

اتحاد حاملات الشحنة على السطح البيئي في الخلايا الشمسية غير المتجانسة

الدكتور برهان دالاتي*

الدكتور علي درويشو**

(تاريخ الإيداع 22 / 1 / 2019. قُبل للنشر في 7 / 4 / 2019)

□ ملخص □

تم في إطار هذا العمل دراسة كثافة الحالات الإلكترونية N_{ir} على السطح البيئي في الوصلة pn غير المتجانسة للخلية الشمسية $CdS/CdTe$ بين طبقة النافذة CdS وطبقة الامتصاص $CdTe$. تم أيضاً إيضاح تأثير هذه الكثافة على المتغيرات الأساسية للخلية. تنشأ الحالات الإلكترونية N_{ir} على السطح البيئي، نتيجة لعدم وجود تجانس في الشبكة البلورية لمادتي نصف الناقل المشكلة للوصلة pn . يمكن اعتبار هذه الحالات كسويات اشابة في فاصل الطاقة لنصف الناقل. من أجل فهم سلوك هذا النوع من الخلايا تم وضع نموذج نظري للخلايا الشمسية ذات وصلة pn لامتجانسة، حيث تكون آلية إعادة اتحاد حاملات الشحنة على السطح البيئي بين طبقة CdS و طبقة $CdTe$ هي الآلية المسيطرة لنقل التيار فيها.

يبين هذا النموذج ارتفاع كل من معامل المثالية للوصلة ($n > 1$) وكثافة تيار الإشباع بسبب زيادة كثافة الحالات الفعالة N_{ir} . يؤدي إعادة اتحاد حاملات الشحنة على السطح البيئي إلى خفض قيم كل من جهد دارة الفتح V_{oc} ، وتيار قصر الدارة I_{sc} ، وعامل الامتلاء FF . يمكن توضيح هذه النتائج بحسابات عديدة لوسائط الخلية الشمسية $CdS/CdTe$.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية، كثافة الحالات على السطح البيئي، العبور النفقي، إعادة اتحاد حاملات الشحنة.

* استاذ مساعد ، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تشرين Email: burhanosmandalati@tishreen.edu.sy

** استاذ مساعد ، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تشرين Email: alinajidarwisho@tishreen.edu.sy

Interface Recombination of The Heterojunction Solar Cells

Dr. Burhan Dalati^{*}
Dr. Ali Darwisho^{**}

(Received 22 / 1 / 2019. Accepted 7 / 4 / 2019)

□ ABSTRACT □

In this work, we study density of active interface states N_{ir} between window layer CdS and absorber layer $CdTe$ of heterojunction solar cell $CdS/CdTe$. The effect of this density on the parameters of solar cell was also explained. Interface state is the result of lattice mismatch of two materials used. Here, we regard interface states as impurity level. In order to understand the behavior of these cells a theoretical model has been developed for pn heterojunction solar cells in which interface recombination between CdS and $CdTe$ is the dominant mechanism of current transport for these cells.

The model explains the large junction ideality factor ($n>1$) and the increased saturation current density in terms of increased density of active interface states N_{ir} . The interface recombination leads to lower values of the open circuit voltage V_{oc} , short circuit current I_{sc} , and fill factor FF . These results are illustrated by numerical calculation of solar cell parameters $CdS/CdTe$.

Keywords: solar cells, interface states, tunneling, recombination

^{*}Associate Professor, Tishreen University, Email: burhanosmandalati@tishreen.edu.sy

^{**}Associate Professor, Tishreen University, Email: alinajidarwisho@tishreen.edu.sy

مقدمة:

يعتبر السليكون أحادي التبلور في الوقت الحاضر، هو المادة الأكثر استخداماً في إنتاج الخلايا الشمسية. وحيث أنه نصف ناقل ذو فاصل طاقة (1.12 eV) غير مباشر، ومعامل امتصاص ضوئي منخفض، لذلك لا يمكن اعتبار السليكون مادة مثالية للخلية الشمسية. إن المردود النظري للخلية الشمسية السليكونية هو بحدود 25%، ومخبرياً، أعلى مردود قد وصل إلى قيمة 24.7%.

بسبب كلفته العالية، لا يزال استخدامه غير ممكناً كمصدر رخيص للطاقة. لذلك كان من الضروري البحث عن مواد جديدة لإنتاج خلايا شمسية ذات مردود عالي وبكلفة أقل. كان من بين هذه المواد CdTe، بسبب أن لها الميزات التالية: 1- فاصل طاقة (1.45 eV) وهي قيمة مثالية لخلية التحويل الضوئي للاستخدام الأرضي، 2- فاصل طاقه مباشر وهذا يعني أن معامل امتصاصه للضوء يكون كبيراً، أي نحتاج فقط لعدة ميكرونات من المادة كي تمتص 90% من مجموع الضوء الوارد على الخلية.

