

**Al/p-Si SCHOTTKY DİYOT YAPISININ ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ
VE
SERİ DİRENÇ ETKİSİ**

Ahmet KARAPINAR

Erciyes Üniversitesi Kayseri Meslek Yüksek Okulu, 38039- KAYSERİ

Necati YALÇIN

Erciyes Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, 38039- KAYSERİ

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, yüksek özdirençli ($\rho=1 \text{ k}\Omega\text{-cm}$), [111] doğrultusunda kesilmiş p-tipi Si kristalinden yapılan Al/p-Si (p^+pM) Schottky diyot yapısının akım iletim mekanizmalarının incelenmesi ve bu yapıya ait parametrelerin akım - gerilim ve kapasite - gerilim karakteristiklerinden tayin edilmesi ve seri direnç etkisini kapsamaktadır. I(V) ve C(V) karakteristiklerinin elde edilmesinde klasik DC yöntemleri kullanıldı. Al/p-Si Schottky diyot yapısının C(V) karakteristiklerinden kristal kalınlığı (do), difüzyon potansiyeli (VD), çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu (p), hol ve elektron engel yükseklikleri ($e\phi_p, e\phi_n$) tayin edildi. I(V) karakteristikleri yardımı ile yapıların diyot idealite çarpanları (n), diyot seri dirençleri (R_s) ve potansiyel engellerine ait ($e\phi_p, e\phi_n$) değerleri bulundu.

Sonuç olarak, C(V) ve I(V) değerlerinden elde edilen neticelerin birbirleriyle teorinin öngördükleriyle ve literatür değerleriyle uyum içinde olduğu görüldü.

SUMMARY

The aim of this work is to search the current transport mechanisms of the Schottky diodes Al/p-Si (p^+ pM) and determine the parameters of the diodes of p-type Si having a high resistivity ($r=1k\Omega\text{-cm}$) and cut [111] direction. The parameters of the diodes are calculated from C(V) and I(V) characteristics. Especially Cheung's method has been applied to work out the parameters of the structures.

Classical DC methods are used in the measurements. The crystal thickness (d_0), diffusion potential (V_D), majority carrier density (p), barrier heights of hole and electron ($e\phi_p, e\phi_n$) obtained by using C(V) characteristics of Al/p-Si Schottky diodes structures. The diode ideality factor (n), barrier heights of the structures ($e\phi_p, e\phi_n$) are found.

As a result, the measured values from I(V) and C(V) characteristics of the p^+ pM structures are in good agreement with each other and the theoretical predictions and the values in the literature.

GİRİŞ:

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaktarın fiziksel özellikleri ve akım iletim mekanizmaları çok geniş bir şekilde Sze [1] ve Rhoderich [2] tarafından verilmiştir. Genel olarak Schottky kontak veya diğer bir deyimle Schottky diyot yapıları olarak adlandırılan bu sistemlerde akım iletimini termiyonik emisyon yolu ile olur.

Akım yoğunluğu bağıntısı;

$$J=J_0 \{ \exp[(eV_D/nkT)] - 1 \} \quad (1)$$

$V_D=V-IR$ ile verilir. Burada V_D engel gerilimi, J_0 doyuma akım yoğunluğu ifadesidir :

