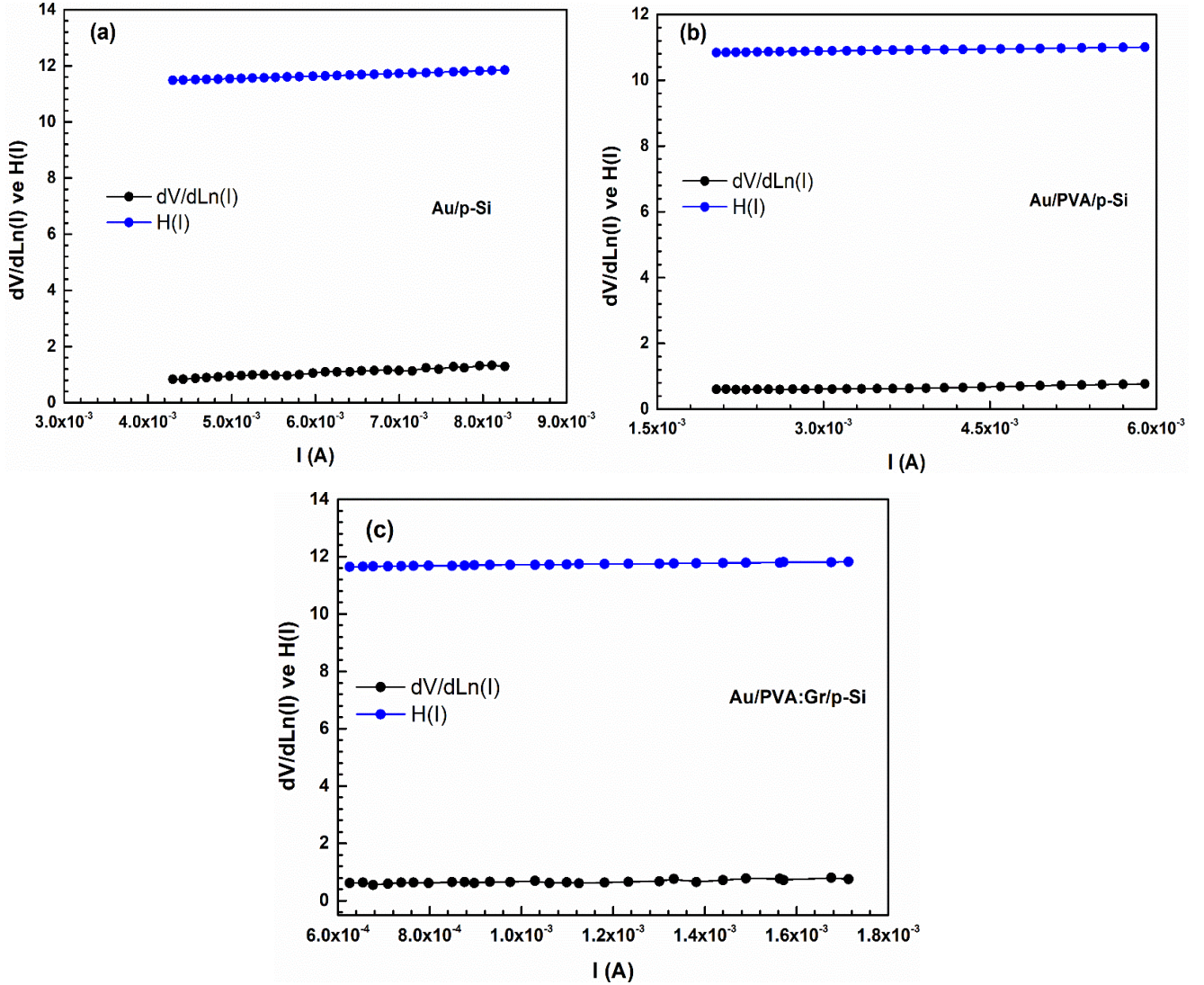
	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	RR	I_0 (A)	Φ_{B0} (eV)	n
Au/p-Si	275.33	6.71×10^6	2.31×10^4	6.51×10^{-8}	0.66	14.46
Au/PVA/p-Si	155.58	3.13×10^7	1.45×10^5	7.14×10^{-8}	0.72	4.98
Au/PVA:Gr/p-Si	432.43	1.91×10^8	3.31×10^5	1.26×10^{-8}	0.77	5.61