من أكثر المواد ملاءمة لتشكيل الوصلة $p-n$ غير المتجانسة مع المركب CdTe هو المركب CdS، وذلك بسبب التوافق الجيد بينهما فيما يتعلق بقيمة الثابت البلوري وبسبب فاصل الطاقة الكبير لمادة CdS التي تبلغ (2.4 eV)، [1].

تشكل الطبقة $n-CdS$ في الخلايا الشمسية CdS/CdTe كطبقة نافذة، تسمح بوصول قسم كبير من الطيف الشمسي إلى طبقة الامتصاص التي تشكلها الطبقة $p-CdTe$. سجلت أعلى كفاءة لهذا النوع من الخلايا بقيمة فعلية 16.5 % وبقيمة نظرية مقدارها 29 % [2,3]. يمكن ربط المردود المنخفض نسبياً لهذه الخلايا بالتركيز العالي للثقوب في المركب CdTe، علاوة على ذلك، فإن العبور النفقي في البنية CdS/CdTe الذي يتم بشكل رئيسي عبر عيوب في طبقة CdS يؤدي إلى انخفاض المردود [4]. تتحدد قيمة معامل المثالية للوصلة pn بألية نقل التيار في الخلية، فعندما تكون الوصلة نموذجية تكون $n = 1$ ، وألية نقل التيار هي حقن الشحنات وانتثارها، وتكون $n = 2$ عندما تكون آلية نقل التيار هي توليد الشحنات، واتحادهما في منطقة الشحنة الفراغية كما يمكن أن تأخذ n قيمة أكبر من 2 بشكل واضح بسبب آلية العبور النفقي للشحنات، واتحادهما على السطح البيئي [5].

تعتبر الخسائر المرتبطة بعملية إعادة الاتحاد عند السطح البيئي الفاصل بين الطبقتين n و p ، من أهم مشكلات الخلايا الشمسية CdS/CdTe [6].

من أجل فهم أكبر لسلوك هذه الخلايا سنقترح نموذج نظري يفسر ظواهر مهمة، ومتعددة لهذه الخلايا، حيث سنجد علاقات تربط وسائط الوصلة بكثافة الشحنات الفعالة على السطح البيئي.

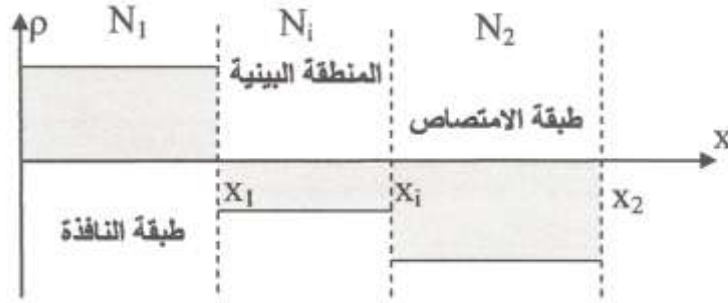
أهمية البحث وأهدافه:

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد طبيعة الارتباط لوسائط الوصلة بكثافة الشحنات الفعالة على السطح البيئي من خلال إيجاد علاقات رياضية تربط بين وسائط الخلية، وكثافة الشحنات على السطح البيئي. تكمن أهمية هذا البحث في فهم أفضل لأثر تغيير الوسائط التي تصف المواد المكونة للخلية على وسائطها المميزة مما يساهم ذلك في تحضير خلايا شمسية بمواصفات أفضل.

طرائق البحث ومواده:

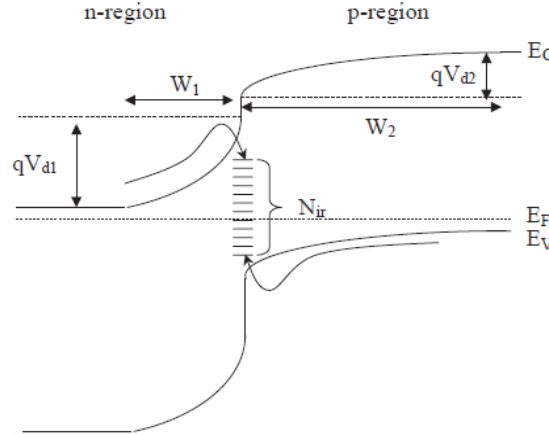
يعتمد البحث على وضع نموذج نظري متكامل لاستخدامه في تفسير ارتفاع معامل المثالية للوصلة $p-n$ بارتفاع كثافة الحالات الإلكترونية على السطح البيئي.

