------ مجلة علوم الرافدين، المجلد 19، العدد 1، ص144-164، 2008 ------

تأثير تركيز الألمنيوم في الطبقة النافذة على كفاءة خلية p- $Ga_{1-x}Al_xAs/p^{-n}$ GaAs الشمسية

بسام محمود مصطفى   هدى محمد منير

قسم الفيزياء

كلية العلوم

جامعة الموصل

(تاريخ الاستلام 2007/3/25 ، تاريخ القبول 2007/9/10)

الملخص

هدف هذه الدراسة تقديم طريقة نظرية لحساب كفاءة خلية أرسنيد الكاليوم الشمـسية ذات النافـذة (والتي تضاف بطريقة التنمية الفوقية وتهدف إلى إزالة العيوب السطحية لتقليل عمليات إعـادة الإتحـاد) المحتوية على الألمنيوم وتأثير تغيير تركيزه على كفاءة الخلية الشمسية، حيث اعتبرنا أن الطبقـة النافـذة كطبقة رابعة في مخطط الطاقة للخلية الفوتوفولتائية. ولعدم توفر البيانـات عـن المتغيـرات الـضرورية والأساسية لحساب ذلك كمعامل الامتصاص، الكتلة الفعالة للحاملات، معامل الانكسار ..الخ. ولذلك قمنـا بحساب كل هذه المتغيرات استنادا إلى بعض المعلومات التجريبية القليلة حول الموضوع باستخدام أسلوب التحليل العددي، حيث حسب معامل الامتصاص ومعامل الانكسار وثابت العزل وفجـوة الطاقـة والكتلـة الفعالة وثوابت وأطوال الانتشار لتركيز الألمنيوم (0 - 45 %) وللأطوال الموجبة المـؤثرة ومـن ثـم استخدام تلك المتغيرات لحساب الكفاءة لأي تركيز للألمنيوم في الطبقة النافذة.

The Effect of Al Concentration in The Window Layer on the Efficiency of p- $Ga_{1-x}Al_xAs/p^{-n}$ GaAs Solar Cell

Bassam M. Mustafa   Huda M. Muneer

Department of Physics

College of Science

Mosul University

ABSTRACT

In this research a theoretical method was introduced to calculate the efficiency of GaAs solar cell, with a window layer (which epitaxially grown to prevent the surface recombination process caused by surface defects) which contains Al and the effect of variation of Al concentration on the efficiency of the solar cell, where we consider the window layer as a forth layer in the energy band diagram for the photovoltaic cell. Because of the lack of information about the necessary and essential variables for calculating the efficiency like absorption coefficient, effective mass of carriers, refractive index, ..etc. This variables was calculated by numerical methods using the few existing experimental information's. Absorption coefficient, refractive index, permittivity, coefficient and diffusion lengths and relaxation times for Al concentrations (0 – 45 %) and for the effective wavelengths were calculated and used to find the efficiency at the former Al concentrations.

المقدمة

إن الخلايا الشمسية هي أحد أشهر تطبيقات استخدام الطاقة الشمسية ويعتمد عمل الخلايا الشمسية على الظاهرة الفوتوفولتائية (Photovoltaic Effect) (Hovel, 1975) حيث إن الخلية الشمسية هي نبيطة فوتوفولتائية صممت لتحويل ضوء الشمس إلى قدرة كهربائية وإعطاء هذه القدرة حملا" مناسبا" (Nelson, 2005).

إن أول التجارب العملية على أرسنيد الكاليوم وعناصر أخرى من مجموعة (III-V) من أشباه الموصلات بدأ العمل فيها عام 1951 (John et al., 1982). هذا وإن تقنية تصنيع الخلايا الشمسية من أرسنيد الكاليوم GaAs بدأت في عام 1960 لكن تقدمها كان بطيئا بسبب العقبات التصنيعية التي واجهتها آنذاك. ومن أهم فوائد نبائط GaAs هي قابليتها العالية لامتصاص الضوء وأنه يحتاج إلى أن يكون بطبقة سمكها عدة مايكرونات، ولها كفاءة تحويل كبيرة بالمقارنة مع السليكون. ولقد ذكر الباحثون أن العيب الرئيس الذي يقلل من كفاءة التحويل في خلايا GaAs الشمسية هو آلية إعادة اتحاد الحاملات المتولدة على السطح (Brown and Williams, 1998). ويمكن خلط GaAs مع الأنديوم In والفسفور p والألمنيوم Al لإنتاج خلايا شمسية بكفاءات عالية (Sandia National laboratories, 2002).

وهناك بعض المشاكل في استخدام إل GaAs وهي قلة مصادر Ga في الطبيعة. ولهذا تستخدم في عمل خلايا شمسية ذات مساحات صغيرة. ومن أهم استخدامات تراكيب خلايا GaAs شيوعا في الخلايا الشمسية هو استخدام طبقة رقيقة من AlGaAs والتي تعتبر كنافذة للضوء الساقط عليها (كرين، 1989).

وفي السنوات الأخيرة (Shealy and Wanger, 2002). استخدمت طريقة النمو من الطور السائل Liquid Phase Epitaxy لإنتاج طبقات من $Al_xGa_{1-x}As$ نتج عنها تحسين في قدرة الخرج لخلايا شمسية من نوع GaAs وكفاءة بحدود 19% والتقليل من سرعة إعادة الاتحاد السطحية. إن طبقة AlGaAs تكون على شكل سبيكة مكونة من طبقة رقيقة وشفافة توضع فوق سطح خلية GaAs لتزيل النوعية الرديئة من على سطح الخلية، ولها فجوة طاقة مباشرة (2.6 eV) وفجوة طاقة غير مباشرة (2.1 eV) لكي تسمح لمعظم الضوء المرئي ($\geq$60%) بالنفاذ إلى داخل الخلية. وللحصول على أعلى كفاءة يجب أن يكون سمك طبقة AlxGa1-xAs قليلاً وتركيز الألمنيوم Al عالياً، وعليه سوف تنفذ كمية كبيرة من الضوء إلى داخل

الخلية الشمسية. وتـوصل كل من (Shealy and Wanger, 2002) إلى وصف وصلة p^{-n} المكونة مـن AlGaAs / GaAs بطريقة النمو من الطور السائل ووجدا أن الكفاءة عند الظروف AM1 هي (21.7%) (Shealy and Wanger, 2002).

يهدف البحث في أن يقدم طريقة نظرية لحساب كفاءة خلية أرسنيد الكاليوم الشمسية ذات النافـذة (والتي تهدف إلى إزالة العيوب السطحية لتقليل عمليات إعادة الإتحاد) المحتوية على الألمنيوم وتأثير تغيير تركيزه على كفاءة الخلية الشمسية استنادا إلى نموذج يعتبر الطبقة النافذة كطبقة رابعة في مخطط الطاقـة للخلية الفوتوفولتائية. المشكلة في هذا النموذج كانت عدم تـوفر البيانـات عـن المتغيـرات الـضرورية والأساسية لحساب ذلك كمعامل الامتصاص ,فجوة الطاقة، الكتلة الفعالة للحاملات، معامل الانكسار، أطوال الانتشار وغيرها للطبقة النافذة. ولذلك حاولنا حساب كل هذه المتغيرات استنادا إلى بعض النتائج التجريبية القليلة حول الموضوع باستخدام أسلوب التحليل العددي ومن ثم نحاول إيجاد طريقة لربط تلك المتغيـرات لنتمكن من حساب الكفاءة لأي تركيز للألمنيوم في الطبقة النافذة.