Bir diyotun kalitesini belirlemek için önemli parametrelerden biride doğrultma oranıdır (RR = IF/IR). Doğrultma oranı (RR) ± 6 V'da Au/p-Si diyot için 2.31×10^4 , Au/PVA/p-Si diyot için 1.45×10^5 ve Au/PVA:Gr/p-Si diyot için ise 3.31×10^5 olarak bulunmuştur. Au/PVA:Gr/p-Si diyotun doğrultma değeri Au/PVA/p-Si diyottan 2.5 kat ve Au/p-Si diyottan yaklaşık 15 kat daha büyüktür. Bu durum geleneksel Metal-Yarıiletken diyotta PVA arayüzeyinin daha iyi performans sağladığını ve PVA katmanı yerine ise PVA:Gr arayüzey katmanı tercih edilmesinin kaçak akım değerini azaltabileceğini göstermektedir. Tablo 1'de temel elektriksel parametreler verilmiştir. I_0 , Φ_{B0} ve n değerleri sırasıyla Au/p-Si için sırasıyla 6.51×10^{-8} A, 0.66 eV ve 14.46, Au/PVA/p-Si Schottky diyot için 7.14×10^{-8} A, 0.72 eV ve 4.98 ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyot için 1.26×10^{-8} A, 0.77 eV ve 5.61 olarak bulunmuştur. Kaçak akım ve PVA:Gr/p-Si arayüzeyinde elektron tünellemesinin azalması nedeniyle Au/PVA:Gr/p-Si diyotta bariyer yüksekliği daha yüksektir. Au/p-Si arayüzünde bulunan PVA:Gr ara katmanı fiziksel bir bariyer görevi görür ve ayrıca Metal/Yarıiletken arasındaki ara difüzyonu ve reaksiyonları önler. Ek olarak, her bir diyot için elde edilen deneysel idealite faktörü (n) değeri beklenenden oldukça yüksektir. Bu yüksek n değerleri, p-Si/PVA:Gr arayüzünde lokalize olan yüksek arayüzey durum yoğunluğuna (N_{ss}), bariyerin homojen olmamasına, ara katmanın varlığına ve kalınlığına atfedilebilir (Card ve Rhoderick, 1971; Tung, 1992; Ersöz ve ark., 2017).

**Şekil 2.** Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyotların direnç grafiği

Akım-voltaj (I-V) karakteristiğini etkileyen önemli parametreler diyotun seri ve şönt direncidir. Şekil 2'de verilen R_i -V grafiği, Ohm yasasından ($R_i = V_i/I_i$) yararlanarak I-V verilerinden elde edilmiştir. Seri direnç (R_s) ve şönt direnç (R_{sh}) değerleri, Au/p-Si diyot için 275.33 Ω ve 6.71×10^6 Ω , Au/PVA/p-Si diyot için 155.58 Ω ve 3.13×10^7 Ω , Au/PVA:Gr/p-Si diyot için 432.43 Ω ve 1.91×10^8 Ω olarak bulundu. Au/PVA:Gr/p-Si diyotun R_{sh} değeri Au/PVA/p-Si diyottan yaklaşık 6 kat ve Au/p-Si yapıdan

yaklaşık 28 kat daha yüksektir. Bu R_{sh} değeri, PVA:Gr diyotu ideal diyota daha çok yakınlaştırmaktadır. R_i -V grafiğinden görülmektedir ki direnç değerleri özellikle düşük ve orta gerilim bölgesinde ((-2 V) - (4 V) gerilim aralığı) uygulanan voltaja oldukça bağlıdır. Yeterince yüksek ileri ön gerilimde cihazların direnci azalmaktadır. ± 5 V'dan sonra direnç değerleri neredeyse voltajdan bağımsız hale gelmektedir.



Şekil 3. Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyotların $dV/dLn(I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri

Ayrıca, R_s ve n değerleri, başka bir yöntem olan Cheung metodu kullanılarak belirlenmiştir (Cheung ve Cheung, 1986):

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

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

Şekil 3a, b ve c'de her bir diyot için $dV/d(LnI)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, değerlerin geniş akım-gerilim aralığında doğrusal bölgeye sahip olduğu görülmektedir. Bu grafiklerin en iyi lineer fit edilmiş eğiminden R_s değerleri, Au/p-Si diyot için 120.54 Ω , Au/PVA/p-Si diyot için 46.08 Ω , Au/PVA:Gr/p-Si diyot için 149.31 Ω olarak elde edildi. $dV/dLn(I)$ -I grafiğinin

lineer denklemi kullanılarak her bir diyot için H(I)-I grafikleri çizildi ve H(I)-I incelendiğinde iyi doğrusallık gösterdiği görülmektedir. H(I)-I grafiklerinin de en iyi fit edilmiş eğimlerinden R_s ve Bariyer Yüksekliği (BH) değerleri Au/p-Si diyot için 92.08Ω ve 0.53 eV , Au/PVA/p-Si diyot için 42.06Ω ve 0.55 eV , Au/PVA:Gr/p-Si diyot için 171.51Ω ve 0.57 eV bulundu.

