مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (26) العدد (1)2004
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Basic Science Series Vol (26) No (1) 2004

أثر التشعيع الإلكتروني على خلية شمسية ذات وصلتين GaInP/GaAs معدة للاستخدام الفضائي

الدكتور عدنان زين الدين*

(قبل للنشر في 2003/11/17)

□ الملخّص □

يعتبر استخدام الوصلة من الطرق البسيطة والفعالة للحصول على معلومات عن مراكز إعادة الاتحاد . لقد استخدمنا أفضل أنواع الخلايا الشمسية المتوفرة تجارياً والمصنعة لاستخدامات الفضاء الخارجي ، وهي من أفضل الوصلات النصف ناقلة التي يمكن تحقيقها حالياً .

إن تقنية التشعيع الإلكتروني لوصلة ، وسيلة تسمح بإدخال عيوب فيها بطريقة دقيقة ومراقبة ، ونهتم بشكل خاص بتلك التي تلعب دوراً أساسياً كمراكز إعادة اتحاد غير مشعة ، وهي المسؤولة عن الخصائص الإلكترونية لمواد هذه الوصلة .

لدراسة الخلايا الشمسية متعددة الوصلات الضرورية لزيادة استطاعة الأقمار الصناعية ، قمنا باستخدام النتائج التي حصلنا عليها سابقاً لتناقص كل من كثافة تيار الدارة المقصورة وجهد الدارة المفتوحة بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني لخلايا شمسية وحيدة مثل GaAs و GaInP.

لقد قسنا مفعول الفولطية الضوئية لخلية شمسية مؤلفة من وصلتين : GaInP/GaAs ، مما سمح لنا بإيجاد تحولات كل من كثافة تيار الدارة المقصورة وجهد الدارة المفتوحة ، لهذه الخلية ، بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني φ .

وبرهنا على أن هذه التحولات تخضع للقانون نفسه الذي تخضع له الخلايا الشمسية الوحيدة GaAs و GaInP .

ووجدنا أن استخدام هذا النوع من الخلايا يسمح لنا بالحصول على استطاعات أكبر ، وبرهنا أن المردود يتناقص فقط من 19.63% إلى 6.27% من أجل جرعة تشعيع إلكتروني $\varphi = 5\times10^{15} elec.cm^{-2}$.

* أستاذ مساعد في قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية _ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (26) العدد (1)2004
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Basic Science Series Vol (26) No (1) 2004

Dégradation D'une Cellule Solaire Spatiale A Double Jonction Gainp/Gaas Sous L'effet D'irradiation Electronique

Dr. Adnan Zein Eddine*

(Accepted 17/11/2003)

□ RÉSUMÉ □

L'utilisation d'une jonction est un moyen simple et efficace pour obtenir des renseignements sur les centres de recombinaison. Nous avons donc utilisé des meilleures cellules solaires existent sur le marché et qui sont fabriquées pour l'espace, parce que elles sont les meilleures jonctions semi-conductrïces que l'on sache réaliser actuellement.

La technique d'irradiation électronique d'une jonction est un moyen d'y introduire des défauts de façon contrôlée, en examinant particulièrement le cas des défauts pouvant potentiellement jouer le rôle des centres de recombinaison non-radiatifs. Ces défauts sont responsables des principales propriétés électroniques de ces matériaux.

Pour étudier des cellules solaires spatiales multi-jonctions nécessitées par l'augmentation de la puissance des satellites. Nous avons utilisé les résultats obtenus sur la dégradation de la densité du courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert en fonction de la dose d'irradiation électronique des cellules uniques telles que GaAs et GaInP .

Nous avons mesuré l'effet photovoltaïque d'une cellule double-jonctions : GaInP/GaAs , ce qui nous a permis de trouver la variation de la densité du courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert de cette cellule en fonction de la dose d'irradiation électronique φ .

Et nous avons montré que ces variations suivent la même loi que celle des cellules uniques telles que GaAs et GaInP .

L'utilisation de ce genre des cellules nous a permis d'obtenir des puissances plus élevées , et nous avons montré aussi que le rendement diminue seulement de 19.63% à 6.27% pour une dose d'irradiation électronique $\varphi = 5\times10^{15} elec.cm^{-2}$.

***Maître De Conférences Au Département De Physique Faculté Des Sciences Université De Tichrine Lattaquié Syrie.**

مقدمة:

منذ بدء استخدام الخلايا الشمسية متعددة الوصلات على نطاق واسع ،[1] , [2] ، خاصة في مجال الفضاء الخارجي ، حيث تخضع لشروط معينة من ناحية درجة الحرارة والتدفق الضوئي .

تم مراقبة التلف الحاصل لها والذي لم يفهم دائماً . وكانت نتائج الدراسات خلال السنوات الأخيرة تقود إلى التحولات الخطية لكل من كثافة تيار الدارة المقصورة J_{sc} وجهد الدارة المفتوحة V_{oc} لهذه الخلايا أثناء عملها في الفضاء الخارجي ، وتعزى التحولات الخطية لجهد الدارة المفتوحة إلى النظام الذي تكون فيه الخلية الشمسية من خلال تعريضها للتشعيع سواءُ أكان إلكترونياً ، [3]، أو بروتونياً [4]، وهو نظام إعادة الاتحاد فقط والذي ينتج عن توضع عيوب في سوية الطاقة ضمن العصابة المحظورة ، مع تجاهل كلي لنظام الانتشار وذلك لصغر التحولات التي تطرأ من خلاله على V_{oc} .

نهتم في هذا البحث بخلية شمسية ذات وصلتين من النوع GaInP/GaAs وندرس تأثير التشعيع الإلكتروني على خصائصها الإلكترونية .

الهدف من البحث :

يهدف هذا البحث إلى دراسة التلف الحاصل للخلايا الشمسية أثناء عملها ، ضمن ظروف معينة ، في الفضاء الخارجي. وهي خلية شمسية ذات وصلتين (dual-junction) GaInP/GaAs ، عالية الجودة ، مصنعة من قبل شركة Emcore الفرنسية ، مساحتها $4cm^2$ ، محضرة بطريقة MOCVD [5] ، (metal organic chemical vapor deposition) .

يمكن أن ندرس أكثر من نموذج لهذه الخلايا ، وذلك للتحقق من النتائج التي نحصل عليها ، ومدى تطابقها .

يستخدم هذا النوع من الخلايا الشمسية للحصول على كمية أكبر من الطاقة التي نحصل عليها عند استخدامنا لخلية شمسية ذات وصلة وحيدة مثل GaInP أو GaAs . سنعمل على مراقبة هذه الخلية أثناء تشعيعها بالإلكترونات ، وقياس التحولات التي تطرأ على كل من جهد الدارة المفتوحة وكثافة تيار الدارة المقصورة ومردود هذه الخلايا ، ومقارنة هذه النتائج بتلك التي حصلنا علها سابقاً في الخلايا الشمسية ذات الوصلة الوحيدة .

النتائج النظرية والعملية والمناقشة :

لقد قمنا ، في هذه الدراسة ، بتعريض الخلايا الشمسية للتشعيع الإلكتروني باستخدام مسرع من نوع (Van de Graaff) ،الملحق (1) ، يحرر حزماً من الإلكترونات بطاقة 1MeV وبكثافة تيار من مرتبة $1\mu A.cm^{-2}$ [6] .

