

تأثير بعض العوامل على القيم العملية والنظرية القصوى لكفاءة
الخلية الشمسية السليكونية

Effect Some Factors on the Maximum Practical and
Theoretical Values of Efficiency of the Silicon Solar Cells

فيصل علي البصام*

فلاح حسون عريبي**

قسم فيزياء الليزر/كلية العلوم للبنات/جامعة بابل

قسم الفيزياء/كلية العلوم/جامعة الكوفة**

// الخلاصة

تم في هذا البحث دراسة تأثير عوامل الطول الموجي وشدة الضوء ودرجة الحرارة على معلمات الخرج للخلية الشمسية السليكونية (تيار الدائرة القصيرة، فولتية الدائرة المفتوحة، عامل المليء). لقد أظهرت النتائج أن القيمة العملية القصوى للكفاءة بتأثير عامل الطول الموجي ودرجة الحرارة كانت (15.479%) عند الطول الموجي (587 نانومتر) (اللون الأصفر) وشدة إضاءة (100 واط/م²) والقيمة النظرية العظمى للكفاءة كانت (79.533%) عند الطول الموجي (452 نانومتر) (اللون الأزرق) عند نفس شدة إضاءة (100 واط/م²) ودرجة حرارة (296.5 كلفن) باستخدام برنامج بلغة فيجول بيسك. أما القيمة العملية العظمى للكفاءة بتأثير عامل الشدة فكانت (22.214%) عند الطول الموجي (509 نانومتر) (اللون الأخضر) عند شدة إضاءة (600 واط/م²) ودرجة حرارة (296.5 كلفن) والقيمة النظرية العظمى للكفاءة عند الظروف نفسها بلغت (32.421%) باستخدام البرنامج نفسه. كما أظهرت النتائج أن القيمة النظرية العظمى للكفاءة عند الظروف نفسها كانت (24.618%) باستخدام البرنامج نفسه.

Abstract

In this research, effect of wavelength, intensity of light and temperature factors on the output parameters of the silicon solar cell (short circuit current, open circuit voltage, filling factor) were studied. The results indicate that the maximum practical value of efficiency by the effect of wavelength factor was equal (15.479%) at wavelength (587nm) (yellow color) and light intensity (100W/m²) and temperature (296.5K). The maximum theoretical value of the efficiency was (79.533%) at the wavelength (452nm) (blue color) and light intensity (100W/m²) and temperature (296.5K) using a program in Visual –Basic language.

The maximum practical value of efficiency by the effect of intensity factor was equal (22.214%) at wavelength (509nm) (green color), and light intensity (600W/m²) and temperature (296.5K). The maximum theoretical value of the efficiency at the same conditions was equal (32.421%) by using the same program. Also the results appeared that the maximum theoretical value of the efficiency at the same conditions was equal (24.618%) using the program.

1- المقدمة :

لما كانت مصادر الطاقة التقليدية ناضبة وملوثة للبيئة والاستهلاك السريع لها، مما دفع الباحثون الى الحصول على مصادر جديدة مستديمة غير ملوثة كالطاقة الشمسية، وذلك من خلال الظاهرة الفوتوفولتائية⁽¹⁾. لقد كانت الكفاءة القصوى للتحويل في حالة استخدام خلايا (Si) هي (18%) و في حالة استخدام خلايا (GaAs) هي (23%)⁽²⁾. إن دراسة كفاءة الخلية الشمسية تتم بواسطة العوامل المؤثرة عليها وتغيرها مثل فولتية الدائرة المفتوحة V_{OC} وتيار الدائرة القصيرة I_{SC} ومقاومة التوالي R_S ومقاومة التوازي R_{SH} ⁽³⁾. لقد قام (Lioujj, 1993) بدراسة تأثير تركيز أشعة الشمس على كفاءة الخلية الشمسية (Si/Si) إذ سجلت كفاءة مقدارها (17.8%) عند (AM1, 1.5Suns) وعند تركيز الأشعة (AM100, 1.5Suns) ارتفعت الكفاءة الى (22.2%)⁽⁴⁾. ولقد لاحظ (Yoon and Vahan, 1994) وزملائه أن كفاءة الخلية تقل بزيادة درجة الحرارة وسببه يعود الى نقصان V_{OC} بارتفاع درجة الحرارة من (298-338)K تحت تأثير إشعاع (AM1.5, 1Suns)⁽⁵⁾، أما استخدام صفائح

متفلورة ملونة كحماية للخلية الشمسية بدلا من الزجاج فقد تمت من قبل (Maruyama, et. al,2000)، فقد لاحظ أن اللون الأخضر أدى الى زيادة الكفاءة بنسبة (2.7%) بينما التلويين بالبرتقالي والوردي والأحمر أدى الى نقصانها بنسبة (0.5، 1.5، 5.5)% على الترتيب، بسبب نقصان الانعكاسية في النموذج الملون عن غير الملون⁽⁶⁾. كما درس (Yates,2003) المعلمات (فولتية الدائرة المفتوحة (V_{OC})، تيار الدائرة القصيرة (I_{SC})، عامل الملء (FF)، الكفاءة (η)) لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة عمليا عند مدى درجة الحرارة K(298-333)، إذ اتضح أن زيادة درجة حرارة الخلية الشمسية أدى الى تناقص فولتية الدائرة المفتوحة وتزايد تيار الدائرة القصيرة وتناقص عامل الملء وبالنتيجة تناقص الكفاءة بمقدار (0.092 /K)⁽⁷⁾، ودرس (Nakajima et al,2004) معلمات الخلية الشمسية السليكونية في ضوء الشمس الطبيعي عند مواقع مختلفة من خط العرض (12.8°) الى خط العرض (43.8°)، ولاحظ أن التيار الخارج لهذه الخلايا لا يعتمد على تأثير درجة الحرارة فقط ولكن على التغير الموسمي لكثافة الهواء والأحوال الجوية الأخرى مثل نسبة بخار الماء عند كل موقع وحسب نسبة الأداء السنوي للكفاءة⁽⁸⁾. ودرس (Ghalib,2007) الكفاءة الكمية عدديا للخلايا نوع (CdS/CdTe) كدالة لطول الانتشار والطول الموجي وعمق معامل الامتصاص لقيم مختلفة من عرض منطقة النضوب ومعامل الامتصاص، وقد حصل على قيم عالية للكفاءة الكمية وصلت الى (96%) عند افتراضه لقيمة معامل الامتصاص 10⁴ cm⁻¹ وطول الانتشار 10⁻⁴ cm وعرض منطقة النضوب 1 μm⁽⁹⁾. إن البحث يهدف الى دراسة تأثير بعض العوامل على المعلمات الأساسية لكفاءة الخلية الشمسية السليكونية العملية والنظرية باستخدام برنامج بلغة فيجول بيسك باستخدام المرشحات بطول موجي معين وتغيير شدة الضوء الساقط عموديا ودرجة حرارة الخلية.