الجانب النظري:

أرسنيد الكاليوم GaAs هو نموذج لشبه موصل مركـب Semiconductor Compound مكـون مـن عناصر (III – V)، إن التركيب البلوري له مشابه لتركيب السليكون ماعدا تتالي ذرتا Ga، As مـع بعضهما أي إن التركيب البلوري له هـو مـن المـشبك الخارصـيني Zinc Blend. إن قيمـة فجـوة الحزمة Band Gap عنـــد درجـة حرارة الغرفة والضغط الجـوي الاعتيادي هـي (1.42 eV) وهي أكبر من فجوة الطاقة للسليكون (James, 1995).

لو سلطنا مجالا كهربائيا ξ على عينة من شبه الموصل لها مقطع عرضي مساحته A وطولها L وكثافة الحاملات هي n إلكترون لكل سنتمتر مكعب. فإن كثافة التيار الكلي الناجم عن المجال الكهربائي المسلط ξ في العينة بأنه مجموع تيار الإلكترونات وتيار الفجوات:

$$J_{total} = J_n + J_p$$

$$J_{total}(drift) = (qn\mu_n + qp\mu_p)\xi$$

$$J_{total}(drift) = \sigma\xi \qquad \text{........................(1)}$$

وتعرف الكمية بين القوسين بالتوصيلية الكهربائيσ . حيث إن μn هي تحركية الإلكترون و q هي شحنته الكهربائية وإن μp هي تحركية الفجوة.

أما عندما يكون لدينا وصلة p^{-n} وبوجود المجال الكهربائي فـإن التيـار يـسري بـالانجراف والانتشار وتكون الكثافة الكلية للتيار عند أي نقطة مجموع مركبتي الانجراف والانتشار:

$$J_n = J_n(drift) + J_n(diffusion)$$

$$= q\mu_n n\xi - qD_n \frac{dn}{dx} \qquad \text{.........................(2)}$$

$$= q\mu_n n\left[\frac{1}{q}\frac{dE_i}{dx}\right] - kT\mu_n \frac{dn}{dx}$$

ويمكن بنفس الأسلوب تطبيقه على الفجوات. حيث Ei المجال الكهربائي

$$J_{total} = J_n + J_p$$

إن علاقة التيار- الفولتية (I-V Characteristics) خلال منطقة الاتصال يمكـن التعبيـر عنهـا بالعلاقة الآتية (زي، 1990):

$$I_d = I_0(\exp(\frac{qv}{kT} - 1)) \qquad \text{..............................(3)}$$

حيث إن I_d هو تيار الحقن Injection Current الذي يسري من خلال منطقة الاتصال تحت تأثير الفولتية المسلطة باتجاه أمامي (v).

I_0 : يمثل تيار الإشباع للحوامل الحرة التي تستطيع أن تعبر الحاجز، ويساوي:

$$I_o = A\left(\frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D}\right) \qquad \text{.............................(4)}$$

حيث إن A هي المقطع العرضي للثنائي (كرين، 1989).

والتيار المار من خلال الحمل عند تسليط ضوء يساوي:

$$I = I_L - I_0(\exp\frac{qv}{kT} - 1) \qquad \text{............................. (5)}$$

حيث إن I :هو التيار المار من خلال الحمل.

I_L :هو التيار المتولد من الإشعاع الشمسي.

v : فرق الجهد على الحمل.

في حالة الدائرة القصيرة تكون مقاومـة الحمل مسـاويةً صفرا ($R_L = 0$) والتيار المار هو تيـار الدائرة القصيرة Isc وبالتعويض عن ($v = 0$) في المعادلة (5) أعلاه ينتج:

$Isc = I_L$

وكذلك في حالة الدائرة المفتوحة ($R_L = \infty$) فإن التيار يساوي صفرا, وعليه فان :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q}\ln(\frac{I_L}{I_0}+1) \qquad \text{..............................(6)}$$

حيث إن V_{oc} هي فولتية الدائرة المفتوحة.

إن كفاءة الخلية الشمسية تحسب بالعلاقة الآتية (Hovel, 1975):

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} * 100\%$$

$$= \frac{I_m * V_m}{P_{in}} \qquad \text{..............................(7)}$$

حيث إن P_{in} هي قدرة الأشعة الشمسية الساقطة على الخلية، وتعطى بالعلاقة الآتية :

$$P_{in} = A_t N(\lambda)(hc/\lambda) \qquad \text{.............................. (8)}$$

حيث إن : A_t :المساحة الكلية للخلية بوحدات cm^2.

N(λ) :هي عدد الفوتونات الساقطة لكل وحدة مساحة (cm^2) ولكل وحدة عرض عند الطـول المـوجي (λ) بوحدات $cm^{-2}.sec^{-1}$.

hc/λ :هي الطاقة التي يحملها كل فوتون بوحدات eV (Hovel, 1975).

ويمكن كتابة المعادلة (7) بدلالة فولتية الدائرة المفتوحة وتيار الدائرة القصيرة بالصيغة الآتية:

$$\eta = \frac{FF * I_{sc} * V_{oc}}{P_{in}} * 100\% \qquad \text{.............................. (9)}$$

FF: هو عامل الملء Fill Factor

إن تيار الدائرة القصيرة، في الخلية الشمسية المتعددة الطبقات هو محصلة التيارات المتولدة فيهـا وتكون كثافة التيار الضوئي الالكتروني (Hovel, 1975):

$$J_n = \left[\frac{qN(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^{\,2} - 1}\right] *$$

$$\left[\frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} + \alpha L_n\right) - \exp(-\alpha x_j)\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\cosh\frac{x_j}{L_n} + \sinh\frac{x_j}{L_n}\right)}{\frac{S_n L_n}{D_n}\sinh\frac{x_j}{L_n} + \cosh\frac{x_j}{L_n}} - \alpha L_n \exp(-\alpha x_j)\right] \qquad \text{.....(10)}$$

R : الانعكاسية على سطح الخلية (30%) Ln طول انتشار الحاملات الأقلية في منطقة p-GaAs.

S_n : سرعة إعادة الاتحاد السطحية وتساوي لطبقة GaAs (10^4-10^7cm/sec).

D_n : ثابت الانتشار في طبقة p-GaAs.

α : معامل امتصاص بوحدات (cm^{-1}).

N : عدد الفوتونات الساقطة على وحدة المساحة لوحدة الطول الموجي.

x_j : سمك الطبقة.

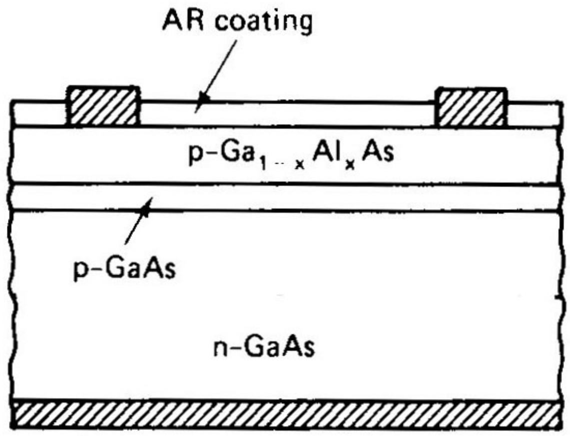
وعليه فإن كثافة التيار الضوئي للفجوات:

$$J_p = \frac{qN(1-R)\alpha L_p}{(\alpha_p{}^2 L_p{}^2 - 1)} \exp[-\alpha(x_j + W)]$$
$$* \left[\alpha L_p - \frac{\frac{S_p L_p}{D_p}\left(\cosh\frac{H'}{L_p} - \exp(-\alpha H' + \sinh\frac{H'}{L_p} + \alpha L_p \exp(-\alpha H')\right)}{(\frac{S_p L_p}{D_p})\sinh(\frac{H'}{L_p}) + \cosh(\frac{H'}{L_p})} \right] \quad ....(11)$$