يسمح هذا المسرع بالحصول على تركيز متجانس للإلكترونات على سطح الخلية وبنفس الوقت يدخل فيها عيوباً (defects) على مراحل عند زيادة جرعة التشعيع الإلكتروني بطريقة دقيقة جداً .

من أجل جرعات تشعيع منخفضة ، فإن التلف الذي تتعرض له هذه الخلايا ينتج عن مراكز إعادة الاتحاد الغير مشعة (non-radiative recombination centers) .

أما من أجل جرعات تشعيع مرتفعة ، فإن مراكز الاصطياد تحدث تعويضاً غير مهمل لحوامل الشحنة الحرة ، لتساهم أيضاً في هذا التلف ، [7] .

أما الإضاءة الضوئية لهذه الخلايا ، فهي قريبة جداً من الإضاءة التي تتعرض لها عندما تكون في الفضاء الخارجي وهي من مرتبة 1AM0 (1Air masse 0) ، وهي عبارة عن مزيج من إضاءتي مصباحين ، احدهما من نوع كوارتز + هالوجين (Qt H) تسلط إنارته مباشرةً على الخلية الشمسية، والآخر من الكزينون (Xenon) يسلط على الخلية الشمسية بوساطة مرآة شفافة وعاكسة توضع أمام المصباح بزاوية 45^0 .

تعتبر نتائج قياس الفولطية الضوئية (photovoltaic) لهذه الخلايا ، والتحولات التي تطرأ عليها نتيجة التشعيع الإلكتروني ، هي المعطيات الأساسية لدراستنا هذه ، حيث أن التيار الكهربائي I(V) الذي تولده الخلية الشمسية من أجل جهد V ، [8] هو الفرق بين التيار المتولد عن إضاءة الخلية الشمسية I_{ph} والتيار بدون إضاءة(V) I_{dc} والناتج عن استقطاب الخلية الشمسية مباشرةً بالجهد V ونكتب :

$$\mathbf{I(V) = I_{ph} - I_{dc}\,(V)} \qquad \mathbf{(1)}$$

نحصل على تيار الدارة المقصورة بجعل $I(V) = 0$ في العلاقة السابقة ، وهذا يعطي :

$$\mathbf{I_{dc}(V_{oc}) = I_{ph} = I_{sc}} \qquad \mathbf{(2)}$$

حيث I_{sc} تيار الدارة المقصورة ، بينما V_{oc} جهد الدارة المفتوحة .

إن كثافة تيار الدارة المقصورة J_{sc} ، ضمن الشروط التي تعمل فيها الخلية الشمسية [9],[7] يساوي تقريباً كثافة تيار الانتشار ، وهذا الأخير يساوي مجموع كل من كثافة تيار انتشار الإلكترونات الأقلية في الباعث (أو القاعدة) وهو من النوع p ، ومع الشرط $L_n < d_p$ يمكن أن نكتب :

$$J_{d_n} = q\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c(\lambda)\phi(\lambda)\frac{\alpha(\lambda)L_n}{1+\alpha(\lambda)L_n}d\lambda \qquad \mathbf{(3)}$$

وكثافة تيار انتشار الثقوب الأقلية في القاعدة (أو الباعث) وهي من النوع n ، ومع الشرط $L_p < d_n$ يمكن أن نكتب [7] :

$$J_{d_p} = q\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\phi(\lambda)\alpha(\lambda)L_p}{1+\alpha(\lambda)L_P}\exp(-\alpha(\lambda)(d_p+W))d\lambda \qquad \mathbf{(4)}$$

إن العلاقتين الأخيرتين متشابهتان ، حيث $\phi(\lambda)$ تدفق الضوء من أجل طول الموجة λ ، بينما C ثابت ، $L_{n,p}$ مسافة انتشار حوامل الشحنة الأقلية ، $d_{n,p}$ عرض كل من القاعدة والباعث على الترتيب ، W عرض المنطقة الخالية من الشحنات الحرة .

عندما يكون المقدار $\alpha(\lambda)(d_p+W)$ صغيراً جداً ، لا يمكن إهمال تيار الانتشار J_d ، وفي هذه الحالة يكون التابع الأسي في العلاقة (4) مساوياً تقريباً إلى الواحد .

بالمقارنة بالعلاقة (3) ، فإن المقدار $c(\lambda)\phi(\lambda)$ ، من أجل الطيف الشمسي ، يتغير ببطء ضمن مجال طول الموجة : (λ_1,λ_2) ، لذلك يمكن اعتباره ثابتاً مساوياً A . حيث λ_2 طول الموجة الموافقة لنهاية الامتصاص أي العصابة المحظورة E_g لمادة المتصل $\lambda_2 = \frac{hc}{E_g}$ ، بينما λ_1 هي أصغر قيمة لطول الموجة والتي من أجلها لا يمكن إهمال المقدار $\phi(\lambda)$.

يمكن كتابة معامل الامتصاص $\alpha(\lambda)$ على شكل تابع أسي [10] ، [11] :

$$\alpha(\lambda) = \alpha(0)\exp(-r\lambda) \qquad \mathbf{(5)}$$

حيث r مقلوب عمق منطقة الانتشار والذي يخص معامل الامتصاص لمادة الخلية الشمسية .

يمكن أن نكتب أخيراً إحدى علاقتي كثافة تيار الانتشار على الشكل :

$$J_d = qA\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}\frac{\alpha(\lambda)L}{1+\alpha(\lambda)L}d\lambda \qquad \textbf{(6)}$$

بمفاضلة العلاقة (5) وبتبديل حدود التكامل في العلاقة السابقة بتابعية α(λ) ومن الشرط : $\lambda_2 > \lambda_1$ يكون $\alpha(\lambda_1) >> \alpha(\lambda_2)$.أيضاً ، تكون $\alpha(\lambda_1)$ كبيرة بالنسبة للمقدار L^{-1} وهذا غير صحيح بالنسبة للمقدار $\alpha(\lambda_2)$.

من المعطيات السابقة ، وبإجراء التكامل نجد :

$$J_d = \frac{qA}{r}[\ln\frac{\alpha(\lambda_1)}{\alpha(\lambda_2)+L^{-1}}] \qquad \textbf{(7)}$$

تتشكل مراكز إعادة الاتحاد نتيجة التشعيع الإلكتروني φ بمعدل κ ، [12] ، وبتركيز N حيث :

$$N = \kappa\varphi \qquad \textbf{(8)}$$

ومن علاقة مسافة الانتشار لحوامل الشحنة الأقلية $L = \sqrt{D\tau}$ ، حيث D معامل الانتشار لهذه الحوامل و τ عمرها ويعطى بالعلاقة :

$$\tau = (N\sigma v)^{-1} \qquad \textbf{(9)}$$

σالمقاطع العرضية لاصطياد حوامل الشحنة الأقلية ، v سرعة الحركة الحرارية . إن التشعيع الإلكتروني يقلل من عمر حوامل الشحنة الأقلية وبالآتي يقلل من قيمة L أي L^{-1} تكون كبيرة أمام المقدار $\alpha(\lambda_2)$ وبالآتي نكتب العلاقة (7) على الشكل :

$$\textbf{(10)}\quad J_d = \frac{qA}{r}[\ln\alpha(\lambda_1) - \ln L^{-1}]$$

نكتب أيضاً :

$$J_d = \frac{qA}{r}[\ln\alpha(\lambda_1) - \ln(\frac{\kappa\sigma v}{D})^{1/2} - \frac{1}{2}\ln\varphi] \qquad \textbf{(11)}$$