2- معادلات إيجاد الكفاءة عمليا ونظريا في الخلية الشمسية:

عند سقوط فوتونات ذات طاقة أكبر من فجوة الطاقة لشبه الموصل، فإنها تمتص من قبله، وكل فوتون سوف يولد زوج (إلكترون- فجوة)، للذان يتحدان بسرعة ونتيجة لذلك يتحولان الى حرارة. وبوجود حاجز الحاجز، يتجه الإلكترون الى الموصل الخارجي من منطقة n والفجوة تتجه نحو الموصل الخارجي من منطقة p. فيتولد جهد يؤدي الى سريان تيار كهربائي لتشغيل حمل خارجي. وهناك حالات عديدة يتعامل فيها شبه الموصل مع الفوتون⁽¹⁰⁾. إن تيار الدائرة القصيرة يمثل أقصى قيمة ممكنة للتيار الضوئي يمكن الحصول عليها من الخلية الشمسية عند الظروف المثالية عندما يكون قطبي الدائرة الكهربائية مغلقا، يمكن تمثيله بالمعادلة⁽¹⁾:

$$I_{SC} = I_0 (e^{qV_{OC}/KT} - 1) \quad (1)$$

حيث K ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة المطلقة V_{OC} أقصى قيمة للفولتية، يمكن الحصول عليها على طرفي الخلية الشمسية عندما تكون دائرة الخلية مفتوحة، أي مقاومة الحمل (R_L=∞) تعطى بالمعادلة الآتية⁽¹¹⁾:

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2)$$

و I₀ تمثل تيار الإشباع لثنائي الخلية الذي يساوي:

$$I_0 = DT^3 e^{-Eg/KT} \quad (3)$$

و I_L التيار المتولد ضوئيا، يعطى بالمعادلة الآتية⁽¹¹⁾:

$$I_L = qAG (L_e + W + L_h) \quad (4)$$

حيث أن A مساحة الخلية، G معدل توليد زوج إلكترون – فجوة ضوئيا، W عرض منطقة الاستنزاف، L_e و L_h هما طول الانتشار للإلكترون في المنطقة p وطول الانتشار للفجوة في المنطقة n على التوالي. وتحسب الكفاءة من إيجاد النسبة بين القدرة الكهربائية الخارجة من الخلية عند نقطة القدرة العظمى لخصائص تيار – فولتية (حاصل ضرب أعظم تيار وأعظم فولتية عند هذه النقطة) وقدرة أشعة الشمس الساقطة عليها (P_{in}) تمثل بالمعادلة⁽¹²⁾:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \quad (5)$$

ولاستخراج الكفاءة تكتب بالمعادلة بالشكل الآتي :

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (6)$$

حيث FF هو عامل المليء الذي يعد مقياس لحدة خصائص تيار – فولتية وقيمته بالنسبة للخلايا ذات الكفاءة المقبولة بين (0.70 – 0.85) يعطى بالمعادلة⁽¹⁾:

$$FF = \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{V_{OC} + 1} \quad (7)$$

حيث أن V_{OC} هي الفولتية المعيارية التي تعطى بالمعادلة الآتية:

$$V_{OC} = \frac{V_{OC}}{KT} \quad (8)$$

إذا كان كل فوتون ممتص يخلق زوج إلكترون – فجوة واحد، فإن معدل توليد الإلكترون أو الفجوة يعطى بالمعادلة التالية⁽¹³⁾:

$$Gp, light = Gn, light = \alpha \frac{P_{opt}(x)}{E_{ph}A} \quad (9)$$

حيث $P_{opt}(x)$ القدرة البصرية، E_{ph} طاقة الفوتون، α معامل الامتصاص. إن العوامل المؤثرة التي ليس لها علاقة بعمليات تصنيع الخلية هي شدة الضوء الساقط ومدة الإضاءة النهارية وزاوية ميل الخلية والحالة الجوية ودرجة الحرارة وموقع الخلية وغيرها. أما تلك المتعلقة بطرق التصنيع فهي فولتية الدائرة المفتوحة وتيار الدائرة القصيرة ومقاومة التوالي والتوازي (Shunt Resistance)، علاوة على البعد بين أصابع الشبكة في التوصيل الأمامي، إذ كلما زاد البعد بين الأصابع زادت مساحة الخلية المعرضة لضوء الشمس، فالسطح المعرض يمكن التعبير عنه بالمعادلة الآتية⁽¹⁴⁾:

$$F_{exp} = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \quad (10)$$

إذ أن t_1 عرض إصبع الشبكة t_2 البعد بين كل إصبعين، وأمثل بعد بين إصبعي الشبكة هو (2 – 5) mm⁽¹⁴⁾. ويرتبط تيار الدائرة القصيرة مع ما يعرف بمعدل الاستجابة الطيفية بالعلاقة الآتية⁽¹⁵⁾:

$$I_{sc} = \bar{K}F \quad (11)$$

حيث أن \bar{K} هو معدل الاستجابة الطيفية التي تعتمد على التوزيع الطيفي للاشعاع الساقط.

فبالتعويض في المعادلة (2) عندما $I_{sc} = I_L$ تصبح كالآتي:

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{\bar{K}}{I_0} F + 1 \right) \quad (12)$$

نلاحظ من المعادلتين (11) و (12) أن تيار الدائرة القصيرة يتناسب خطياً مع الفيض الشمسي الساقط (الشدة)، بينما فولتية الدائرة المفتوحة تتناسب أسياً مع ذلك الفيض F ^(11,10). ويرتبط التيار الضوئي الطيفي $I_{L,\lambda}$ مع الكفاءة الكمية β_λ للفوتون ذي الطول الموجي λ بالعلاقة الآتية⁽¹¹⁾:

$$I_{L,\lambda} = q\beta_\lambda \dot{N}_\lambda = \frac{q\beta_\lambda \lambda}{hc} F_\lambda \quad (13)$$

أو أن:

$$I_{L,\lambda} = K_\lambda F_\lambda \quad (14)$$

حيث أن $\dot{N}_\lambda = \frac{n_\lambda}{\beta_\lambda}$ تمثل معدل توليد الأزواج لوحدة المساحة بواسطة \dot{N}_λ التي هي عدد الفوتونات الساقطة لوحدة

الزمن لوحدة المساحة ولوحدة الأطوال الموجية، F_λ هي الفيض الشمسي ذي الطول الموجي λ .