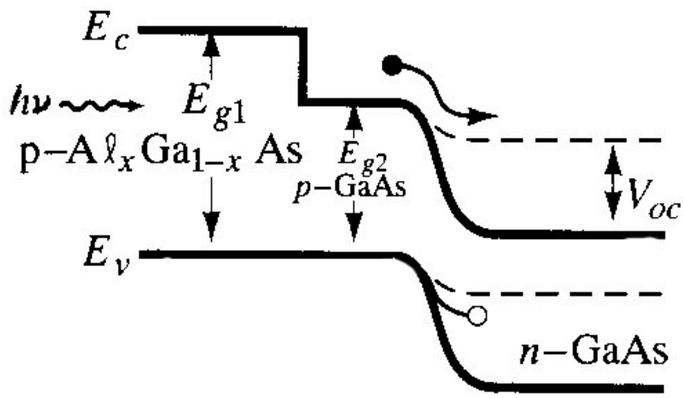
كما إن كثافة تيار منطقة الاستنزاف هو (Hovel, 1975):

$$J_{dr} = qN(1-R)\exp(-\alpha x_j)(1-\exp(-\alpha W)) \quad ....(12)$$

نظرا لكون إل GaAs شبه موصل ذا فجوة طاقة محظورة مباشرة ولاحتوائه على عيوب سطحية التي تكون مسارا لتسريب الالكترونات، ونتيجة لعمليات إعادة الاتحاد السطحية للالكترونات المتولدة على سطح الخليـة مما يحد من كفاءة الخلية الشمسية، يتم ترسيب طبقة رقيقة مـن إل AlGaAs وبتراكيـز مختلفة للألمنيوم للتقليل من هذه التأثيرات وتعمل هذه الطبقة على كبح فعالية سطح GaAs وبالتالي تحسين كفاءة الخلية. وإذا كان تركيز الألمنيوم x كبيرا فإن الفجوة المحظورة لهذه الطبقة تكون عريضة ويكـون امتصاصها لضوء الشمس المار خلالها قليلا. أي إن هـذه المادة تعمل كطبقة شفافة (نافذة) تسمح بمـرور معظـم الضـوء خلالهـا إلـى التركيب التحتـي (كرين، 1989)، (Hovel,1975). والشكل 1:(a) يمثل مقطعا طوليا لتركيب الخلية الشمسية ذات النافذة أما الشكل 1: (b) فهو يمثل مخطط لحزمة الطاقة لهـذه الخلية والتي تسلسل طبقاتها هو p-AlGaAs / p-GaAs / n-GaAs.



الشكل 1 : (a) مقطع خلية شمسية مضافاً إليها الطبقة النافذة (كرين، 1989).



الشكل 1 : (b) مخطط حزمة الطاقة لخلية شمسية مضافاً إليها الطبقة النافذة (Neamen, 1992)

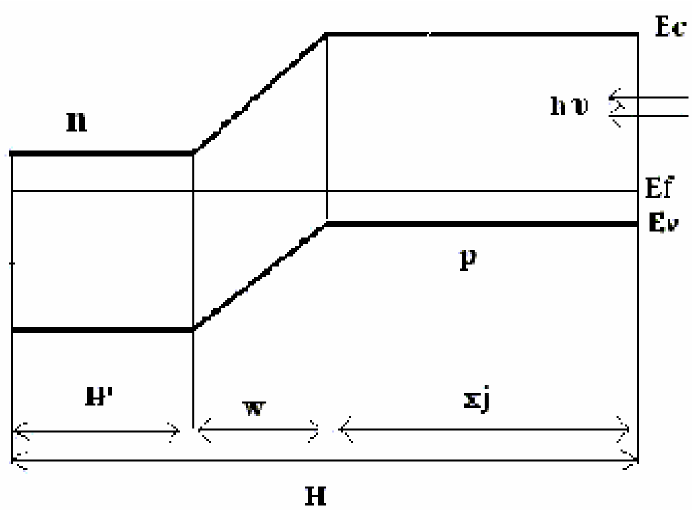
إن أهمية وضع الطبقة النافذة AlGaAs هو التقليل من الأثر الهام للاتحاد الـسطحي علـى تيـار الدائرة القصيرة. ومن الطبيعي أن يقع التخفيض في امتصاص الإشعاع الشمسي الوارد. ولهـذا يجـب أن تكون هذه الطبقة رقيقة وأن تحتوي على كمية كبيرة من الألمنيوم (لوجي، 1994).

خواص الخلية الشمسية قيد البحث:

تتكون الخلية الشمسيـة التي تمت دراستها فـي هـــذا البحـث مـن طبقــة مـن نــوع $p\text{-}Al_xGa_{1-x}As$ والتي تسمى بالطبقة النافذة وهي ذات تأثير كبيـر ومباشـر فـي كفــاءة الخليــة الشمسيـة ككل وتكـون بسمك ($x = 0.1*10^{-4}$ cm)، تليـها طبقـة مـن نــوع p-GaAs وبـسمك ($x = 0.4x10^{-4}$ cm) أمــا طبقــة القاعــدة فتــكون مـــن نــوع n-GaAs وبــســمك ($H' = 299.41x10^{-4}$ cm)، ومنطقة الاستنزاف الواقعة بين الطبقتين p- GaAs وn-GaAs تكون بـسمك ($W = 0.09x10^{-4}$ cm)، أما مساحة الخلية الشمسية فكانت ($A = 4$ cm^2) وبسمك كلـي ($300x10^{-4}$ cm) وتعد هذه القيم ضرورية لغرض إكمال الحسابات وإيجـاد التيار والفولتية الداخلـة فـي عمليـة حـساب كفـاءة الخلية الشمسيـة من نـوع (p-AlGaAs / p-GaAs / n-GaAs). والجدول الأتي يبـين بعـض المعالم الأخرى للخلية الشمسية GaAsعند درجة حرارة(300^ok) (Hovel, 1975).

الجدول 1 : يوضح المعالم لخلية GaAs (Hovel, 1975).

Top region p-type	Base Region n-type
$N_a = 2x10^{19}cm^{-3}$	$Nd = 2x10^{17}cm^{-3}$
$D_n = 32.4$ cm^2 / sec	$D_p = 5.7$ cm^2 / sec
$\tau_n = 1 \times 10^{-9}$ sec	$\tau_p = 1.58 \times 10^{-8}$ sec
$L_n = 1.8 \times 10^{-4}$ cm	$L_p = 3 \times 10^{-4}$ cm
$n_i = 1.1*10^7cm^{-3}$	



الشكل 2 : يمثل مخطط توضيحي لخلية شمسية ذات وصلة p-n (لوجي، 1994).

حساب الكفاءة بوجود الطبقة النافذة:

كما هو معلوم بأن الكفاءة هي النسبة بين القدرة الخارجة من الخلية الشمسية إلى القـدرة الداخلـة إليها. ولحساب كفاءة الخلية الشمسية علينا أولا إيجاد التيار الناتج عنها. وكما أشرنا فإن الأجزاء الأربعـة تساهم في التيار وهي الطبقتان السطحية وطبقة الاستنزاف وطبقة القاعدة.