$$J_0=R^*_{(n,p)} T^2 \exp[-e\phi_{(n,p)}/kT] \quad (2)$$

olur. Yukardaki (1) ve (2) eşitliklerinde R_s diyot seri direnci, n idealite çarpanı, k Boltzmann sabiti, $R^*_{(n,p)}$ Richardson sabiti, T mutlak sıcaklık, $e\phi_{(n,p)}$ taşıyıcıların potansiyel engel yüksekliğidir. İdeal diyot halinde $n=1$ ' dir. İdeal diyotlarda diyot seri direncini tayin etmek maksadı ile ilk defa Norde [3] tarafından bir metot önerildi. İdeal olmayan diyotlarda ($n > 1$) Sato ve Yasumura [4], Norde tarafından ileri sürülen yöntemi değiştirerek doğru beslem karakteristiklerinden yapıya ait idealite çarpanı (n), seri direnç (R_s) ve potansiyel engeli ($e\phi_{(n,p)}$) gibi parametrelerin tayin edilebileceği konusunda bir yöntem geliştirdiler. Bu yöntemde bir diyot yapısı için iki farklı sıcaklıkta ölçüm gerekmektedir. Yukarda sözü edilen parametreler için Cheung ve Cheung [5] tarafından ileri sürülen yöntemle tek bir sıcaklıktaki $I(V)$ karakteristiklerinden, yapısal parametrelerin ölçülmesini mümkün hale getirmektedir.

Bu çalışmada Al/p-Si Schottky diyot yapısının yapısal parametrelerinin doğru beslem akım-gerilim ve ters beslem akım gerilim, Sığa gerilim karakteristiklerinden hareketle tayinleri yapıldı. Özellikle doğru beslem karakteristiklerine ait verilerin kullanılması ile diyot parametrelerinin tayininde ileri sürülen teoremin sonuçları ile ters beslemden elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapıldı. Bu neticelerin sıcaklık parametresine bağlı olarak yapılan ölçümlerle uyum içinde olduğuda gösterildi.

TEORİ

İdeal Schottky diyot yapısı için akım yoğunluğu -gerilim bağıntısı

$$J=J_0 [\exp (eV_D/kT) - 1] \quad (3)$$

eşitliği ile verilir [2]. V_D diyotda engel gerilimi, J_0 termiyonik emisyon akım yoğunluğudur ve daha önce verilen (2) bağıntısı ile $e\phi_{(n,p)}$ nin elde edilmesinde kullanılır.

$$e\phi_{(n,p)} = kT \ln \{ (R^*_{(n,p)} T^2) / J_0 \} \quad (4)$$

Olur. $R^*_{(n,p)}$ elektron veya holler için Richardson sabitidir. (1) denklemini bir dizi işleme

$$V = RAJ + n\phi_{(n,p)} + (n/\beta) \ln (J / R^*_{(n,p)} T^2) \quad (5)$$

şekline konabilir. Burada A , diyot alanı ve $\beta = e/kT$ dir. Son bağıntı yeniden düzenlenerek

$$[dV/d(\ln J)] = RAJ + n/\beta \quad (6)$$

biçiminde yazılabilir. $[dV/d(\ln J)]$ - J doğrusunun eğiminden R seri direnci ,doğrusunun extrapolasyonundan n/β değeri tesbit edilip n tayin edilir. Şimdi

$$H(J) = V - (n/\beta) \ln (J / R^*_{(n,p)} T^2) \quad (7)$$

bağıntısı ve (5) denklemini bir araya getirerek $H(J)$ için

$$H(J) = RAJ + n\phi_{(n,p)} \quad (8)$$

elde edilir. $H(J)$ - J doğrusunun eğiminden R seri direnci ve extrapolasyonundan $e\phi_{(n,p)}$ hesaplanır. Schottky diyodun ters beslem akım yoğunluğu-gerilim karakteristiği

$$J = R^*_{(n,p)} T^2 \exp [e\phi_{(n,p)} / kT] \exp [\alpha (V + V_D)^{1/4}] \quad (9)$$

olur. Burada

$$J=J_0 \exp [\alpha (V+V_D)^{1/4}], \quad \alpha = [e^3 N_A / 8 (\epsilon \epsilon_0)^3 \pi^2 (kT)]^{1/4}$$

olmaktadır. (9) eşitliği yardımı ile $\ln J - (V+V_D)^{1/4}$ çiziminden J_0 bulunur. J_0 ifadesinden $e\phi_{(n,p)}$ tayin edilebilir. J_0 ' ın sıcaklık bağılılığı $\ln(J/T^2) - 1/T$ çiziminden elde edilen doğru da $e\phi_{(n,p)}$ yi bulmayı sağlar. Bu değer diyot geometrisine bağlı olmaksızın sonucu verdiğiinden kontrol göre V_i gören bir yöntemdir. Schottky diyodun ters beslem kapasite-gerilim verilerinden elde edilen

$$C^{-2} = 2 (V_D + V) / (e \epsilon \epsilon_0 N(d,a)); \quad N_d = n, \quad N_a = p \quad (10)$$