عند زيادة درجة حرارة الخلية، فإنها تسبب زيادة مقاومة التوالي R_s وتناقص التوصيلية. في مدى التشغيل الاعتيادي للخلية الشمسية K (300-380)، تكون الزيادة في R_s صغيرة جداً، كما تحدث زيادة قليلة في التيار الضوئي (تيار الدائرة القصيرة) الذي يعطى بالمعادلة^(16,7):

$$I_L(\lambda) = \eta_\lambda q N_A \quad (15)$$

حيث أن η_λ كفاءة الخلية الشمسية عند الطول الموجي λ ، N_A عدد الفوتونات عند طول موجي معين

3- الإجراءات العملية و النظرية:

(a) إيجاد كفاءة الخلية عمليا:

استخدمت خلية شمسية من السليكون أحادي البلورة مصنعة بعملية زكر ولسكي (Czochralski) (Process) نوع P من شركة المنصور، ذات شكل دائري قطرها (10 cm) وسمكها $(0.5 \pm 0.015) \text{mm}$ ، ومعامل الانكسار للعاكس $n = 2.2$ ، مساحة الخلية $(78.5 \pm 1.5) \text{cm}^2$. ولقياس خصائص تيار – فولتية، استخدمت مقاييس متعددة رقمية و محرار رقمي لقياس درجة الحرارة ومصدر ضوئي محاكي للشمس على مسافة عمودية (30cm)، وجهاز قياس شدة الاشعاع الشمسي الساقط (Solar meter) بوحدة (W/m^2) . ومسخن يبعد (5cm) عن الخلية، ومجزئ جهد للتحكم بالشدة. ومرشحات ضوئية بأطوال موجية $(452, 509, 587, 614, 656) \text{nm}$ ، تم تغيير عوامل الشدة ودرجة الحرارة والطول الموجي المؤثرة على الخلية الشمسية بتغيير مقاومة الحمل R_L بصورة تدريجية وقيست V_{OC} عند $R_L = \infty$ عند I_{SC} عند $R_L = 0$ ، ومن ثم حساب FF من المعادلة (7)، وبالتالي η من المعادلة (6).

(b) حساب كفاءة الخلية نظريا:

أعد برنامج الحاسبة الالكترونية بلغة فيجول بيسك باستخدام المعادلات (14) و(4) و(3) و(7) و(8) و(6) و(2) و(1)، بعد إدراج قيم الثوابت ($I_0, G, I_L, V_{OC}, I_{SC}, V_{oc}, FF, \eta$) معلمات الخلية الشمسية لحساب (K, A, q, D, L_e, L_h, W) السليكونية، والمتغيرات، وبيين ملحق (1) برنامج الحاسبة بلغة فيجول بيسك وتطبيقات ($T, E_{ph}, E_g, \alpha, I$) وعوامل الطول الموجي والشدة ودرجة الحرارة...

4- النتائج والمناقشة:

استخرجت كفاءة الخلية الشمسية السليكونية العظمى عمليا ونظريا بتأثير عوامل الطول الموجي وشدة الضوء الساقط عموديا ودرجة الحرارة عمليا واستخدام المتغيرات والثوابت في برنامج الحاسبة لإيجاد معلمات الخلية المشار إليها في البند (3b).

(a) تأثير عامل الطول الموجي على كفاءة الخلية:

(1) النتائج العملية

يبين الشكل (1) خصائص التيار – فولتية للخلية الشمسية السليكونية، أنها تتغير تبعا لتغير شدة الضوء الساقط ومساحة المنحني تزداد بزيادة الشدة، وذلك لزيادة عدد الفوتونات المولدة لأزواج إلكترون – فجوة، مما يزيد من قيم التيار المار في الدائرة، في حين أن فولتية الدائرة المفتوحة تتغير أسيا مع الشدة، كذلك يتغير تيار الدائرة القصيرة أسيا مع فولتية الدائرة المفتوحة، فعند قيمة $V = 0.484$ يبدأ التيار بالتزايد بدرجة كبيرة، بسبب تزايد الشدة، نتيجة تولد الأزواج. ويوضح الجدول (1) تغير معلمات خرج الخلية الشمسية عند تغيير الطول الموجي الساقط على الخلية باستخدام المرشحات الضوئية عند شدة إضاءة ودرجة حرارة ثابتين، حيث يلاحظ أن تيار الدائرة القصيرة يتغير مع الطول الموجي والاستجابة الطيفية منخفضة عند الطول الموجي (452nm) (اللون الأزرق)، لأن الأطوال الموجية القصيرة تكون ممتصة قريبا جدا من السطح، وإعادة الاتحاد لأزواج إلكترون – فجوة عند السطح تكون أكبر وضوحا^(12,17)، أو بتعبير آخر أن حاملات المتولدة عند سطح الخلية تكون مقتنصة بواسطة حالات السطح (Surface States)، مما يسبب توهين التيار الضوئي. بينما تتزايد الاستجابة الطيفية عند الطول الموجي (509 nm) (اللون الأخضر) وأعلى استجابة تكون عند الطول الموجي الأعلى (587nm) (اللون الأصفر)، لأن معظم حاملات المتولدة والقريبة من المفروق (p – n) تصل المفروق، ولهذا فإن توهين التيار الضوئي يكاد يكون معدوما، أما الأطوال الموجية الأخرى المقترحة (614, 656nm) (اللون البرتقالي والأحمر)، فإن الفوتونات تكون ممتصة ويعمق في البلورة وبعيدة من المفروق، بسبب الأطوال الموجية الأكبر في الضوء المرئي، علاوة على حصول إعادة الاتحاد في المناطق شبه المتعادلة (Quasi-neutral region) المتجانسة التطعيم^(12,17). إن تزايد وتنقص تيار الدائرة القصيرة و فولتية الدائرة المفتوحة وعامل المليء و الفولتية المعيارية مع تزايد الطول الموجي يوضحه جدول (1) (18). إن الخسائر الطيفية ناجمة عن عدم التوافق بين الطيف الشمسي وخواص الامتصاص الطيفي للمادة التي تكون غير ممتصة بسبب أن $E_{ph} < E_g$ ^(19,20). فالطول الموجي الأمثل للخلايا السليكونية المتعددة التبلور هو $\lambda_{opt} = 1100 \text{nm}$ ، وللخلايا السليكونية العشوائية المهدرجة $\lambda_{opt} = 700 \text{nm}$ ، أما كفاءة التحويل لهذه الأنواع من الخلايا فهي (20%) عند استجابة طيفية مثلى تحدث عند الطول الموجي (550nm)⁽²¹⁾. عند الأطوال الموجية (452, 509)nm يكون معامل الامتصاص كبير لكن الخلايا الاعتيادية لا تكون فعالة في التقاط حاملات المتولدة قرب السطح، لهذا تكون كفاءة التجميع الكمي مساوية الى % (13.114, 13.805) على التوالي، أما عند الطول الموجي (587nm). فيكون معامل الامتصاص قليلا، لكن نسبة كبيرة من حاملات تتكون في المناطق التي تكون عندها احتمالية التجميع عالية. لقد لوحظ أن تحويل الطيف الشمسي الى ضوء أحادي اللون يزيد الكفاءة بشكل كبير بحيث ان $E_{ph} \geq E_g$ ⁽²¹⁾، وهذا يفسر الحصول على أعظم قيمة لكفاءة التجميع الكمي بقيمة (15.479)%.