والطبقتان هما AlGaAs وهي ذات تأثير كبير على كفاءة الخلية الشمسية، وطبقـة GaAs وكمـا موضحة بالشكل (3) ويعطى تيار الجبهة الكلي بالعلاقة الآتية:

$$J_f = J_{fGaAs} + J_{fAlGaAs} \qquad ....(13)$$

حيث أن تيار الجبهة لـ GaAs يعطى بالعلاقة الآتية:

$$J_{fGaAs} = \left[\frac{qN(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^{\,2} - 1}\right] * \left[\frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} + \alpha L_n\right) - \exp(-\alpha x_j)\left(\frac{S_n L_n}{D_n}\cosh\frac{x_j}{L_n} + \sinh\frac{x_j}{L_n}\right)}{\frac{S_n L_n}{D_n}\sinh\frac{x_j}{L_n} + \cosh\frac{x_j}{L_n}} - \alpha L_n \exp(-\alpha x_j)\right] \qquad ....(14)$$

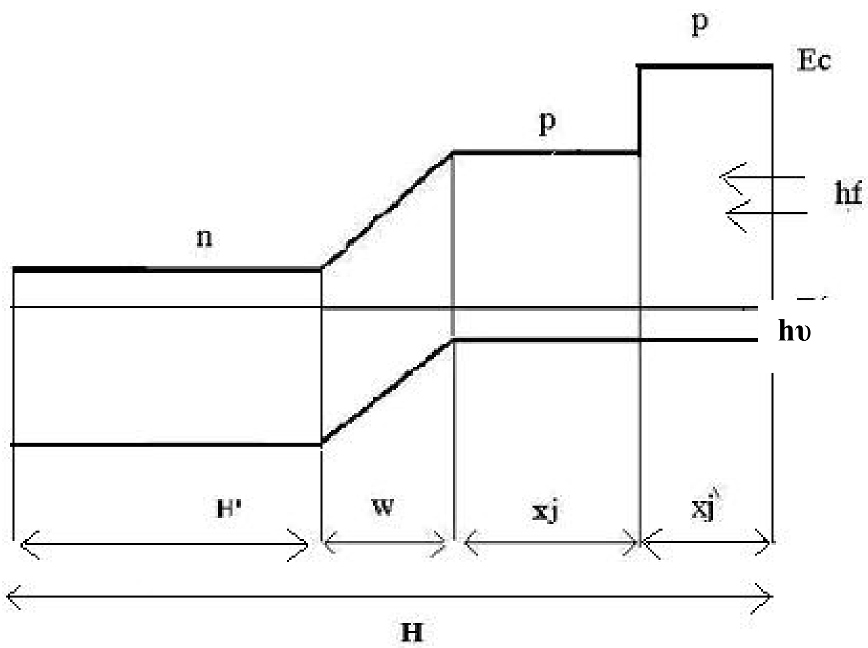
أما تيار الجبهة للطبقة النافذة AlGaAs يعطى بالعلاقة الآتية:

$$J_{fAlGaAs} = \left[\frac{qN(1-R)\alpha' L'_n}{\alpha'^2 L_n'^{\,2} - 1}\right] * \left[\frac{\left(\frac{S'_n L'_n}{D'_n} + \alpha' L'_n\right) - \exp(-\alpha' x'_j)\left(\frac{S'_n L'_n}{D'_n}\cosh\frac{x'_j}{L'_n} + \sinh\frac{x'_j}{L'_n}\right)}{\frac{S'_n L'_n}{D'_n}\sinh\frac{x'_j}{L'_n} + \cosh\frac{x'_j}{L'_n}} - \alpha' L'_n \exp(-\alpha' x'_j)\right] \qquad ....(15)$$

حيث أن N هي عدد الفوتونات الساقطة لوحـدة المـساحة لوحـدة الطـول المـوجي بوحـدات ($cm^{-2}/s/\mu$) و *L'n* طول انتشار الحاملات الأقلية للطبقة النافذة p-AlGaAs. S'n سرعة إعـادة الاتحـاد السطحية للطبقة النافذة AlGaAs وتـساوي(10^5cm/sec). D'n ثابـت الانتـشار فـي الطبقـة النافـذة p-AlGaAs. α ' معامل امتصاص الطبقة النافذة بوحدات (cm^{-1})، xj سمك الطبقة النافذة.

ولحساب تيار طبقة GaAs نستخدم المعالم الموجودة في الجدول (1) مع تغيير قيمة سرعة إعـادة الاتحاد السطحية من10^7 إلى 10^5 عند زيادة تركيز الألمنيوم في الطبقـة النافـذة مـن 0.05 إلـى 0.45

(Hovel,1975). أما لحساب التيار الناتج من طبقة AlGaAs فيجب علينا أولاً إيجاد بعض المعالم عن هذه الطبقة وهي معامل الامتصاص، ثابت العزل ϵ_r، معامل الانكسار n، زمن العمر τ، الثابـت *A، الكتلـة الفعالة *m, التحركية µ, ثابت الانتشارD وطول الانتشار L_p.



الشكل 3 : مخطط توضيحي لخلية شمسية pAlGaAs/pGaAs/nGaAs.

حساب معامل الامتصاص:

من الدراسـات القليلة المتوفـرة حول معامل الامتصاص وكما نـرى من الشكل (4) وبتراكيـز محددة (0-0.8) وبزيادة 0.2 في كل مرة لمادة الألمنيوم والمأخوذ من المصدر المثبت على الشكل. ولأجل التمكن من حساب معامل الامتصاص من هذا الرسم لاحظنا أنه عند أي قيمة للتركيز فإن منحنيات معامل الامتصاص تتميز بخاصيتين مهمتين وهما انتظام التغيرات للتركيز الواحد وكذلك تماثل هـذه التغيـرات للتراكيز المختلفة مما دفعنا للقول بحصول تغيير وانحدار بالخواص ومادام الحال كذلك فـيمكن باسـتخدام أسلوب التحليل العددي إيجاد معامل الامتصاص لكل طول موجي. فلو اعتبرنا أن الاحداثي السيني والـذي يمثل الطول ألموجي، أنه يمثل إحداثي مسافة (أي أنه لو نظرنا المحور السيني في شكل 4 وكأنه مـسافة فقط)، وأن هذا الاحداثي يمثل الاحداثي z وكمـا في الشكل (5). ولإيجاد معاملات الامتصاص لأي تركيز x فإن العملية تتضمن إيجاد أحسن منحني يمر بين أي من المنحنيين. فلو أخذنا أي منحنـي مـن الرسـم السابق ورسمنا بين α و z، فلقيمة معينة لمعامل الامتصاص α_i يكون التركيز عند المنحنـي (1) هـو x_{i1}

وعند المنحني (2) هو x_{i2} فإن معدل تغير المسافة على المحور z بالنسبة للتركيز x بين المنحنيـين 1و2 وحسب معادلة نيوتن هو (Sokolenkoff, 1966):

$$S_i = \frac{\Delta z_i}{\Delta x_i} \qquad \text{.......................(16)}$$

$$\Delta z_i = S_i \Delta x_i \qquad \text{...............................(17)}$$

$$\Delta z_i = z_i - z_{i1} \qquad \text{...............................(18)}$$

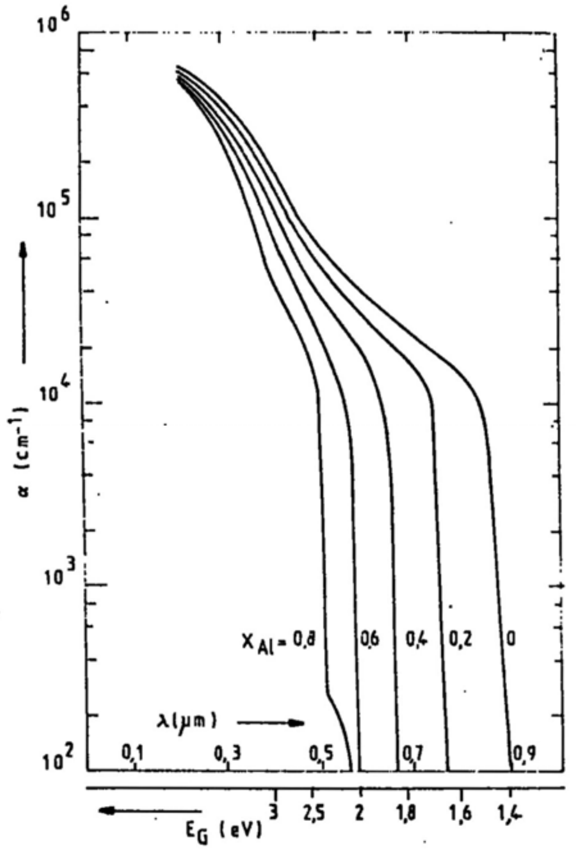
$$\Delta x_i = x_i - x_{i1} \qquad \text{...............................(19)}$$

