قياس الوسطاء الكهربائية لثنائيات شوتكي

خالد مصري

قسم الفيزياء ـ المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا ـ دمشق

تاريخ الإيداع 2004/06/20

قبل للنشر في 2004/12/26

الملخص

قمنا ببناء منظومات قياس المميزات الكهربائية المباشرة I(V) والسعوية C(V) لثنائيات شوتكي، وبوضع المنهجيات اللازمة لتحديد الوسطاء الكهربائية منها وهي تركيز الشوائب في ركيزة السيليكون وتيار التسريب وارتفاع حاجز شوتكي. من ثم، قمنا بتطبيق ذلك في دراسة ثنائي شوتكي تجاري يستخدم بوصفه كاشفاً للجسيمات ألفا، الذي يعرف بالكاشف ذي الحاجز السطحي، وكانت النتائج التي حصلنا عليها متوافقة مع القيم المتوقعة.

الكلمات المفتاحية: ثنائيات شوتكي، حاجز شوتكي، تيار التسريب، تيار الإشباع العكسي، المميزات الكهربائية، المميزات السعوية، الكواشف ذات الحاجز السطحي.

Electrical Parameters

Khaled Masri

Physics department- Higher Institute of Applied Sciences and Technology- Damascuse

Received 20/06/2004
Accepted 26/12/2004

ABSTRACT

We present a PC controlled apparatus, we have built up to measure automatically forward electrical characteristics and capacity versus voltage characteristics, of schottky diodes. Methods used to extract electrical parameters of these diodes (leakage current, Schottky barrier height and substrat doping concentration) are described. These methods were applied to a commercial Schottky diode, used as Alpha particles detector (surface barrier detector), and the obtained results were compatible with the expected ones.

Key words: Schottky diodes, schottky barrier, leakage current-reverse saturation current, electrical characteristics, capacity characteristics, surface barrier detector.

المقـدمـة

اكتسبت التماسات معدن-نصف ناقل اهتماماً كبيراً في الـسنوات الأخيـرة، بـسبب التطبيقات المتزايدة في مجال التقانات المتقدمة[1]. تُستخدم ثنائيات شوتكي في مجـالات مختلفة، مثل الحساسات، والخلايا الشمسية، والكواشف الضوئية، وكواشف الجسيمات ألفا (الكواشف ذات الحاجز السطحي Surface barrier detectors) [2].

ثنائيات شوتكي عبارة عن نصف ناقل (غالباً من السيليكون من النوعn)، تُوضع عليه طبقة رقيقة من المعدن[3]. يبين الشكل (1) المخطط الطاقي لثنائي شوتكي، فـي حالـة نصف ناقل من النوع n، وقد افترضنا أن تابع عمل نصف الناقل Φ_s أكبر من تابع عمـل المعدن Φ_m. يعطى ارتفاع حاجز شـوتكي Φ_{Bn0} (Schottky barrier height)، حـسب نظرية شوتكي [4,3] بالعلاقة:

$$\Phi_{Bn0} = \Phi_m - \chi \qquad (1)$$

حيث χ الألفة الإلكترونية (electronic affinity) لنصف الناقل.

في الواقع، توجد العديد من الآثار effects التي تغير من قيمة ارتفاع حـاجز شـوتكي (النظرية السابقة). الأثر الأول هو أثر شوتكي أو القوة الخيال المحرضـة (image force)، وهو يتعلق بالحقل الكهربائي في نصف الناقل؛ وبالتحديد يتغير ارتفاع هذا الحـاجز بتغيـر جهود الانحياز (bias voltage) المطبقة على الثنائي. من جهةٍ أخرى، فإن ارتفاع الحـاجز تابع لكثافة الحالات عند السطح الفاصل بين نـصف الناقـل والمعـدن (interface states density) [6]. من ثم، تختلف قيمة ارتفاع الحاجز عن القيمة النظرية المثالية. ونظراً لأنـه لا يمكن التنبؤ بكثافة الحالات السطحية هذه، يجب تعيين ارتفاع الحاجز تجريبياً.

