



دراسة تأثير عوامل الطول الموجي وشدة الضوء ودرجة  
الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية السليكونية الأحادية  
البلورة

رسالة مقدمة من قبل / فلاح حسون عريبي

إلى مجلس كلية العلوم- جامعة بابل

وهي جزء من متطلبات نيل درجة ماجستير

علوم في الفيزياء .

إشراف

د . فيصل علي مصطفى

تشرين الأول

رمضان ١٤٢٧

٢٠٠٦



**Study effectiveness of the wavelength and  
the light intensity and the temperature  
factors on the efficiency of the single crystal  
silicon solar cell**

**A Thesis Submitted By**

**Falah Hasson Araybi**

**To the Council of the College of Science**

**University of Babylon**

**In Partial Fulfillment of the Requirements for  
the Degree of Master of Sciences in Physics**

**Advisor**

**Dr.Faisel Ali Mustaf /// Ramadan ١٤٢٧**

**October ٢٠٠٦**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿ يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا

الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ ﴾

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

سورة المجادلة من الآية (١١)

## شكر وتقدير

بسم الله خير الأسماء ، بسم الله رب الأرض والسماء ، باسمه الذي عليه توكل في الشدة والرخاء . الحمد لله الأول بلا أول كان قبله . والآخر بلا آخر يكون بعده . الذي قصرت عن رؤيته أبصار الناظرين وعجزت عن نعته أوهام الواصفين . الحمد لله الذي منّ علينا بمحمدٍ نبيه (صلى الله عليه واله الطيبين الطاهرين) اللهم صل على محمد أمينك وعلى وحيك ونجيك من خلقك وصفيك من عبادك . فلك الحمد ياربي على توفيقني في إتمام هذا البحث .

لا يسعني وأنا انهي بحثي إلا أن أتقدم بالشكر إلى الأستاذ المساعد الدكتور فيصل علي مصطفى والأستاذ المساعد الدكتور طالب هادي قدوري والدكتور عدنان فالح حسن وزملائي طلبة الدراسات العليا في قسم الفيزياء وأساتذة وموظفي قسم الفيزياء وإلى جامعة بابل – كلية العلوم لما قدموه من رعاية لطلبة الدراسات العليا وإلى الطالبين عادل حسن عبد وعلي دشر صالح في قسم علوم الحاسبات - كلية العلوم- جامعة بابل لمساعدتهم لي في إعداد برنامج الحاسبة الإلكترونية لانجاز الجانب النظري .

فلاح

## إقرار المشرف على الرسالة

أشهد إن إعداد هذه الرسالة الموسومة بـ " دراسة تأثير عوامل الطول الموجي وشدة الضوء ودرجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية السليكونية الأحادية البلورة " للطلاب ( فلاح حسون عريبي ) قد جرى بإشرافي في قسم الفيزياء/ كلية العلوم/ جامعة بابل ، وهي جزء من متطلبات نيل درجة ماجستير علوم في الفيزياء.

التوقيع :

المشرف : د . فيصل علي مصطفى البصام

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

العنوان : كلية العلوم للبنات / جامعة بابل

التأريخ : / / ٢٠٠٠

### توصية رئيس قسم الفيزياء

بناءً على التوصيات المتوفرة أُرشح هذه الرسالة للمناقشة

التوقيع :

رئيس القسم : د . طالب هادي قدوري

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

العنوان : كلية العلوم / جامعة بابل

التأريخ : / / ٢٠٠٠

### قرار اللجنة المناقشة

نشهد نحن أعضاء لجنة التقويم والمناقشة ، إننا اطلعنا على هذه الرسالة وقد ناقشنا الطالب في محتوياتها ، وفيما له علاقة بها ، ورأينا إنها جديرة بالقبول لنيل درجة ماجستير علوم في الفيزياء ، وعليه نوصي بقبول الرسالة وتقدير ( جيد جداً ) .

### رئيس اللجنة

التوقيع :

الاسم : د . فؤاد شاكر هاشم

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد.

العنوان : جامعة بابل - كلية التربية

التأريخ : / / ٢٠٠٧

## عضو اللجنة

التوقيع :

الاسم : د . محمد عبد الأمير كريم

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

العنوان : جامعة بابل - كلية العلوم

التاريخ : / / ٢٠٠٧

## عضو اللجنة

التوقيع :

الاسم : د . عدنان فالح حسن

المرتبة العلمية : مدرس

العنوان : جامعة الكوفة - كلية العلوم

التاريخ : / / ٢٠٠٧

## عضو اللجنة (المشرف)

التوقيع :

الاسم : د . فيصل علي مصطفى البصام

المرتبة العلمية : أستاذ مساعد

العنوان : جامعة بابل - كلية العلوم للنبات

التاريخ : / / ٢٠٠٧

## مصادقة عمادة كلية العلوم

أصادق على ما جاء في قرار اللجنة أعلاه

التوقيع :

الاسم : د . عوده مزعل ياسر

المرتبة العلمية : أستاذ

التاريخ : / / ٢٠٠٧

العنوان : جامعة بابل - كلية العلوم

## Abstract

In this work , effect three factors on the output parameters of the silicon solar cell (short circuit current , open circuit voltage , fill factor ) and as a result on the efficiency of the silicon solar cell has been studied as follows :-

1- The wavelength of the incident light on the silicon solar cell in the range  $(452 - 656)nm$  .