Bağlantısı $C^{-2} - V$ doğrusunu çizmeyi mümkün kılar. Bu doğrunun eği-minden $N(d,a)$ ve extrapolasyonundan V_D bulunur. V_D ' nin bulunması ile

$$e\phi_{(n,p)} = eV_D + E_f \quad (11)$$

bağıntısından $e\phi_{(n,p)}$ yi tayin etme imkanı doğar. Şimdi (4),(6),(8),(10) ve (11) bağıntıları Schottky diyot yapısına ait parametrelerin tayinine imkan verir.

Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada Wacker Chemitronik (Almanya) firmasından temin edilen [III] doğrultulu p- tipi Si kristalleri kullanıldı. Dört uçlu (Four Probe) ve Hall olayı ölçümleriyle kristalin öz direncinin $\rho \approx 1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ olduğu bulundu [7, 8]. Vakum-buharlaştırma yöntemi ile (10^{-6} Torr) P⁺P M Schottky diyot yapıları teşkil edildi. Klasik DC yöntemleri ile I(V) ve C(V) ölçümleri yapıldı .

Al/p-Si (p^+pM) yapısının 500 kHz. küçük sinyal etkisinde gerçekleştirilen sığa gerilim ölçmeleri (300K) yapıldı. Şekil-1' de ise $C(V)$ karakteristiği görülmektedir. Si 'un dielektrik sabiti $\epsilon=11.8$ [1], diyot alanı $A=3.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ ve $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12} \text{ F/M}$ değerleri kullanılmak suretiyle doyma kapasitesi $C_0=19 \text{ p F}$ değerinden d_0 deplasyon tabakası için $d_0 = A (\epsilon\epsilon_0)/C_0$ bağıntısı aracılığı ile $d_0 = 17 \text{ } \mu\text{m}$ değeri bulundu. Şekil-2' de C^{-2} -V eğrisi görülmektedir. Bu doğrunun eğiminden $N_A=1.25 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ değeri elde edildi. Bir çok numune için yapılan hesaplamalar sonunda

$$V_D=(0.24 \pm 0.03) \text{ V} \text{ ve } N_A=(1,5 \pm 0.2).10^{19} \text{ m}^{-3} \quad (12)$$

sonuçları bulundu. $\rho \approx 1\text{k}\Omega\text{-cm}$ öz direncine karşı gelen ρ değeri $\rho=(1/e\mu_p p)$ den $\rho=1.39 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ olarak bulunur.

