

أثر التشعيع الإلكتروني على الجزء البيني لخلية شمسية معدة للاستخدام الفضائي

الدكتور عدنان زين الدين *
الدكتور رامز إبراهيم*

(قبل للنشر في 2003/7/16)

□ الملخص □

استخدمنا في هذه الدراسة ، بشكل أساسي ، الخلايا الشمسية المعدة للفضاء الخارجي مستفيدين من المعلومات السابقة المتوفرة لدينا عن آلية التلف لهذه الخلايا عند تعريضها للتشعيع الإلكتروني .
و درسنا ، بشكل خاص ، التغير الخطي لكل من كثافة تيار الدارة المقصورة وتوتر الدارة المفتوحة بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني ϕ .

بينت القياسات ، تغير توتر الدارة المفتوحة للخلايا الشمسية التي درسناها بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني ϕ :
بالنسبة لخلايا شمسية من النوع GaInP sub-cell ، و pure Ge ، فقد وجدنا أن علاقة الميل بين منطقتي الانتشار وإعادة الاتحاد محققة ، وهي أن ميل منحنى التوتر بتابعية جرعة التشعيع لمنطقة إعادة الاتحاد يساوي أربعة أضعاف مثيله في منطقة الانتشار .

أما بالنسبة لخلية شمسية من النوع Ge sub-cell ، فإن المنحنى يبدي ميلاً ضعيفاً ، مما يجعلنا نستنتج بأن هذه الخلية لا تتأثر كثيراً بالتشعيع الإلكتروني ϕ .

بينما تغير كثافة تيار الدارة المقصورة لجميع هذه الخلايا يتناقص خطياً بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني ϕ .
لقد برهنا أن الفائدة المباشرة لعملنا هذا هي معرفة سلوك هذه الخلايا في المهمات البعيدة ، أي عمل هذه الخلايا في درجة حرارة ثابتة وتحت تدفق ضوئي ضعيف. وتبين لنا بأنه يجب المضي قدماً في دراسة الخلية الشمسية البينية GaInP ، وخصوصاً من أجل الخلايا التي تعتمد صناعتها على العناصر : GaAs/GaInP/Ge ، وكذلك إعادة النظر في الدراسات السابقة التي أجريت على الجرمانيوم النقي (pure Ge) وعلى الخلايا الشمسية البينية المصنوعة من الجرمانيوم (Ge sub-cell) .

إن عملنا هذا يفتح أفاقاً واسعة مع بدء استخدام الخلايا الشمسية الفضائية المتعددة الوصلات والضرورية لزيادة استطاعة الأقمار الصناعية .

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

Dégradation D'un Sub-Cell Solair Spatiale Sous L'effet D'irradiation Electronique

Dr. Adnan Zein Eddine*
Dr. Ramez Ibrahim*

(Accepted 16/7/2003)

□ RÉSUMÉ □

Notre étude ayant été faite en utilisant principalement des cellules solaires spatiales, nous avons profité des connaissances acquises pour étudier en détail le mécanisme de dégradation de celles-ci sous l'effet d'irradiation électronique.

Nous avons en particulier étudié la variation linéaire de la densité du courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert en fonction de la dose d'irradiation électronique φ .

Les mesures ont montré que, la tension du circuit ouvert des cellules solaires que nous avons étudié, varie en fonction de la dose d'irradiation électronique φ :

En ce qui concerne les cellules solaires GaInP sub-cell et pure Ge, nous avons trouvé que la relation de la pente de la courbe représentant la tension en fonction de la dose d'irradiation φ entre les deux zones : diffusion et recombinaison, est vérifiée avec très bonne approximation, cela veut dire que l'une est le quadruple de l'autre. Pour la cellule solaire Ge sub-cell, ce courbe montre une pente approximativement constante, ce qui nous a amené à déduire que ce genre de cellules n'est pas influencé beaucoup par la dose d'irradiation électronique φ .

Tandis que la variation linéaire de la densité du courant de court-circuit pour toutes ces cellules diminue linéairement en fonction de la dose d'irradiation électronique φ .

Nous avons eu alors la possibilité de démontrer l'utilité directe de notre travail comme l'étude du comportement des cellules dans des missions lointaines c'est-à-dire correspondant à un fonctionnement à température constante et sous faible flux lumineux.

Pour ces cellules à base de GaAs/ GaInP / Ge, il va falloir compléter l'étude sur GaInP sub-cell et reprendre les vieilles études sur pure Ge et Ge sub-cell.

Notre travail ouvre donc de larges perspectives avec l'arrivée des cellules spatiales multijonctions nécessitées par l'augmentation de la puissance des satellites.

* Maître de conférences au Département de Physique Faculté des Sciences Université de Tichrine Lattaquié Syrie.

مقدمة :

تستخدم الخلايا الشمسية السيليكونية على نطاق واسع ، خصوصاً عند استعمالها في الأقمار الصناعية التي تستغرق رحلاتها زمناً طويلاً ، حيث تكون الظروف الخارجية غير اعتيادية. وهذا هو السبب الأساسي في المحاولات الجارية لتطوير صناعة هذه الخلايا ، بغية الحصول على أكبر استطاعة ممكنة لها. بدأ يظهر في السنوات الأخيرة جيل جديد من الخلايا الشمسية ونال اهتمام الدراسات العلمية كي يوضع قيد الاستخدام ، وهي الخلايا الشمسية متعددة الوصلات (multi-junction) [1] ، وخاصة منها تلك التي تتألف من ثلاثة وصلات (triple-junction) .