نعوض قيم Δz_i و Δx_i من المعادلتين 18 و 19 في المعادلة 17 نحصل على ما يأتي:

$$z_{i1} - z_i = S_i (x_{i1} - x_i)$$

$$z_i = z_{i1} + S_i (x_i - x_{i1}) \qquad \text{..............................(20)}$$

$$= z_{i1} + \left(\frac{z_{i2} - z_{i1}}{x_{i2} - x_{i1}} \right) (x_i - x_{i1}) \qquad \text{............................(20 a)}$$

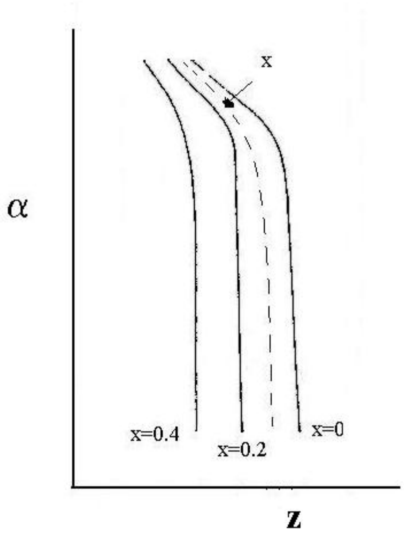


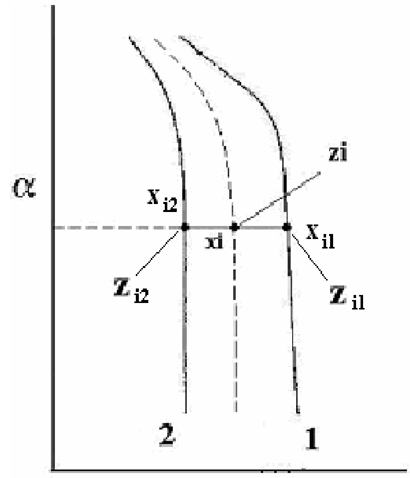
الشكل 4 : تغير معامل الامتصاص مع الطول الموجي للطبقة النافذة (لوجي، 1994).

إن عملية إيجاد هذه القيم تتم من خلال تكبير الشكل (4) عدة مرات للحصول على قدرة تحليل عالية وكما هو موضح في الجدول التالي:

الجدول 2 : قيم معامل الامتصاص مع المسافة بـ(mm) بين أي منحنيين عند أي تركيز للألمنيوم.

x / α(cm^{-1})	x=0.05	x=0.1	x=0.15	x=0.25	x=0.3	x=0.35	x=0.45
$1*10^2$	7.25	14.5	21.75	5.75	11.5	17.25	4.375
$2*10^2$	7	14	21	5.5	11	16.5	4.375
$4*10^2$	6.75	13.5	20.25	5.375	10.75	16.125	4.375
$6*10^2$	6.75	13.5	20.25	5.25	10.5	15.75	4.375
$8*10^2$	6.5	13	19.5	5.25	10.5	15.75	4.375
$1*10^3$	6.5	13	19.5	5.125	10.25	15.375	4.375
$2*10^3$	6.25	12.5	18.75	5	10	15	4.375
$4*10^3$	6.25	12.5	18.75	5	10	15	4.375
$6*10^3$	6	12	18	5.125	10.25	15.375	4.125
$8*10^3$	5.75	11.5	17.25	5.375	10.75	16.125	4.25
$1*10^4$	5.25	10.5	15.75	5.75	11.5	17.25	4.25
$2*10^4$	3.75	7.5	11.25	4.25	8.5	12.75	4
$4*10^4$	2.5	5	7.5	2.75	5.5	8.25	2.125
$6*10^4$	1.75	3.5	5.25	2	4	6	1.625
$8*10^4$	1.375	2.75	4.125	1.5	3	4.5	1.5
$1*10^5$	1.25	2.5	3.75	1.25	2.5	3.75	1.25
$2*10^5$	1	2	3	1	2	3	0.875
$4*10^5$	1	2	3	0.875	1.75	2.625	0.675





الشكل 5 :(a) و (b) يوضحان كيفية إيجاد تغير معامل الامتصاص مع الطـول ألمـوجي لأي تركيز (باستخدام الاندراج).

حساب معامل الانكسار وثابت العزل:

كما تم حساب كل من معامل الانكسار وثابت العزل لهده الطبقة وللأطوال الموجيـة المـستخدمة وبالاعتماد على المصدر (Willardson, 1967) وبالمعادلـة , $n=2.95-0.71x-0.9x^2$ ، x تركيـز Al (زي، 1981). فقيم معامل الانكسار:

الجدول 3 : يوضح قيم معامل الانكسار للطبقة النافذة (Willardson, 1987).

λ(μm) \ x	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
0.3	2.95	2.92	2.89	2.86	2.83	2.8	2.77	2.74	2.71	2.68
0.4	3.39	3.35	3.32	3.28	3.25	3.22	3.18	3.15	3.11	3.08
0.5	4.33	4.28	4.24	4.2	4.15	4.11	4.07	4.02	3.98	3.94
0.6	3.87	3.83	3.79	3.75	3.71	3.65	3.63	3.59	3.56	3.52
0.7	3.75	3.7	3.66	3.62	3.59	3.55	3.51	3.47	3.44	3.4
0.8	3.64	3.6	3.56	3.53	3.49	3.45	3.42	3.38	3.34	3.31
0.9	3.59	3.55	3.51	3.48	3.44	3.41	3.37	3.33	3.3	3.26
1	3.49	3.45	3.42	3.38	3.35	3.31	3.28	3.24	3.21	3.17
1.1	3.46	3.42	3.39	3.35	3.32	3.28	3.25	3.21	3.18	3.14

وقيم ثابت العزل ε_r تحسب من المعادلة $\varepsilon_r=n^2$ كما الجدول التالي :

الجدول 4 : يوضح قيم ثابت العزل لكل طول موجي ولكل تركيز(Willardson, 1987)

λ(µm) \ x	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
0.3	8.52	8.35	8.17	8	7.84	7.67	7.5	7.34	7.18
0.4	11.22	11.02	10.75	10.56	10.36	10.11	9.92	9.67	9.98
0.5	18.31	17.97	17.64	17.22	16.89	16.56	16.16	15.84	15.52
0.6	14.66	14.36	14.06	13.76	13.32	13.17	12.88	12.67	12.39
0.7	13.69	13.39	13.1	12.88	12.6	12.32	12.04	11.83	11.56
0.8	12.96	12.67	12.46	12.18	11.9	11.69	11.42	11.15	10.95
0.9	12.6	12.32	12.11	11.83	11.62	11.35	11.08	10.89	10.62
1	11.9	11.69	11.42	11.22	10.95	10.75	10.49	10.3	10.04
1.1	11.69	11.49	11.22	11.02	10.75	10.56	10.3	10.11	9.85

إيجاد المتغيرات الضرورية لحساب تيارات الخلية:

آ - زمن الاسترخاء

يعرف τ بزمن الاسترخاء للحاملات الأقلية ويتم حسابه عند طول موجي وتراكيز مختلفة وحسب المعادلة التالية (Kalashnikov et al.,1990):

$$\tau = \frac{m^2 e^2}{20\varepsilon_r \hbar^3 N_o} \qquad \text{..........................(21)}$$

حيث أن (m) هي كتلة الإلكترون الساكونية $9.1\text{x}10^{-31}$kg، (e) هي شحنة الإلكترون ($1.6\text{x}10^{-19}$c)، εr ثابت العزل (Neamen, 1992) و(N_o) تركيز الشوائب في شبه الموصل (10^{21} cm^{-3}) (Sze, 1981).