2- Intensity of the incident light on the silicon solar cell in the range  $(100 - 600)W / m^2$  .

3- Temperature of the silicon solar cell in the range  $(296.5 - 358)K$  .

The results appeared that the maximum practical value of the efficiency by effect the wavelength factor was equal  $(15.479\%)$  at the wavelength  $(587nm)$  (yellow colour) and light intensity  $(100W / m^2)$  and temperature  $(296.5K)$  and the maximum theoretical value of the efficiency was equal  $(79.533\%)$  at the wavelength  $(452nm)$  (blue colour) and light intensity  $(100W / m^2)$  and temperature  $(296.5K)$  by using electronic calculator programme in visual basic language .

And also the results appeared that the maximum practical value of the efficiency by effect intensity of the incident light factor was equal  $(22.214\%)$  at the wavelength  $(509nm)$  (green colour) and light intensity  $(600W / m^2)$  and temperature  $(296.5K)$  and the maximum theoretical value of the efficiency at the same conditions was equal  $(32.421\%)$  by using the same above programme .

The results appeared that the maximum practical value of the efficiency by effect the temperature factor was equal  $(15.479\%)$  at the wavelength  $(587nm)$  (yellow colour) and light intensity  $(100W / m^2)$  and temperature  $(296.5K)$  and the

maximum theoretical value of the efficiency at the same conditions was equal (24.618%) by using the same above programme .

From the above results , apparent that the values of efficiency of the silicon solar cell practically calculated is less than values of efficiency of the silicon solar cell theoretically calculated , and existence contrast in factor (  $\gamma$  ) ( the maximum practical value of the efficiency at the yellow colour while the maximum theoretical value of the efficiency at the blue colour ) and coincidence in factors (  $\gamma$  ), (  $\gamma$  ) in that the maximum value of the efficiency practically and theoretically is at the same conditions , and the results which obtained on it has been analysis and comparison it with what we have available from reported researches and studies.

## الخلاصة

في هذا البحث ، تمت دراسة تأثير ثلاثة عوامل على معالم الخرج للخلية الشمسية السليكونية ( تيار الدائرة القصيرة ، فولتية الدائرة المفتوحة ، عامل الملء ) وبالتالي على كفاءة الخلية الشمسية السليكونية وهي

١- الطول الموجي للضوء الساقط على الخلية الشمسية السليكونية في المدى  $(452 - 656)nm$ .

٢- شدة الضوء الساقط على الخلية الشمسية السليكونية في المدى  $(100 - 600)W/m^2$ .

٣- درجة حرارة الخلية الشمسية السليكونية في المدى  $(296.5 - 358)K$ .

أظهرت النتائج إن القيمة العملية العظمى للكفاءة بتأثير عامل الطول الموجي كانت تساوي  $(15.479\%)$  عند الطول الموجي  $(587nm)$  (اللون الأصفر) وشدة إضاءة  $(100W/m^2)$  ودرجة حرارة  $(296.5K)$  والقيمة النظرية العظمى للكفاءة كانت تساوي  $(79.533\%)$  عند الطول الموجي  $(452nm)$  (اللون الأزرق) وشدة إضاءة  $(100W/m^2)$  ودرجة حرارة  $(296.5K)$  باستخدام برنامج الحاسبة الالكترونية بلغة فيجول بيسك .

وأظهرت النتائج أيضا إن القيمة العملية العظمى للكفاءة بتأثير عامل شدة الضوء الساقط كانت تساوي  $(22.214\%)$  عند الطول الموجي  $(509nm)$  (اللون الأخضر) وشدة إضاءة  $(600W/m^2)$  ودرجة حرارة  $(296.5K)$  والقيمة النظرية العظمى للكفاءة عند الظروف نفسها كانت تساوي  $(32.421\%)$  باستخدام نفس البرنامج أعلاه .

كما أظهرت النتائج إن القيمة العملية العظمى للكفاءة بتأثير عامل درجة الحرارة كانت تساوي  $(15.479\%)$  عند الطول الموجي  $(587nm)$  (اللون الأصفر) وشدة إضاءة  $(100W/m^2)$  ودرجة حرارة  $(296.5K)$  والقيمة النظرية العظمى للكفاءة عند الظروف نفسها كانت تساوي  $(24.618\%)$  باستخدام نفس البرنامج أعلاه .

من النتائج أعلاه ، يتضح إن قيم كفاءة الخلية الشمسية السليكونية المحسوبة عمليا هي أقل من قيم كفاءة الخلية الشمسية السليكونية المحسوبة نظريا ، ووجود تناقض في العامل (١) ( القيمة العملية العظمى للكفاءة عند اللون الأصفر بينما القيمة النظرية العظمى للكفاءة عند اللون الأزرق ) وتطابق في

العاملين (٢) و (٣) في إن القيمة العظمى للكفاءة عملياً ونظرياً هي عند الظروف نفسها ، وقد تم تحليل النتائج التي حصلنا عليها ومقارنتها مع مامتوفر لدينا من بحوث ودراسات منشورة .