نهتم في دراستنا هذه بخلية شمسية من النوع GaAs/GaInP/Ge ، ولكي ندرس تأثير التشعيع الإلكتروني على هذه الخلايا ، قمنا في السابق بدراسة خلية واحدة منها وهي GaAs. والآن نكمل هذه الدراسة وذلك بعرض النتائج التي حصلنا عليها عندما نعرض خلية شمسية بينية (sub-cell) من النوع GaInP [2] وهي الجزء البيني من الخلية الشمسية ثلاثية الوصلات ، أما العناصر الأخرى ، فهي موجودة ولكنها لا تلعب أي دور في التيار الضوئي الناتج عن الخلية ، أي هي عناصر غير فاعلة . كذلك ندرس تأثير التشعيع الإلكتروني على خلية شمسية من الجرمانيوم النقي (pure Ge) ، وخلية أخرى بينية من الجرمانيوم (Ge sub-cell) من أجل المقارنة بين نتائجهما . تعتبر هذه الدراسة ، بالإضافة إلى الدراسة السابقة التي أجريناها على الخلية الشمسية GaAs ، كمدخل لدراسة خلية شمسية من النوع GaAs/GaInP حيث تتألف من وصلتين فقط (dual-junction) ، وأخرى ثلاثية الوصلات وذلك بإضافة عنصر الجرمانيوم إلى الخلية السابقة (triple-junction) .

الهدف من البحث :

يهدف هذا البحث إلى دراسة الخلايا الشمسية في ظروف مشابهة قدر المستطاع للظروف التي يمكن أن تتعرض لها هذه الخلايا في الفضاء الخارجي. وهذه الخلايا ثلاثية الوصلات من النوع GaAs/GaInP/Ge . مما يقتضي حاجتنا الماسة لمعرفة كيف تتصرف أية خلية شمسية منفردة من الخلية السابقة عند تعريضها للتشعيع الإلكتروني .

لقد درسنا سابقاً الخلية الشمسية GaAs [3]، وهنا ندرس الخلية الشمسية البينية GaInP والتي تضم العناصر الباقية كأنصاف نواقل غير فاعلة ، وهذه الخلية عالية الجودة مصنعة من قبل شركة Emcore الفرنسية مساحتها 4cm^2 ، وهي من النوع n^+p [4] ، محضرة بطريقة MOCVD [5] (metal organic chemical ، vapor deposition) ، ومنمأة على قاعدة p مشوية بتركيز $N_A=1.5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ [6].

كذلك درسنا خليتين شمسييتين Ge مساحة كل منهما 0.13cm^2 من صنع معهد Fraunhofer الألماني لأنظمة الطاقة الشمسية (ISE). الأولى من الجرمانيوم النقي والأخرى بينية .

لقد قمنا بتعريض هذه الخلايا للتشعيع الإلكتروني باستخدام مسرع من نوع (Van de Graaf) يحرر حزماً من الإلكترونات بطاقة 1MeV وبكثافة تيار من مرتبة $1\mu\text{A.cm}^{-2}$ [7] ، ويسمح بالحصول على تركيز متجانس

للإلكترونات على سطح الخلية وبنفس الوقت يدخل فيها عيوباً (defects) على مراحل عند زيادة جرعة التشعيع بطريقة دقيقة ومراقبة .

نهتم فقط بالعيوب التي تلعب دوراً أساسياً كمراكز إعادة اتحاد غير مشعة (non-radiative recombination centers) أي الانتقال من سوية طاقة إلى أخرى بواسطة سوية مساعدة تقع بين السويتين السابقتين ضمن العصابة المحظورة [8] .

لدراسة الفولطية الضوئية (photovoltaic) لهذه الخلايا ، قمنا بتعريضها لإضاءة قريبة جداً من الإضاءة التي تتعرض لها عندما تكون في الفضاء الخارجي وهي من مرتبة 1AM (1Air masse) ، وهي عبارة عن مزيج من إضاءتي مصباحين ، احدهما من نوع كوارتز + هالوجين (Qt H) تسلط إنارته مباشرة على الخلية الشمسية، والآخر من الكزيتون (Xenon) يسلط على الخلية الشمسية بواسطة مرآة شفافة وعاكسة توضع أمام المصباح بزواوية 45⁰ .

لقد تمت هذه الدراسة على النحو التالي :

1- قياس الميزة I=f(V) لهذه الخلايا في حالتها الإضاءة والظلام ، وقياس تغيراتها بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني j .

2- دراسة تغيرات كل من توتر الدارة المفتوحة V_{oc} وكثافة تيار الدارة المقصورة J_{sc} لهذه الخلايا بتابعية جرعة التشعيع الإلكتروني j .

النتائج العملية والمناقشة :

كنا قد برهنا في دراسة سابقة [3] ، أن التناقص الخطي لكل من كثافة تيار الدارة المقصورة J_{sc} وتوتر الدارة المفتوحة V_{oc} بتابعية لوغاريتم جرعة التشعيع الإلكتروني (log j) ، من أجل التدفق الضوئي في الفضاء ، يمكن أن يعطى بالعلاقتين :

$$J_{sc} = x - r \log j \quad (1)$$

$$V_{oc} = e - m \log j \quad (2)$$

لقد برهنا من أجل الخلايا الشمسية التي تتألف من وصلة وحيدة فقط ، فإن المعامل m هو عبارة عن مضروب للمقدار 2.3kT/q [9] ، أي :

$$m = 2.3 \frac{kT}{q} i \quad (3)$$

حيث i = 1/2 في نظام الانتشار ، i = 2 في نظام إعادة الاتحاد ، k ثابت بولتزمان ، T درجة الحرارة بالدرجات المطلقة ، q شحنة الإلكترون. ووجدنا أن قيمة هذا المعامل في درجة حرارة الغرفة وفي نظام الانتشار $m_i = 3 \cdot 10^{-2} V(\log j)^{-1}$ ، وله القيمة $m_i = 1.2 \cdot 10^{-1} V(\log j)^{-1}$ في نظام إعادة الاتحاد .