Her bir diyot için, Eşitlik 7'de (Norde, 1979) verilen alternatif bir yöntem olan Norde fonksiyonu kullanılarak BH ve R_s değerleri bulunmuştur.

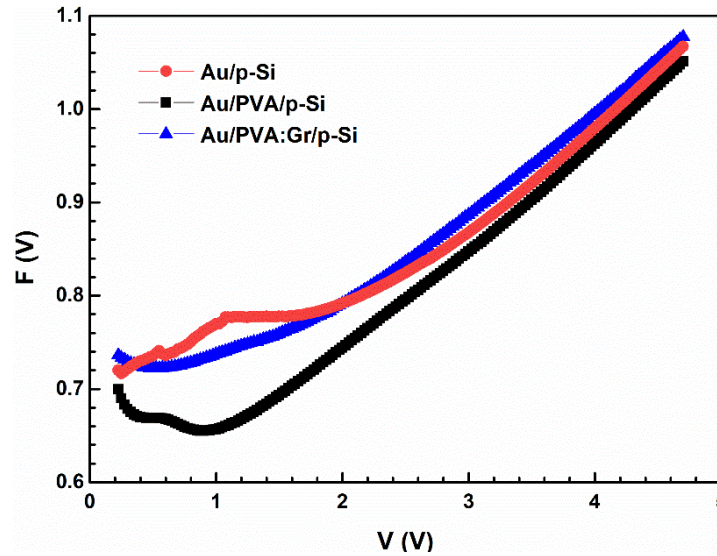
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (7)$$

Eşitlik 7'de γ boyutsuz tamsayıdır ve iki yapı için $\ln(I)$ -V grafiklerinin eğiminden türetilen idealite faktöründen daha büyük olmalıdır. Başka bir ifadeyle, γ değeri ideallik faktöründen küçük olmamak üzere ($1 < n < \gamma$) ilk büyük tam sayıdır. Şekil 4, ileri besleme Norde karakteristiğini göstermektedir. BH aşağıdaki eşitliklerden elde edildi:

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (8)$$

V_0 , F (V_0) karşılık gelen minimum voltajdır. R_s değeri aşağıdaki ilişki kullanılarak türetilir:

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_0} \quad (9)$$

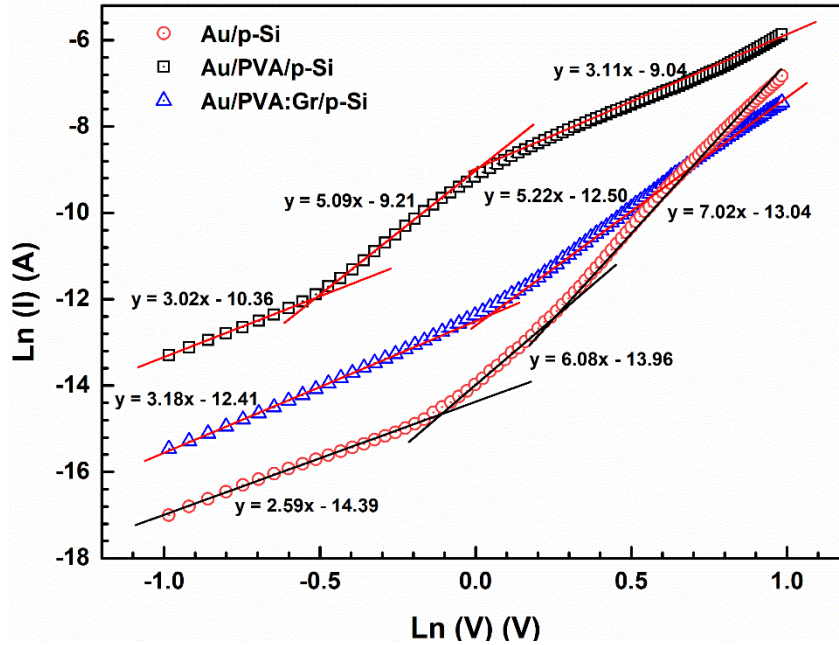


Şekil 4. Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyotların F(V)-V Norde fonksiyonu grafikleri

F(V)-V karakteristiği incelendiğinde, BH ve R_s değerleri, Au/p-Si diyot için 0.70 eV ve 362.39Ω , Au/PVA/p-Si diyot için 0.75 eV ve 175.07Ω ve Au/PVA:Gr/p-Si diyot için 0.76 eV ve 525.21Ω olarak bulunmuştur. Norde fonksiyonu ve Cheung metodu karşılaştırıldığında, Cheung metodundan elde edilen R_s değerlerinin daha düşük olması I-V'nin farklı bölgelerinden kaynaklanabilmektedir. Doğrusal olmayan bölgede Cheung metodu kullanılırken, ileri beslem I-V karakteristiğinde Norde'de kullanılabilir (Norde, 1979; Cheung ve Cheung, 1986).