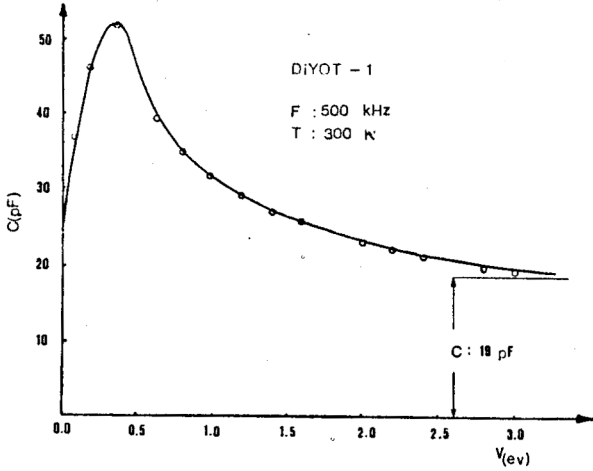
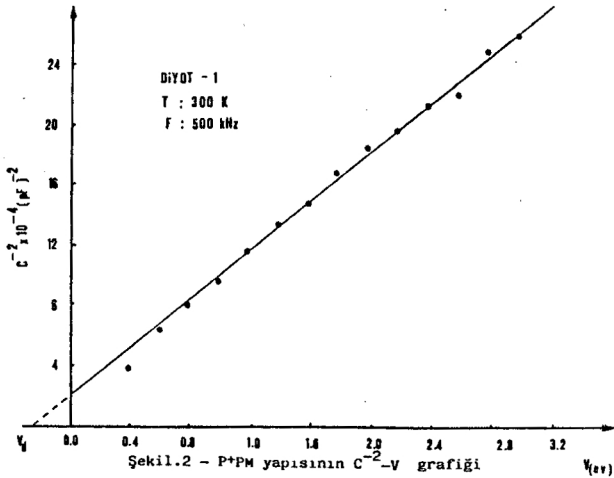
Al/p-Si, (P^+PM) yapısının çeşitli sıcaklıklarda (273K, 300K, 318, 338K) akım-gerilim ölçmeleri yapıldı. Örnek bir $I(V)$ karakteristiği Şekil-3' de verilmektedir. $T=300\text{K}$ ' de örnek bir akım gerilim karakteristiği Şekil-4' te verilmiştir. Şekil-4'te ters beslem $I(V)$ değerlerinden çizilen $\ln I -(V+V_D)^{1/4}$ grafiğinin doğrusal kısmının extrapolasyonu $I=3.2 \times 10^{-5} \text{ A}$ 'dır. $R^*p=93 \text{ A/cmK}^2$ [1], $T=300 \text{ K}$ ve

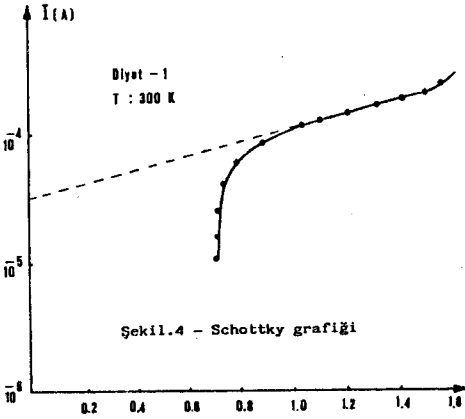
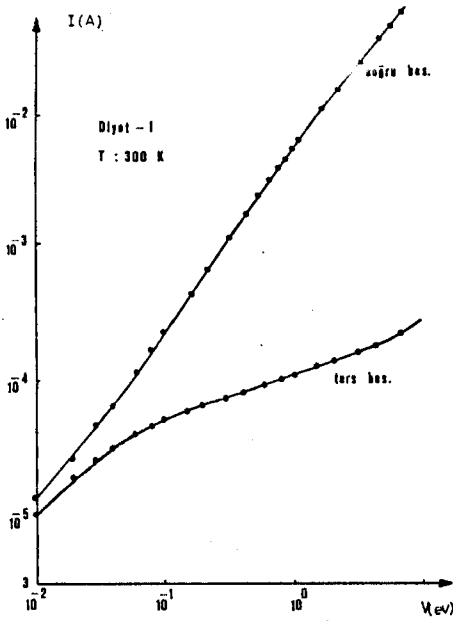
$A=3.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ değerleri yerine konmak suretiyle, $e\phi_p = kT \ln (A R^*p T^2/I_0)$ eşitliğinden $e\phi_p=0.59 \text{ eV}$. sonucu bulunur. Çok sayıda diyot yapıları kullanılarak hesaplanan $e\phi_p$ değerleri