## المحتويات

رقم الصفحة	الموضوع
<b>الفصل الأول : المقدمة</b>	
١	(١-١) نبذة تاريخية عن تطور الخلية الشمسية
٢	(٢-١) المقدمة
٥	(٣-١) مفاهيم أساسية
٧	(٤-١) الهدف من البحث
٨	(٥-١) الدراسات السابقة
<b>الفصل الثاني : مفاهيم نظرية</b>	
١٠	(١-٢) شوائب المجموعتين الثالثة والخامسة
١١	(٢-٢) ثنائيات مفرق $p-n$
١١	(٣-٢) منطقة الاستنزاف
١٥	(٤-٢) التأثير الفوتوفولتائي في الخلية الشمسية
١٨	(٥-٢) الخلية الشمسية ومعالم الخرج لها
٢١	(٦-٢) تحويل الرمل إلى خام السليكون المعدني
٢٢	(٧-٢) تحويل خام السليكون المعدني إلى خام سليكون شبه موصل
٢٣	(٨-٢) تحويل خام سليكون شبه موصل متعدد البلورات إلى رقائق أحادية البلورة
٢٤	(٩-٢) عمليات إعادة الاتحاد في أشباه الموصلات
٢٤	(١-٩-٢) إعادة الاتحاد الإشعاعي
٢٤	(٢-٩-٢) إعادة الاتحاد خلال القانصات
٢٤	(٣-٩-٢) إعادة اتحاد أو شي
٢٤	(٤-٩-٢) إعادة الاتحاد عند السطوح
٢٥	(١٠-٢) عملية التوليد في أشباه الموصلات
٢٦	(١١-٢) بعض العوامل المؤثرة على كفاءة الخلية الشمسية
٢٦	(١-١١-٢) فولتية الدائرة المفتوحة
٢٦	(٢-١١-٢) تيار الدائرة القصيرة
٢٦	(٣-١١-٢) مقاومة التوالي ومقاومة التوازي
٢٨	(٤-١١-٢) بعد أصابع الشبكة
٢٨	(٥-١١-٢) عمق المفرق
٣٠	(٦-١١-٢) زاوية الميل
٣٠	(٧-١١-٢) مقاومة الحمل

٣٠	(١٢-٢) الاستجابة الطيفية للتيار الضوئي
٣٢	(١٣-٢) تغير الشدة عند درجة حرارة ثابتة
٣٣	(١٤-٢) تأثير درجة الحرارة على معالم الخلية الشمسية السليكونية
<b>الفصل الثالث : الجانب العملي</b>	
٣٥	(١-٣) المقدمة
٣٥	(٢-٣) الخلية الشمسية
٣٦	(٣-٣) أجهزة القياس
<b>رقم الصفحة</b>	<b>الموضوع</b>
٣٧	(٤-٣) خصائص التيار - الفولتية
٣٨	(٥-٣) حساب كفاءة الخلية الشمسية عملياً بتأثير عوامل الطول الموجي وشدة الإضاءة ودرجة الحرارة عليها
٣٨	(٦-٣) حساب كفاءة الخلية الشمسية نظرياً
<b>الفصل الرابع : النتائج والمناقشة والاستنتاجات</b>	
٣٩	(١-٤) المقدمة
٣٩	(٢-٤) تغير خصائص التيار - الفولتية
٤١	(٣-٤) تأثير عامل الطول الموجي على كفاءة الخلية الشمسية عملياً ونظرياً
٥٠	(٤-٤) تأثير عامل شدة الضوء الساقط على كفاءة الخلية الشمسية عملياً ونظرياً
٥٦	(٥-٤) تأثير عامل درجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية عملياً ونظرياً
٦٣	(٦-٤) الاستنتاجات
٦٣	(٧-٤) المقترحات
٦٤	المصادر <i>References</i>
٦٩	ملحق رقم (١) : وصف برنامج الحاسبة الإلكترونية
٧٢	ملحق رقم (٢) : برنامج الحاسبة الإلكترونية

## قائمة الأشكال

رقم الصفحة	العنوان	رقم الشكل
٤	تطور الكفاءة مع الزمن لكل مواد الخلية الشمسية .	(١-١)
٤	الاكتفاء الذاتي لمنزل بوساطة استخدام منظومات الخلايا الشمسية .	(٢-١)
٧	خصائص التيار - الفولتية للخلية الشمسية .	(٣-١)
١٠	شبيكة السليكون البلورية مع الذرات الشائبة .	(١-٢)
١١	مفرق $p-n$ .	(٢-٢)
١١	تكوين المجال الكهربائي الداخلي .	(٣-٢)