بينما نحصل على المعامل r من التدفق الضوئي f (l) ، ومن معامل الامتصاص a (l) لمادة الخلية الشمسية ، ويعطى بالعلاقة :

$$r = 1.15 \frac{qA}{r} \quad (4)$$

حيث A تعطى بالعلاقة :

$$A = f(l) \exp[-a(l)(d+W)] \quad (5)$$

d سماكة الخلية الشمسية ، W عرض المنطقة الخالية من الشحنات الحرة (depletion region) ، أما r فهو مقلوب عمق منطقة الانتشار والذي يخص معامل الامتصاص $a(l)$ لمادة الخلية الشمسية (المتصل) ، ويعطى بالعلاقة [10],[11] :

$$a(l) = a(0) \exp(-rl) \quad (6)$$

تكون العلاقة (1) صالحة لأن الثابت A يتغير ببطء بتابعية طول الموجة مقارنةً بالمقدار $a(l)$. بينما يتعلق المعاملان x, e بالتركيز وبالخصائص الإلكترونية لمراكز إعادة الاتحاد المحدثة بالتشعيع الإلكتروني والتي تمثل عيوباً في الخلية الشمسية [12] ، تتشكل بمعدل k [13] ، ويمكن أن نكتب [3] :

$$x = \frac{qA}{r} \left[\ln a(l_1) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{ksv}{D} \right) \right] \quad (7)$$

$$e = j \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_{d,r}^*} \right) \quad (8)$$

حيث l_1 أصغر قيمة لطول الموجة والتي من أجلها لا يمكن إهمال المقدار $f(l)$ ، أما s فتمثل المقاطع العرضية لاصطياد حوامل الشحنة الأقلية ، v سرعة الحركة الحرارية ، بينما $j=1$ في نظام الانتشار (d)، و $j=2$ في نظام إعادة الاتحاد (r). ونكتب أيضاً في الحالة العامة :

$$J_d^* = qn_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{D_n s_n v_n k} + \frac{1}{N_D} \sqrt{D_h s_h v_h k} \right) \quad (9)$$

$$(10) J_r^* = \frac{\rho}{2} n_i k T W_0 \left(\frac{k^2 s_n v_n s_h v_h}{V_d} \right)^{1/2}$$

حيث n_i تركيز حوامل الشحنة الذاتية ، أما V_d فهو حاجز الكمون الذي من أجله يكون عرض المنطقة الخالية من الشحنات الحرة يساوي W_0 ، بينما N_{AD} تركيز الشوائب الآخذة والمأنحة في كل طرف من المتصل علالترتيب ، D معامل الانتشار لحوامل الشحنة الأقلية ، ويرتبط مع عمرها t ومسافة انتشارها L بالعلاقة

$$L = \sqrt{Dt} \quad (11)$$

:1

قياس الميزة المباشرة أمبير - فولت [I=f(V)] في حالتى الإضاءة والظلام :

تعطى كثافة التيار الكهربائي لخلية شمسية (في حالة انحياز أمامي) بدون إضاءة بالعلاقة [14] , [15] :

$$J(V) = J_1 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] + J_2 \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (12)$$

يعبر الحد الأول عن كثافة تيار الانتشار J_d لحاملات الشحنة الأقلية في منطقتي الخلية الشمسية المعتدلتين ، بينما يعبر الحد الثاني عن كثافة تيار إعادة الاتحاد J_r في المنطقة الخالية من الشحنات الحرة ، J_1 و J_2 كثافة تيارى الإشباع ، ويعطيان بالعلاقين :

$$(13) \quad J_1 = qn_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{t_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_h}{t_h}} \right)$$

$$J_2 = \frac{\rho}{2} n_i \frac{kT}{\sqrt{t_n t_h}} \frac{W_0}{\sqrt{V_d}} \quad (14)$$

عند تعريض الخلية الشمسية للتشعيع الإلكتروني J ، فإن مراكز إعادة الاتحاد تتشكل ضمن العصابة المحظورة بنسبة تركيز N ، وبمعدل k وفق العلاقة [16] :

$$N = kj \quad (15)$$

ومن علاقة عمر حاملات الشحنة الأقلية :

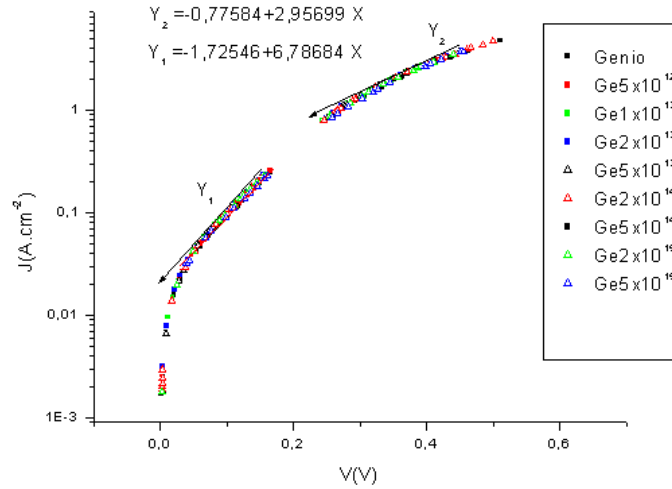
$$t = (kj \text{ s v})^{-1} \quad (16)$$

سوف نجد علاقتي كثافة تيارية الإشباع بتابعية جرعة التشعيع :