يفترض النموذج أن الخلية الشمسية عبارة عن وصلة $p-n$ لا متجانسة بالإضافة إلى منطقة بيئية ذات ثخانة معينة في البداية، تتحول في حال تهاى ثخنها إلى الصفر إلى سطح بيئي، وهذا ما يوضحه الشكل (1).



الشكل (1): البنية الطبقيّة لمنطقة الشحنة الفراغية في الوصلة اللامتجانسة.
 $N_1=N_a$ تركيز الشحنات في طبقة النافذة، $N_2=N_a$ تركيز الشحنات في طبقة الامتصاص
 N_{ir} تركيز الشحنات في المنطقة البيئية حيث: $(N_i \rightarrow N_{ir}; x_i - x_j \rightarrow 0)$

وأن حالات السطح البيئي N_{is} معتدلة كهربائياً لا تؤثر على مستوى طاقة فيرمي، ولا تتأثر بالحقل الكهربائي. إن إعادة اتحاد حاملات الشحنة في منطقة السطح البيئي تشحن الحالات في هذه المنطقة بشحنة كهربائية سالبة. وهذه الحالات المشحونة N_{ir} ، كما يبينه الشكل (2)، هي فقط الفعالة، وهي التي ستؤخذ بالحسابات اللاحقة. يزداد معدل إعادة اتحاد الشحنات بالإضاءة مما يؤدي إلى ارتفاع كثافة الحالات المشحونة على السطح البيئي [7].



الشكل (2): مخطط عصابات الطاقة للوصلة $p-n$ اللامتجانسة في النموذج المستخدم

يمكن تقدير كثافة الحالات على السطح البيئي N_{is} والتي يكون N_{ir} هو الجزء الفعال منها باستخدام العلاقة التالية [8]:

$$N_{is} = \frac{2}{a_1 \cdot a_2} \cdot \frac{\Delta a}{a_2} \quad (1)$$

حيث تعبر كل من a_1 و a_2 عن ثابت الشبكة البلورية للمادة نصف الناقل في منطقتي n و p على التسلسل. من أجل وصلة لامتجانسة $CdS/CdTe$ ($a_1 = 5.82 \text{ \AA}$ لطبقة CdS ، [9] و $a_2 = 6.48 \text{ \AA}$ لطبقة $CdTe$ ، [10])، تأخذ N_{ir} قيمة يمكن أن تصل إلى $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. من النموذج المفترض واعتبار قانون غاوص في الإزاحة للحقل الكهربائي E الذي يجب أن يكون مستمراً عبر السطح البيئي، أي:

$$\varepsilon_1 E_1 = qN_{ir} + \varepsilon_2 E_2 \quad (2)$$

حيث $E_1, E_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ هي على الترتيب، ثابت العزل الكهربائي النسبي للمركب CdS ، ثابت العزل الكهربائي للمركب $CdTe$ ، الحقل الكهربائي في CdS ، الحقل الكهربائي في $CdTe$ ، أما q فهي شحنة الإلكترون و N_{ir} فتمثل كثافة حالات السطح البيئي المشحونة.

ومن حل معادلة بواسون Poisson في النموذج المعتبر، نحصل على العلاقات التالية التي تعطي كل من V_{d2} & V_{d1} كموني الانتثار في منطقتي n و p على الترتيب:

$$V_{d1} = \frac{q}{2\varepsilon_1\varepsilon_0} N_1 W_1^2 \quad (3)$$

$$V_{d2} = \frac{q}{2\varepsilon_2\varepsilon_0} N_2 W_2^2 \quad (4)$$

حيث يشير الدليل 1 على الطبقة النافذة CdS والدليل 2 على طبقة الامتصاص $CdTe$. تشير الرموز q و N_1 و N_2 و W_1 و W_2 و ε_1 و ε_2 ، على الترتيب إلى: شحنة الإلكترون، تركيز الذرات المانحة، تركيز الذرات الآخذة، عرض منطقة الشحنة الفراغية في طبقة النافذة، عرض منطقة الشحنة الفراغية في طبقة الامتصاص، ثابت العزل الكهربائي لنصف الناقل.