يعود نقل التيار في الثنائي شوتكي بشكلٍ أساسي إلى حوامل الشحنة الأكثرية. هنـاك عدة آليات لنقل التيار، ولعل الآلية الأساسية في نصف ناقل من النوعn متوسط (الشوب) doping، هو انتقال الإلكترونات فوق حاجز الكمون، والذي يمكن وصفه بنظرية الإصدار الترموأيوني thermoionic emission theory. تعطى عبارة كثافة التيـار الترموأيـوني [4,3]، عند تطبيق جهد V بين طرفيه بالعلاقة:

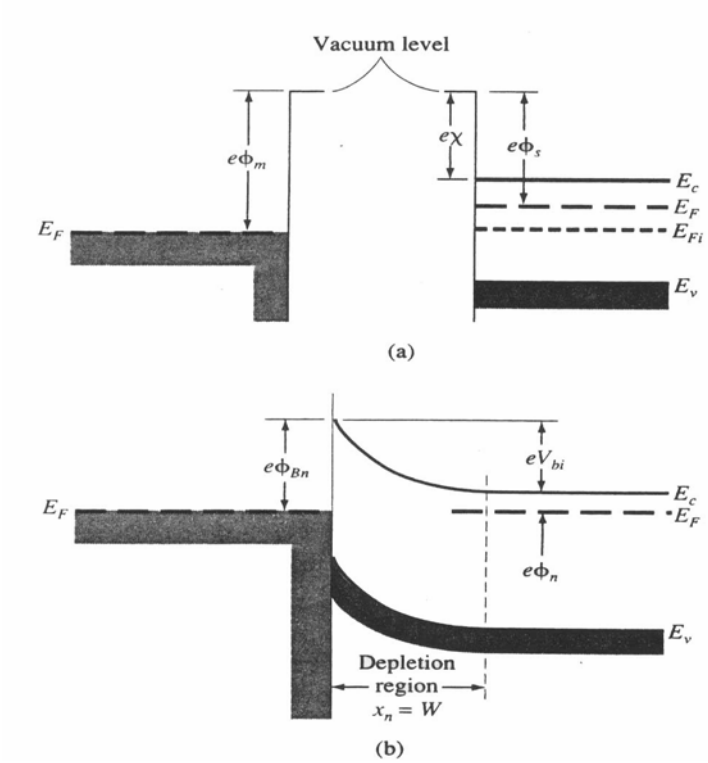
$$J = J_{sT}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \qquad (2)$$

حيث يرمز J_{sT} لكثافة تيار الإشباع العكسي (reverse saturation current)، ويعطى بالعلاقة:

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bn0}}{kT}\right)\exp\left(\frac{q\Delta\Phi}{kT}\right) = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \qquad (3)$$

حيث A^* ثابت ريتشاردسون الفعال (effective Richardson constant) وT درجـة الحرارة المطلقة وq شحنة الإلكترون و$\Delta\Phi$ انخفاض ارتفاع الحاجز نتيجة القوة الخيـال، وΦ_{Bn} ارتفاع الحاجز الفعال (الشكل b 1).

نلاحظ من العلاقة (3)، أن تيار الإشباع العكسي يتبع ارتفاع حاجز شـوتكي تبعيـةً أسية، مما يبين التأثير الكبير لهذا الأخير في شدة التيار، ومن ثم ضرورة قياسه تجريبياً.



الشكل (1) a - المخطط الطاقي، قبل التماس، لنصف ناقل من النوع n ومعدن، إذ افترضنا أن تابع عمل نصف الناقل Φ_s أكبر من تابع عمل المعدن Φ_m.
b - المخطط الطاقي لثنائي شوتكي الناتج.

طرائق حساب ارتفاع حاجز شوتكي

يمكن تحديد ارتفاع حاجز الكمون بين المعدن ونصف الناقل Φ_{Bn}، بقياس المميـزات الكهربائية المباشرة (forward electrical characteristics) I(V) للثنائي، وبقياس السعة

في حالة الانحياز العكسي C(V) [5]. سنعرض فيما يأتي، الطرائق التي استخدمناها في هذا العمل، لتحديد هذا الوسيط.