$$J_1 = J_d^* j^{1/2} \quad (17)$$

$$J_2 = J_r^* j \quad (18)$$

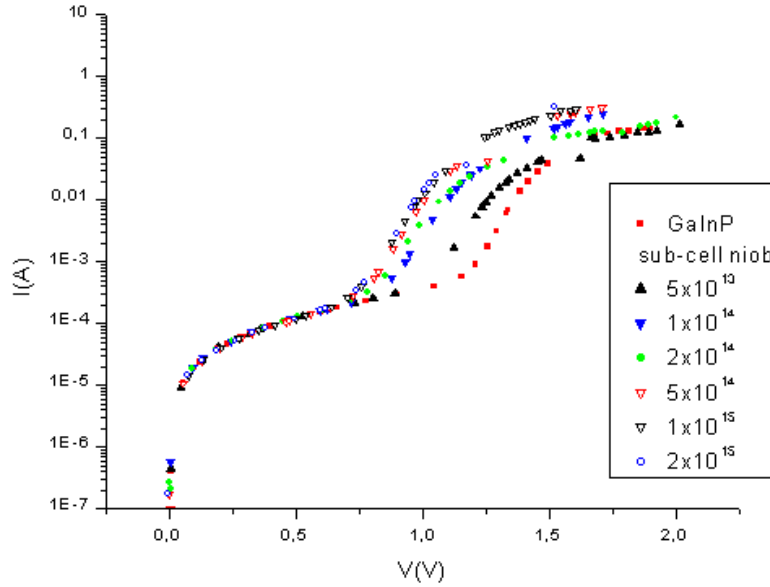
يبين الشكل (1) في مستوي نصف لوغاريتمي كثافة التيار بتابعية التوتر لخلية شمسية ببنية من الجرمانيوم (Ge sub cell) في حالة انحياز أمامي وذلك من أجل قيم مختلفة لجرعة التشعيع الإلكتروني J ، بدءاً من حالة عدم التشعيع وفي الظلام (n.i.o.) حتى القيمة $J = 5 \cdot 10^{15} \text{ elec.cm}^{-2}$. نلاحظ أن هذا المنحني لا يتغير رغم زيادة J لأن عمر العيوب المحدثة بالتشعيع الإلكتروني أصغر من عمر العيوب الموجودة أصلاً في مادة الخلية الشمسية [6] ، لذلك تتطابق المنحنيات الناتجة. يمكن أن نحدد على هذه المنحنيات منطقتي الانتشار وإعادة الاتحاد حيث أن ميل المنطقة الأولى يساوي ضعف ميل المنطقة الثانية (تقريباً في حالة الشكل) .



الشكل (1) : تغير $J=f(V)$ للخلية الشمسية Ge sub cell بدون إضاءة مع تغير جرعة التشعيع الإلكتروني J .

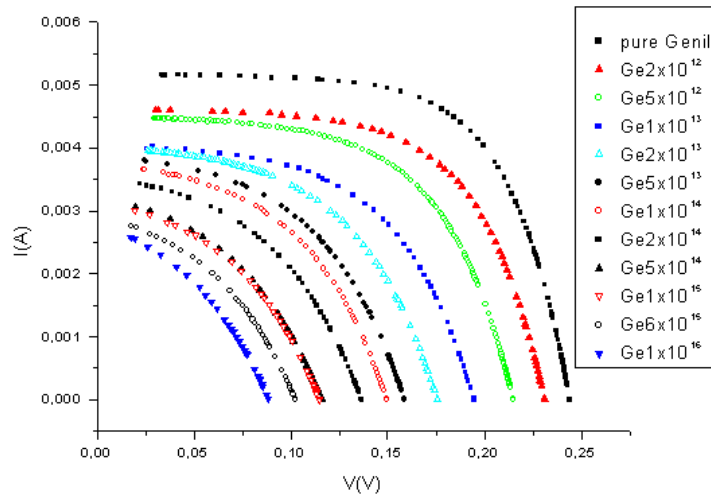
كذلك الأمر بالنسبة للشكل (2) ، حيث يبين في مستوي نصف لوغاريتمي الميزة $I=f(V)$ لخلية شمسية ببنية من النوع GaInP في حالة انحياز أمامي وفي الظلام. نلاحظ أن المنحنيات الناتجة تتراح ضمن مجال

للتوتر مع بقاء قيمة التيار ثابتة رغم زيادة جرعة التشعيع الإلكتروني حتى القيمة $j = 2 \cdot 10^{15} \text{ elec.cm}^{-2}$ ، ثم تتطابق عند الاقتراب من قيم تيار الاستقطاب العكسي للخلية الشمسية وهو صغير جداً.

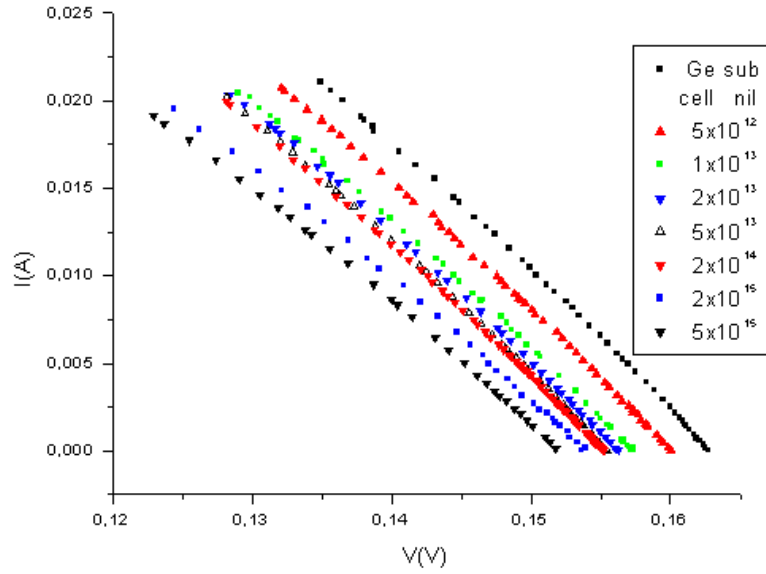


الشكل (2) : تغير $I=f(V)$ للخلية الشمسية GaInP sub cell بدون إضاءة مع تغير جرعة التشعيع الإلكتروني j .