Çift logaritmik ölçekte çizilmiş olan $\ln(I)$ - $\ln(V)$ grafiği Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5'de akım ve gerilim arasındaki ilişki, $I \sim V^m$, bir güç yasası davranışı gösterir. Burada m, grafikte her bölge için eğim olarak ifade edilebilir. Şekil incelendiğinde, Au/p-Si ve Au/PVA/p-Si diyotlarının 3 lineer bölgeye, Au/PVA:Gr/p-Si diyotun ise 2 lineer bölgeye sahip olduğu görülmektedir.

Au/p-Si ve Au/PVA/p-Si Schottky diyotlar için Bölge-I'in eğimleri sırasıyla 2.59 ve 3.02, Bölge-II'nin eğimleri sırasıyla 6.08 ve 5.09, Bölge-III'ün eğimleri sırasıyla 7.02 ve 3.11 iken, Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyotun Bölge-I ve Bölge-II'nin eğimleri sırasıyla 3.18 ve 5.22'dir. PVA:Gr katkısının etkisiyle yüklerin tuzaklanmasının sınırlandırıldığı ve bu nedenle tuzak bölge sayısının 3'den 2'ye düştüğü görülmektedir. Au/p-Si ve Au/PVA/p-Si diyotlar için Bölge I ve Bölge II'de, Au/PVA:Gr/p-Si için Bölge I'de baskın akım mekanizması Tuzak Yükü-Sınırlı Akım (TCLC)'dir. TCLC'ye göre, elektron sayılarındaki bir artış, arayüz tuzaklarının dolmasına neden olur ve böylece uzay yükü artar (Cetinkaya ve ark., 2013). Diğer yandan, Au/p-Si ve Au/PVA/p-Si diyotlar için Bölge-III ve Au/PVA:Gr/p-Si için ise Bölge-II'de baskın akım mekanizması uzay yükü sınırlı akımdır (SCLC). Uygulanan voltajın artması ile arayüz katmanından doğrultucu kontağa doğru SCLC artar. Elektronların artması tuzakları doldurmakta ve SCLC ye sebep olmaktadır (Cetinkaya ve ark., 2013). Akım/iletim mekanizmasının farklılık göstermesinde N_{ss} , Metal/Yarıiletken arayüzündeki bariyer homojenliği, R_s , doğal veya çeşitli yöntemler ile oluşturulmuş ara katman tabakası etkili olmaktadır (Card ve Rhoderick, 1971; Sze, 1981; Rhoderick ve Williams, 1988).



Şekil 5. Au/p-Si, Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyotların ileri beslemde Ln(I)-Ln(V) grafikleri

Elektronik cihazlarda doğrultucu ve omik kontakları arasında bir polimer veya yalıtkan tabaka olduğu iyi bilinmektedir ve uygulanan uygun ileri gerilim voltajı diyotun elektriksel özellikleri üzerinde etkilidir. Bu cihazlarda, yüklerin depolanabileceği ve serbest bırakılabileceği arayüzey durumları veya tuzakları (N_{ss}) da mevcuttur (Sze, 1981; Sharma, 1984; Rhoderick ve Williams, 1988). Bu arayüzey durumları/tuzaklar yapısal kusurlar, alıcı-verici atomlar, zayıf moleküler bağlantı ve safsızlıktan kaynaklanmaktadır. Arayüzey durumları, yarıiletken yasak enerji bant aralığında olup belirli bir yoğunluğa sahiptir.