المميزات I(V) المباشرة

تُكتب عبارة التيار (2) في حالة جهود انحياز كبيرة نسبياً (V > 3kT/q)، وفق الشكل:

$$J = J_{sT} \exp\frac{qV}{kT}$$

إذا رسمنا Ln(J) بدلالة qV/kT، يجب أن نحصل، في الحالة المثالية، على مستقيم ميله 1، وتقاطعه مع محور العينات Ln(J_{sT}). في الحقيقة، يكون الميل المقاس دائماً أصغر من 1. نأخذ هذا الابتعاد عن المثالية بالحسبان، بإدخال وسيط تجريبي، يسمى معامل المثالية (ideality factor) [4,3] بحيث تصبح عبارة التيار:

$$J = J_{sT} \exp\frac{qV}{nkT}$$

حيث يكون المعامل n دائماً أكبر من الواحد، ولكنه يقترب من 1 كلما كانت الوصلة جيدة؛ فهو إذاً معامل جودة للوصلة. إذا علمنا J_{sT} في درجة حرارة معينة، يمكننا منه استنتاج Φ_{Bn} باستخدام العلاقة (3):

$$\Phi_{Bn} = \frac{kT}{q} Ln \frac{A^* T^2}{J_{sT}} \qquad \textbf{(4)}$$

حيث تساوي قيمة ثابت ريتشاردسون الفعال للإلكترونات في السيليكون:

114 A $cm^{-2}K^{-2}$ وللثقوب 32 A $cm^{-2}K^{-2}$.

إذا أردنا أن نتجاوز الارتياب في قيمة ثابت ريتشاردسون الفعال ، نقيس J_{sT} في درجات حرارة مختلفة، ثم نرسم Ln(J_{sT} /T^2) بدلالة 1/T، فنحصل على مستقيم ميله $-q\Phi_{Bn}/k$.

هذه الطريقة في إيجاد Φ_{Bn} تقريبية، لأننا لا نأخذ بالحسبان تغيرات Φ_{Bn} مع الجهد المباشر (الناتجة عن نقصان انخفاض الحاجز بزيادة الجهد المباشر) ولا تغيرات Φ_{Bn} مع درجة الحرارة.

المميزات C(V) في حالة الانحياز العكسي

تعطى سعة وصلة ثنائي شوتكي [3] بالعلاقة الآتية:

$$c = \left[\frac{q\varepsilon_s N_d S}{2\left(V_{bi} + V_R + kT/q\right)} \right]^{1/2} \qquad \textbf{(5)}$$

بأخذ مربع مقلوب السعة، نحصل على:

$$\frac{1}{c^2} = \left[\frac{2\left(V_{bi} + V_R + kT/q\right)}{q\varepsilon_s N_d S^2} \right]$$

حيث V_{bi} ارتفاع الحاجز من جهة نصف الناقل، و V_R جهد الانحياز العكسي المطبق على الثنائي، وS مساحة مقطعه العرضي، وε_s السماحية الكهربائية لنصف الناقل، وN_d تركيز الشوائب المانحة (donor impurities concentration) فيه.

تقوم طريقة العمل على قياس السعة، من أجل قيم مختلفة لجهد الانحياز العكسي، ومن ثم رسم $1/C^2$ بدلالة V_R. بذلك نحصل على مستقيم يتقاطع مع محور الجهد عند النقطـة $-V_{bi}$ وميله يساوي: $\frac{2}{S^2 q\varepsilon_s N_d}$ من الميل، يمكن حساب تركيز الشوائب فـي نـصف الناقل؛ ومن ثم، يمكننا حساب:

$$\Phi_n = \frac{E_C - E_{fs}}{q} = \frac{kT}{q} Ln \frac{N_C}{N_d} \qquad \textbf{(6)}$$

حيث E_{fs} طاقة مستوى فرمي (Fermi energy level) وE_c طاقة أسفل قطاع الناقليـة (conduction band)، وN_c كثافة الحالات الفعالة في قطاع الناقلية في نـصف الناقـل. وأخيراً، نستنتج ارتفاع حاجز الكمون:

$$\Phi_{Bn} = V_{bi} + \Phi_n + kT/q \qquad \textbf{(7)}$$

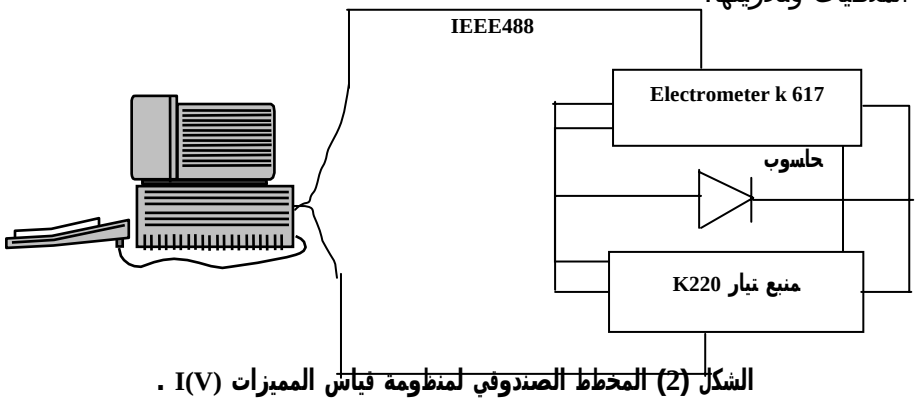
في هذه الطريقة، نحصل علـى الحـاجز الموافـق لحالـة القطاعـات المـسطحة (flat bands) [5].