بتطبيق علاقة الحياد الكهربائي نحصل على العلاقة:

$$N_1 W_1 = N_{ir} + N_2 W_2 \quad (5)$$

حيث تعبر N_{ir} عن الكثافة السطحية للحالات البيئية المشحونة. بتغير N_{ir} يمكن لكل من W_d و W_p أن تتغير وحسب المعادلتين (3) و (4) تتغير معها كل من V_{d1} و V_{d2} .

يعرف معامل المثالية للوصلة $p-n$ بالمعادلة التالية:

$$n = \frac{V_d}{V_{d2}} = 1 + \frac{V_{d1}}{V_{d2}} = 1 + \frac{(N_{ir} + N_2 W_2)^2}{N_1 N_2 W_2^2} \quad (6)$$

حيث $V_d = V_{d1} + V_{d2}$ تعبر عن كمون الانتثار الكلي.

تظهر المعادلة (6) أن n يمكن أن تأخذ قيمة أكبر من 2 عندما يكون $(N_{ir} + N_2 W_2)^2 > N_1 N_2 W_2^2$. وهذا يعني عندما يكون: $N_{ir} > (\sqrt{N_1 N_2} - N_2) W_2$.

إن زيادة N_{ir} عن هذا الحد يؤدي إلى ارتفاع قيم n عن قيمة 2، وهذا ما يبين تأثير كثافة الحالات المشحونة N_{ir} على السطح البيئي على آلية نقل التيار للخلية الشمسية، وبدوره تأثيرها على متغيرات الخلية. لذلك سندرس حالة $n > 2$ وسنحسب وسائط الوصلة كتابع لقيمة N_{ir} .

باستخدام العلاقات (3) و (4) و (6) نحصل على العلاقتين:

$$W_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_0V_d(n-1)}{qN_1n}} \quad (7)$$

$$W_2 = \sqrt{\frac{2\varepsilon_2\varepsilon_0V_d}{qN_2n}} \quad (8)$$

وبإدخال العلاقة (8) في (6) نحصل على المعادلة التالية:

$$N_{ir} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_0N_1V_d(n-1)}{qn}} - \sqrt{\frac{2\varepsilon_2\varepsilon_0N_2V_d}{qn}} \quad (9)$$

تظهر هذه العبارة العلاقة الضمنية $n = n(N_{ir})$ لتابعية معامل المثالية n للوصلة بكثافة الحالات المشحونة على السطح البيئي N_{ir} .

يمكن كتابة تيار الإشباع J_0 الناشئ عن إعادة الاتحاد كما يلي، [11]:

$$J_0 = qP_sS_I \quad (10)$$

حيث تعبر P_s عن كثافة الثقوب الزائدة و S_I هي سرعة إعادة اتحاد الثقوب على السطح البيئي ويمكن حسابها على الشكل التالي:

$$S_I = v_{th}\sigma_pN_{ir} \quad (11)$$

تعبّر v_{th} عن السرعة الحرارية و σ_p عن المقطع العرضي لأسر الثقوب على السطح البيئي. يمكن كتابة علاقة كثافة الثقوب الزائدة P_s بالشكل التالي:

$$P_s = N_2 \exp\left(\frac{-qV_{d2}}{kT}\right) = N_2 \exp\left(\frac{-qV_d}{nkT}\right) \quad (12)$$

بإدخال العلاقتين (11) و (12) في العلاقة (10) نحصل:

$$J_0 = qv_{th}\sigma_pN_{ir}N_2 \exp\left(\frac{-qV_d}{nkT}\right) \quad (13)$$

سنستخدم هذه العلاقة (13) بالإضافة للعلاقة (9) في الحسابات الرقمية من أجل توضيح مدى تابعية تيار الإشباع J_0 لكثافة الحالات المشحونة على السطح البيئي N_{ir} .

يمكن حساب التغيرات في مميزات (تيار-جهد):

$$J = J_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (14)$$

تبعاً لكثافة الحالات المشحونة N_{ir} من أثر هذه الأخيرة على كل من J_0 و n .

يمكن كتابة كثافة تيار قصر الدارة J_{sc} بالعلاقة، [11]:

$$j_{sc} = \frac{j_{L0}}{1 + \frac{S_I}{\mu_l E_I}} \quad (15)$$

حيث j_{L0} التيار الناتج عن الإضاءة، والذي يصل إلى السطح البيئي، وتعبّر μ_l عن حركية الشحنات في طبقة النافذة و E_I عن شدة الحقل الكهربائي على السطح البيئي، والتي يمكن حسابها حسب المعادلة التالية:

$$E_T = \frac{q}{\epsilon_1 \epsilon_0} N_1 W_1 \quad (16)$$

وبإدخال (11) و (16) في (15) نحصل على المعادلة:

$$J_{sc} = \frac{J_{L0}}{1 + \frac{\sigma_p v_{th} N_{ir} \epsilon_1 \epsilon_0}{q \mu_i N_1 W_1}} \quad (17)$$

والتي سنستخدمها بالإضافة للمعادلتين (7) و (9) في الحسابات العددية من أجل توضيح أثر كثافة الحالات المشحونة للسطح البيني N_{ir} على تيار قصر الدارة J_{sc} .