أي أن J_d وبالآتي J_{sc} يتناقص خطياً مع $\ln\varphi$ ونكتب :

$$J_{sc} = \xi - \rho\log\varphi \qquad \textbf{(12)}$$

تمثل هذه العلاقة مستقيماً في المستوي $(\log\varphi, J_{sc})$ ميله ρ يتعلق بشروط إضاءة الخلية الشمسية من خلال الثابت A وبمادتها من خلال الثابت r . يعطى هذا الميل بالعلاقة :

$$\rho = 1.15\frac{qA}{r} \qquad \textbf{(13)}$$

يتضمن المقدار ξ خصائص مراكز إعادة الاتحاد ويمثل قيمة كثافة تيار الدارة المقصورة $J_{sc}(0)$ ، ويعطى بالعلاقة :

$$\xi = \frac{qA}{r}[\ln\alpha(\lambda_1) - \frac{1}{2}\ln(\frac{\kappa\sigma v}{D})] \qquad \textbf{(14)}$$

لدراسة جهد الدارة المفتوحة V_{oc} لهذه الخلايا الشمسية ، ننطلق من العلاقة المعروفة لكثافة تيار الخلية الشمسية بدون إضاءة عندما تحيز مباشرة ، [8] , [13] :

$$J(V) = J_1[\exp(\frac{qV}{kT}) - 1] + J_2[\exp(\frac{qV}{2kT}) - 1] \qquad \textbf{(15)}$$

يمثل الحد الأول من الطرف الأيمن في العلاقة السابقة كثافة تيار الانتشار ، بينما يمثل الحد الثاني كثافة تيار إعادة الاتحاد ، بينما J_1 و J_2 كثافة تياري الإشباع ويعطيان بالعلاقتين :

$$J_1 = qn_i^2\left(\frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_h}{\tau_h}}\right) \qquad \textbf{(16)}$$

$$J_2 = \frac{\pi}{2} n_i \frac{kT}{\sqrt{\tau_n \tau_h}} \frac{W_0}{\sqrt{V_d}} \qquad \textbf{(17)}$$

حيث n_i تركيز حوامل الشحنة الذاتية ، $\tau_{n,h}$ عمر حوامل الشحنات الأقلية في المنطقتين p,n على الترتيب $N_{A,D}$ تركيز الشوائب الآخذة والمانحة في كل طرف من المتصل ، V_d حاجز الكمون ، W_0 عرض المنطقة الخالية من الشحنات الحرة لخلية شمسية غير محيزة ، k ثابت بولتزمان ، T درجة الحرارة بالدرجات المطلقة q شحنة الإلكترون .

باستخدام العلاقتين (8) و (9) نكتب :

$$J_1 = qn_i^2\left(\frac{1}{N_A}\sqrt{D_n\sigma_n v_n \kappa\varphi} + \frac{1}{N_D}\sqrt{D_h\sigma_h v_h \kappa\varphi}\right) = J_d^* \varphi^{1/2} \qquad \textbf{(18)}$$

$$J_2 = \frac{\pi}{2} n_i kTW_0 \left(\frac{\kappa^2 \sigma_n v_n \sigma_h v_h}{V_d}\right)^{1/2} \varphi = J_r^* \varphi \qquad \textbf{(19)}$$

يمكن أن نستبدل في العلاقة الأخيرة المقدار $\kappa^2\sigma_n\sigma_h$ بالمقدار $\kappa^2\sigma^2$ لأن الفرق بين σ_n و σ_h مهمل ، حيث $\sigma_{n,h}$ المقاطع العرضية لاصطياد حوامل الشحنة الأقلية للإلكترونات (n) والثقوب (h) . كذلك يمكن اختصار العلاقة (18) في الحالة التي تكون فيها $N_D >> N_A$ (الخلية الشمسية GaInP) ، [14] ، أو الحالة المغايرة $N_A >> N_D$ (الخلية الشمسية GaAs) ، [15] . مما سبق يمكن أن نكتب :

$$J_d^* = \frac{qn_i^2}{N_{A,D}} (\kappa\sigma v D)^{1/2} \qquad \textbf{(20)}$$

$$J_r^* = \frac{\pi}{2} n_i kTW_0 \kappa\sigma v V_d^{-1/2} \qquad \textbf{(21)}$$

من العلاقة (2) ، ومن أجل $J(V=V_{oc}) = 0$ مع الشرط $qV_{oc} >> kT$ نجد علاقة تربط بين كثافة تيار الدارة المقصورة وجهد الدارة المفتوحة في نظام الانتشار :

$$J_{ph} = J_{sc} = J_d^* \varphi^{1/2} \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) \qquad \textbf{(22)}$$

أما في نظام إعادة الاتحاد ، فنجد العلاقة :

$$J_{sc} = J_r^* \varphi \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT}\right) \qquad \textbf{(23)}$$

من العلاقتين السابقتين نحصل على علاقة خطية لجهد الدارة المفتوحة :

$$V_{oc} = \varepsilon - \mu \log\varphi \qquad \textbf{(24)}$$

من أجل خلية شمسية ذات وصلة وحيدة فإن المعامل (الميل) μ هو مضروب للمقدار $2.3kT/q$ ، [12] ، [16] أي :

$$\mu = 2.3\frac{kT}{q} i \qquad \textbf{(25)}$$

حيث $i = 1/2$ في نظام الانتشار ، $i = 2$ في نظام إعادة الاتحاد .

يمثل المقدار ε القيمة العظمى لجهد الدارة المفتوحة عندما $\mu \log \varphi = 0$ ، ويعطى بالعلاقة :

$$\varepsilon = a \frac{kT}{q} \ln(\frac{J_{sc}}{J^*_{d,r}}) \qquad \textbf{(26)}$$

حيث a =1 في نظام الانتشار (d) ، a=2 في نظام إعادة الاتحاد (r) .

سنبرهن عملياً ، عندما نستخدم خلايا شمسية متعددة الوصلات فإن جهد الدارة المفتوحة [17] ، في هذه الحالة يعطى بالعلاقة :

$$V_{oc} = \sum_j [\varepsilon_j - \mu_j \log \varphi] \qquad \textbf{(27)}$$

j تمثل الخلية الشمسية المستخدمة ، وبالآتي فإن جهد الدارة المفتوحة في نظام الانتشار للخلية الشمسية GaInP/GaAs يعطى بالعلاقة :

$$(V_{oc})_d = \sum_{j=1,2} [\varepsilon_{d_j}] - 2 \times 2.3 \frac{kT}{q} \times \frac{1}{2} \log \varphi \qquad \textbf{(28)}$$

أما في نظام إعادة الاتحاد ، فنكتب :

$$(V_{oc})_r = \sum_{j=1,2} [\varepsilon_{r_j}] - 2 \times 2.3 \frac{kT}{q} \times 2 \times \log \varphi \qquad \textbf{(29)}$$

حيث نضرب المعامل μ المعرف بالعلاقة (25) بعدد وصلات الخلية الشمسية .