منظومات القياس

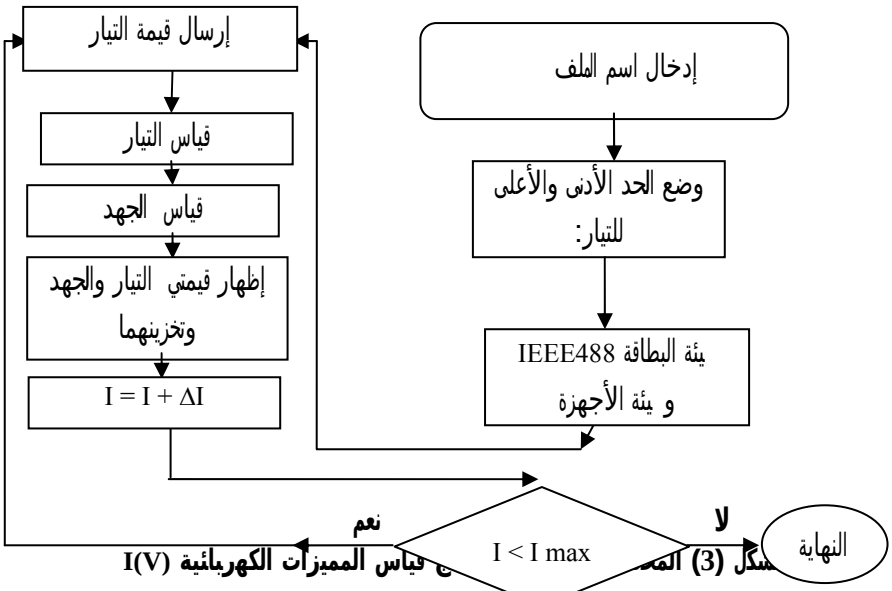
منظومة قياس المميزات I(V)

تتكون منظومة القياس من منبع تيـار Keithly 220 ومقيـاس جهـد Keithly 617، وكلاهما مربوط بالحاسوب بواسطة بطاقة وصل IEEE 488، كما يبين الشكل (2). تقوم عملية القياس على توليد تيار تتراوح شدته بين زهاء 10^{-9} A و10^{-3} A، وقيـاس الجهـد الموافق له بين طرفي الكاشف. تتكرر العملية من أجل زهاء 40 نقطة عمـل، وتخـزن

المعطيات في ملف نصي، كل سطر فيه عبارة عن شدة التيار والجهد الموافق لها. يبـين الشكل (3) المخطط الانسيابي (flow chart) للبرنامج الذي كتبناه، بلغة باسكال، لتحصيل المعطيات وتخزينها.



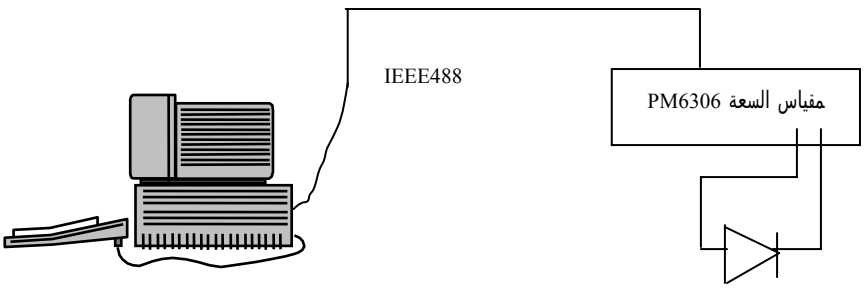
الشكل (2) المخطط الصندوقي لمنظومة قياس المميزات I(V) .