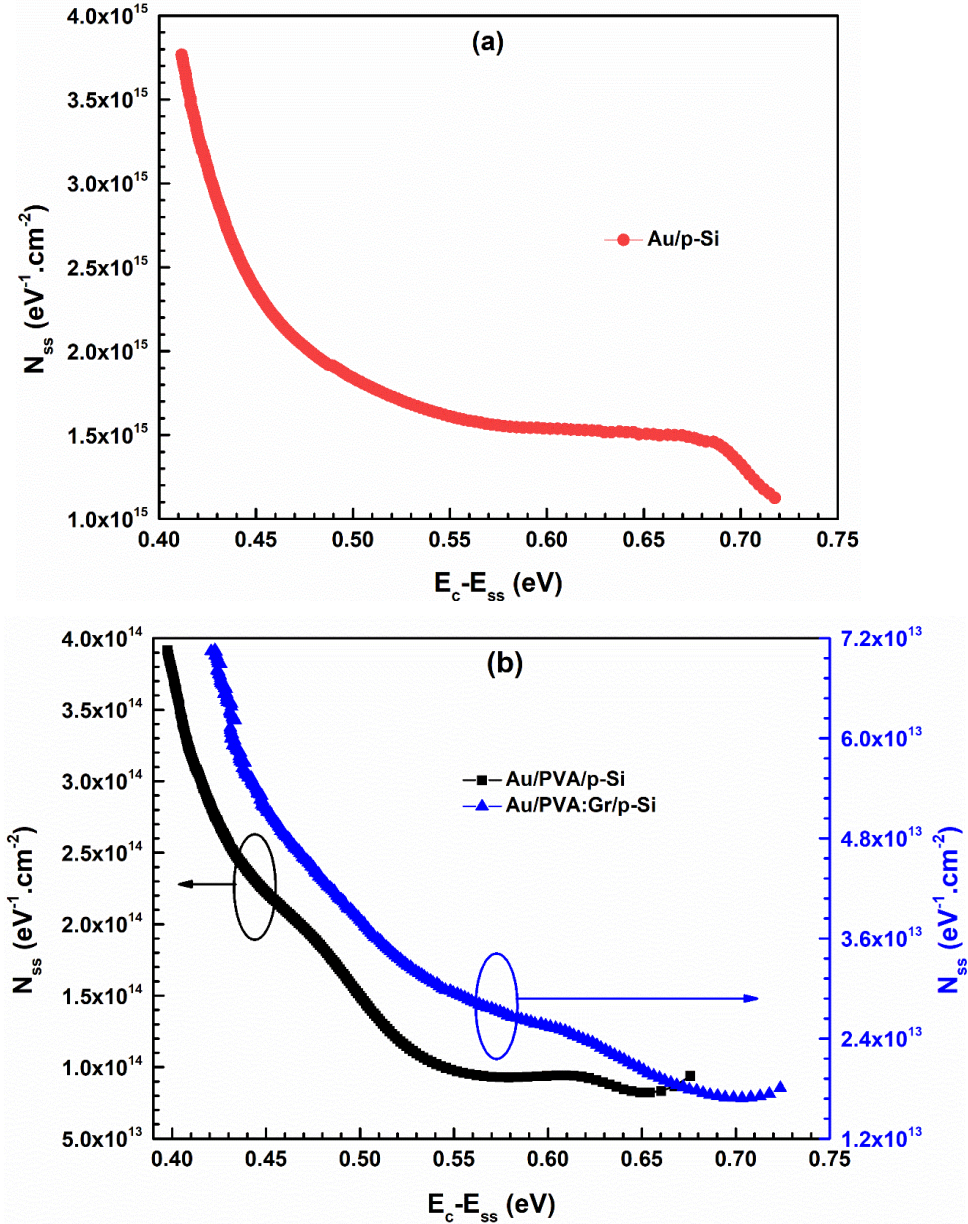
I-V karakteristikleri yardımıyla Schottky diyotların arayüzey tuzak yoğunlukları (N_{ss}) değeri (Sze, 1981; Ashery ve ark., 2020):

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \quad (10)$$

ifadesi kullanılarak elde edilmiştir. q elektron yükü, δ arayüzey tabakası kalınlığı, W_D tükenim tabakası genişliği, ϵ_i arayüzey katmanı geçirgenliği, ϵ_s yarıiletkenin elektriksel geçirgenliği olarak ifade edilir. p tipi bir yarıiletken için iletim bandının alt seviyesine göre arayüzey durumlarının enerjileri (E_{ss}) (Sze, 1981; Ashery ve ark., 2020):

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (11)$$

ile verilir.



Şekil 6. (a) Au/p-Si, (b) Au/PVA/p-Si ve Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyotların arayüzey durumları dağılım grafikleri

Her bir diyot için arayüzey durum yoğunluğunun enerjiye bağlı dağılımı Şekil 6 (a) ve (b)'de verilmiştir ve Şekil 6 (b)'deki N_{ss} değerleri 6 (a)'dan daha düşüktür. Bu durum PVA:Gr arayüzey katmanının, Al/p-Si arasındaki reaksiyonu ve ara difüzyonu engellediğini ve yasak enerji aralığında bulunan arayüz durumlarını azaltarak diyot performansını iyileştirdiğini göstermektedir.