1- قياس الميزة I=f(V) في حالة الإضاءة :

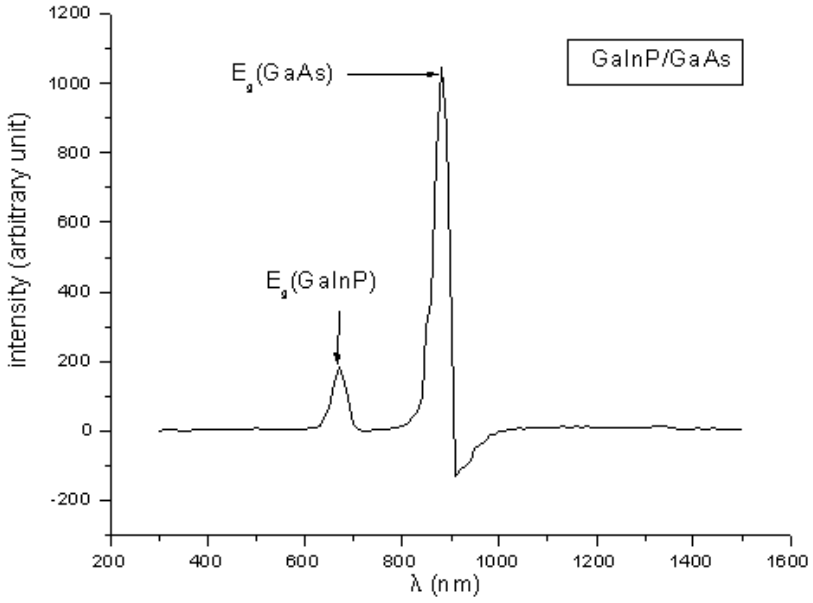
قبل قياس الميزة أمبير – فولت للخلية الشمسية GaInP/GaAs ، قمنا بالتحقق من تألقها الكهربائي (electro- luminescence) بدون تعريضها لأية إضاءة وبتطبيق جهد بين طرفيها ، وزيادة هذا الأخير حتى تبدأ بالتألق .تساعد هذه المرحلة على التأكد من عناصر الخلية الشمسية والتحقق من عملها .

يبين الشكل (1) التألق الكهربائي لهذه الخلية الشمسية ، تمثل النهاية العظمى الأولى طاقة فجوة عصابة الوصلة GaInP حيث $E_g = 1.84eV$ ، بينما تمثل النهاية العظمى الثانية طاقة فجوة عصابة الوصلة GaAs حيث $E_g = 1.43eV$ ، [18] .

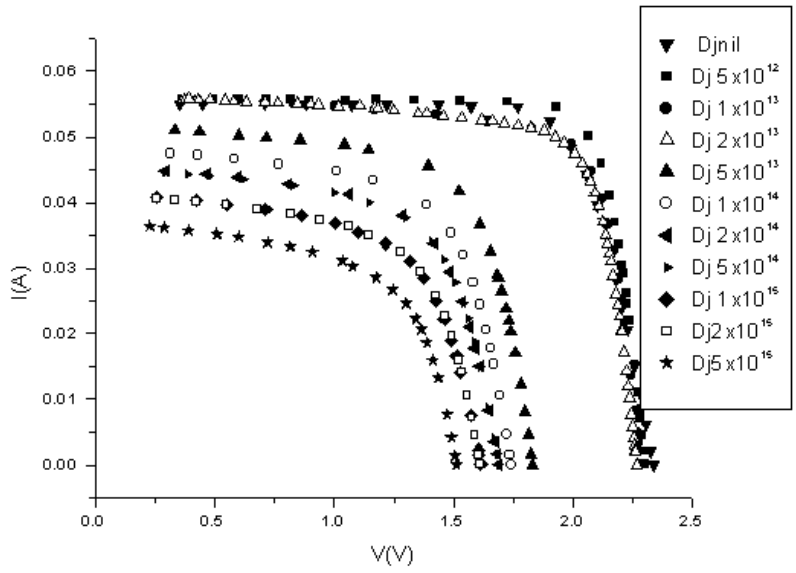
بعد تعريض الخلية الشمسية للتشعيع الإلكتروني على مراحل ، نلاحظ تناقص الفولطية الضوئية وهذا ما يبينه الشكل (2) ، حيث نرسم التيار الكهربائي الضوئي I=f(V) الذي ينتج عن هذه الخلية قبل وأثناء تعريضها للتشعيع الإلكتروني، نلاحظ في هذا الشكل تناقص كل من التيار الضوئي والجهد بدءاً من جرعة التشعيع :

$$\varphi > 2 \times 10^{13} elec.cm^{-2}$$

يوافق المنحني الأول في هذا الشكل قيم التيار الضوئي قبل تعريض الخلية الشمسية للتشعيع الإلكتروني (nil) .



الشكل (1) : التألق الكهربائي للخلية الشمسية GaInP/GaAs .

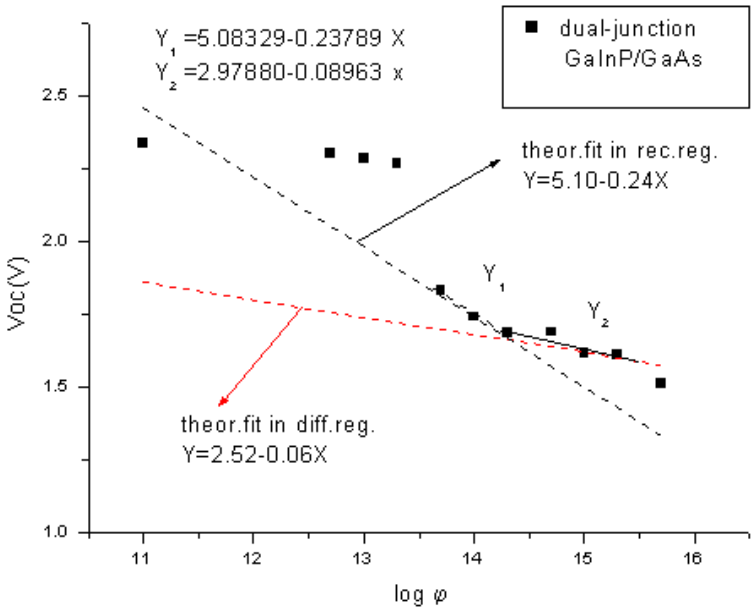


الشكل (2) : تغير I=f(V) للخلية الشمسية GaInP/GaAs مع تغير جرعة التشعيع الإلكتروني φ .

2 – قياس جهد الدارة المفتوحة V_{oc} :

نأخذ تقاطع المنحنيات السابقة I=f(V) مع المحور الأفقي فنحصل على قيم جهد الدارة المفتوحة V_{oc} لكل جرعة تشعيع إلكتروني . يبين الشكل (3) المنحني البياني(V_{oc}=f(log φ ، حيث أن النقطة الأولى من منحني هذا الشكل تعبر عن قيمة المقدار المقاس قبل تعريض الخلية الشمسية للتشعيع الإلكتروني وتجاوزاً وضعنا هذه

النقطة مقابل القيمة $\varphi = 10^{11} elec.cm^{-2}$ كي لا نبدأ من الصفر (نفس الملاحظة بالنسبة للأشكال اللاحقة) .
نلاحظ من هذا المنحني أن التناقص في جهد الدارة المفتوحة يبدأ من أجل $\varphi > 2\times10^{13} elec.cm^{-2}$.



الشكل (3): تغير جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaInP/GaAs مع تزايد جرعة التشعيع الإلكتروني φ .

رغم أن الدراسات السابقة كانت تهمل منطقة الانتشار ، [7] ، [9] ، وتعتبر التناقص الخطي لجهد الدارة المفتوحة V_{oc} فقط يظهر في منطقة إعادة الاتحاد . بالواقع ، يمكن أن نحدد على هذا المنحني منطقتي الانتشار وإعادة الاتحاد .