١٥	مفرق حاد نوع $p-n$ (a) كثافة الشحنة (b) المجال الكهربائي .	(٤-٢)
١٦	التأثير الفوتوفولتائي في الخلية الشمسية .	(٥-٢)
١٧	مبدأ الخلايا الفوتوفولتائية .	(٦-٢)
١٨	علاقة معامل الامتصاص وعمق الاختراق مع الطول الموجي للفوتون لبعض أشباه الموصلات .	(٧-٢)
١٩	أنواع الخلايا الشمسية السليكونية .	(٨-٢)
٢١	نموذج الكتروني بسيط لخلية فوتوفولتائية يتكون من مصدر تيار ضوئي مربوط على التوازي مع ثنائي القطب (a) عمل الدائرة المفتوحة (b) عمل الدائرة القصيرة (c) تجهيز تيار لمقاومة حمل خارجية .	(٩-٢)
٢٢	مقطع عرضي يبين المعالم النموذجية للفرن القوسي الذي يستخدم لإنتاج خام السليكون المعدني	(١٠-٢)
٢٣	المعالم الأساسية في عملية جوكر السكي لإنماء قالب اسطواني كبير من السليكون أحادي البلورة .	(١١-٢)
٢٣	قطع الشرائح الرقيقة من القالب الأسطواني .	(١٢-٢)
٢٥	عمليات إعادة الإتحاد في أشباه الموصلات .	(١٣-٢)
٢٥	توليد الحاملات بسبب امتصاص الضوء .	(١٤-٢)
٢٧	تأثير المقاومة المتواليّة $R_S$ على خصائص التيار - الفولتية للخلية الشمسية.	(١٥-٢)
٢٧	تأثير المقاومة المتوازية $R_{SH}$ على خصائص التيار - الفولتية للخلية الشمسية .	(١٦-٢)
٢٧	تأثير المقاومتين المتواليّة والمتوازية $R_S \& R_{SH}$ على القدرة الخارجة للخلية الشمسية .	(١٧-٢)
٢٩	احتمالية التجميع لخلية محدودة الأبعاد مع مجال السطح الخلفي وبدونه .	(١٨-٢)
٢٩	تيار الدائرة القصيرة لمفرق $p-n$ من السليكون عند $AM_0$ بوصفه دالةً لعمق المفرق .	(١٩-٢)
٢٩	الكفاءة لمفرق $p-n$ من السليكون عند $AM_0$ بوصفه دالةً لعمق المفرق.	(٢٠-٢)
٣٠	تغير القدرة الخارجة مع تغير مقاومة الحمل المربوط لخلية شمسية سليكونية .	(٢١-٢)
٣٢	الاستجابة الطيفية لخلية شمسية سليكونية نموذجية .	(٢٢-٢)
٣٣	التيار والفولتية الخارجين لخلية شمسية سليكونية مفردة عند قيم مختلفة للشدة .	(٢٣-٢)
٣٥	الخلية الشمسية السليكونية المستخدمة في البحث .	(١-٣)
٣٧	الدائرة الكهربائية المستخدمة لقياس خصائص التيار - الفولتية للخلية الشمسية .	(٢-٣)
٤٠	خصائص التيار - الفولتية للخلية الشمسية عملياً .	(١-٤)
<b>رقم الصفحة</b>	<b>العنوان</b>	<b>رقم الشكل</b>
٤٠	تيار الدائرة القصيرة بوصفه دالةً لفولتية الدائرة المفتوحة عملياً .	(٢-٤)
٤٢	تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير الطول الموجي عملياً .	(٣-٤)
٤٢	تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير الطول الموجي عملياً .	(٤-٤)
٤٣	تغير عامل الملء مع تغير الطول الموجي عملياً .	(٥-٤)
٤٤	تغير الكفاءة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع تغير الطول الموجي عملياً .	(٦-٤)
٤٥	معامل الامتصاص للسليكون بوصفه دالةً للطول الموجي نظرياً .	(٧-٤)

٤٦	تغير طاقة الفوتون مع تغير الطول الموجي نظرياً.	(٨-٤)
٤٧	تغير معدل توليد أزواج الكترون - فجوة مع تغير الطول الموجي نظرياً.	(٩-٤)
٤٧	تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير الطول الموجي نظرياً.	(١٠-٤)
٤٨	تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير الطول الموجي نظرياً.	(١١-٤)
٤٨	تغير عامل الملاء مع تغير الطول الموجي نظرياً.	(١٢-٤)
٤٩	تغير الكفاءة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع تغير الطول الموجي نظرياً.	(١٣-٤)
٥٠	تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير شدة الضوء الساقط عملياً.	(١٤-٤)
٥١	تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير شدة الضوء الساقط عملياً.	(١٥-٤)
٥١	تغير عامل الملاء مع تغير شدة الضوء الساقط عملياً.	(١٦-٤)
٥٢	تغير الكفاءة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع تغير شدة الضوء الساقط عملياً.	(١٧-٤)
٥٣	تغير معدل التوليد لأزواج الكترون - فجوة مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.	(١٨-٤)
٥٣	تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.	(١٩-٤)
٥٤	تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.	(٢٠-٤)
٥٤	تغير عامل الملاء مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.	(٢١-٤)
٥٥	تغير الكفاءة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.	(٢٢-٤)
٥٧	تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.	(٢٣-٤)
٥٧	تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.	(٢٤-٤)
٥٨	تغير عامل الملاء مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.	(٢٥-٤)
٥٨	تغير الكفاءة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.	(٢٦-٤)
٦٠	تغير فجوة الطاقة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.	(٢٧-٤)
٦٠	تغير تيار الإشباع مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.	(٢٨-٤)
٦١	تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.	(٢٩-٤)
٦١	تغير عامل الملاء مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.	(٣٠-٤)
٦٢	تغير الكفاءة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.	(٣١-٤)