N_{ss} grafiği incelendiğinde, elde edilen arayüzey durum yoğunluğu değerleri uygulanan voltaj ile azalmaktadır. Yasak enerji bant aralığının ortasından başlayarak bir minimum seviyede başlayan arayüzey durumları, iletim bandının alt seviyesine doğru artış göstermektedir. Arayüzey durumların değerleri Au/p-Si diyot için 0.71 eV enerji seviyesinde $1.1 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 0.41 eV enerji seviyesinde $3.7 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, Au/PVA/p-Si diyot için 0.67 eV enerji seviyesinde $9.3 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 0.40 eV enerji seviyesinde $3.7 \times 10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak, Au/PVA:Gr/p-Si diyot için 0.73 eV enerji seviyesinde $1.8 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ve 0.42 eV'de seviyesinde $7.0 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak elde edildi. Elde edilen değerlere baktığımızda arayüzey durumların yoğunluğu yasak enerji bandına doğru azalmakta ve iletim bandına doğru ise artmaktadır.

Her bir diyot için taşıyıcı konsantrasyonu eşitlik 12 ile hesaplanmıştır (Farag ve Yahia, 2011):

$$N_d = \frac{2}{A^2 \epsilon_s \epsilon_0 q} \frac{\partial(1/C^2)}{\partial V} \quad (12)$$

Burada N_d taşıyıcı konsantrasyonunu ifade etmektedir. A diyotların doğrultucu kontaklarının alanı, q ve ϵ_0 sırasıyla temel elektrik yükü ve boşluğun elektriksel geçirgenliğidir. C arayüzeyin kapasitansı ve V ise uygulanan ön gerilimdir. Eşitlik 12 uygulanırken en yüksek frekans (yaklaşık 1 MHz) ve tükenim bölgesinin maksimumunda her bir diyotun taşıyıcı konsantrasyonları bulunmuştur. Au/p-Si diyot için taşıyıcı konsantrasyonu $1.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, Au/PVA/p-Si diyot için taşıyıcı konsantrasyonu $1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ve Au/Gr:PVA/p-Si diyot için taşıyıcı konsantrasyonu ise $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Au/Gr:PVA/p-Si diyotun taşıyıcı konsantrasyonun Au/p-Si ve Au/PVA/p-Si diyotlardan sırasıyla yaklaşık 93 ve 1.5 kat fazla olduğu anlaşılmaktadır. Gr katkısının taşıyıcı konsantrasyonunu arttırdığı görülmüştür. Bu artışın Gr malzemesinin iletkenliğe katkı sağladığını göstermektedir. Başka bir ifadeyle, Gr malzemesinin iletkenliğe sağladığı katkı Gr'nin yapı içine verdiği hareketli yüklerden gelmektedir. Yapı içerisinde hareketli yüklerin artışı ise taşıyıcı yoğunluğunun artmasına doğrudan katkı sağlamaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, hem arayüzeysiz hem de PVA ve %3 grafen katkılı PVA (PVA:Gr) arayüzey tabakalı olmak üzere üç tip Schottky diyotun ileri ve geri beslemde I-V verilerinden elde edilen temel elektriksel özellikleri araştırıldı. Bu amaçla, p-Si alttaş üzerinde PVA ve PVA:Gr arayüzey tabakalı Schottky diyotlar üretildi ve bu üretilen diyotların elektriksel özellikleri ayrıntılı olarak karşılaştırıldı. Her bir Schottky diyotun I-V karakteristiği incelendiğinde, Au/p-Si diyotun doğrultma oranının PVA ara tabakalı Schottky diyotun doğrultma oranından yaklaşık 6 kat ve PVA:Gr ara tabakalı Schottky diyottan ise yaklaşık 15 kat daha az olduğu bulunmuştur. Ek olarak, Au/p-Si diyotun ters doyum akımı (I_0), Au/PVA:Gr/p-Si Schottky diyottan 6.5 kat daha yüksektir. Termiyonik emisyon (TE) teorisi kullanılarak elde edilen R_s , n ve Φ_{B0} değerleri Au/p-Si için sırasıyla 275.33 Ω , 14.46, 0.66 eV, Au/PVA/p-Si için 155.58 Ω , 4.98 ve 0.72 eV ve Au/PVA:Gr/p-Si için 432.43 Ω , 5.61 ve 0.77 eV olarak elde edilmiştir. Norde metodu kullanılarak, BH ve R_s değerleri, Au/p-Si için sırasıyla 0.70 eV ve 362.39 Ω , Au/PVA/p-Si diyot için 0.75 eV ve 175.07 Ω ve Au/PVA:Gr/p-Si diyot için 0.76 eV ve 525.21 Ω bulunmuştur. N_{ss} yoğunluk dağılımı enerjinin bir fonksiyonu olarak ($E_c - E_{ss}$) ve üç diyot için I-V verilerinden elde edilen n ve BH değerleri dikkate alınarak hesaplandı. Au/p-Si diyot için 0.71 eV enerji seviyesinde $1.1 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 0.41 eV enerji seviyesinde $3.7 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, Au/PVA/p-Si diyot için 0.67 eV enerji seviyesinde $9.3 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 0.40 eV enerji seviyesinde $3.7 \times 10^{14} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak,