انطلاقاً من النقاط التجريبية وبتطبيق الملاءمة النظرية باستخدام العلاقة $\mu_r = 4\mu_d$ ، والتي تنص على أن ميل منطقة إعادة الاتحاد تساوي إلى أربعة أضعاف ميل منطقة الانتشار . إن غايتنا من هذه الطريقة هي تعيين القيم التجريبية الحقيقية للمعاملات $\varepsilon_{d,r}$ ، فنجد النتائج الآتية :

عندما يكون جهد الدارة المفتوحة في نظام الانتشار ، من الشكل السابق نجد :

$$V_{oc} = 2.52 - 0.06\log\varphi \qquad \textbf{(V)}$$

أما في نظام إعادة الاتحاد ، فسنجد العلاقة :

$$V_{oc} = 5.10 - 0.24\log\varphi \qquad \textbf{(V)}$$

يمكننا أن نعتبر أن هذه النتائج هي النتائج التجريبية لأننا حصلنا عيها من النقاط التجريبية . أما بالنسبة لقيم الميل $\mu_{d,r}$ فهي التي تظهر على المنحني البياني للشكل السابق من أجل النقاط التجريبية وهي قريبة جداً من قيم العلاقتين السابقتين وبنفس الوقت تحقق العلاقة $\mu_r \cong 4\mu_d$.

بنفس الطريقة ، يمكننا أن نذكر النتائج التجريبية باستخدام الملاءمة النظرية والتي حصلنا عليها سابقاً لخلايا شمسية ذات وصلة وحيدة من النوع GaAs و GaInP ، لأنها مجتمعةً تشكل الخلية الشمسية GaInP/GaAs قيد الدراسة .

من أجل الخلية الشمسية GaAs ، [15] ، وجدنا :

في نظام الانتشار : $V_{oc} = 1.02 - 0.03\log\varphi$ (V)

في نظام إعادة الاتحاد : $V_{oc} = 2.36 - 0.12\log\varphi$ (V)

من أجل الخلية الشمسية GaInP ، [14] ، وجدنا :

في نظام الانتشار : $V_{oc} = 1.46 - 0.03\log\varphi$ (V)

في نظام إعادة الاتحاد : $V_{oc} = 2.80 - 0.12\log\varphi$ (V)

لحساب القيم النظرية لمعاملات جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaInP/GaAs ، نحسب أولا القيم النظرية لهذه المعاملات للخلايا الشمسية المنفصلة (ذات الوصلة الوحيدة) ثم نستخدم العلاقة (27) .

نكتب في الجدول (I) المعاملات النظرية والتجريبية المستخدمة للخليتين الشمسيتين GaInP و GaAs .

الجدول (I) : المعاملات النظرية والتجريبية للخلايا الشمسية المنفصلة GaInP و GaAs :

معامـــــل الخلية الشمسية	$\alpha(\lambda_1)$	D	ν	$N^*_{A,D}$	n_i	V_d	W_0	$\kappa\sigma$	τ_0
الواحدة	cm^{-1}	cm^2s^{-1}	$cm\ s^{-1}$	cm^{-3}	cm^{-3}	V	μ m	cm	s
GaInP	$6x10^5$	60	$3.5\ x10^7$	$1.5\ x10^{17}$	$2.3\ x10^2$	1.5	$1.8\ x10^{-2}$	$1.7\ x10^{-13}$	$6.7\ x10^{-8}$
GaAs	10^4	200	$4.7\ x10^7$	$4\ x10^{17}$	10^6	1.2	$1.8\ x10^{-2}$	$4.89\ x10^{-13}$	$2.18\ x10^{-5}$

$N^*_{A,D}$: N_A من أجل الخلية الشمسية GaInP و N_D من أجل الخلية الشمسية GaAs .

باستخدام العلاقات (20) ، (21) و (26) نحسب القيم النظرية للمعاملات $\varepsilon_{d,r}$ للخلايا الشمسية GaAs و GaInP نظراً لعدم توفر القيم النظرية لمعاملات الخلايا الشمسية متعددة الوصلات والتي ذكرناها في الجدول (I) لذلك نستخدم العلاقة (27) عند حساب القيم النظرية للمعاملات $\varepsilon_{d,r}$ و $\mu_{d,r}$ للخلية الشمسية (dual-junction) GaInP/GaAs ، والتي منها نكتب :

$$\mu = \sum_{j=1,2} \mu_j \quad \text{و} \quad \varepsilon = \sum_{j=1,2} \varepsilon_j$$

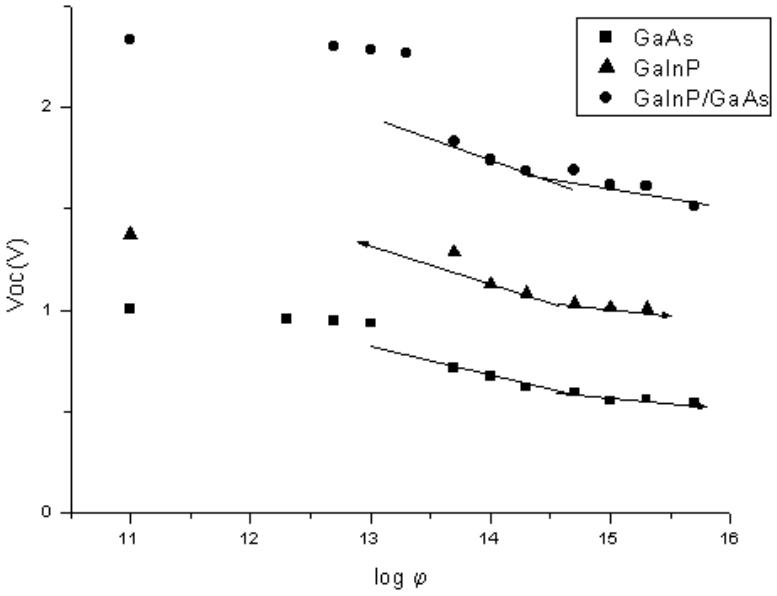
نلخص هذه النتائج في الجدول (II) .

الجدول (II) : مقارنة بين النتائج النظرية والتجريبية لمعاملات جهد الدارة المفتوحة للخلايا الشمسية GaAs و GaInP و GaInP/GaAs :

القيم التجريبية				القيم النظرية			
$\mu_d(V)$	$\mu_r(V)$	$\varepsilon_d(V)$	$\varepsilon_r(V)$	$\varepsilon_d(V)$	$\mu_r(V)$	$\mu_d(V)$	$\varepsilon_r(V)$

الخلية الشمسية							
2.73	1.43	0.12	0.03	2.36	1.02	0.12	0.04
GaAs							
3.22	1.86	0.12	0.03	2.80	1.46	0.14	0.04
GaInP							
5.95	3.29	0.24	0.06	5.10	2.52	0.24	0.08
GaInP/GaAs							

من الجدول السابق نلاحظ التقارب الواضح بين النتائج التجريبية والنظرية .



الشكل (4) : تغير جهد الدارة المفتوحة للخلايا الشمسية GaAs و GaInP و GaInP/GaAs مع تزايد جرعة التشعيع الإلكتروني φ .