كما يمكن حساب التغيرات في جهد فتح الدارة:

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \left\{ \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) + 1 \right\} \quad (18)$$

تبعاً لكثافة الحالات المشحونة على السطح البيني باستخدام المعادلات (7) و (9) و (13) و (17).

النتائج والمناقشة:

أجريت الحسابات العددية من أجل إظهار أثر تركيز الحالات المشحونة على السطح البيني على متغيرات الخلية الشمسية، وذلك باستخدام القيم المبينة بالجدول (1)، والتي تعتبر نموذجية من أجل الخلايا الشمسية المبنية على أساس المركب $CdTe$ [12-15].

الجدول (1): الثوابت الفيزيائية المستخدمة في إيجاد متغيرات الخلية الشمسية $CdS/CdTe$ ، [12-15]

$$\begin{aligned} N_D &= 18^{18} \text{ cm}^{-3} \\ N_A &= 10^{15} \text{ cm}^{-3} \\ \epsilon_{CdS} &= 8.9, \quad \epsilon_{CdTe} = 10.9 \\ V_d &= \text{const.} = 0.92 \text{ V} \\ j_{L0} &= 15 \text{ mA/cm}^2 \\ \mu_i &= 0.005 \text{ cm}^2/\text{Vs} \\ v_{th} &= 5 \times 10^5 \text{ cm/s} \\ \sigma_p &= 10^{-17} \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

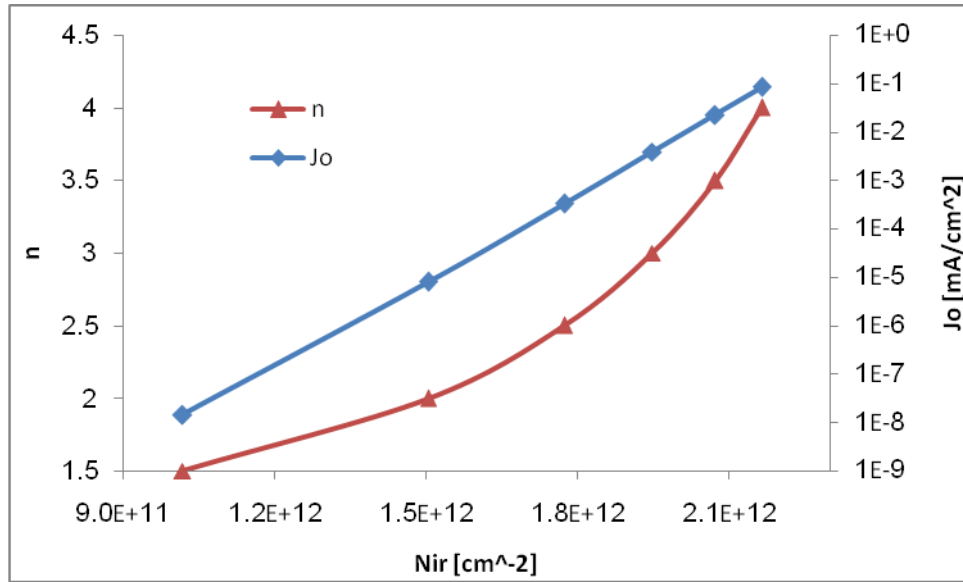
باستخدام هذه القيم العددية في العلاقات السابقة، نحصل على الجدول (2) بالقيم الحسابية للمتغيرات الأساسية للخلية الشمسية المدروسة $CdS/CdTe$.

برسم تغيرات قيم معامل المثالية n للوصلة وتيار الإشباع J_0 بتابعة كثافة الحالات المشحونة على السطح البيني N_{ir}

الجدول (2): القيم الحسابية للمتغيرات الأساسية للخلية الشمسية المدروسة $CdS/CdTe$

n	W_r [cm]	N_{ir} [cm ⁻²]	J_0 [mA.cm ⁻²]	J_{sc} [mA.cm ⁻²]	V_{oc} [V]	FF [%]
1.5	1.74E-06	1.02E+12	1.45E-08	14.74	0.81	81.2
2	2.13E-06	1.51E+12	8.02E-06	14.69	0.75	75.9
2.5	2.33E-06	1.77E+12	3.31E-04	14.66	0.69	70.6
3	2.46E-06	1.95E+12	3.89E-03	14.65	0.64	65.2
3.5	2.54E-06	2.07E+12	2.25E-02	14.64	0.59	59.8
4	2.61E-06	2.17E+12	8.36E-02	14.63	0.53	54.8

نحصل على الشكل (3).