شكل (3) المخـ ـ قياس المميزات الكهربائية I(V)

منظومة قياس المميزات السعوية C(V)

تتكون منظومة القياس من مقياس LCR طراز PM 630 ، مربوط بالحاسـوب عـن طريق بطاقة وصل IEEE 488. يمكن عن طريق الحاسوب التحكم بتردد إشارة القيـاس ومطالها، إضافةً إلى الجهد المستمر المطبق على العينة المدروسة، والذي يتم قياس السعة



عنده. تقوم عملية القياس بتحديد هؤلاء الوسطاء، وبتغيير جهد الانحيـاز (العكـسي فـي حالتنا) وقياس السعة عند كل نقطة. يبين الشكل (4) المخطط الصندوقي لمنظومة القياس. نخزن المعطيات في ملف نصي، كل سطر فيه عبارة عن قيمة الجهد والسعة الموافقة له. تجدر الإشارة، إلى أنه يجب وضع العينة في وضعية الانحياز العكسي، لأن المقيـاس لا يولد سوى جهود موجبة. يبين الشكل (5) المخطط الانسيابي لبرنامج تحصيل المعطيـات وتخزينها.

الشكل (4) المخطط الصندوقي لمنظومة قياس المميزات السعوية C(V).

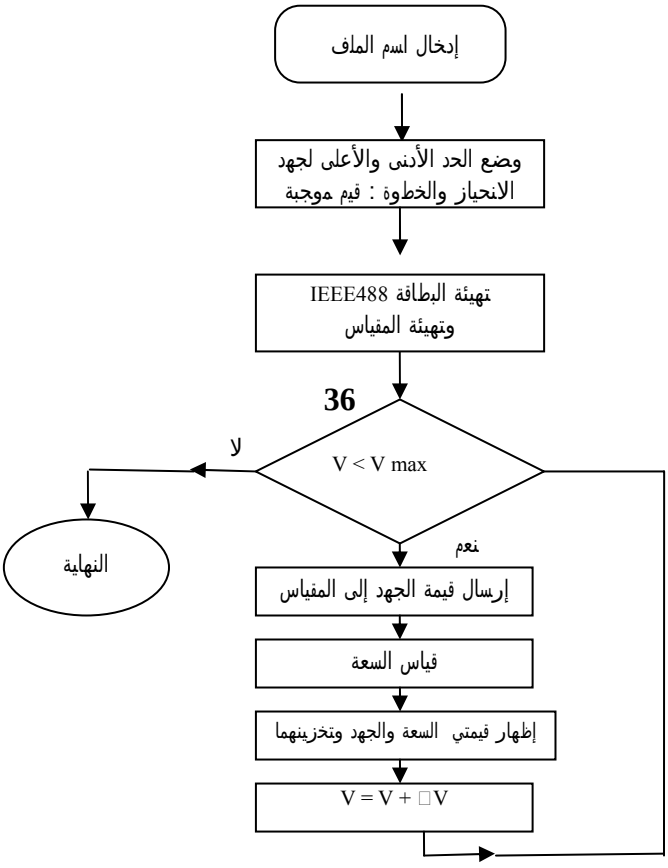
النتائج التجريبية

أجرينا القياسات على ثنائي شوتكي يستخدم بوصفه كاشفاً لجـسيمات ألفـا ركيزتـه (substrat) من السيليكون، النوع n، تتوضع عليها طبقة من الذهب، صنع شـركة [7] Enertec، مساحة نافذته 175 mm^2، وسنعرض في الفقرات الآتية النتائج التـي حـصلنا عليها.

المميزات السعوية C(V)

قمنا بقياس سعة الكاشف التجاري من أجل جهود انحياز عكسي تتراوح بـين1 و8V، وعند تردد 10kHz. يبين الشكل (6) قيم السعة المقيسة، في حين يبين الشكل(7) المنحنى البياني الذي يمثل $1/C^2$ بدلالة V، مع أفضل المستقيمات الذي يمر بالنقـاط التجريبيـة، باستخدام برنامج Origin، والتي تكتب معادلته وفق الشكل:

$$1/C^2 = 1.81x10^{18} + 2.79x10^{18}\ V$$



الشكل (5) المخطط الانسيابي لبرنامج قياس المميزات الكهربائية C(V)