ب - حساب الكتلة الفعالة *m لطبقة AlGaAs:

يتم حساب قيمة الكتلة الفعالة بعد إيجاد قيمة الثابت *A وحسب العلاقة الآتية (Pankove, 1971):

$$A^* = \frac{q^2\left(2\dfrac{m_e^{\ *} m_h^{\ *}}{m_e^{\ *} + m_{h*}}\right)^{3/2}}{nch^2 m_e^{\ *}} \qquad \text{..........................(22)}$$

وباعتبار أن الكتل الفعالة لكل من الإلكترون *me* والفجوة *mh* متساويان لـ AlGaAs وعليه فإن المعادلة تصبح (Pankove, 1971):

$$A^{*}=\frac{q^{2}(m)^{1/2}}{nch^{2}} \qquad ....(23)$$

وبتعويض قيم معامل الانكسار عند كل طول موجي ولكل تركيز نحصل على قيم الكتل الفعالة للطبقة النافذة.

لإيجاد قيمة الثابت *A لكل طول موجي ولكل تركيز نعوض قيم معامل الامتصاص لكل طول موجي للطبقة النافذة من الشكل (4) والذي يوضح العلاقة بين معامل الامتصاص مع الطول الموجي لطبقة AlGaAs (لوجي، 1994) وحسب العلاقة الآتية:

$$A^{*}=\frac{\alpha'}{(h\upsilon-E_{g})^{1/2}} \qquad ....(24)$$

حيث أن α' معامل الامتصاص للطبقة النافذة $h\upsilon$, طاقة الفوتون الساقط ($\lambda = 0.3 - 1.1\mu m$) و Eg قيمة فجوة الطاقة عند كل تركيز لطبقة AlGaAs والتي تحسب بالعلاقة الآتية (Neamen, 1992) :

ج - حساب قيمة التحركية للطبقة النافذة (μ) :

يتم حساب التحركية بتعويض قيم كل من زمن العمر والكتلة الفعالة لطبقة AlGaAs لكل طول موجي ولكل تركيز حسب المعادلة التالية (Neamen, 1992):

$$\mu=\frac{e\tau}{m^{*}} \qquad ....(25)$$

د - حساب ثابت الانتشار D للطبقة النافذة:

يتم حساب ثابت الانتشار للطبقة النافذة بعد إيجاد قيم التحركية لكل طول موجي ولكل تركيز وحسب المعادلة الآتية (كرين، 1989):

$$D=\frac{kT}{q}\mu \qquad ....(26)$$

حيث أن(kT/q) هي الفولتية الحرارية وتساوي (0.025v) عند درجة حرارة الغرفة (300°K) حيث q تمثل شحنة الإليكترون أو الثقب.

هـ - حساب طول الانتشار L_p للحاملات الأقلية في الطبقة النافذة:

تم حساب طول الانتشار للحاملات الأقلية للطبقة النافذة عند كل طول موجي ولكل تركيز وحسب المعادلة الآتية (Neamen, 1992):

$$L = \sqrt{D\tau} \qquad \text{..................(27)}$$

حساب فولتية الدائرة المفتوحة

لإيجاد فولتية الدائرة المفتوحة عندما تكون الخلية معزولة كهربائيا عن الدائرة الخارجية أي عندما يكون (IL = 0) فإن (Hovle, 1975):

$$V_{oc} = \frac{KT}{q}\ln\left(\frac{J_{sc}}{J_o}+1\right) \qquad \text{..................(28)}$$

حيث إن J_o هي كثافة تيار الإشباع:

$$J_o = q\,\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D}\left[\frac{\left(\frac{S_pL_p}{D_p}\right)\cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)+\sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)}{\left(\frac{S_pL_p}{D_p}\right)\sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)+\cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)}\right]$$

$$+\,q\,\frac{D_n}{L_n}\frac{n_i^2}{N_A}\left[\frac{\left(\frac{S_nL_n}{D_n}\right)\cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)+\sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right)}{\left(\frac{S_nL_n}{D_n}\right)\sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right)+\cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)}\right] \qquad \text{............(29)}$$

وبما أن سمك الخلية محدد بالسمك الكلي H' وأن منطقة الجبهة على جانب من الرقة، وحيث إن $H' = H-(x_j+w)$ وحيث إن S_n ، S_p هي سرعة إعادة الإتحاد الأمامية والخلفية من الخلية على التوالي. وبالاعتماد على قيم الجدول (2-3) وجدنا قيمة J_o تساوي:

J_o= 2.79x10^{-18} A/cm2
I_o= J_o x A
= 2.79x10-18 A/cm^2 x 4 cm^2
= 1.11x10^{-17} A

من المعادلات السابقة نستطيع حساب التيارات الناجمة عن طبقات الخلية الشمسية وكما هو معلوم فإن الكفاءة هي النسبة بين القدرة الخارجة من الخلية الشمسية إلى القـدرة الداخلة إليها. ولإيجـاد القـدرة الخارجة من الخلية لابد من حساب القيمة العظمى لكل من الفولتية والتيار الناتج من الخلية الشمسية وكذلك حساب قيمة القدرة الداخلة لإيجاد الكفاءة وكما في المعادلات الآتية:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \qquad \text{......................(30)}$$

حيث إن P^m هي أعلى قدرة خارجة من الخلية الشمسية.

القدرة الخارجة (المجهزة) من الخلية الشمسية إلى الحمل هي:

$$P = I.V = I_L.V - I_o\left[\exp\left((\frac{qV}{KT}) - 1\right)\right].V \qquad \text{......................(31)}$$

ولإيجاد الفولتية والتيار اللذين يجهزان أعظم قدرة إلى الحمل نقـوم باشـتقاق المعادلـة الـسابقة ومساواة ناتج الاشتقاق بالصفر :

$$\frac{dP}{dV} = 0 = I_L - I_o\left[\exp\left(\frac{qV_m}{KT}\right) - 1\right] - I_o V_m\left(\frac{q}{KT}\right)\exp\left(\frac{qV_m}{KT}\right) \qquad \text{................(32)}$$

يمكن إيجاد قيمة V_m بطريقة التجربة والخطـأ, حيـث قمنـا بكتابـة برنـامج بلغـة البرمجـة (turbo C^{++}) .

بعد إيجاد V_m نقوم بتعويضها بالمعادلة الآتية وذلك لإيجاد قيمة I_m :

$$I_m = I_o\left(\frac{qV_m}{KT}\right)\exp\left(\frac{qV_m}{KT}\right) \qquad \text{................(33)}$$

وبعد ضرب قيمة الفولتية العظمى V_m بقيمة التيار العظمى I_m نكون قد حصلنا على قيمة أعظـم قدرة خارجة P_m.