تبين الأشكال (3) ، (4) ، (5) التيار الكهربائي الضوئي $I=f(V)$ الناتج عن خلية شمسية قبل وأثناء تعريض هذه الخلايا للتشعيع الإلكتروني ، وتختلف جرعات التشعيع من خلية لأخرى . نلاحظ في جميع الأشكال السابقة تناقص كل من التيار الكهربائي والتوتر مع زيادة جرعة التشعيع الإلكتروني j



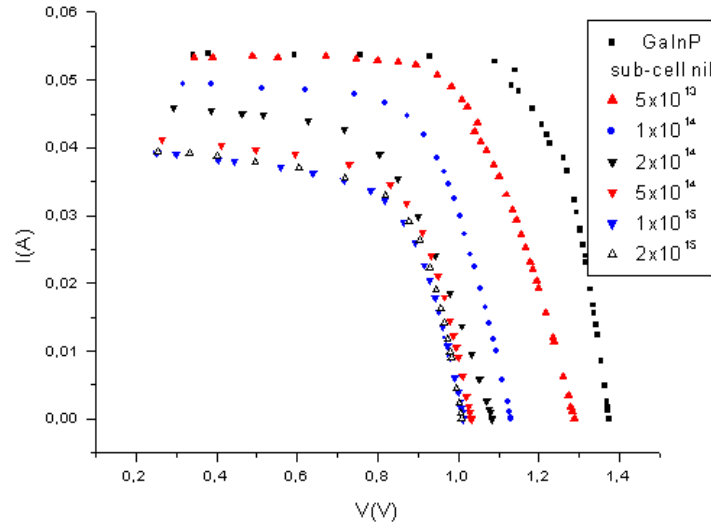
الشكل (3) : تغير $I=f(V)$ للخلية الشمسية pure Ge في حالة الإضاءة مع تغير جرعة التشعيع الإلكتروني j . من أجل خلية شمسية من النوع Ge النقي ، الشكل (3) ، فإن التيار الكهربائي يتناقص بدءاً من قيمة لجرعة التشعيع $2 \times 10^{12} \text{ elec.cm}^{-2}$ حتى القيمة $1 \times 10^{16} \text{ elec.cm}^{-2}$ ، والمنحني الأول في الشكل السابق يوافق قيم التيار الضوئي قبل تعريض الخلية الشمسية للتشعيع الإلكتروني (nil) .



الشكل (4) : تغير $I=f(V)$ للخلية الشمسية Ge sub cell في حالة الإضاءة مع تغير جرعة التشعيع الإلكتروني ج .

بينما في حالة الخلية الشمسية البينية Ge الشكل (4) فنكتفي بالقيمة $5 \times 10^{15} \text{elec.cm}^{-2}$ لجرعة التشعيع الإلكتروني .

كذلك الأمر بالنسبة للخلية الشمسية البينية GaInP الشكل (5) حيث أن المنحني الأول في هذا الشكل يوافق قيم تحولات التيار الضوئي قبل تعريضها للتشعيع الإلكتروني ، ثم نزيد هذه الجرعات حتى القيمة $2 \times 10^{15} \text{elec.cm}^{-2}$ والتي تتعلق بتيار الإشباع الخاص لكل خلية شمسية .



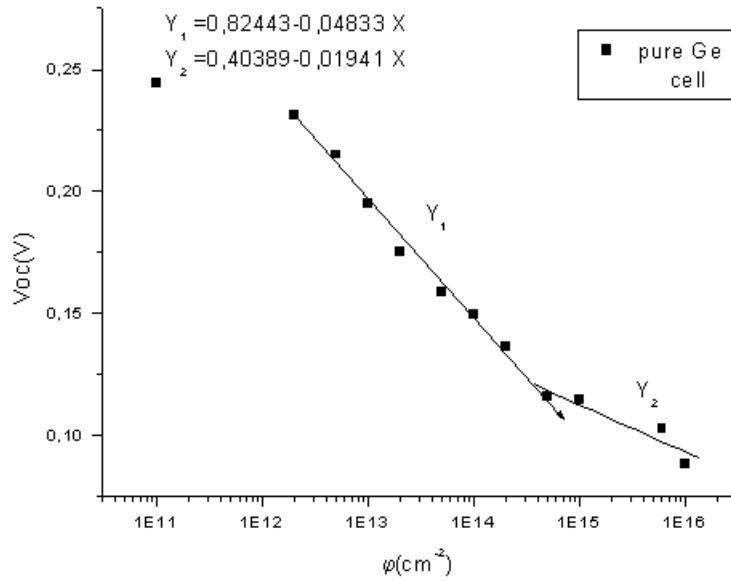
الشكل (5) : تغير $I=f(V)$ للخلية الشمسية GaInP sub cell في حالة الإضاءة مع تغير جرعة التشعيع الإلكتروني ج .

نشير أخيراً إلى أن القيمة الأولى للتيار في كل منحني من منحنيات الأشكال الثلاثة السابقة تمثل تيار الدارة المقصورة I_{sc} ، بينما القيمة الأخيرة القريبة من المحور V تمثل توتر الدارة المفتوحة V_{oc} .

2 : قياس توتر الدارة المفتوحة V_{oc} :

نأخذ نقاط تقاطع المنحنيات السابقة $I=f(V)$ مع المحور الأفقي للخلايا الشمسية المعرضة للإضاءة وللتشعيع الإلكتروني فنحصل على قيم توتر الدارة المفتوحة.

يبين الشكل (6) وفي مستوي نصف لوغاريتمي المنحني البياني $V_{oc} = f(j)$ للخلية الشمسية Ge النقي. نلاحظ من هذا المنحني أن التناقص في توتر الدارة المفتوحة يبدأ من أجل $j > 2 \cdot 10^{12} \text{ elec.cm}^{-2}$ ، ويمكن أن نحدد على هذا المنحني منطقتي الانتشار وإعادة الاتحاد [9] ، حيث أن ميل الأخيرة يساوي أربعة أضعاف ميل منطقة الانتشار .



الشكل (6): تغير توتر الدارة المفتوحة للخلية الشمسية Ge النقي مع تزايد جرعة التشعيع الإلكتروني j .