(2) النتائج النظرية

لقد لوحظ تغير معلمات خرج الخلية الشمسية عند تغيير الطول الموجي الساقط عند شدة $(100 \text{W}/\text{m}^2)$ ودرجة حرارة (296.5K). إذ أن منطقة الامتصاص الضعيفة هي عند الطول الموجي الأكبر من (500nm)، ويرجع ذلك الى عمليات الامتصاص للفجوة غير المباشرة، ثم يزداد بصورة مفاجئة التي ترجع الى عمليات الامتصاص للفجوة المباشرة كما في الشكل (2)، ففي الأطوال الموجية القصيرة يكون معدل توليد أزواج إلكترون – فجوة كبيرا، لأن معامل الامتصاص يتناسب طرديا مع معدل التوليد⁽²²⁾. وبزيادة معدل التوليد يزداد التيار المتولد ضوئيا (تيار الدائرة القصيرة)، مما يؤدي الى زيادة فولتية الدائرة المفتوحة و الفولتية المعيارية وعامل المليء وبالنتيجة زيادة كفاءة الخلية الشمسية⁽¹⁸⁾، وهذا يفسر سبب الحصول على أعظم قيمة لكفاءة التجميع الكمي عند الطول الموجي (452nm) (اللون الأزرق)، والجدول (2) يبين قيم المعلمات وهي مقارنة لنتائج الدراسة للباحث⁽²²⁾.

وعند مقارنة النتائج العملية مع النتائج النظرية بتطبيق العوامل ذاتها، يتضح أن هناك فروق كبيرة في قيم الكفاءة، فنجد أن الكفاءة العملية العظمى (15.479%) عند الطول الموجي (587nm) (اللون الأصفر) وشدة (100W/m²) ودرجة حرارة (296.5K) بينما الكفاءة النظرية العظمى تساوي (79.533%) عند العوامل ذاتها عن طريق برنامج الحاسبة بلغة فيجول بيسك والسبب يعود الى إهمال بعض العوامل المؤثرة على الكفاءة مثل مقاومتي التوالي والتوازي ومقاومة الحمل وغيرها من العوامل عند التطبيق النظري للمعادلات المستخدمة لحساب معاملات الخرج للخلية.

(b) تأثير عامل الشدة على الكفاءة:

1- النتائج العملية

تتغير معالم خرج الخلية مع تغير شدة الأشعة عند طول موجي (509nm) ودرجة حرارة (296.5K) كما في الجدول (3). لقد لوحظ أنه في تركيب طيفي معين تتناسب الشدة مع تيار الدائرة القصيرة، لأن عدد الفوتونات تزداد وبالتالي تؤدي الى زيادة أعداد أزواج الإلكترون – فجوة⁽²³⁾، كما أن فولتية الدائرة المفتوحة تتغير أسياً مع الشدة بسبب أن التغير في المقاومة المتوازية يكون أعلى عند القيم الواطئة للشدة. هذه الدراسة مقارنة للدراسة التي حصل عليها كل من^(4,22,8).

2- النتائج النظرية

يوضح الجدول (4) تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير الشدة عند طول موجي (509nm) ودرجة حرارة (296.5K)، حيث يبين تزايد قيم المعلمات مع زيادة الشدة مما يؤدي الى زيادة عدد أو تركيز الحاملات بسبب الامتصاص الأعلى للضوء، والافتراض المعقول أن نسبة التوليد الأعلى هي بسبب شدة الإضاءة الأعلى⁽²⁴⁾.

وعند إجراء مقارنة بين النتائج النظرية ونتائج الدراسة^(4,22,8)، نجد أنها متوافقة. وعند مقارنة النتائج العملية والنظرية نجد أن الكفاءة النظرية العظمى هي أكبر بكثير بقيمة (32.421%) من الكفاءة العملية العظمى (22.214%) عند قيم المعلمات نفسها، أي بطول موجي (509nm) ودرجة حرارة (296.5K) وشدة (600W/m²)، بسبب إهمال بعض العوامل المؤثرة على الكفاءة مثل مقاومتي التوالي والتوازي ومقاومة الحمل وغيرها عند التطبيق البرنامج النظري للمعادلات المستخدمة لحساب معاملات خرج الخلية، كما في جدول (3) و(4).

(c) تأثير عامل درجة الحرارة على الكفاءة:

1- النتائج العملية

يتضح من الجدول (5) تغير معاملات الخرج مع تغير درجة الحرارة عند طول موجي (587nm) وشدة إضاءة (100W/m²)، حيث أنه بزيادة درجة الحرارة فإن الكثير من الإلكترونات ستكون قادرة على التحرك من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل، علاوة على الإلكترونات الإضافية منها في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ التي تؤدي الى زيادة تيار الإشباع، مما يؤدي الى تناقص فولتية الدائرة المفتوحة^(7,16) بمقدار (3.040 × 10⁻³ V/K)، هذا التناقص في الفولتية يسمح لحاملات الشحنة المتهيجة حرارياً أن تعبر المفرد في كلا الاتجاهين، ولكن تيار الدائرة القصيرة يزداد بمقدار (9.756 × 10⁻⁴ A/K)، ويؤدي بالتالي الى تناقص نسبة المليء بمقدار (2.650 × 10⁻³ /K) وبالنتيجة تناقص كفاءة الخلية بمقدار (0.133/K). هذه النتيجة موافقة لما حصل عليه^(5,25,7).