## قائمة الجداول

رقم الصفحة	العنوان	رقم الجدول
٤١	تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير الطول الموجي عملياً.	(١-٤)
٤٥	تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير الطول الموجي نظرياً.	(٢-٤)
٥٠	تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير شدة الأشعة الساقطة عليها عملياً.	(٣-٤)

٥٢	تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير شدة الأشعة الساقطة عليها نظرياً .	(٤-٤)
٥٦	تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير درجة حرارة الخلية عملياً .	(٥-٤)
٥٩	تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير درجة حرارة الخلية نظرياً .	(٦-٤)
٧٠	بارامترات فجوة الطاقة لـ $GaAs, Si, Ge$ .	(١)
٧١	الرموز المستخدمة في برنامج الحاسبة الالكترونية	(٢)

### قائمة الرموز

الرمز	الاسم
$A$	مساحة الخلية الشمسية
$AM$	كتلة الهواء البصري
$c$	سرعة الضوء
$c_n, c_p$	معاملات أوشي
$D$	ثابت مميز للمفرق
$E_g$	فجوة الطاقة
$E_C, E_V$	طاقات حافات حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ
$E_t$	مستوى طاقة القانصة
$E_{ph}$	طاقة الفوتون
$E_{max}$	أقصى قيمة للمجال الكهربائي في منطقة الاستنزاف
$E(x)$	المجال الكهربائي
$\epsilon_s$	ثابت العزل
$FF$	عامل الملء للخلية الشمسية
$F_{exp}$	السطح المعرض
$G$	معدل توليد زوج الكترون- فجوة ضوئياً

$h$	ثابت بلانك
$I_{SC}$	تيار الدائرة القصيرة
$I_j$	تيار المفروق
$I_o$	تيار الإشباع للتنائي
$I_L$	التيار المتولد ضوئياً
$I_{load}$	تيار الحمل
$k$	ثابت بولتزمان
$L_e$	طول الانتشار للإلكترون في النوع $p$
$L_h$	طول الانتشار للفجوة في النوع $n$
$\mu$	تحركية حاملات الشحنة
$\eta$	كفاءة الخلية الشمسية
$\eta_\lambda$	كفاءة الخلية الشمسية عند طول موجي معين (الاستجابة الطيفية)
$n_i$	التركيز الذاتي
$N_\lambda$	عدد الفوتونات عند طول موجي معين
$N_C, N_V$	الكثافة الفعالة للمراتب في حزمة التوصيل وحزمة التكافؤ
$N_a, N_d$	كثافة القابلات والمانحات على التوالي
$N_a^-, N_d^+$	كثافة القابلات والمانحات المتأينة على التوالي
$P_m$	القدرة العظمى الخارجة من الخلية الشمسية
$P_{in}$	قدرة الأشعة الشمسية الساقطة على الخلية الشمسية
<b>الرمز</b>	<b>الاسم</b>
$P_{opt}(x)$	القدرة البصرية
$P_\lambda$	قدرة الإشعاع عند طول موجي معين
$\rho$	كثافة الشحنة الحجمية
$q$	شحنة الإلكترون
$Q_n, Q_p$	الشحنة في المنطقة نوع $n$ والمنطقة نوع $p$ على التوالي
$R_S$	المقاومة المتواليّة
$R_{SH}$	المقاومة المتوازية
$R_{load}$	مقاومة الحمل
$t_1, t_2$	عرض أصبع الشبكة والبعد بين كل أصبعين على التوالي
$T$	درجة حرارة الخلية الشمسية
$V_{OC}$	فولتية الدائرة المفتوحة
$V_o$	الفولتية لمفروق $p-n$
$v_{oc}$	الفولتية المعيارية
$W$	عرض منطقة الاستنزاف الكلية

$x$	المسافة
$x_p, x_n$	عرض منطقة الاستنزاف في المنطقة نوع ( $p$ ) والمنطقة نوع ( $n$ ) على التوالي
$\phi(x)$	الجهد في شبه الموصل
$\alpha$	معامل الامتصاص لشبه الموصل المصنوعة منه الخلية الشمسية
$\lambda$	الطول الموجي

## الفصل الأول

### (١-١) نبذة تاريخية عن تطور الخلية الشمسية

#### **Historical Section of Solar Cell Development**

إن تطور الخلية الشمسية نشأ في عام ١٨٣٩ من قبل عالم فيزيائي تجريبي فرنسي (Becquerel) باكتشافه التأثير الفوتوفولتائي بينما كان يجري تجربة على خلية إلكتروليتيية متكونة من قطبين معدنيين موضوعين في محلول موصل للكهربائية وبعد تسعة عشر عاماً وجد إن معادن ومحاليل معينة تنتج مقادير صغيرة من التيار الكهربائي عندما تكون معرضة إلى الضوء [١].