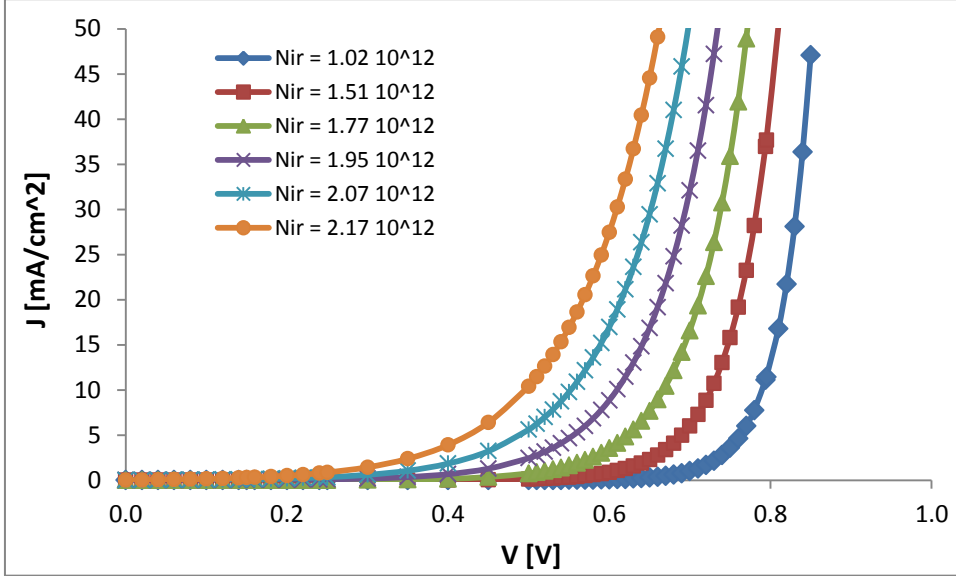


الشكل (3): معامل المثالية n للوصلة (العلاقة 9)، وتيار الإشباع J_0 (العلاقة 13)،

بتابعة كثافة الحالات المشحونة على السطح البيني N_{ir}

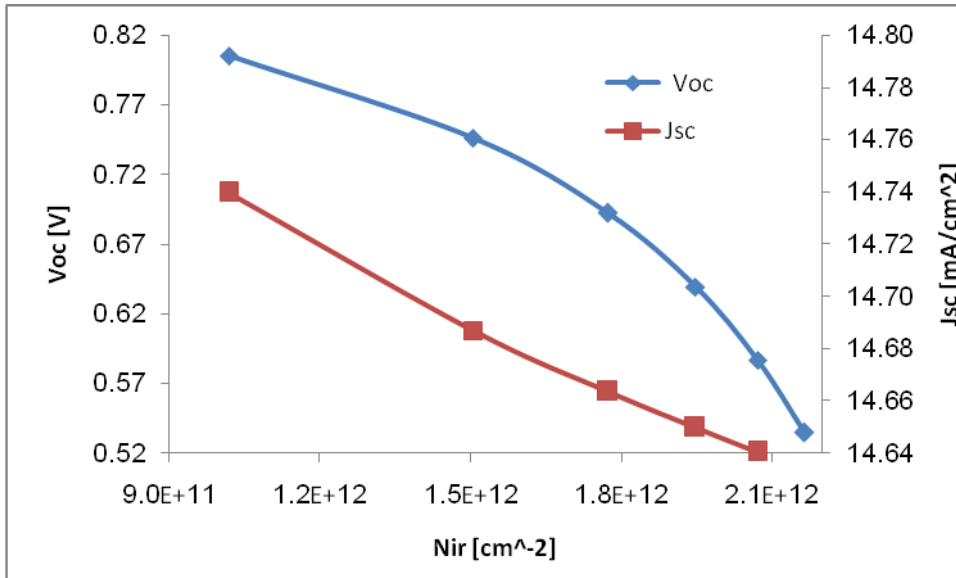
يظهر الشكل (3) أن معامل المثالية للوصلة n يزداد بشكل تابع رتيب لكثافة الحالات المشحونة على السطح البيني N_{ir} . يظهر تحليل الخلايا الشمسية $CdS/CdTe$ أن معامل مثالية الوصلة pn قد يأخذ قيمة $n = 3$ في الظلام. يفسر النموذج المقترح هنا هذا الرقم من خلال وجود كثافة عالية للحالات المشحونة على السطح البيني بمقدار $N_{ir} \approx 2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. وكما هو واضح في الشكل (3) فإن زيادة طفيفة في قيمة N_{ir} في هذا المجال تؤدي إلى قيم كبيرة لمعامل المثالية n . كما يظهر الشكل (3) علاوة على ذلك تابعة تيار الإشباع J_0 الشديدة لقيمة N_{ir} . تجدر الإشارة إلى أن تبعية J_0 لقيمة N_{ir} هي الأشد بالنسبة لباقي وسائط الخلية ولذلك سوف يكون لتيار الإشباع الأثر الأكبر على مميزات (تيار-جهد) للخلية.