2- النتائج النظرية

يوضح جدول (6) تغير معاملات خرج الخلية مع تغير درجة الحرارة عند طول موجي (587nm) وشدة إضاءة (100W/m²)، فعند زيادة درجة حرارة الخلية، فإن عدداً من الإلكترونات الموجودة في حزمة التكافؤ يمكن أن تثار حرارياً وتنتقل الى حزمة التوصيل تاركة مكانها فجوات، والإلكترونات التي تصل حزمة التوصيل ستملئ هذه الحزمة جزئياً، فانهيار طاقة الفجوة حرارياً يتبع المعادلة الآتية⁽²⁶⁾:

$$E_g(T) = E_g(300K) + \frac{dE_g}{dT}(T - 300K) \quad (16)$$

ولما كانت $\frac{dE_g}{dT} = -2.3 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ للسليكون فإن E_g تتناقص بمقدار (2.665 × 10⁻⁴ eV/K)، هذا التناقص في

فجوة الطاقة يسمح للفوتونات في الأطوال الموجية الأطول أن تكون ممتصة بواسطة الخلية، لذلك يلاحظ حدوث زيادة قليلة في تيار الدائرة القصيرة بزيادة درجة الحرارة^(7,16). إن زيادة درجة حرارة الخلية يؤدي الى زيادة تيار الإشباع بمقدار (1.348 × A/K)، وتناقص فولتية الدائرة المفتوحة بمقدار (1.598 × 10⁻³ V/K)، وبالتالي تناقص الكفاءة بمقدار (0.063/K)، وعند إجراء مقارنة مع نتائج سابقة⁽²⁷⁾ نجد توافق بينهما، والأشكال (3)، (4)، (5)، (6)، (7)، (8)، (9)، (10) تبين تغير عوامل فجوة الطاقة وتيار الإشباع وفولتية الدائرة المفتوحة وتيار الدائرة القصيرة وعامل المليء والكفاءة مع درجة الحرارة المطلقة للخلية نظرياً وعملياً. وعند مقارنة النتائج العملية والنظرية، يتضح أن القيمة العملية العظمى للكفاءة (15.479%) عند طول موجي (587nm) (اللون الأصفر) وشدة إضاءة (100W/m²) ودرجة حرارة (296.5K)، بينما تكون القيمة النظرية العظمى للكفاءة (24.618%) عند قيم المعلمات نفسها باستخدام برنامج الحاسبة بلغة فيجول بيسك.

5-الاستنتاجات والمقترحات:

- من نتائج البحث يتضح مايلي:
- 1- إن أفضل استجابة طيفية تحدث للخلية عمليا عند تغيير الطول الموجي بقيمة (587nm) (اللون الأصفر) لتصل كفاءة التحويل (15.479%)، علاوة على زيادة الكفاءة بزيادة شدة الضوء الساقط عموديا.
 - 2- إن زيادة درجة الحرارة تؤدي الى زيادة تيار الإشباع، وبالتالي تناقص القدرة الخارجة، لذا يفضل بناء أو وضع منظومات الخلايا في أماكن لا ترتفع فيها درجة الحرارة عاليا مثلا تحتوي على تهوية جيدة أو أغطية نباتية أرضية منخفضة الارتفاع، أو تظلي الخلايا المصنعة بطبقتين أو ثلاث لتقليل الانعكاسية من السطح .
 - 3- بالإمكان استخدام برنامج الحاسبة بلغة فيجول بيسك لتحديد أفضل قيم المتغيرات مثل فجوة الطاقة لشبه موصل معين ونسب التشويب لنوعي p و n وغيرها باستخدام المعادلات الأنفة الذكر لحساب معالم الخلية وبالتالي كفاءتها.
 - 4- يفضل استخدام اسماك الخلايا أقل من (100)mm لتتمكن من امتصاص غالبية الأطوال الموجية في الطيف الشمسي، ويكمن ذلك من صعوبة تقطيع الشرائح، لذا يفضل استخدام ليزر CO₂ لأغراض التقطيع الدقيق.
 - 5- تقريبا نسب الكفاءة العملية من نسب الكفاءة النظرية البالغة (79.533%)، وذلك بتقليل تأثيرات مقاومات التوالي والتوازي والحمل وإعادة الاتحاد للحاملات عند المفارق، لغرض رفع قدرة الخرج.

جدول (1) يبين معالم خرج الخلية مع تغيير الطول الموجي عمليا

λ (nm)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
452	0.364	0.372	0.7603	13.114
509	0.377	0.377	0.7625	13.805
587	0.407	0.389	0.7675	15.479
614	0.404	0.387	0.7667	15.270
656	0.401	0.384	0.7654	15.013

جدول (2) يبين معالم خرج الخلية مع تغير الطول الموجي نظريا

(nm) λ	E _{ph} (eV)	G×10 ²⁰ (cm ⁻³ s ⁻¹)	I _L (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	v _{oc} (V)	FF	η (%)
452	2.7434	3.1359	85.3544	0.8435	85.3544	32.9875	0.8670	79.533
509	2.4361	1.2420	33.8049	0.8199	33.8049	32.0613	0.8641	30.513
587	2.1124	1.0094	27.4733	0.8146	27.4733	31.7839	0.8635	24.618
614	2.0195	0.9411	25.6160	0.8128	25.6160	31.7839	0.8633	22.898
656	1.8902	0.6029	16.4110	0.8014	16.4110	31.3386	0.8618	14.439

جدول(3) يبين معالم خرج الخلية مع تغير الطول الموجي نظريا

Intensity(W/m ²)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
100	0.377	0.376	0.7625	13.805
200	0.808	0.475	0.7977	19.500
300	1.169	0.491	0.8023	19.556
400	1.531	0.505	0.8062	19.853
500	2.000	0.512	0.8081	21.084

جدول (4) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير شدة الاشعة الساقطة