يبين الشكل (4) المنحنيات البيانية لتغيرات V_{oc}=f($\log \varphi$) لمجمل الخلايا الشمسية المستخدمة في هذه الدراسة . من هذا الشكل نلاحظ ، أن التناقص الذي يطرأ على جهد الدارة المفتوحة نتيجة التشعيع الإلكتروني لخلية من هذه الخلايا هو نفسه ويبدأ من أجل $\varphi > 2\times10^{13} elec.cm^{-2}$ ، ومن البديهي أن جهد الدارة المفتوحة للوصلة الثنائية هو مجموع جهدي الدارة المفتوحة للوصلتين الأساسيتين ، وهذا ما يوضحه الشكل السابق .

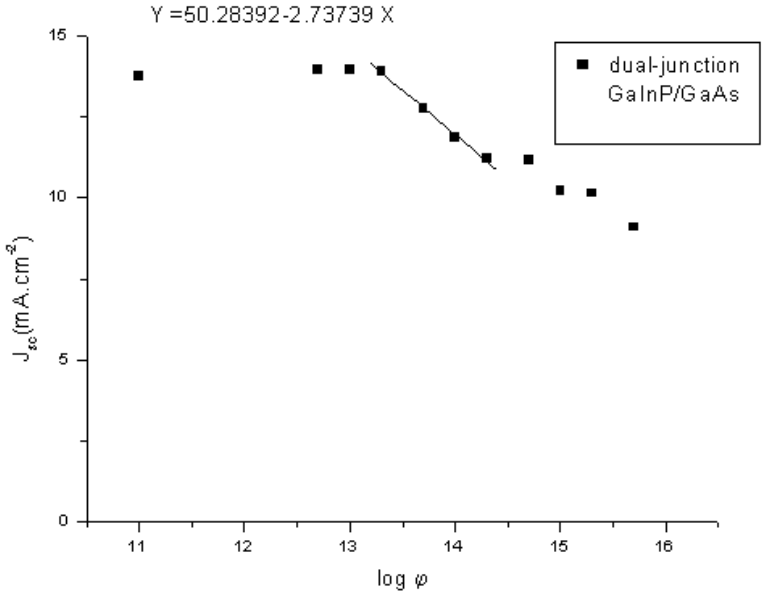
3 قياس كثافة تيار الدارة المقصورة J_{sc} :

عندما تعمل الخلايا الشمسية في نظام الدارة المقصورة فإن كثافة تيار هذه يساوي تقريباً إلى كثافة تيار الانتشار $J_{sc} \cong J_d$ ، [9] .

يساهم التشعيع الإلكتروني للخلية الشمسية في تناقص تيارها الضوئي ، ولكي نحصل على كثافة تيار الدارة المقصورة ، نأخذ قيم نقاط تقاطع المنحنيات البيانية للشكل (2) مع المحور الرأسي ، ثم نقسم كل منها على سطح الخلية وهو $4cm^2$.

يبين الشكل (5) المنحني البياني $J_{sc}=f(\log\varphi)$ للخلية الشمسية GaInP/GaAs . نلاحظ من هذا المنحني أن كثافة تيار الدارة المقصورة J_{sc} يتناقص خطياً بزيادة جرعة التشعيع الإلكتروني φ بدءاً من القيمة $\varphi > 2\times10^{13} elec.cm^{-2}$ وفق العلاقة :

$$J_{sc} = 50.28 - 2.74\log\varphi \qquad (\ mA.cm^{-2}\ )$$



الشكل (5): تغير كثافة تيار الدارة المقصورة لخلية شمسية GaInP/GaAs بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني φ .

نكتب أيضاً النتائج التجريبية التي حصلنا عليها [15] ، [14] لتناقص كثافة تيار الدارة المقصورة لخليتين شمسيتين مستقلتين ، حيث وجدنا :

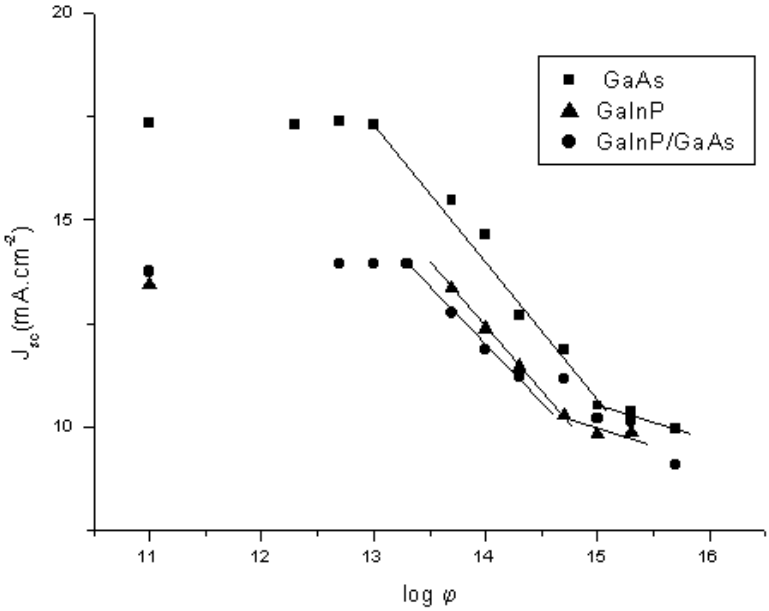
$$(\varphi\, J_{sc} = 62.47 - 3.45 \log\ mA.cm^{-2}\ )$$

$$\varphi\, J_{sc} = 51.17 - 2.77 \log \qquad (\ mA.cm^{-2}\ )$$

لكل من GaAs و GaInP على الترتيب .

نلاحظ من هذه النتائج أن كثافة تيار الدارة المقصورة للخلية الشمسية GaInP/GaAs هو نفسه للخلية الشمسية GaInP ، لأنه عند وصل خليتان شمسيتان على التسلسل فإن التيار الضوئي الذي تقدمه الخلية الشمسية الناتجة عن الوصل هو التيار الأقل شدةً . هذا ما تبينه العلاقات السابقة .

يبن الشكل (6) المنحنيات البيانية لتغيرات $J_{sc}=f(\log\varphi)$ للخلايا الشمسية المستخدمة في هذه الدراسة . نلاحظ أن تناقص كثافة تيار الدارة المقصورة لجميع هذه الخلايا ، يبدأ عند قيمة لجرعة التشعيع الإلكتروني $\varphi > 2\times10^{13} elec.cm^{-2}$.



الشكل (6): تغير كثافة تيار الدارة المقصورة للخلايا الشمسية GaAs و GaInP و GaInP/GaAs بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني φ .

نكتب في الجدول **III** النتائج النظرية والتجريبية لقيم معاملات كثافة تيار الدارة المقصورة للخلايا الشمسية المستخدمة في هذه الدراسة . مع ملاحظة أن النتائج النظرية للخلية الشمسية GaInP/GaAs هي نفسها للخلية GaInP .

الجدول III: مقارنة بين النتائج النظرية والتجريبية لمعاملات كثافة تيار الدارة المقصورة للخلايا الشمسية قيد الدراسة :

القيم النظرية		القيم التجريبية		
$\rho(mA.cm^{-2})$	$\xi(mA.cm^{-2})$	$\rho(mA.cm^{-2})$	$\xi(mA.cm^{-2})$	الخلية الشمسية
3.81	57	3.45	62.47	GaAs
3.40	63.10	2.77	51.17	GaInP
3.40	63.10	2.74	50.28	GaInP/GaAs

نكتب في الجدول **IV** قيم كثافة تيار الدارة المقصورة لهذه الخلايا قبل تعريضها للتشعيع الإلكتروني $J_{sc}(0)$.