عندما يكون توتر الدارة المفتوحة للخلية الشمسية في نظام إعادة الاتحاد ، نكتب باستخدام العلاقة (2) :

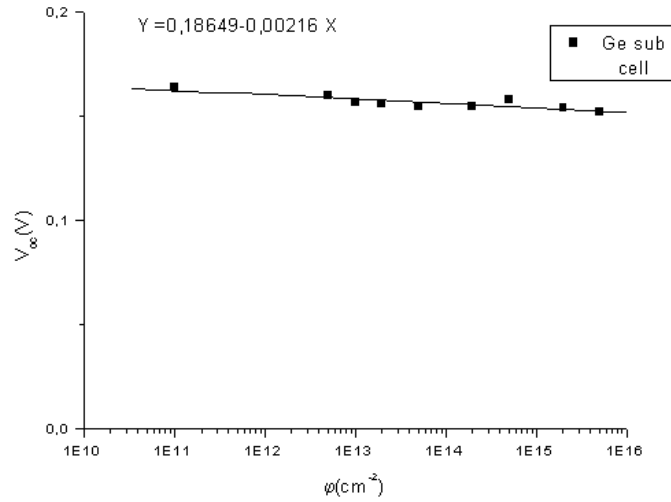
$$V_{oc} = 0.82 - 0.05 \log j \quad (V)$$

أما في نظام الانتشار فسوف نجد العلاقة :

$$V_{oc} = 0.4 - 0.02 \log j \quad (V)$$

نشير أيضاً إلى أن النقطة الأولى من منحني هذا الشكل تعبر عن قيمة V_{oc} قبل تعريض الخلية الشمسية للتشعيع الإلكتروني وتجاوزاً وضعنا هذه النقطة مقابل القيمة $j = 10^{11} \text{ elec.cm}^{-2}$ كي لا نبدأ من الصفر . (نفس الملاحظة بالنسبة للأشكال اللاحقة) .

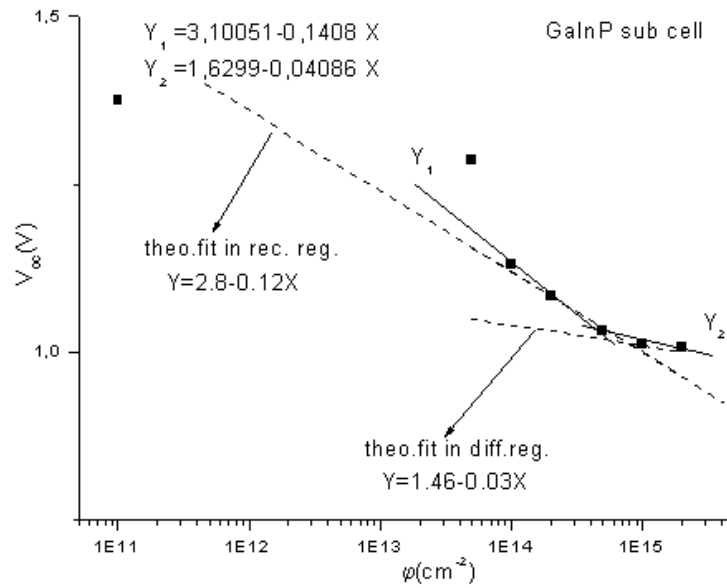
يبين الشكل (7) وفي مستوي نصف لوغاريتمي المنحني البياني $V_{oc} = f(j)$ للخلية الشمسية البينية Ge .



الشكل (7): تغير توتر الدارة المفتوحة للخلية الشمسية البينية Ge مع تزايد جرعة التشعيع الإلكتروني .

نلاحظ أن تغير V_{oc} صغير جداً وهو وفق الشكل (4) يتغير ضمن المجال : $0.16V \leq V_{oc} \leq 0.15V$ أي أنه يتناقص فقط بمقدار $10mV$ ، بينما في الحالة السابقة كان تناقص V_{oc} بمقدار $640mV$ ومع ذلك كانت النتائج العملية قريبة من الواقع. أما في هذه الحالة فإن V_{oc} للجرمانيوم البيني في خلية شمسية ثلاثية الوصلات لا يتأثر بالتشعيع الإلكتروني .

بينما نلاحظ على الشكل (8) التناقص الواضح لتوتر الدارة المفتوحة عندما تتزايد جرعة التشعيع الإلكتروني على خلية شمسية بينية GaInP ، وهذا التناقص يبدأ من أجل القيمة $5 \times 10^{13} \text{ elec.cm}^{-2}$ ، حيث نرسم في مستوي نصف لوغاريتمي المنحني البياني $(V_{oc} = f(j))$ ، نختار على هذا المنحني معظم النقاط التي يمكن أن تحقق العلاقة بين ميلي منطقتي الانتشار وإعادة الاتحاد .



الشكل (8): تغير توتر الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaInP sub cell مع تزايد جرعة التشعيع الإلكتروني .

نكتب في الجدول (I) معاملات الخلية الشمسية البينية المستخدمة GaInP وهي من النوع n^+p أي $N_D \gg N_A$

الجدول I : المعاملات النظرية والتجريبية للخلية الشمسية GaInP sub cell

معامل الخلية الشمسية	$a(l_1)$	D	v	N_A	n_i	V_d	W_0	ks	t_0
الوحدة	cm^{-1}	cm^2s^{-1}	$cm s^{-1}$	cm^{-3}	cm^{-3}	V	μm	cm	s
GaInP Sub-cell	6×10^5	60	3.5×10^7	1.5×10^{17}	2.3×10^2	1.5	1.8×10^{-2}	1.7×10^{-13}	6.7×10^{-8}

لذلك نأخذ في الحسابات عندما نستخدم العلاقة (9) المقادير التي تظهر في مقاماتها N_A . أما الملاءمة النظرية في الشكل (8) فنحصل عليها من العلاقة $m_r = 4m_d$ ، يمكن أن نلاحظ التقارب الواضح بين النتائج العملية والنظرية ، ونلخص هذه النتائج في الجدول (II) :

الجدول II : مقارنة بين النتائج النظرية والتجريبية لمعاملات توتر الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaInP sub cell

معامل الخلية الشمسية	القيم النظرية	القيم التجريبية	القيم النظرية	القيم التجريبية	القيم النظرية	القيم التجريبية
$V_{oc}(0)$	e_d	e_r	m_d	m_r	m_d	m_r
v	v	v	$v (\log j)^{-1}$	$v (\log j)^{-1}$	$v (\log j)^{-1}$	$v (\log j)^{-1}$
GaInP sub-cell	1.46	2.80	1.63	3.10	0.04	0.14