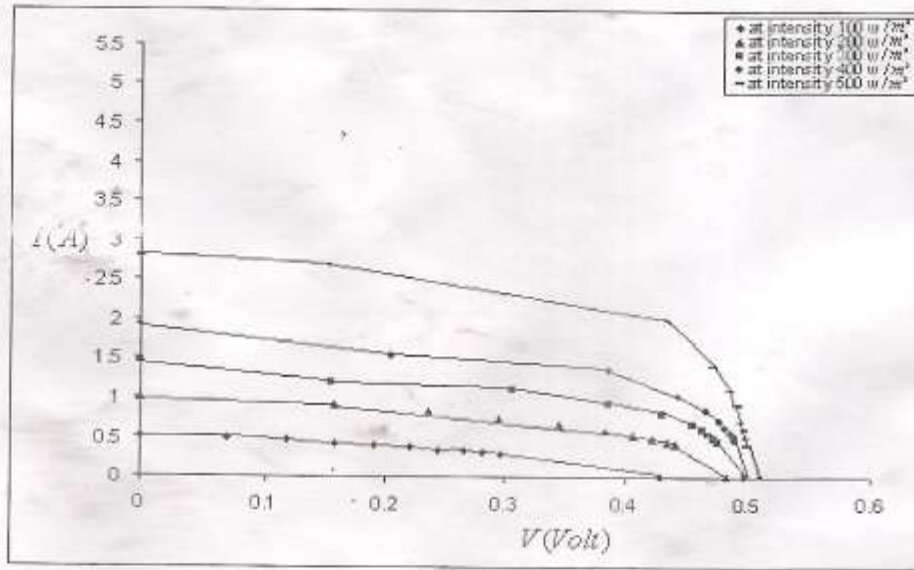
Intensity (W/m ²)	G×10 ²⁰ (cm ⁻³ s ⁻¹)	I _L (A)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	v _{oc} (V)	FF	η (%)
100	1.24197	33.8049	0.8199	33.8049	32.0613	0.8641	30.513
200	2.48394	67.6099	0.8376	67.6099	32.7544	0.8663	31.251
300	3.72591	101.4148	0.8480	101.4148	33.1599	0.8675	31.683
400	4.96788	135.2198	0.8553	135.2198	33.4476	0.8684	31.989
500	6.20985	169.0247	0.8610	169.0247	33.6707	0.8691	32.227
600	7.45182	202.8297	0.8657	202.8297	33.8530	0.8696	32.421

جدول (5) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير درجة الحرارة الخلية عمليا

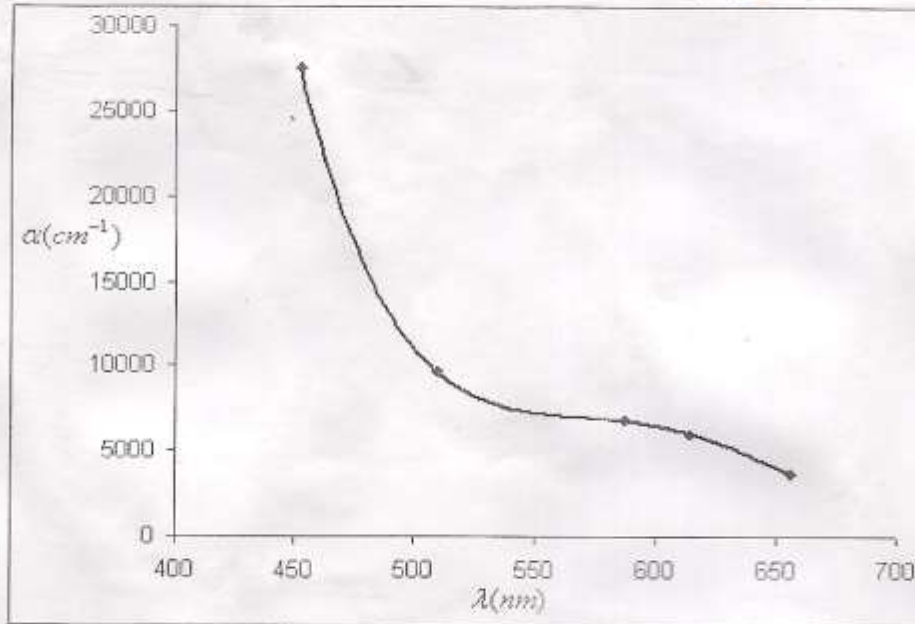
T(K)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
296.5	0.407	0.389	0.7675	15.479
303	0.419	0.380	0.7602	965420
308	0.425	0.362	0.7495	14.724
313	0.434	0.345	0.7385	14.087
318	0.440	0.329	0.7273	13.413
323	0.445	0.309	0.7131	12.491
328	0.450	0.297	0.7027	11.965
333	0.456	0.279	0.6877	11.146
338	0.458	0.264	0.6738	10.371
343	0.462	0.247	0.6533	9.558
348	0.464	0.231	0.6400	8.739
353	0.466	0.218	0.6244	8.081
358	0.467	0.202	0.6045	7.264

جدول (6) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير درجة الحرارة الخلية نظريا.