الجدول IV : القيم التجريبية لكثافة تيار الدارة المقصورة للخلايا الشمسية قيد الدراسة :

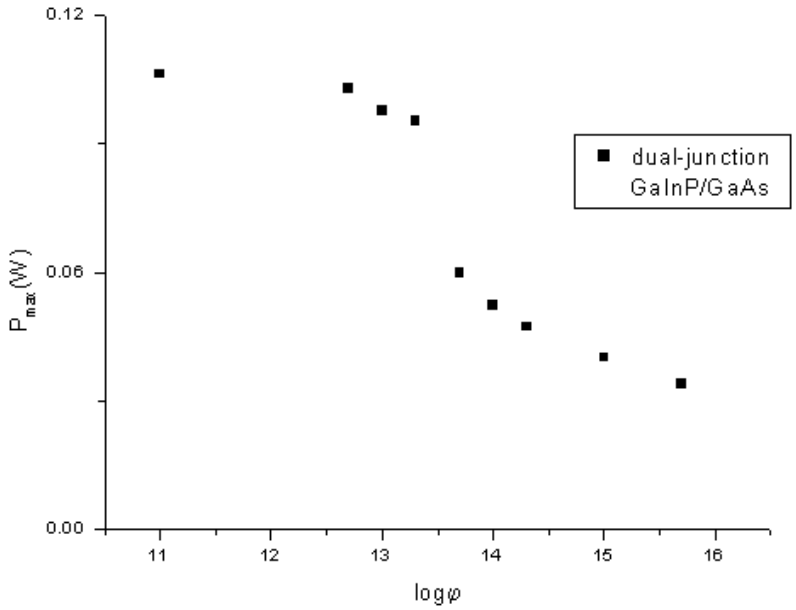
الخلية الشمسية	GaInP /GaAs	GaInP	GaAs
$J_{sc}(0)$ $(mA.cm^{-2})$	13.74	13.43	17.33

4- قياس مردود وعامل الملء للخلية الشمسية GaInP/GaAs :

إن الغاية الأساسية من استخدام الخلايا الشمسية متعددة الوصلات هي الحصول منها على أكبر طاقة ممكنة . نحصل على الاستطاعة العظمى من قيم المنحني البياني I=f(V) للشكل (2) ، وذلك برسم مستقيم

يمر من مبدأ الإحداثيات (الصفر) ويقطع كل منحني من منحنيات هذا الشكل بنقطة إحداثياتها (I_m,V_m) هي تيار وجهد الاستطاعة العظمى التي تقدمها الخلية الشمسية على الترتيب ، نختار النقاط السابقة بحيث يكون السطح $I_m \times V_m$ أعظمياً .

لقد قمنا بحساب كل من الاستطاعة العظمى ، [19] ، [20] ، وعامل الملء (fill factor) ، [21] ، ومردود الخلية الشمسية GaInP/GaAs ، [22] ، من العلاقات :



الشكل (7): تغيرات الاستطاعة العظمى بتابعية لوغاريتم تركيز جرعة التشعيع الإلكتروني φ .

$$P_{max} = I_m V_m$$

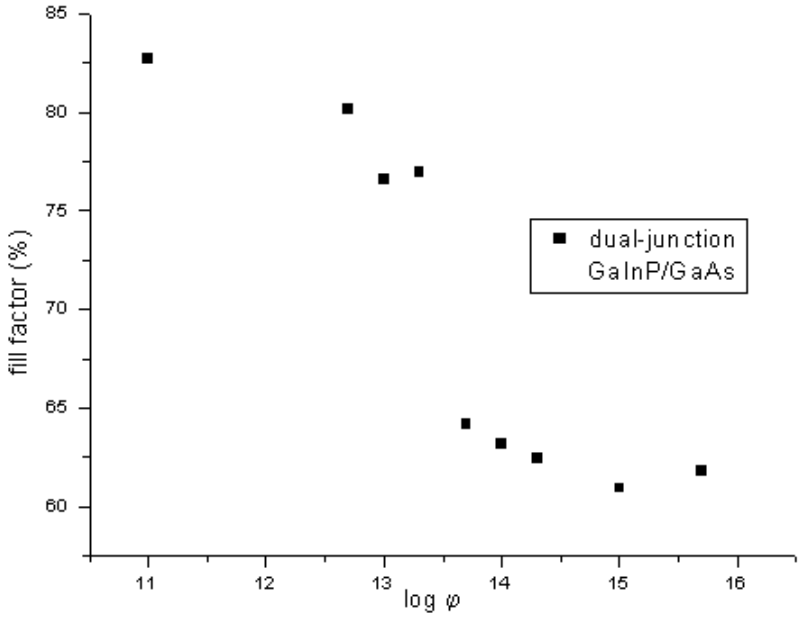
$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} V_{oc}}$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i}$$

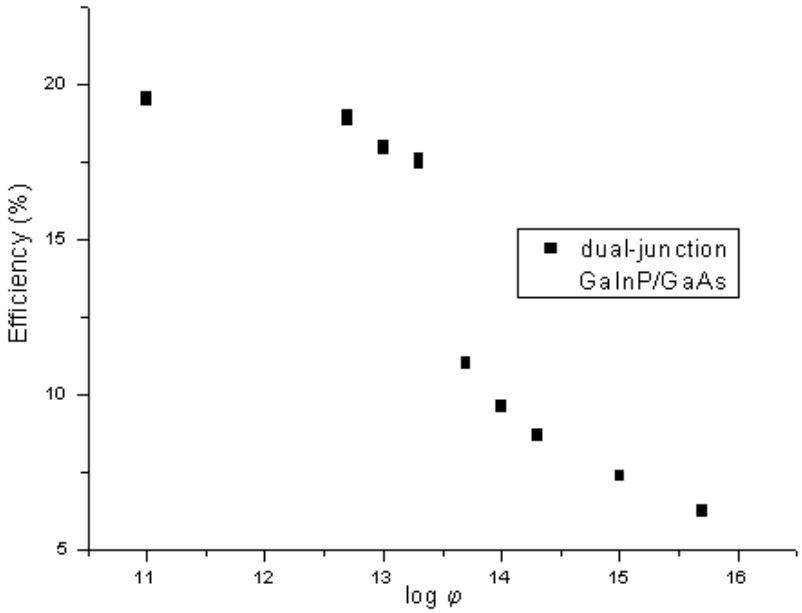
حيث P_i الاستطاعة الضوئية الواردة في واحدة السطح ولها القيمة $135.3\ mW \times cm^{-2}$ ، [22] .

تبين الأشكال (7) و (8) و (9) تناقص كل من الاستطاعة العظمى وعامل الملء ومردود الخلية الشمسية بتابعية لوغاريتم جرعة التشعيع الإلكتروني φ . نلاحظ التناقص الخطي لهذه المقادير الفيزيائية ، وأن مردود هذه الخلية يتناقص من النسبة 19.63% قبل تشعيعها إلى النسبة 6.27% عند تشعيعها إلكترونياً بجرعة $\varphi = 5 \times 10^{15} elec.cm^{-2}$ ، أي أنها فقدت تقريباً 2/3 من مردودها . كذلك يتناقص عامل الملء ، الذي يعتبر مؤشراً على تحويل الطاقة الشمسية ، من النسبة 82.7% إلى 60.8% ، بينما يتناقص في الخلية الشمسية GaAs من النسبة 75% إلى 55% ، [15] .