في عام ١٨٧٣ اكتشف الباحث (Willoughby Smith) التوصيل الضوئي للسلينيوم [٢] ، ولاحظ كل من (Adams and Day) في عام ١٨٧٦ التأثير الفوتوفولتائي في السلينيوم الصلب وتم صناعة خلية شمسية من هذه المادة [٣].

وفي عام ١٨٧٧ أنشأ الباحث (Charles Fritts) أول خلية شمسية حقيقية (على الأقل ، أول خلية مشابهة للخلايا الحديثة غير إنها كانت مصنوعة من مواد صلبة فقط) بوساطة استعمال مفارق متكونة من طلاء السلينيوم بطبقة شفافة تقريباً من الذهب ، نبائط هذا العالم كانت غير كفوءة ونسبة تحويل الضوء الممتص إلى طاقة كهربائية أقل من (١٪) ، ولكنها كانت البداية [١].

في عام ١٩٠٢ لاحظ الباحث (Philipp von Leonard) التغير في طاقة الإلكترون مع تردد الضوء ونشر العالم (Albert Einstein) في عام ١٩٠٤ وثيقة عن التأثير الكهروضوئي كما أجرى العالم (Robert Millikan) عدة تجارب وبرهن التأثير الكهروضوئي في عام ١٩١٦ . قدم العالم جوكرالسكي طريقة لإنتاج السليكون الأحادي البلورة في عام ١٩١٨ ، وتسلم العالم (Einstein)

(Albert) جائزة نوبل لنظرياته في توضيح التأثير الكهروضوئي في عام ١٩٢٣ [٢] ، وفي عام ١٩٥٠ أصبحت مختبرات بيل تنتج خلايا شمسية لسفن الفضاء [٤] .

الباحث (Chapin) وزملائه نشروا نتائج اكتشافهم لخلايا شمسية سليكونية في

" *Journal of Applied Physics* " ذات كفاءة (٤.٥%) ارتفعت بعد أشهر قليلة فقط إلى (٦%) في عام ١٩٥٤ [٥] . وحصلت شركة (Hoffman Electronics) على خلايا فوتوفولتائية كفاءتها % (١٤, ٩, ٨) في الأعوام (١٩٦٠, ١٩٥٩, ١٩٥٨, ١٩٥٧) على التوالي [٢] .

وفي عام ١٩٦٣ نجحت (Sharp Corporation) في إنتاج نماذج فوتوفولتائيات سليكونية عملية ، وجهاز (Salyut ١) بخلايا شمسية في عام ١٩٧١ ، كما جهاز (Skylab) بخلايا شمسية في عام ١٩٧٣ [٦] .

وفي عام ١٩٧٦ ازداد اهتمام الباحثين (Carlson and Wronski) بالسليكون العشوائي وتم صناعة أول خلايا فوتوفولتائية من السليكون العشوائي ذات كفاءة (١.١%) ومساحة (3.5cm<sup>2</sup>) [٧] .

شيدت مؤسسة بحوث الطاقة الشمسية في (Golden , Colorado) عام ١٩٧٧ ، وفي عام ١٩٨٥ تم إنتاج نماذج خلايا سليكونية مختبرية ذات كفاءة تحويل طاقة (٢٠%) في مركز هندسة الفوتوفولتائية في (University of New South Wales) [٨] .

اكتشفت الخلية الشمسية الحساسة للصبغة في عام ١٩٩١ ، وفي عام ١٩٩٣ شيد مختبر الطاقة المتجددة الوطني (NREL) ، كما شيد المركز الوطني للفوتوفولتائية في عام ١٩٩٦ ، وفي عام ٢٠٠٥ أصبح بإمكان نماذج الخلايا الشمسية التجارية أن تحول (١٧%) من الطاقة الإشعاعية المرئية الساقطة إلى طاقة كهربائية [٩] .

## ٢-١) المقدمة

إن

## Introduction

تزايد الحاجة إلى الطاقة ، نتيجةً للتقدم الواسع ولكون المصادر التقليدية مصادر ناضبة وملوثة للبيئة في مجال الصناعة والتكنولوجيا ، والاستهلاك السريع لمصادر الطاقة التقليدية ، دفعت الباحثين إلى تطوير وسائل فعالة واقتصادية ، للحصول على الطاقة من المصادر الجديدة والمستديمة كالطاقة

الشمسية . ويمكن تحويل هذه الطاقة مباشرةً إلى طاقة كهربائية ، باستخدام الخلايا الشمسية من دون حدوث حركة ميكانيكية لأي جزء من المنظومة أو تلوث البيئة بالمخلفات .

لقد اكتشفت الخلية الشمسية في عام ١٩٤١ ، ولكن لم تعرف بشكلها الحالي إلا في عام ١٩٥٤ ، إذ عدت في ذلك الوقت من أهم الابتكارات في تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية حسب الظاهرة الفوتوفولتائية [١٠] .