Au/PVA:Gr/p-Si diyot için 0.73 eV enerji seviyesinde $1.8 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ve 0.42 eV'de seviyesinde $7.0 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ yüzey durum dağılımı bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlar elektronik cihazlarda yalıtım amaçlı kullanımlarda PVA içerisine Grafen katkılanmasıyla yüzey pasifizasyonunun daha da arttığını, direncin artmasına rağmen kaçak akımın azaldığını ve bu durumun cihaz güvenilirliğini arttırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca, Grafen malzemesinin yalıtkanların geleneksel olarak kullanıldığı tüm cihazlarda performansı arttırmak amacı ile katkılanabileceği, Grafenin bir katkı malzemesi olarak elektrik-elektronik sanayii ve endüstrisinde ümit vaat eden bir malzeme olacağı kanaatindeyiz.

KAYNAKLAR

- Altındal Ş, Tunç T, Tecimer H, Yücedağ İ, 2014. Electrical and photovoltaic properties of Au/(Ni, Zn)-doped PVA/n-Si structures in dark and under 250 W illumination level. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 28: 48-53.
- Ashery A, Shaban H, Gad SA, Mansour BA, 2020. Investigation of electrical and capacitance-voltage characteristics of GO/TiO₂/n-Si MOS device. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 114: 105070.
- Baraz N, Yücedağ İ, Azizian-Kalendaragh Y, Altındal Ş, 2017. Determining electrical and dielectric parameters of dependence as function of frequencies in Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 (2): 1315-1321.
- Buzio R, Gerbi A, He QM, Qin Y, Mu WX, Jia ZT, Tao XT, Xu GW, Long SB, 2020. Benchmarking β -Ga₂O₃ Schottky Diodes by Nanoscale Ballistic Electron Emission Microscopy. *Advanced Electronic Materials*, 6 (3): 1901151.
- Card HC, Rhoderick EH, 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4: 1589.
- Cetinkaya HG, Tecimer H, Uslu H, Altındal Ş, 2013. Photovoltaic characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si Schottky barrier diodes (SBDs) at various temperatures. *Current Applied Physics*, 13 (6): 1150-1156.
- Cheung SK, Cheung NW, 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics Letters*, 49: 85-87.
- Cicek O, Tan SO, Tecimer H, Altındal Ş, 2018. Role of Graphene-Doped Organic/Polymer Nanocomposites on the Electronic Properties of Schottky Junction Structures for Photocell Applications. *Journal of Electronic Materials*, 47 (12): 7134-7142.
- Çetinkaya S, Çetinkara HA, Kahraman S, Bayansal F, 2015. Characterization of Al/n-ZnO/p-Si/Al structure with low-cost solution-grown ZnO layer. *Philosophical Magazine Letters*, 93 (9): 550-559.
- Ersöz G, Yücedağ İ, Azizian-Kalendaragh Y, Orak İ, Altındal Ş, 2016. Investigation of electrical characteristics in Al/CdS-PVA/p-Si (MPS) structures using impedance spectroscopy method. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63 (7): 2948-2955.
- Ersöz G, Yücedağ İ, Bayrakdar S, Altındal Ş, Gümüş A, 2017. Investigation of photo-induced effect on electrical properties of Au/PPy/n-Si (MPS) type schottky barrier diodes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28 (9): 6413-6420.
- Garrel DR, Gaudereau P, Zhang L, Reeves I, Brazeau P, 1991. Chronic administration of growth hormone-releasing factor increases wound strength and collagen maturation in granulation tissue. *Journal of Surgical Research*, 51 (4): 297-302.
- Greco G, Di Franco S, Bongiorno C, Grzanka E, Leszczynski M, Giannazzo F, Roccaforte F, 2020. Thermal annealing effect on electrical and structural properties of Tungsten Carbide Schottky contacts on AlGaN/GaN heterostructures. *Semiconductor Science and Technology*, 35 (10): 105004.
- Güneş S, Neugebauer H, Sariçiftçi NS, 2007. Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells. *Chemical Reviews*, 107 (4): 1324-1338.
- Jiang, Y, Sung W, Baliga J, Wang S, Lee B, Huang A, 2018. Electrical Characteristics of 10-kV 4H-SiC MPS Rectifiers with High Schottky Barrier Height. *Journal of Electronic Materials*, 47 (2): 927-931.
- Li H, Jiao W, Yanan O, Jianling Z, Jian Y, Guosheng W, Guangwen X, 2014. Effects of the graphene content and the treatment temperature on the supercapacitive properties of VO_x/graphene nanocomposites. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 449: 148-156.