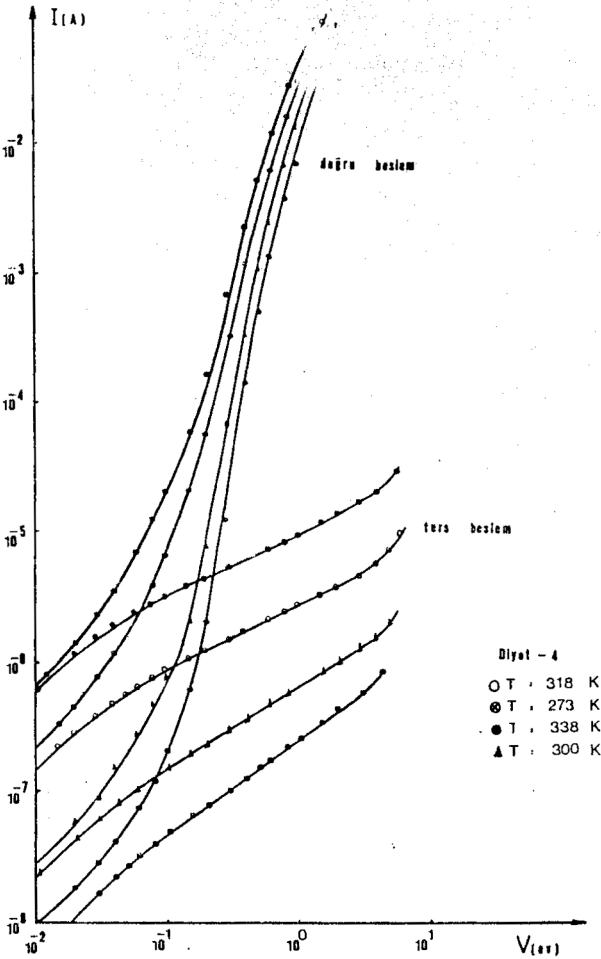
$$e\phi_p=(0.60 \pm 0.02) \text{ eV}. \quad (13)$$

olarak elde edildi. Şekil-5' te verilen grafikteki ters beslem akım - gerilim değerlerinden elde edilen $\ln I -(V+V_D)^{1/4}$ çizimleri Şekil-6' da görülmektedir.

$I_0 = A R^*p T^2 \exp(-e\phi_p/kT)$ ifadesinden $\ln(I_0/T^2) - (1/T)$ grafiğinin

Şekil.1 - P⁺PM yapısının C-V karakteristiğiŞekil.2 - P⁺PM yapısının C⁻²-V grafiği





Şekil.5 - P⁺PM Schottky diyot yapısının farklı sıcaklıklarda çizilen akım-gerilim karakteristikleri

eğiminden $e\phi_p$ bulunabilir. Bu çizim Şekil-7' de görülmektedir. Gerekli hesaplamalar yapıldığında $e\phi_p$ için

$$e\phi_p = 0.62 \text{ eV.} \quad (14)$$

değeri elde edilir.

Al/p-Si(p^+pM) Schotky diyot yapısının çeşitli sıcaklıklarda doğru beslem haline ait akım gerilim karakteristikleri Şekil-5' te verilmektedir. Uygulama geriliminin $(3kT/e) > V$ olması halinde Ohm yasasına uyan akımlar elde edilmektedir. [10, 11]. Özellikle bu durum oda sıcaklığındaki karakteristiklerde görülmektedir. ($T=300K$). $V > V_D$ olması halinde ikili enjeksiyon olur. Bu durumda omik kontakdan çoğunluk taşıyıcıları (holler), doğrultucu kontakta termyonik emisyon yolu ile azımlık taşıyıcıları (elektronlar) girer. V ' nin $(3kT/e) < V < V_D$ aralığında olması halinde akım tamamen doğrultucu kontakta emisyon yolu ile olur. Doğru beslem halinde yapıya ait genel akım gerilimin karakteristiği