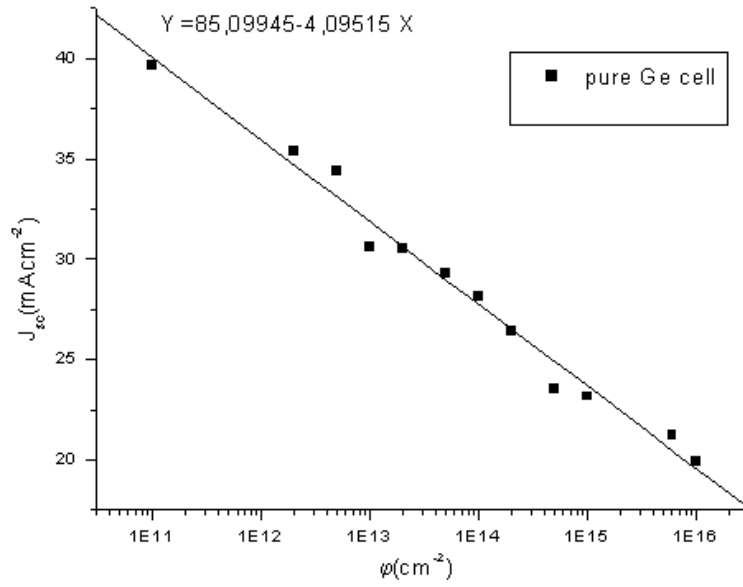
3 : قياس كثافة التيار الكهربائي لدارة مقصورة J_{sc} :

عندما تكون الخلايا الشمسية في حالة الدارة المقصورة فإن التوتر بين طرفي المنطقة الخالية من الشحنات الحرة يساوي الصفر ، وتركيز الحاملات p, n لا يختلف كثيراً عن تركيزها في حالة التوازن. لذلك فإن معدل إعادة الاتحاد لشوكلي - ريد (Shockley-Read) ، [17] في نظام الدارة المقصورة يكون صغيراً جداً ، أما كثافة تيار التوالد J_{gr} فيبقى ثابتاً ، لذلك فإن $J_{sc} @ J_d$ [9] ، حيث J_d تيار الانتشار لحوامل الشحنة الأقلية [3] . إن تناقص التيار الضوئي الناتج عن زيادة جرعة التشعيع الإلكتروني [18] ، يسمح لنا بقياس كثافة تيار الدارة المقصورة J_{sc} لكل جرعة تشعيع إلكتروني ، لذلك نأخذ قيم نقاط تقاطع المنحنيات البيانية في كل من الأشكال (3),(4),(5) مع المحور الرأسي ، ثم نقسم هذه القيم على سطح الخلية الموافق وهو $0.13cm^2$ لكل من pure Ge و GaInP sub cell ، و $4cm^2$ للخلية GaInP .

نرسم على الشكل (9) وفي مستوي نصف لوغاريتمي المنحني البياني $J_{sc} = f(j)$ للخلية الشمسية pure

Ge ، من هذا المنحني نستنتج أن J_{sc} يتناقص خطياً بزيادة جرعة التشعيع الإلكتروني j وفق العلاقة (1) :

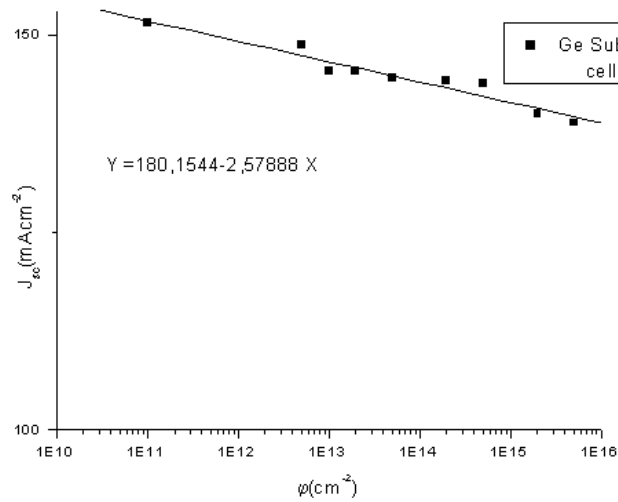
$$J_{sc} = 85.10 - 4.10 \log j \quad (mA.cm^{-2})$$



الشكل (9): تغير كثافة تيار الدارة المقصورة لخلية شمسية pure Ge بتابعة جرعة التشعيع الإلكتروني . ج

بينما نجد على الشكل (10) من أجل الخلية الشمسية Ge sub cell أن J_{sc} يتناقص وفق العلاقة :

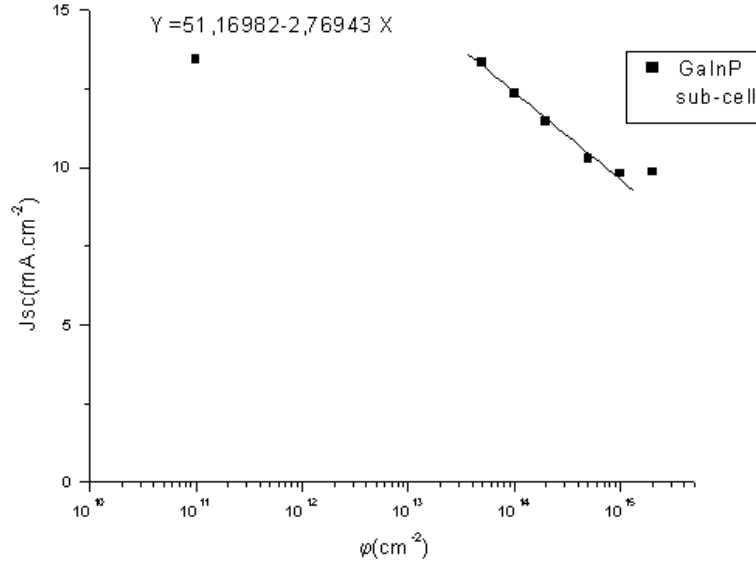
$$J_{sc} = 180.15 - 2.58 \log j \quad (\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$$