يظهر الشكل (4) مميزات (تيار-جهد) في الظلام المحسوبة من أجل قيم مختلفة لكثافة الحالات المشحونة على السطح البيني N_{ir} هذه القيم تتفق حسب النموذج المفروض مع القيم $n = (1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4)$ لمعامل المثالية للوصلة.



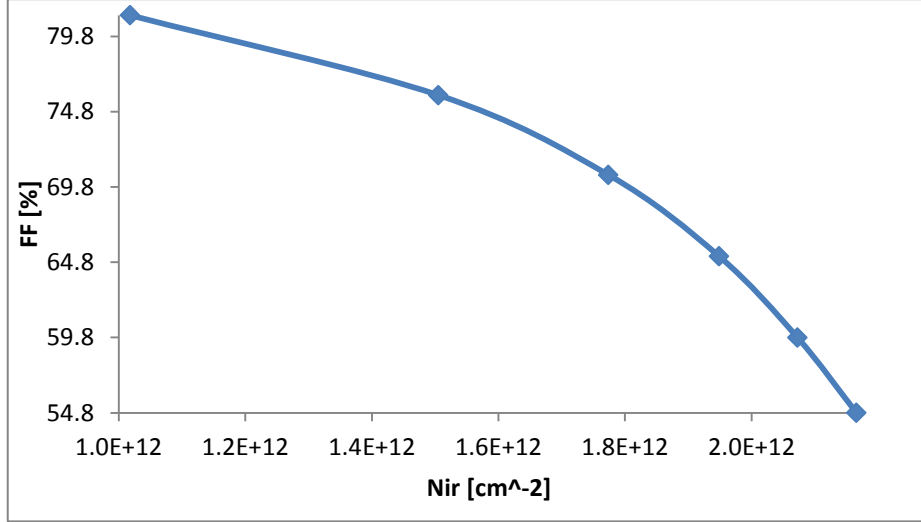
الشكل (4): مميزة (تيار-جهد) المحسوبة من العلاقة (14) لكثافة مختلفة للحالات المشحونة على السطح البيني N_{ir}

إن تأثير N_{ir} على كثافة تيار قصر الدارة J_{sc} ضئيل كما يظهر في الشكل (5). هذا ما يمكن تفسيره من خلال ملاحظة أن كل من S_I و E_I في المعادلة (16) يتعلق بقيمة N_{ir} بنفس التابعية تقريباً. كما يتناقص جهد دارة الفتح V_{oc} بازدياد N_{ir} كما يظهر في الشكل (5) كنتيجة لتابعية J_0 الشديدة لقيمة N_{ir} .



الشكل (5): تيار قصر الدارة J_{sc} (العلاقة 17) ، وكمون فتح الدارة V_{oc} (العلاقة 18)، بتابعية كثافة الحالات المشحونة على السطح البيني N_{ir}

أما الشكل (6) فهو يظهر تابعة معامل الامتلاء FF بتغير قيمة N_{ir} المحسوبة باستخدام البرنامج الحاسوبي (Mathematical). يتضح من هذا الشكل أن إعادة اتحاد الشحنات على السطح البيئي ينقص من معامل الامتلاء للخلية، وهذا ما أكدته النتائج التجريبية، [16,17].



الشكل (6): معامل الامتلاء FF (العلاقتين 17 و 18)، بتابعة كثافة الحالات المشحونة على السطح البيئي

تجدر الإشارة هنا إلى أن عرض منطقة النفاذ في طبقة الامتصاص p تبقى في إطار هذا النموذج أكبر منها في طبقة النافذة n من أجل كل قيم N_{ir} أي ($W_p \gg W_n$). وبما أن القدر الأكبر من الشحنات يتولد في طبقة الامتصاص فإن ارتفاع كثافة الحالات المشحونة على السطح البيئي لا يخرب مفعول الخلية الشمسية.