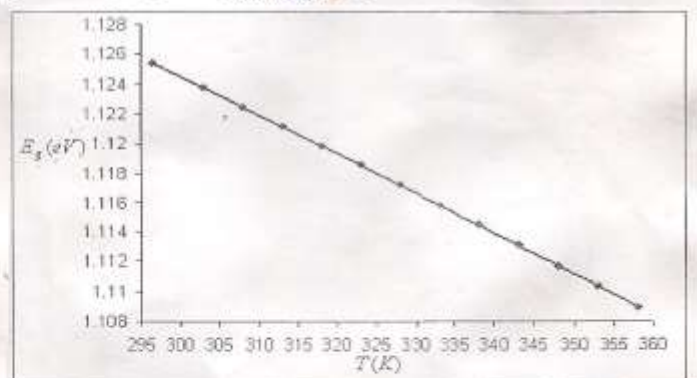
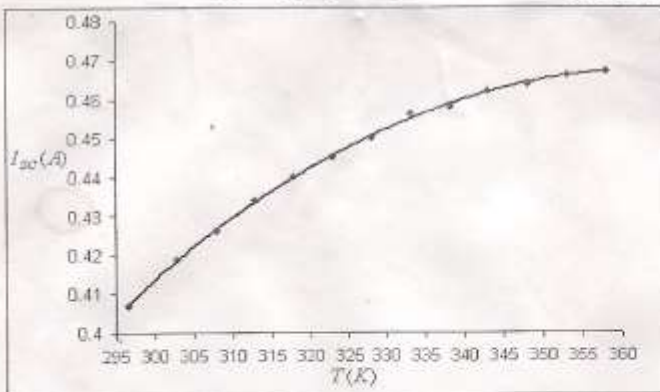
T(K)	E _g eV)	I ₀ (A)×10 ⁻¹¹	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
296.5	1.12541	0.0426	27.4733064702714	0.8146	0.8635	24.618
303	1.12375	0.1176	27.4733064702713	0.8044	0.8599	24.211
308	1.12247	0.2607	27.4733064702715	0.7965	0.8572	23.897
313	1.12117	0.5638	27.4733064702715	0.7886	0.8544	23.583
318	1.11986	1.191	27.4733064702713	0.7807	0.8515	23.269
323	1.11854	2.463	27.4733064702714	0.7728	0.8486	22.954
328	1.11721	4.985	27.4733064702714	0.7648	0.8457	22.639
333	1.11587	9.891	27.4733064702714	0.7568	0.8428	22.323
338	1.11452	19.240	27.4733064702715	0.7487	0.8398	22.008
343	1.11316	36.770	27.4733064702714	0.7406	0.8368	21.692
348	1.11179	69.030	27.4733064702715	0.7325	0.8337	21.376
353	1.11040	127.400	27.4733064702714	0.7244	0.8306	21.059
358	1.10901	231.300	27.4733064702715	0.7162	0.8274	20.743



الشكل (1) يبين خصائص التيار - الفولتية للخلية الشمسية عمليا.

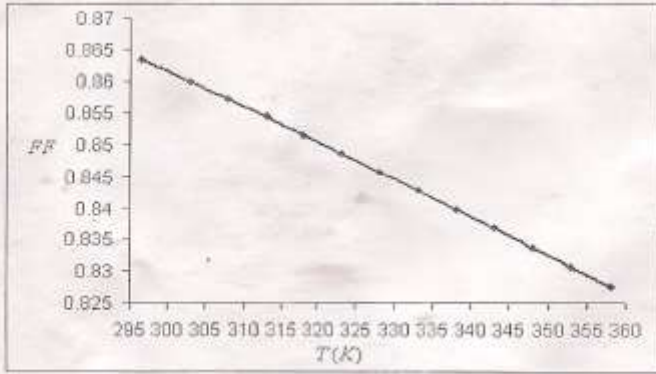


الشكل (2) يبين معامل الامتصاص للسليكون بوصفه دالةً للطول الموجي نظريا.

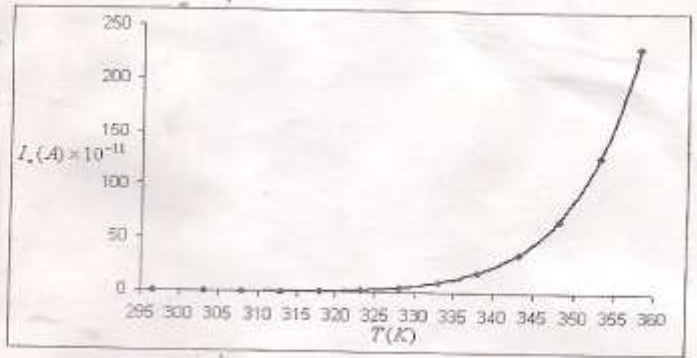


الشكل (3) يبين تغير فجوة الطاقة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظريا.

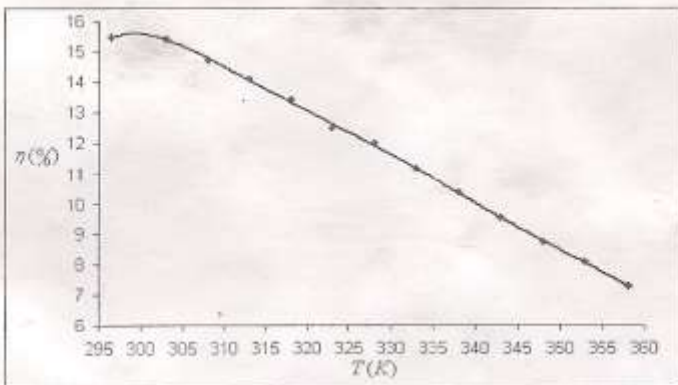
الشكل (4) يبين تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عمليا.



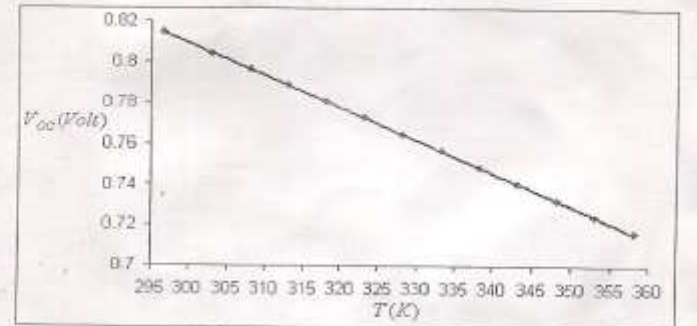
الشكل (6) يبين تغير عامل الملاءم مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.



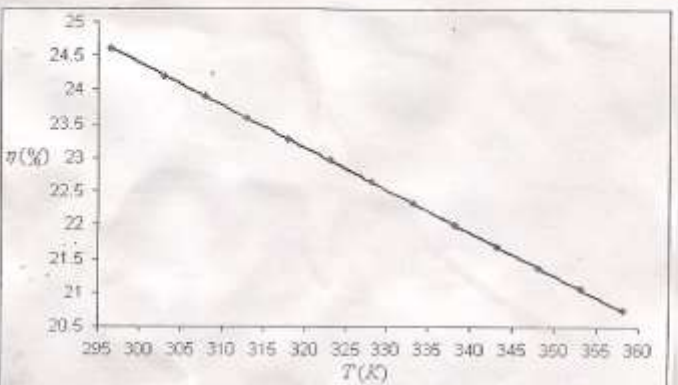
الشكل (5) يبين تغير تيار الإشباع مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.