الشكل(10): تغير كثافة تيار الدارة المقصورة لخلية شمسية Ge sub cell بتابعة جرعة التشعيع الإلكتروني . ج

أيضاً على الشكل (11) نرسم في مستوٍ نصف لوغاريتمي المنحني البياني $J_{sc} = f(j)$ للخلية الشمسية GaInP sub cell ، نستنتج من هذا المنحني القيم التجريبية لكل من τ و X ، ومن العلاقة (7) نحسب قيمة المقدار $ks = 1.67 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$ وهي قريبة جداً من القيمة النظرية الجدول (I) [6],[19] ،

وبالتالي يمكن حساب t_0 زمن حياة أو عمر حاملات الشحنة الأقلية [20],[21] ، قبل أن نعرض الخلية الشمسية لجرعة التشعيع الإلكتروني j .



الشكل (11): تغير كثافة تيار الدارة المقصورة لخلية شمسية GaInP sub cell بتابعة جرعة التشعيع الإلكتروني j .

من الشكل السابق نكتب العلاقة :

$$J_{sc} = 51.17 - 2.77 \log j \quad (\text{mA.cm}^{-2})$$

يمكن في هذه الحالة وعندما تتوفر القيم النظرية لمعاملات الخلية الشمسية المدروسة أن نقارن بين النتائج النظرية والتجريبية ، وهذا ما نلخصه في الجدول (III) :

الجدول III: مقارنة بين النتائج النظرية والتجريبية لمعاملات كثافة تيار الدارة المقصورة للخلية الشمسية aInP sub cell

$J_{sc}(0)$ (mA. cm ⁻²)	القيم التجريبية		القيم النظرية		معامل الخلية الشمسية
	r (mA.cm ⁻²)	x (mA.cm ⁻²)	r (mA.cm ⁻²)	x (mA.cm ⁻²)	
13.43	2.77	51.17	3.40	63.10	GaInP sub-cell

نشير أخيراً إلى أن تحليل المنحني البياني $J_{sc} = f(j)$ يعطينا فقط معلومات عن مراكز إعادة الاتحاد في المنطقة المحايدة المعنية من الخلية الشمسية ، بينما يظهر تحليل المنحني البياني $V_{oc} = f(j)$ دور جميع العيوب وخاصة تلك التي تؤثر في المنطقة الخالية من الشحنات الحرة في الخلية الشمسية .

الخاتمة :

تعتبر هذه الدراسة كمقدمة لدراسة الخلايا الشمسية ثلاثية الوصلات من النوع GaAs/GaInP/Ge ، لذلك استخدمنا ثلاثة أنواع من الخلايا الشمسية لدراسة تأثير التشعيع الإلكتروني عليها وهي pure Ge ، Ge sub

cell ، GaInP sub cell . لقد بينت النتائج أن تأثير التشعيع الإلكتروني يختلف من خلية لأخرى وهذا يظهر من خلال التناقص الذي يطرأ على كل من كثافة تيار الدارة المقصورة وتوتر الدارة المفتوحة وبالنتيجة ينقص من عمر وكفاءة هذه الخلايا .

ومن الجدير ذكره ، أنني أجريت هذه القياسات أثناء وجودي في مختبر الأوساط غير المنتظمة واللامتجانسة في جامعة بيبير وماري كوري في باريس خلال فترة من عام 2002 مستفيداً من مهمة للبحث العلمي

.....

- 1- KURTZ, S.R. et al.1997 – Projected Performance of Three-and four-Junction Devices Using GaAs and GaInP. Presented at the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference , California U.S.A.
- 2- KARAM, N.H. et al. 2001. Solar Energy Materials & Solar Cells . Vol. 66,pp453-466.
- 3- ZEIN EDDINE, A. Tishreen University Journal .To be published .
- 4- KHAN, A. et al.2002-Thermal annealing study of 1MeV electron-irradiation-induced defects in n⁺ p GaInP diodes and solar cells .Jour. Appl. Phys.Vol.91,No.4 pp.2391-2397.
- 5- AKIHIRO, M. et al. 2001 .Solar Energy Materials &Solar cells. Vol.66, pp585-592 .
- 6- KHAN, A. et al. 2000 . Journal of Crystal Growth . Vol.210 ,pp264-267.
- 7-WALTRES,R.J. et al.1997. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference ,California U.S.A.pp843-846.
- 8- BOURGOIN, J. C. and DE ANGELIS,N.2001. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 66, pp467.
- 9- BOURGOIN,J.C. and ZAZOUI,M. 2002. Semicond . Sci. Technol. 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- BOURGOIN,J. C .and Lannoo,M.1983. Point Defects in Semiconductors . Vol.2,ch.8 (Berlin : Springer).
- 13- YAMAGUCHI, M. et al.1996.Proc.of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists conference , (IEEE 1996,pp 167-170 Washington).
- 14- HOVEL,H.J.1975. Solar Cells , in Semiconductors and Semimetals ,Vol.11 ,pp.16, Academic Press .New York .
- 15- SIMOEN, E. et al.1996 .Appl.Phys.Lett.Vol.69,pp2858 .
- 16- YAMAGUCHI, M. et al.1996. Proc. of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists conference , (IEEE 1996,pp 163-166 Washington).
- 17-SHOKLEY,W. and READ,W.T.1957. Carrier Generation and Recombination in PN Junctions and PN Junctions Characteristics Proc. of the IRE . pp1228 .
- 18- YAMAGUCHI, M. et al . 1984 . Jour. Appl. Phys .Vol.55, No6 pp.1429-1436.
- 19- DE ANGELIS ,N. et al.2001. Solar Energy Materials &Solar cells. Vol.66, pp495.
- 20- KAHN,A.et al.2000.Appl.Phys.Lett.Vol.76, pp2559-2561.
- 21- YAMAGUCHI, M. et al. 1997. Appl. Phys.Lett. Vol. 70, No16,pp.2180-2182.