تنتج الطاقة الإشعاعية الشمسية عن تفاعلات الاندماج النووي في الشمس ، وتنبعث هذه الطاقة كأشعة كهرومغناطيسية في المنطقة فوق البنفسجية التي تكون أطوال موجاتها أقل من  $0.4\mu m$  إلى المنطقة المرئية التي تقع موجاتها ما بين  $(0.4 - 0.7)\mu m$  ، ثم إلى المنطقة تحت الحمراء والتي تكون أطوال موجاتها أكبر من  $0.7\mu m$  [١١] .

ومن المميزات الرئيسية للخلايا الشمسية هي [١٢] :

١- تعمل لفترة طويلة بين (١٥-١٠) عام من دون أي هبوط في الأداء .

٢- تتطلب صيانة أقل إذ يفترض أنها لا تحتاج إلى صيانة بعد التركيب والإنشاء .

٣- ذات تكاليف تشغيل قليلة لتوفر أشعة الشمس خلال النهار .

٤- سهولة التركيب والتنصيب .

٥- غير ملوثة ، إذ لا تنبعث أي غازات أو ملوثات نتيجةً لإنتاج الطاقة .

أما العوائق التي تحد من استخدام الخلايا الشمسية بشكل واسع فهي :

١- الحاجة إلى صفوف طويلة من الخلايا الشمسية ومساحات كبيرة من الأرض.

٢- نظراً للتغيرات الجوية وحجب أشعة الشمس في الليل، تكون الطاقة المتولدة غير ثابتة .

٣- الكفاءة القصوى للتحويل في حالة استخدام (*Si*) تكون (١٨٪) تقريباً و (٢٣٪) تقريباً لمادة (*GaAs*) .

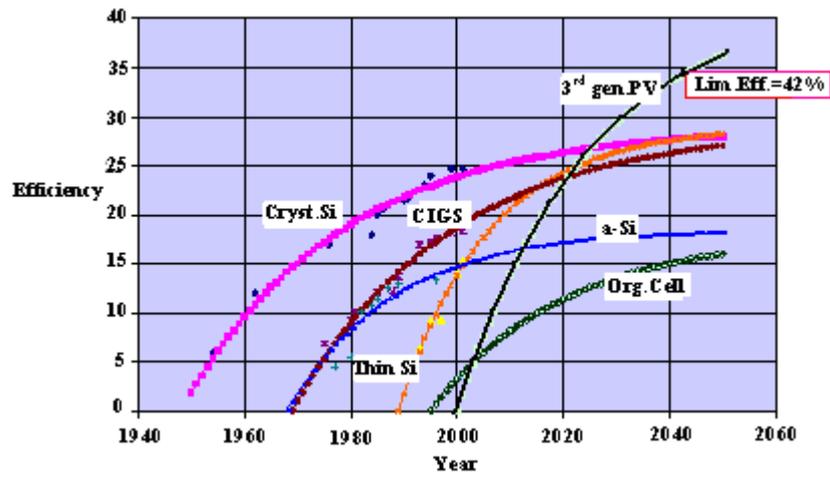
٤- سعر الخلايا الشمسية مازال عالياً رغم تطور تصنيعها، لذا فإن الطاقة الكهربائية المحصلة منها ذات كلفة عالية مقارنةً مع المصادر الأخرى .

لقد كانت كفاءة تحويل الخلية قليلة ، إذ وصلت إلى (٤٪) في عام ١٩٥٠ وإلى (٦٪) في عام ١٩٥٤ حيث سجلها الباحث وزملائه (*Chapin et al.*) باستخدام خلية شمسية سليكونية وسرعان ما ارتفعت هذه النسبة حتى أصبحت (١٤٪) في عام ١٩٥٨ [١٣] .

وكان الباحث (*Reynolds*) وزملائه في عام ١٩٥٤ سابقاً باستعمال خلايا ( $Cu_2S / CdS$ ) ذات المفرق المتباين وسجل كفاءة (٦٪) ، ارتفعت بعد عشرين عاماً إلى (١٠٪) باستعمال خلايا زرنيخيد الكاليوم (*GaAs*) [١٣] .

استخدمت الخلايا الشمسية استخداماً حقيقياً في عام ١٩٥٥ ، لتوفير الطاقة الكهربائية للمركبات الفضائية منذ بداية عصر الفضاء ، إذ تعتبر المصدر الرئيسي للطاقة في هذه المركبات ، وتأخر استخدامها أعوام عدة في التطبيقات الأرضية لارتفاع كلفتها ، لذا بدأت جهود الباحثين وفي محاولات متواصلة لأجل زيادة كفاءة هذه الخلايا ، ونتيجةً للتقدم في تحسين الكفاءة انخفضت كلفتها من ٥٠ دولاراً إلى أقل من ٥ دولارات للواط الذروة الواحد (*Peak Watt*) خلال العقد الماضي [١٤] .