$$[dV / d \ln(J)] = RAJ + n/\beta \quad (6)$$

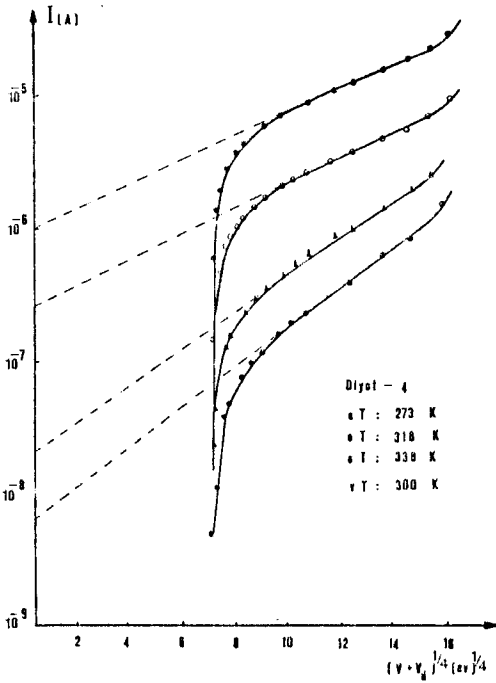
$$H(J) = RAJ + n \phi_p \quad (8)$$

Bu bağıntılardan elde edilen verilerle çizilen grafikler Şekil-8'de verildi. Bu grafiklerden $n = 1.082$, $e\phi_p = 0.61 \text{ eV.}$ ve $R_s = 130 \Omega$, $R_p = 100 \Omega$ değerleri bulundu. Çok sayıda numune kullanılarak elde edilen değerler

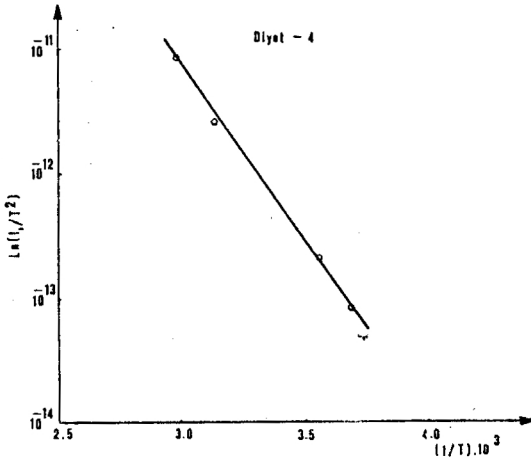
$$e\phi_p = (0.61 \pm 0.03) \text{ eV.}, \quad n = 1.10 \pm 0.03 \quad (15)$$

olarak elde edildi.

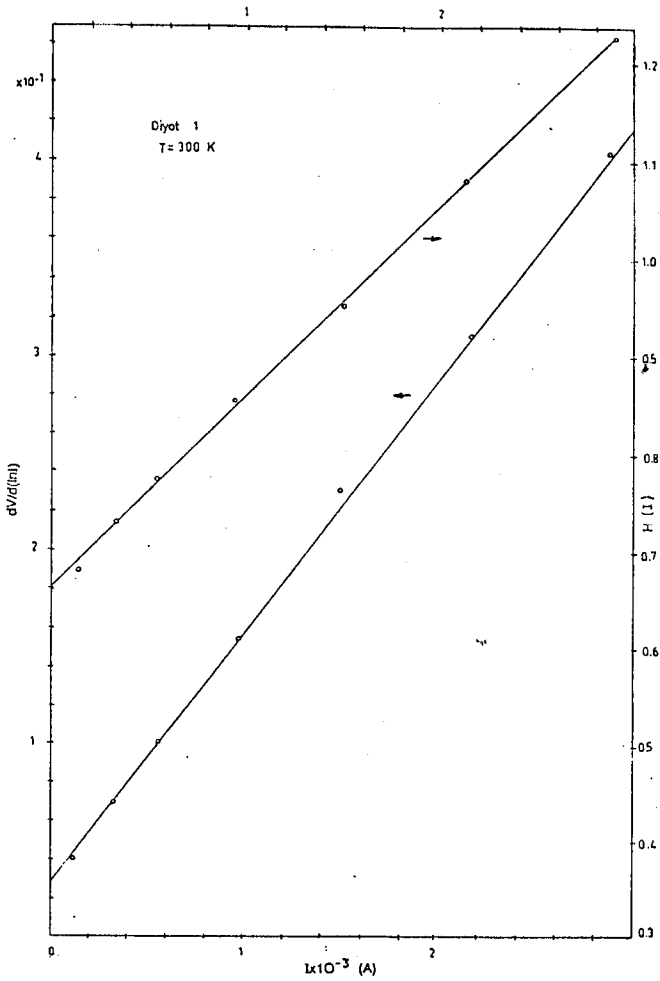
Özdieleci $\rho = 1 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ [111] doğrultusunda kesilmiş p- tipi Si kristalinin