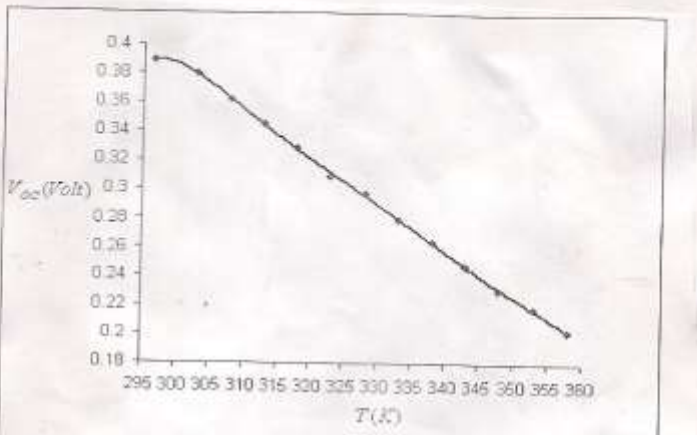
الشكل (8) يبين تغير الكفاءة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.



الشكل (7) يبين تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.



الشكل (10) يبين تغير الكفاءة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.



الشكل (9) يبين تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.

// المصادر

- [1] مارتن. أ.كرين ،"الخلايا الشمسية مبادئ العمل،التقنية وتطبيقات المنظومة" ترجمة يوسف مولود حسن، جامعة الموصل ، 1989.
- [2] ميشل وبتلر،"الطاقة الشمسية" ،ترجمة عاصم عبد الكريم عزوز،جامعة الموصل ،1982.
- [3]G.Busch &H.Schaade, "Lecturers and Solid State Physics " , Pergamon,1976.
- [4]Lioujj,Physical Model and Predicting the Performance of Si/SiGe ,Si/Si and AlGaAs/GaAs Solar Cells" ,Solar Energy Materials and Solar Cells,29,3,261,1993.
- [5]Yoon,S.Garboushian and Vahan,"Reduced Temperature Dependence of High Concentration Photovoltaic Solar Cell Open Circuit Voltage at High Concentration Levels ",IEEE Electron Device Society,2,1500,1994.
- [6]T.Maruyana,R.Kitamura,A.Enomoto,and K.Shirasawa ,,"Solar Cell Module Colored with Fluorescent Plate" ,Solar Energy Materials and Solar Cells, 69,61,2000.
- [7]T.A.Yates,"Solar Cell in Concentrating Systems and their High Limitations ",Senior Thesis, University of California (Santa Cruz),Sept. 3 ,2003.
- [8]Nakajima,M.Ichikawa, M.Kondo, K.Yamamoto,H.Yamagishi and Y.Tawada", Special Effect of a Single – Junction Amorphous Silicon Solar Cell on Outdoor Performance", Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 – Regular Papers Short Notes and Review Papers,43(5A): p.2425-2431,2004.
- [9] Ghalib,B.A.,Quantum Efficiency of CdS/CdTe Solar Cell, J.Basrah Research (Sciences),Vol.33,Part.1 Mar.55-62(2007).
- [10]ACRE Australian CRC for Renewable Energy Lid, Solar Cell, Principle and Applications",p.1,2000.
- [11] سول وايدر " مقدمة في الطاقة الشمسية" ،ترجمة شاكر جابر شاكر،خليل ابراهيم سعيد ،يوسف مولود حسن، عماد ممدوح، جامعة الموصل ، 1989.
- [12]D.L.Pulfrey, "Photovoltaic Power Generation" m Van Nostrand Reinhold Company,Oxford,p.56-72 ,1988.
- [13]B.Van Zeghroeek, "Carrier Recombination and Generation ",Chapter 2,Semiconductor Fundamentals,BBoulder,Dec.,2004.
- [14]C.M.Signal, "Efficiency of Conventional Silicon Solar Cell" ,International Solar Energy Society Congress, New Delhi ,India ,p.766-771,1979.
- [15]S.C.Bawa, T.B.Desai, K.S.Yadav,V.Holla and B.R.Marathe,"Design and Fabrication of Silicon Solar Cells for Concentrated Light", Sun Mankind's Future Source of Energy, Proceeding of the International Solar Energy Society Congress, New Delhi ,India,2p.709,1978.
- [16]E.Radziemska and E.Kleugmann, "Thermally Affected Parameters of the Current – Voltage Characteristic of Silicon Photocell", Energy Conversion and Managements, 43,p.1889-1900,2002.
- [17]B.Van Zeghbroeck," Solar Cells", Chapter 4:p-n Junctions, Principles of Semiconductor Devices, Boulder ,Dec.,2004.
- [18] J.P.McKelvey, "Solid State and Semiconductor Physics" ,New York:Harper and Row,p.422,1966.
- [19] M.A.Green, Solar Cells: Operating Principles ,Technology and Systems Applications, Prentice Hall, Englewood,Cliffs,N.J.,1982.
- [20] M.A.Green, "Third Generation Photovoltaic" ,Advanced Solar Energy Conversion,Berlin,2003.
- [21]W.D.J.H.M.Vansark,A.Meijerink,R.E.I.Sshropp,J.A.Mvan,Roosmale and E.H.Lysen, "Modeling Improvement of Spectral Response of Solar Cells by Deployment of Spectral Converters Containing Semiconductors Nanocrystals" ,Semiconductors, Vol.38,No.8,p962-969,2004.

- [22]E.S.Hraysat, “Investigation of Three Cascade Solar Cells under Various Air MassCondition”WREC,p.1894-1897,2000.
- [23]H.J.Hovel,”Solar Cells”, Semiconductors and Semimetals, Academic Press ,New York,p.334-339,1990.
- [24]H.Hashigami,Y.Itakura and T.Saitoh, ”Effect of Illumination Conditions on Czochralski – Grown Silicon Solar Cell Degradation”, Journal of Applied Physics ,93mp.4240,2003.
- [25] EG .Guells”k ,VB.Shuman and AS.Zubrilov,”Low – Temperature Characteristic of Solar Cells”, Semiconductors.29(8):p.779-780,1995.
- [26]MoslemShaltout,M.A.Elnicklawy,M.M.Hassen,A.F.Rahoma,M.Sabry,”The Temperature Dependence of the Spectral and Efficiency Behavior of Silicon Solar Cell under Low Concentrated Solar Radiation, Renewable ,21,p.445-458,2000.
- [27]J.C.C.Fan, ”Theoretical Temperature Dependence of Solar Cell Parameters” ,Solar Cells, 17,p.309-315,1986.