من تقاطع أفضل المستقيمات مع محور الجهود، نجد أن ارتفاع حاجز الكمون يساوي: V_{bi} =1.81/2.79= 0.65 V، ومن الميل نجد أن تركيز الشوائب المانحة في ركيزة السيليكون: $N_d = 1.4\ 10^{12}\ cm^{-3}$، وهي قريبة من القيم المستخدمة في مثل هذه التطبيقات. بالتعويض في المعادلة (6)، مع أخذ $N_c = 2.7\ 10^{19}\ cm^{-3}$ في حالة السيليكون في درجة حرارة الغرفة [6] ، نجد Φ_n =0.44 V. وأخيراً، بالتعويض في المعادلة (7) نجد أن ارتفاع حاجز شوتكي:

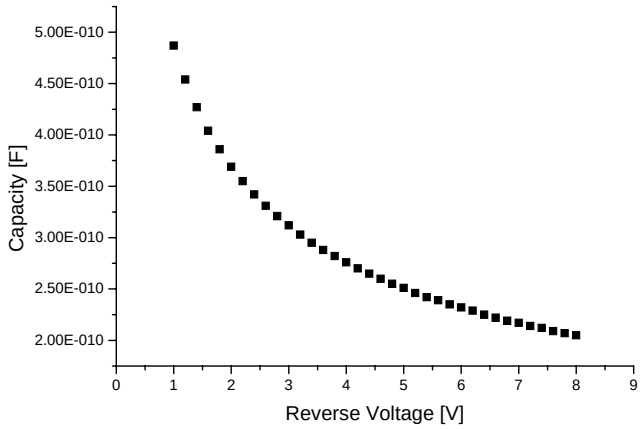
Φ_{Bn} =1.11 V. حسب نظرية شوتكي ، يجب أن يكون ارتفاع الحاجز[5]:

$$\Phi_{Bn} = \Phi_{Au} - \chi_{Si} = 5.1 - 4.01 = 1.09\ V$$

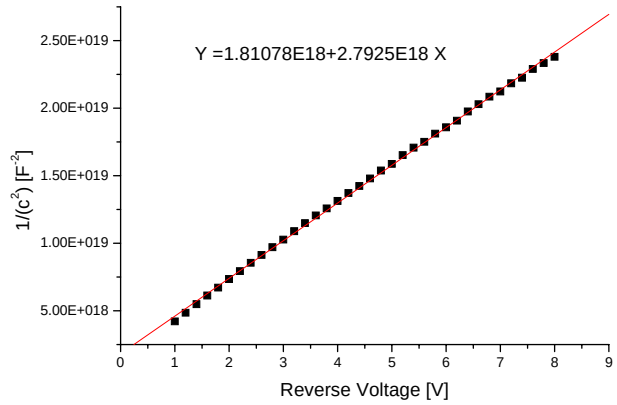
أما لو افترضنا أن الحالات السطحية هي التي تحدد قيمة ارتفاع الحاجز، فإننا نجد [6]:

$$\Phi_{Bn} = \frac{2}{3} E_g = 0.75\ V$$

نستنتج مما سبق أن حاجز الكمون التجريبي قريب جداً من القيمة التي تعطيها نظرية شوتكي، أي أن الحالات السطحية ليس لها دور أساسي في الكاشف المدروس.



الشكل (6) تغير سعة الكاشف بدلالة جهد الانحياز العكسي.

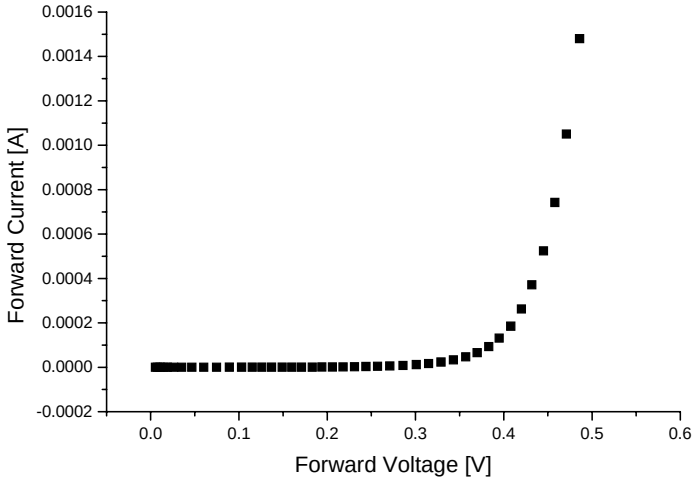


الشكل (7) تغير مقلوب مربع سعة الكاشف بدلالة جهد الانحياز العكسي.