Şekil.6 - Değişik sıcaklıklarda Schottky grafikleri

Şekil.7 - $\ln(I_0/T^2)-(1/T)$ grafiği

Al/p-Si Schottky Diyot Yapısının.....



Şekil 8. dV/dI ve I grafikleri

taşıyıcı yoğunluğu $p = (1/e\mu_e\rho)$ bağıntısında $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ [1],
 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ koniak sureti ile $p = 1.39 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ olarak hesaplandı.
 $T = 300 \text{ K}$ 'de Si 'un valans bandındaki kuantum halleri sayısı $N_A = 1.04 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
değeri kullanılarak [1] fermi seviyesi için $E_f = k T \ln(N_A/p)$ bağıntısından $E_f = 0,35$
eV. (valans banddan) değeri bulundu. Deneysel $C(V)$ ve $I(V)$ ölçmelerinden V_D ,
elektron alıcı katkı atomları yoğunluğu $N_A(=p)$, hol potansiyel engeli $e\phi_p$, Schottky
diyodun seri direnci R_s , diyod idealite çarpanı n değerleri hesaplandı. Bunların elde
edilişindeki yöntemler ve değerler topluca Tablo. 1' de görülmektedir.

Tablo.1

Schottky diyot yapısının C-V ve I-V karakteristiklerinden elde edilen sonuçlar ($T = 300 \text{ K}$)

PARAMETRELER						
Yöntem	eV_D (eV)	p (cm^{-3})	$e\phi_p$ (eV)	n	R_s (Ω)	d (μm)
C-V	-	-	-	-	-	17
C^{-2} -V	0.24 ± 0.02	$(1.5 \pm 0.2) 10^{19}$	0.59 ± 0.02	-	-	-
I-V	-	-	-	-	-	-
$\ln I - (V + V_D)^{1/4}$	-	-	0.60 ± 0.02	-	-	-
$\ln \left(\frac{I_0}{T^2} \right) - \frac{1}{T}$	-	-	0.62	-	-	-
$\frac{dV}{d(\ln I)} - I$	-	-	0.61 ± 0.03	1.10 ± 0.03	130	-
$H(I) - I$	-	-	-	-	100	-

TARTIŞMA

Doğrultucu kontakın $e\phi_p$ hol potansiyel engeli

$e\phi_p = E_f + eV_D = (0.35+0.24) \text{ eV} = 0.59 \text{ eV}$. Si'nin yasak enerji aralığı $E_g = 1.12 \text{ eV}$ olduğundan elektronlar için $e\phi_n = E_g - e\phi_p = 0.53 \text{ eV}$ olur. In $I-(V+V_D)^{1/4}$ grafiğinden $e\phi_p = 0.60 \text{ eV}$ olarak bulundu. Yine $e\phi_n$ için $e\phi_n = 0.52 \text{ eV}$ tur. Doğru beslem akım-gerilim karakteristiklerinden $(3kT/e < V < V_D)$ elde edilen sonuçlar $n=1.10$, $R_s = 130 \Omega$ ve