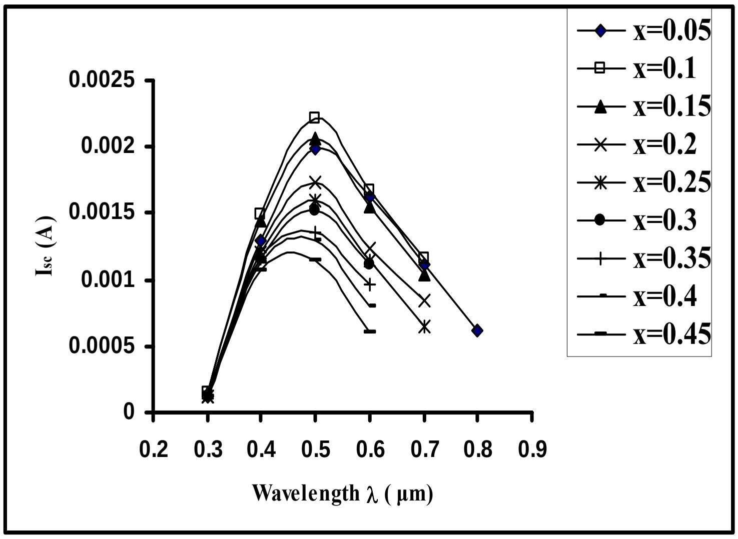
أما القدرة الساقطة فيتم إيجادها من المعادلة الآتية (Hovel, 1975):

$$P_{in} = AN(\lambda)\frac{hc}{\lambda} \qquad \text{................(34)}$$

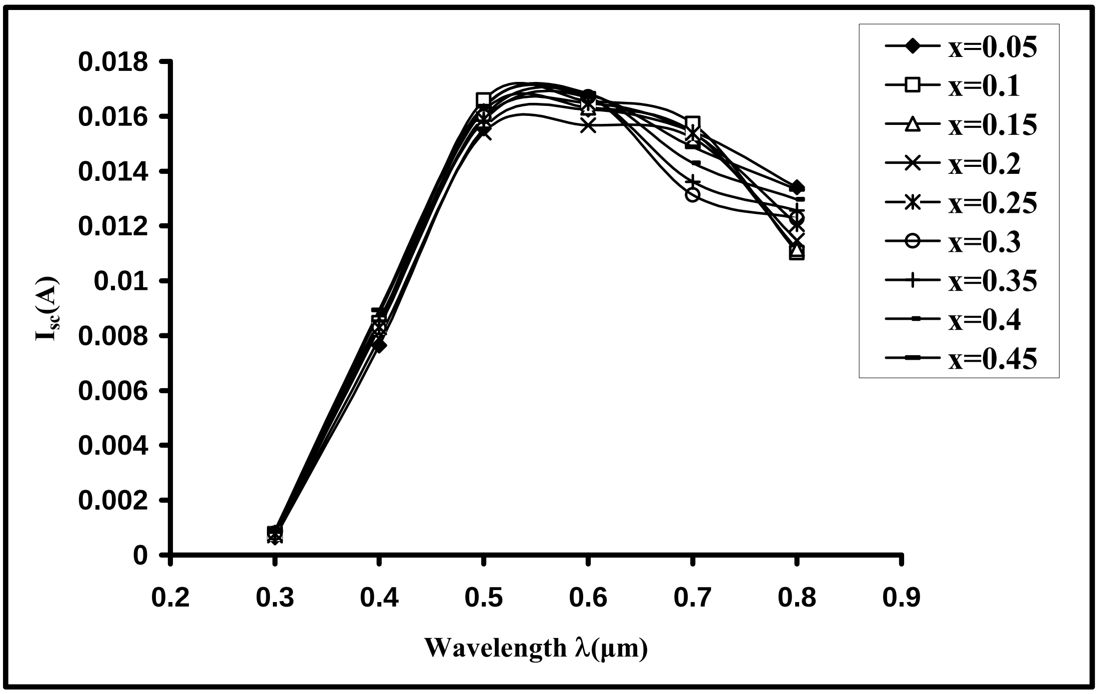
حيث إن $N(\lambda)$ تمثل عدد الفوتونات الساقطة في السنتمتر المربع وفي الثانية ولكل عرض طيفـي واحد بوحدات (cm^{-2}/s/µm) (روجي، 1994). وبقسمة أعظم قدرة خارجة مـن الخليـة علـى القـدرة الساقطة عليها نكون قد وجدنا قيمة الكفاءة للخلية.

النتائج والمناقشة

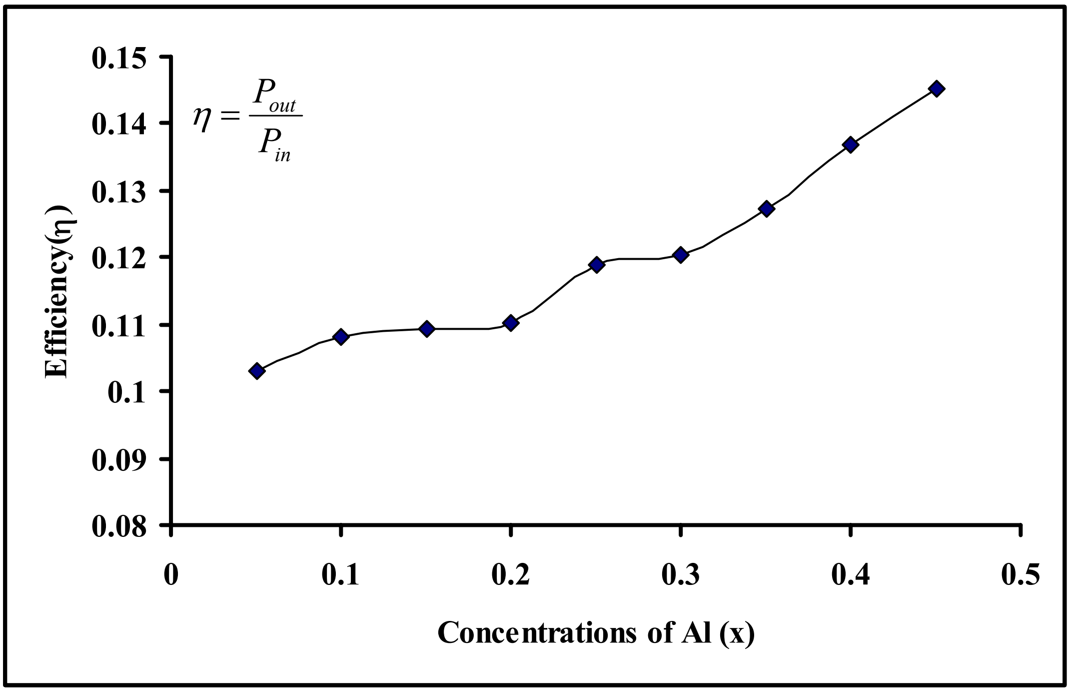
إن حساب تيار الطبقة السطحية عملية معقدة نوعا ما حيث أنها تعتمد على مقدار الطيف الشمسي وكذلك تعتمد على كل الكميات السابقة التي تم الإشارة إليها، وبالاعتماد على النموذج النظري لحساب تيار طبقة AlGaAs والذي أعتمد على إضافة جزء أخر لنموذج الخلية الشمسية وهي الطبقة النافذة AlGaAs. تم حساب تيار هذه الطبقة (الشكل 6) مع إدخال كل المعطيات السابقة وهي معامل الامتصاص α' وثابت الانتشار وطول الانتشار للتراكيز (0.05-0.45). من ناحية ثانية استخدمت طبقة رقيقة حتى لا تؤثر على عمل الخلية وبسمك $0.1x10^{-4}$ cm . ثم تم بعد ذلك حساب قيمة التيارات للتراكيز (0.05-0.45) للطبقة السطحية وطبقة الاستنزاف وطبقة القاعدة والشكل (7)، والذي التيار فيه هو محصلة التيارات السابقة يشير إلى قيم تيار الدائرة القصيرة للخلية عند الأطوال الموجية المختلفة و للتراكيز المختلفة. حيث نلاحظ أن تيار الدائرة القصيرة للخلية الشمسية يزداد تدريجياً مع زيادة الطول ألموجي حتى حوالي 5.5 ميكرون ثم يقل بعد.