المميزات المباشرة

قمنا بقياس المميزات المباشرة للكاشف، من أجل تيارات تتراوح شدتها بـين 0 و1.5 ميلي أمبير؛ فحصلنا على المنحنى المبين في الشكل (8). برسم اللوغرتم الطبيعـي لقـيم التيار الموافقة لجهود انحياز كبيرة، بحيث يمكن إهمال الواحد أمام الحد الأسي، حـصلنا على مستقيم (الشكل9) معادلته:

$$Ln(I_F) = -19.28 + 26.33\ V$$



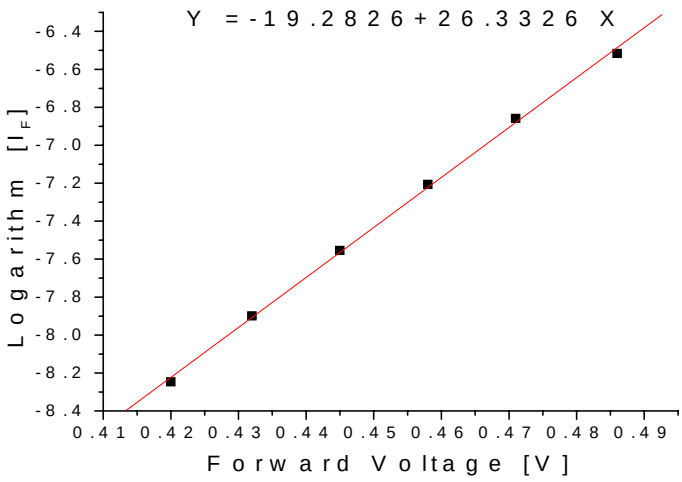
الشكل (8) المميزات الكهربائية المباشرة I(V) للكاشف.

وفقاً لما بيناه سابقاً، فإن تقاطع هذا المستقيم مع محور التيار يساوي $Ln\ (J_{sT})$، من ثم:

$$Ln\ (J_{sT}) = -19.28$$

ومنه شدة تيار التسريب: $I_{sT} = 4.2\ 10^{-9}$ A.

بالتعويض في المعادلة (4) نجد أن ارتفاع حاجز شوتكي: $\Phi_{Bn} = 0.94V$. وهي قريبة من القيمة التي وجدناها من المميزات السعوية.



الشكل (9) الجزء الأسي من المميـزات الكهربائيـة I(V) المباشـرة للكاشـف، مـع أفـضل المستقيمات.

الخلاصة

قمنا في هذا العمل ببناء منظومتي قياس للمميزات الكهربائية المباشرة I(V) والسعوية C(V) لثنائيات شوتكي، ووضعنا منهجية عمل لقياس ارتفاع حاجز شوتكي لهذه الثنائيات. من ثم، طبقنا ذلك على ثنائي شوتكي تجاري يستخدم بوصفه كاشفاً للجسيمات ألفا (كاشف ذو حاجز سطحي)، وكانت النتائج التي حصلنا عليها بالطرائق المختلفـة متقاربـة مـن بعضها بعضاً وقريبة من القيم المتوقعة. وهكذا نكون قد وضعنا آليات ومنهجيات موثوق فيها لتوصيف ثنائيات شوتكي، وهي الخطوة الأولى التي لا بد منها عند تـصنيع هـذه الثنائيات، حتى نتمكن من الحكم على جودة ما نصنع، وحتى نتمكن من تحديـد مـواطن الخلل فيها، ومن ثم التأثير في مراحل التصنيع في الاتجاه الصحيح. وسنبين ذلك في نشرة لاحقة، نصف فيها كاشف جسيمات ألفا الذي قمنا بتـصنيعه، ومراحـل التـصنيع التـي اعتمدناها، وكيف قمنا بتوصيفه وفق المنهجية التي عرضناها.

REFERENCES

1- **Okumura, T. and K. N Tu, Appl, J. "Analysis of parallel Schottky contacts by differential internal photoemission spectroscopy", Phys. 54 (2). 1983.**
2- **Glenn, F. Knoll, 2000. "Radiation detection and measurement",**
3- **Sze, S. M. 1981. "Physics of semiconductor devices",**
4- **Donald, A. Neamen, 1997. "Semiconductor physics and devices".**
5- **Schroder,D.K.1990. "Semiconductor material and device characterization".**
6- **Andre Vapaille et Rene Castagne, 1987. Dispositifs et circuits integres semiconducteurs,**
7- **Catalogue: Enertec, nuclear instruments 86-87.**