- Mikhelashvili V, Thangadurai P, Kaplan WD, Eisenstein G, 2010. The correlation of the electrical properties with electron irradiation and constant voltage stress for MIS devices based on high-k double layer (HfTiSiO:N and HfTiO:N) dielectrics. *Microelectronic Engineering*, 87 (9): 1728-1734.
- Mirzanezhad-Asl R, Phirouznia A, Altındal Ş, Badali Y, Azizian-Kalandaragh Y, 2019. Fabrication, structural and electrical characterization of Au/(CuSe-polyvinyl alcohol)/n-Si (MPS) Schottky barrier structures. *Physica B-Condensed Matter*, 561: 1-8.
- Norde H, 1979. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50: 5052.
- Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang D, Zhang Y, Dubonos SV, Grigorieva IV, Firsov AA, 2004. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 306 (5696): 666-669.
- Özdemir AF, Gök A, Türüt A, 2007. The electrical measurements in poly(2-chloroaniline) based thin film sandwich devices. *Thin Solid Films*, 515 (18): 7253- 7258.
- Padma R, Balaram N, Reddy IN, Reddy VR, 2016. Influence of nanostructure Fe-doped ZnO interlayer on the electrical properties of Au/n-type InP Schottky structure. *Materials Chemistry and Physics*, 177: 92-98.
- Peppas NP, Merril EW, 1977. Development of semicrystalline poly(vinyl alcohol) hydrogels for biomedical applications. *Journal of Biomedical Materials Research*, 11 (3): 423-434.
- Raj M, Joseph C, Subramanian M, Perumalsamy V, Elayappan V, 2020. Superior photoresponse MIS Schottky barrier diodes with nanoporous:Sn-WO₃ films for ultraviolet photodetector application. *New Journal of Chemistry*, 44 (19): 7708-7718.
- Ramadan R, Martin-Palma RJ, 2020. Electrical Characterization of MIS Schottky Barrier Diodes Based on Nanostructured Porous Silicon and Silver Nanoparticles with Applications in Solar Cells. *Energies*, 13 (9): 2165.
- Reddy CVS, Han X, Zhu QY, Mai MLQ, Chen W, 2006. Dielectric spectroscopy studies on (PVP+PVA) polyblend film. *Microelectronic Engineering*, 83 (2): 281-285.
- Reddy VR, Manjunath V, Janardhanam V, Kil YH, Choi CJ, 2014. Electrical Properties and Current Transport Mechanisms of the Au/n-GaN Schottky Structure with Solution- Processed High-k BaTiO₃ Interlayer. *Journal of Electronic Materials*, 43: 3499-3507.
- Rhoderick EH, Williams RH, 1988. *Metal Semiconductor Contacts*. Clarendon Press, Oxford-İngiltere.
- Sharma BL, 1984. *Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their application*. Plenum Press, New York-Amerika Birleşik Devletleri.
- Singh AK, Dwivedi ADD, Chakrabarti P, Prakash R, 2009. Electronic and optical properties of electrochemically polymerized polycarbazole/aluminum Schottky diodes. *Journal of Applied Physics*, 105 (11): 114506.
- Sze SM, 1981. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, New York-Amerika Birleşik Devletleri.
- Taşcıoğlu I, Farooq WA, 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.
- Tung RT, 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45: 13509.
- Uslu H, Altındal Ş, Tunç T, Uslu İ, Mammadov TS, 2011. The illumination intensity and applied bias voltage on dielectric properties of au/polyvinyl alcohol (Co, Zn-doped)/n-Si Schottky barrier diodes. *Journal of Applied Polymer Science*, 120, 322-328.
- Wöhrle D, Meissner D, 1991. *Organic Solar Cells*. *Advanced Materials*, 3 (3): 129-138.
- Yücedağ İ, 2009. On the anomalous peak at low and moderate frequency C-V curves of Al/SiO₂/p-Si structure at the forward bias region. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 3 (6): 612-615.
- Farag AAM, Yahia IS, 2011. Rectification and barrier height inhomogeneous in Rhodamine B based organic Schottky diode. *Synthetic Metals*, 161 (1-2): 32-39.