الشكل 6 : تيار الطبقة النافذة كدالة للطول ألموجي وتركيز الألمنيوم.



الشكل 7 : تغير تيار الدائرة القصيرة للخلية الشمسية AlGaAs/GaAs كدالة للطول ألموجي.



الشكل 8: تغير كفاءة الخلية الشمسية مع التركيز.

إن الشكل (8) يبين تغير الكفاءة مع التركيز حيث أن الكفاءة تزداد مع زيادة تركيز الألمنيوم مما يؤكد صواب مخطط الطاقة المقترح ذو الطبقات الأربعة في دراسة الموضوع، حيث يتفق ذلك مع النتائج

العملية. فإذا ماعدنا إلى الشكل (6) والذي يرينا تيار الطبقة النافذة وهو قليل (في حـدود 1 ملـي أمبيـر) مقارنة مع تيار الخلية الكلي مما يشير إلى أن الدور الأساسي للطبقة النافذة ليس كمصدر للتيار بل يتمثـل في عملية التخلص من الحالات السطحية الناجمة عن وجود عيوب في طبقة GaAs، وحيث أن GaAs هو شبه موصل من النوع المباشر فإن معظم الامتصاص يتم في الطبقة السطحية وهنا يأتي الـدور المـدمر للعيوب. إضافة إلى أن هذه الطبقة تؤكد على دورها فـي عمليـة التناسـق Matching بـين GaAs و AlGaAs حيث أن هذه الطبقة سالفة الذكر تؤدي إلى حصول نمو فوقي Epitaxial Growth فوق طبقـة GaAs وبذلك يؤدي هذا النمو إلى إلغاء العيوب الموجودة في هذه الطبقة عن طريـق تـشكيلها لـشبيكة منتظمة ولهذه الشبيكة السطحية أثر بالغ في إبعاد تأثير العيوب عن منطقة الـسحب (أي تـأثير المجـال الكهربائي لمنطقة النضوب في سحب أزواج الإلكترون – فجوة المتولد عند سقوط الأشعة الشمسية)، وبذلك يستطيع المجال الكهربائي سحب الأزواج نتيجة لتوفر سرعة إعادة الاتحاد القصيرة والتي هي بحدود 10^4 ثانية مقارنة بسرعة إعادة الاتحاد 10^7 أو 10^8 بوجود العيوب السطحية وهذا ما يؤدي فعـلاً إلـى رفـع الكفاءة. إن التغيرات في الكفاءة والتي تم الحصول عليها يؤدي إلى سلوك جديد لطبقة GaAs بعـد إزالـة عيوبها.

إن التغير في سرعة إعادة الاتحاد وكذلك في قيم L_p و D تؤثر بشدة على تيار الخلية وبالتالي كفاءتهـا ربما أثر نوعاً في دقة حساباتنا وبالتالي فإن الحاجة تبدو ماسة إلى التوسع في دراسة هـذه الطبقـة لكـي تتضح تماماً عملية التفاعل بين الطبقة الجديدة AlGaAs وطبقة GaAs.

الاستنتاجات

يمكن إجمال أهم الاستنتاجات التي تم التوصل إليها في هذه الدراسة بالنقاط آلاتية:

1. تم التوصل إلى قيم كل من معامل الامتصاص ومعامل الانكسار والكتلة الفعالة وكل مـن التحركيـة μ وطول الانتشار L وثابت الانتشار D عند تراكيز للألمنيوم (0.05-0.45).
2. من خلال إيجاد الكميات السابقة وتطبيق نموذج الطبقات الأربعة لحساب تيارات الخلية ومن ثم حـساب كفاءتها، بحيث يمكن اعتبار ذلك كطريقة نظرية لحساب كفاءة الخلية عند أي تركيـز للألمنيـوم فـي الطبقة النافذة.
3. إن تيار الطبقة النافذة بشكل عام يكون قليلاً ولذلك فإن مساهمتها في كفاءة الخلية قليلـة، وبـذلك فـإن مساهمتها الأساسية آتية من دورها في إزالة العيوب السطحية.
4. تبين لنا من خلال دراسة تأثير التطعيم بالألمنيوم إن كفاءة الخليـة الشمسية تزداد مـع زيادة تركيـز الألمنيوم.

المصـادر العربية

زي، إس. إم.، 1990. نبائط أشبـاه الموصلات. ترجمة، فهر غالب حياتي، حسيـن علـي أحمـد، دار الحكمة للطباعة والنشر، جامعة الموصل، 708 صفحة.

كرين، مارتن، أ.، 1989. الخلايـا الشمسية. ترجمة، د. يوسف مولود حسـن، مديـرية دار الكتـب للطباعة والنشر، جامعة الموصل، 326 صفحة.

لوجي، أنـدر وجين، أ.، روجي، 1994. الخلايـا الشمسية، ترجمة، د. نـور الدين الأخـوة وآخـرين، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، إدارة العلوم، تونس، 500 صفحة.

REFERENCES

Brown, R.A. and Williams, J.S., 1998. Amorphization Kinetics of GaAs Irradiation with Si Ions, J. Appl. Phys., Vol. 83, 7533 p.

John, E., Dave, Y. and James, G., 1982. Foreword, IEEE Trans. Electron Device, Vol. ED-29, 1029 p.

Hovel, H.J., 1975. In Semiconductor and Semimetals, Vol. 11, Solar Cell, edited by R.K. Willardson and A.C. Beer, Academic Press, New York, San Francisco, London. 254 p.

Kalashnikov, S.G. and Bonch-Bruevich, V.L., 1990. The Physics of Semiconductors, Nauka, for Physics and Mathematical Physics, 688 p.

Neamen, D.A., 1992. Semiconductor Physics and Devices, University of New Mexico, Richard D. Irwin, Inc. 746 p.

Nelson, J., 2005. The Physics of Solar Cells, Properties of Semiconductor Materials, Imperial Collage, UK. http//:www. World scientific Pankove J.I., (1971), Optical Process in Semiconductor, Dover Publication, 405 p.

Sandia National Laboratories, 2002. report Gallium Arsenide Solar Cells, Photovoltaic Systems Research and Development. http//:www.sandia.gov.dis.htm.

Sokolenkoff, R., Redheffer, 1966. Mathematics of Physics and Modern Engineering, 2nd. ed, McGraw - Hill, 760 p.

Sze, S.M., 1981. Physics of Semiconductor Devices, 2nd.ed, John Wiley, New York, 870 p.

Wanger, D.K. and Shealy, J.R., 2002. Graded Band–Gap AlGaAs Solar Cell Grown by MOVPE, Journal of Crystal Growth , Vol. 68, pp.474-476.

Willardson, R.K., 1967. Semiconductors and Semimetals, Vol. 3, (P.H. Philipp and H. Ehrenreich), Academic Press, New York, 367 p.