$R_s = 100 \Omega$ dur. Ayrıca $e\phi_p = 0.61 \text{ eV}$ olur. Buradan da elektronlar için $e\phi_n = 0.51 \text{ eV}$ değeri bulunur. Görüldüğü gibi değişik yöntemlerle bulunan değerler birbirleriyle uyum içindedir. Ayrıca bu sonuçlar diyot geometrisinden (kalınlık ve alan) bağımsız bir yöntem olan $\ln(I_s/T^2) / (1/T)$ grafiğinden elde edilen $e\phi_p = 0.60 \text{ eV}$. ve $e\phi_n = 0.52 \text{ eV}$. değerleri ile de uyum içindedir. Bu bir denetim değeri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, daha önce elde edilen sonuçlar ile uyum içindedir. Al/p Si/Al yapısının Sze[1] tarafından verilen $e\phi_p$ değeri 0.58 eV ' tur. Tseng ve Wu [12] tarafından verilen değeri ise 0.542 eV tur. Ayrıca diyot idealite çarpanının $n=1.10$ gibi bir değeri olması diyotların ideal yapıya ($n=1$) yaklaştığını göstermektedir. Schottky diyot yapısına ait hesaplanan değerlerin birbirleri ve literatür değerleri ile [1,12] tutarlılığı $C(V)$ ölçmeleri ve sıcaklığa bağlı ölçmelerle denetlenerek uygunluk içinde olduğu gösterildi.

KAYNAKLAR

- 1 Sze,S.M., "Physics of Semiconductor Devices", John - Wiley and Sons, Inc., New York, 3, 104, (1981)
- 2 Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., "Metal - Semiconductor Contacts", Clarendon Press, Oxford, 4, 141, (1988)
- 3 Norde, H., "A Modified Forward I - V Plot For Schottky Diodes With High Series Resistance", J. Appl. Phys. 7, 50, 5052, (1979)
- 4 Sato, K. and Yasumura, Y., "Study of Forward I - V Plot for Schottky Diodes With Series Resistance", J. Appl. Phys., 9, 58, 3655, (1985)
- 5 Cheung, S.K. and Cheung, N.W., "Extraction of Schottky Diode Parameters From I - V Characteristics", Appl. Phys. Lett., 2, 49, 85, (1986)
- 6 Yalçın, N., Türüt, A. and Tüzemen, S., "Ag/p - Si Schottky Diyot Yapısının Bazı Parametrelerinin Tayini" E.Ü.Fen Bil.Enst. Dergisi, 5, 1-2, 790, Kayseri, (1989)
- 7 Türüt, A., "Nötronlarla Işınlanmış P - Silisyumun Bazı Elektronik Özellikleri", A.Ü.Fen. Bil. Enst. Doktora Tezi, Erzurum, 70, (1987)
- 8 Yıldırım, M., "Nötronlarla Işınlamanın ve Su Vermenin P - Si Özdirencine ve Taşıyıcı Yoğunluğu Üzerine Etkileri", A.Ü.Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, (1987)
- 9 Efeoğlu, H., "DC Metoduyla Holl ve Özdirenç Ölçme Sistemi ve N-Tipi Si için Özdirenç ve Mobilite Tayini", A.Ü.Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi Erzurum, 1987.
- 10 Büget, U. and Wright, G.T., "Space - Charge - Limited Current in Silicon", Solid - State Elect., 10, 199, (1967)
- 11 Yalçın, N., "P⁺nM ve P⁺PM Yapılarında Elektronik İletkenlik ve Lityumun P+PM Yapısındaki Etkileri", A.Ü.Fen Bil. Ens. Doktora Tezi, Ankara, (1976)
- 12 Tseng, H.H., "A Simple Interfacial Layer Model For The Nonideal I - V and C - V Characteristics of the Schottky Barrier Diode", Solid State Elect., 30, 4, 383, 1987