الاستنتاجات والتوصيات:

تبين من خلال هذه الدراسة أن تأثير كثافة الحالات المشحونة N_{ir} على السطح البيئي بين طبقة CdS و طبقة $CdTe$ على متغيرات الخلية الشمسية $CdS/CdTe$ يعود سببه إلى ارتفاع كثافة الحالات المشحونة على السطح البيئي، والذي بدوره يؤدي إلى زيادة إعادة اتحاد الشحنات على السطح البيئي بين طبقة CdS و طبقة $CdTe$. إن النموذج النظري المقترح يمكن أن يشرح أثر تغيير الوسائط التي تصف المواد المكونة للخلية على وسائطها المميزة، حيث وجدت علاقات رياضية مناسبة تربط بين وسائط الخلية وكثافة الشحنات على السطح البيئي. يمكن باستخدام هذا النموذج تفسير ارتفاع معامل المثالية للوصلة $p-n$ بارتفاع كثافة الحالات المشحونة على السطح البيئي. وقد بينت الحسابات العددية أن هذا الارتفاع يؤدي إلى خفض جميع الوسائط الفوتوفولتية للخلية الشمسية. بذلك نكون قد ساهمنا في فهم أفضل لأثر تغيير الوسائط التي تصف المواد المكونة للخلية على وسائطها المميزة مما يساهم ذلك في تحضير خلايا شمسية بمواصفات أفضل.

المراجع:

- [1] Zhang Lei, Wu Wei, et al., The Interface Recombination Current of the CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell. Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement
- [2] Subhash Chander* and M. S. Dhaka, Preparation and physical characterization of CdTe thin films deposited by vacuum evaporation for photovoltaic applications, *Adv. Mat. Lett.* (2015).
- [3] M. Powalla and D. Bonnet, "Thin-film solar cells based on the polycrystalline compound semiconductors CIS and CdTe, " *Advances in OptoElectronics*, vol. 2007, Article ID 97545, 6 pages, 2007.
- [4] J. Stankiewicz, W. Giriat, *Appl. Phys. Lett.* 35, 70 (1979).
- [5] S. Ashok, K. P. Pande, *Solar Cells* 14, 61, 1985
- [6] R. H. Bube, *Photovoltaic Materials*, Imperial College Press, 1998.
- [7] Khalili Khadijea, et al., Effects of Interface Recombination on the Performance of SWCNT\GaAs Heterojunction Solar Cell, *Procedia Engineering* 8 (2011) 275–279.
- [8] Lawrence L. Kazmerski, Photovoltaic Branch, Solar Energy Research Institute, Golden, CO 80401, U.S.A
- [9] A.P.Belyaev, V.P.Rubets and I.P.Kalinkin, .Soliton heteroepitaxy. in the formation of epitaxial films of II.VI compounds under... St.Petersburg State Technological Institute, 198013 St.Petersburg, Russia 2002.
- [10] برانبو وأسعد وميا. الخواص الضوئية والبنوية لأغشية الكادميوم تيلورايد (CdTe) المرسبة بالتبخير الحراري. مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية. المجلد (27) . العدد الثاني. 2011
- [11] A. Rothwarf, *Solar Cells* 16 (1985) 567-590
- [12] Hamid Fardi and Fatima Buny, Characterization and Modeling of CdS/CdTe Heterojunction Thin-Film Solar Cell for High Efficiency Performance, *International Journal of Photoenergy*, Volume 2013, Article ID 576952, 6 pages
- [13] L. Kosyachenko, "Efficiency of thin-film CdS/CdTe solar cells, "in *Solar Energy*, R. D. Rugescu, Ed., pp. 105–130, 2010.
- [14] J. Sites and J. Pan, "Strategies to increase CdTe solar-cell voltage, " *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 15, pp. 6099–6102, 2007.
- [15] Saeed Salem Babkair, Charge Transport Mechanisms and Device Parameters of CdS/CdTe Solar Cells..., JKAU: Sci., Vol. 22 No. 1, pp: 21-33 (2010)
- [16] J. Toušek, et al, Diffusion length in CdTe by measurement of photovoltage spectra in CdS/CdTe solar cells, *J. Appl. Phys.* 89, 460 (2001).
- [17] Li Bing, et al., Electronic properties and deep level transient spectroscopy of CdS/CdTe thin film solar cells. 2011 Chinese Physical Society and IOP Publishing Ltd.