تؤكد النتائج السابقة على أهمية وفعالية استخدام الخلايا الشمسية متعددة الوصلات ، وهي تتوافق مع النتائج التي حصل عليها Nadvid S.F. وزملاؤه ، [23] ، عام 1999 من أجل خلية شمسية GaInP/GaAs ذات سطح $27.5cm^2$.



الشكل (8): تغيرات عامل الملء بتابعية لوغاريتم تركيز جرعة التشعيع الإلكتروني φ .



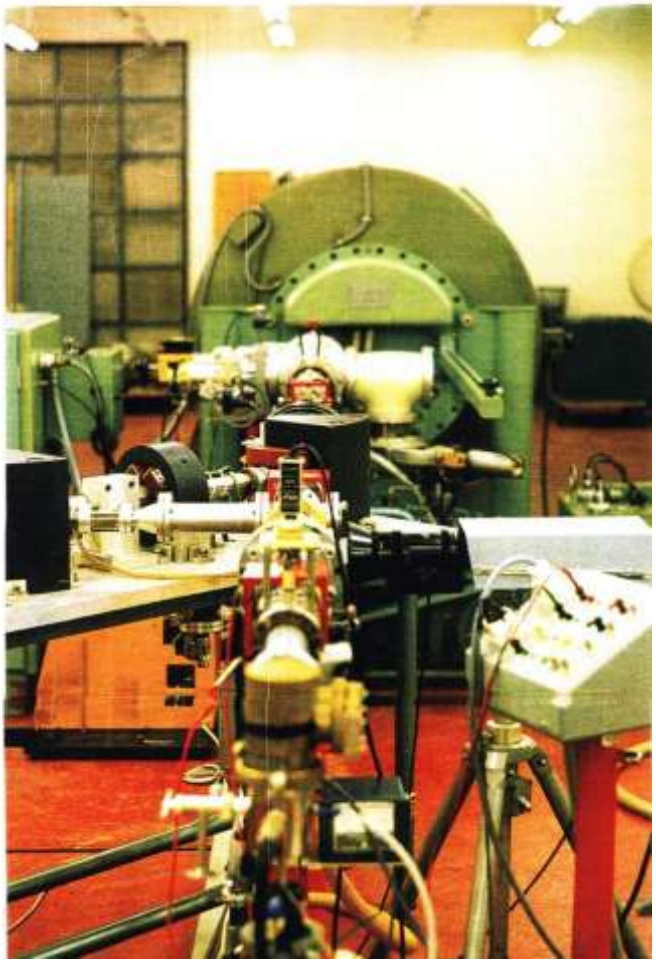
الشكل (9): تغيرات مردود الخلية الشمسية بتابعية لوغاريتم تركيز جرعة التشعيع الإلكتروني φ .

الخاتمة :

استطعنا من خلال نتائج هذا البحث (الذي أجريت قياساته في مختبر الأوساط غير المنتظمة واللامتجانسة في جامعة بيير وماري كوري في باريس عام 2002 مستفيداً من مهمة للبحث العلمي) أن نفسر بشكل دقيق آلية التلف للخلايا الشمسية بشكل عام عند تعريضها للتشعيع الإلكتروني . ولقد برهنا أن هذا التلف هو التناقص الخطي لكل من جهد الدارة المفتوحة والذي لا يقتصر على منطقة واحدة فقط بل على منطقتي الانتشار وإعادة الاتحاد ، وكثافة تيار الدارة المقصورة ، وهذا الأخير له السلوك نفسه .

انطلاقاً من الخصائص الإلكترونية للخلايا الشمسية ذات الوصلة الوحيدة والمعدة لاستخدامات الفضاء وجدنا علاقة نظرية أيضاً لهذه الخصائص من أجل خلية شمسية ثنائية الوصلة ، وبرهنا صحتها تجريبياً .

لقد برهنا أن الفائدة المباشرة لاستخدام الوصلة الثنائية في صناعة الخلايا الشمسية ، تكمن في مضاعفة الاستطاعة التي تقدمها هذه الخلايا ، وبنفس الوقت ترفع من كفاءتها و مردودها .



الملحق (1) : مسرع (Van de Graaf) في مختبر الأوساط غير المنتظمة واللامتجانسة في جامعة بيير وماري كوري في باريس VI.

المراجع:

.....

1- OLSON,J.M.et al.1990 . Appl. Phys. Lett. Vol.56 , No.7,pp 623-625 .

2- LAMMASNIEMI ,J. et al. 1998 .2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion 6-10 July 1998 VIENNA , AUSTRIA pp 3520-3523 .

3- KARAM,N.H. et al. 1998 .2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion 6-10 July 1998 VIENNA , AUSTRIA pp3534-3539 .

4- HISAMAUSU, T. et al 1998 .2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion 6-10 July 1998 VIENNA , AUSTRIA pp 3568-3571 .

5- AKIHIRO, M.et al. 2001 .Solar Energy Materials &Solar cells. Vol .66, pp585-592 .

6- YAMAGUCHI,M.et al.1997 – *Superior radiation –resistant properties of InGaP/GaAs tandem solar cells* . Appℓ. Phys. Lett .Vol.70,No.12 pp1566-1568.

7- DE ANGELIS, N. 2000 Thèse de Doctorat de l'université Pierre et Marie Curie (Paris-VI) .

8- HOVEL,H.J.1975.*Semiconductors and Semimetals* ,Vol. 11:Solar Cells , Academic Press . New York .

9- BOURGOIN,J.C.and ZAZOUI,M.2002.Semi.Scinc. and Tech.Vol.17,pp453-461.

10- DASH , W.C . and NEWMAN , R .1951 – Phys. Rev. Vol. 99 , pp 1151 .

11- HILL , D. E . 1964 – Phys . Rev . Vol . 133 , pp A866 .

12- YAMAGUCHI,M.et al.1996.Proc.of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists conference, (IEEE 1996,pp 167-170 Washington) .

13- SIMOEN,E.et al.1996 .Appl.Phys.Lett.Vol.69,pp2858 .

14- ZEIN EDDINE, A.et IBRAHIM, R.2003. Tishreen University Journal .To be published .

15- ZEIN EDDINE, A.2003. Tishreen University Journal .To be published .

16- ZAZOUI,M. et al.2002 .Radiation Effects on Componements and Systems (RADECS 2002) . Padova, Italie sept.19-20 , 2002 .

17- ZAZOUI,M. et al.2002 . Proc. Sixth European Space Power Conference , Porto, Portugal, 6-10May 2002 . pp747-751 .

18- FRASS,L.M. and KNECHTLI,R.C. 1978 , 13th IEEE Photovoltaic Specialists conference . pp 886-891.

19- YAMAGUCHI,M.et al.1998 . 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion 6-10 July 1998 VIENNA , AUSTRIA pp3524-3529 .

20- RANNELS,J.E. 2001 .Solar Energy Materials &Solar cells. Vol .66, pp3-8 .

21- BERTNESS,K.A. et al.1994 . Appl. Phys. Lett. Vol.65 , No.8,pp 989-991 .

22- KARAM,N.H. et al. 1999. IEEE Transactions on Electron Devices . Vol.46 , No. 10 ,
pp2116-2125 .

23- NAVID,S.F. et al.1999 . Presented at the 16th Space Photovoltaic Research and Development
(SPRAT) conf. Cleveland, OH , Aug. 13-Sept. 2 , 1999 .