على الرغم من إحراز تقدم كبير في مجال تحسين كفاءة الخلايا الشمسية خلال العشرين عام الماضية كما مبين في الشكل (١-١) إلا إن ارتفاع الكلفة مازال عائقاً أمام انتشار استخدام هذه الخلايا وما تزال المحاولات مستمرة في هذا المجال ، ويبين الشكل (١-٢) الاكتفاء الذاتي لمنزل بواسطة استخدام منظومات الخلايا الشمسية [١٥] . إن دراسة كفاءة الخلية الشمسية تتم بدراسة العوامل المؤثرة عليها ، ومن ثم معرفة أشكال وأسباب تغير هذه العوامل ، إذ تتركز هذه العوامل في أولاًً: فولتية الدائرة المفتوحة  $V_{OC}$  ، ثانياً: تيار الدائرة القصيرة  $I_{SC}$  ، ثالثاًً : مقاومة التوالي  $R_s$  ومقاومة التوازي  $R_{SH}$  وغيرها من العوامل [١٦] .



الشكل (١-١) يوضح تطور الكفاءة مع الزمن لكل مواد الخلية الشمسية [١٥].



الشكل (٢-١) يوضح الاكتفاء الذاتي لمنزل بواسطة استخدام منظومات الخلايا الشمسية [١٥] .

## Fundamental

## (٣-١) مفاهيم أساسية

### Concepts

### Optical Air Mass (AM)

### كتلة الهواء البصري

النسبة بين طول أي مسار حقيقي للضوء وأقصر مسار تعرف بكتلة الهواء البصري . وعندما تصبح الشمس بزاوية  $\theta$  مع عمود فوق الرأس فإن كتلة الهواء تحدد وفق المعادلة [١٠] :

$$AirMass = \frac{1}{\cos\theta} \dots\dots\dots (1-1)$$

وأبسط طريقة لتقدير كتلة الهواء تكون عن طريق قياس الظل ( $S$ ) المتكون لجسم عمودي ذي ارتفاع ( $h$ ) فإن :

$$AirMass = \sqrt{1 + \left(\frac{S}{h}\right)^2} \dots\dots\dots (1-2)$$

### AM٠

وتعرف بالثابت الشمسي (شدة الإشعاع الشمسي في الفضاء الحر على بعد يساوي المسافة بين الأرض والشمس ) وهي تمثل القدرة الإشعاعية الساقطة على وحدة المساحة العمودية على اتجاه الإشعاع إذ يدعى الطيف الشمسي خارج جو الأرض بكتلة الهواء الصفرية ( $AM٠$ ) ويقابل الطيف الشمسي الساقط على الأقمار الصناعية وكثيراً ما يدخل في التطبيقات الفضائية والقيمة لهذا الثابت

المعمول بها في الفوتوفولتائية هي ( $1353W / m^2$ ) وقد تم الحصول على هذه القيمة من معدل القياسات المسجلة بأجهزة خاصة مثبتة على مناطيد وطائرات على ارتفاعات عالية وسفن فضائية [١٠] .

## AM ١

وتمثل شدة الإشعاع الشمسي عند سطح الأرض عندما تكون الشمس عمودية وان كثافة القدرة الساقطة هي ( $925W / m^2$ ) ويعرف الإشعاع بإشعاع كتلة الهواء الواحدة .

## AM ١.٥

لغرض إجراء مقارنة معقولة بين أداء خلايا شمسية مختلفة عند اختبارها في مواقع مختلفة على الأرض يجب أن يكون هناك مقياس أرضي معين بحيث تنسب إليه جميع القياسات الأخرى . فان أحسن مقياس وأوسعها استخداماً هو توزيع إشعاع AM١.٥ وقد تم اعتبار هذا التوزيع للإشعاع كمقياس على سطح الأرض وإن معدل كثافة القدرة الكلية المتضمنة هي ( $1000W / m^2$ ) وهي أعلى قدرة شمسية ساقطة على سطح الأرض تقريباً .

## AM ٢

عندما تكون "  $\theta$  " الزاوية التي تصنعها الشمس مع عمود فوق الرأس تساوي  $60^\circ$  فإن الإشعاع هو كتلة الهواء الثانية وكثافة القدرة الساقطة تساوي ( $691W / m^2$ ) .

## Sun شمس

هي وحدة قياس الفيض الشمسي وان ( $1Sun = 100mW / cm^2$ ) [١٠] .

**Short – Circuit Current )**

**تيار الدائرة القصيرة**

**(  $I_{sc}$  )**

يمثل أقصى قيمة ممكنة من التيار الضوئي يمكن الحصول عليها من الخلية الشمسية عند الظروف المثالية عندما يكون قطبي الدائرة الكهربائية للخلية مغلقة إذ إن التيار الضوئي الكلي سيرجع خلال الدائرة الخارجية ويتلاشى تيار المفرق وبذلك تكون الفولتية على قطبي الخلية تساوي صفراً ً ويمكن تمثيله بالمعادلة [١٠,١٧]

$$I_{SC} = I_0 (e^{qV_{OC}/kT} - 1) \dots \dots \dots (1-3)$$

### فولتية الدائرة المفتوحة (Open – Circuit Voltage ) $(V_{OC})$

وهي أقصى قيمة من الفولتية يمكن الحصول عليها على طرفي الخلية الشمسية عندما تكون الدائرة الكهربائية للخلية مفتوحة أي إن مقاومة الحمل  $(R_L = \infty)$  ويمكن تمثيلها بالمعادلة [١٠,١٧]

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \dots \dots \dots (1-4)$$

إذ  $q$  شحنة الإلكترون ،  $k$  ثابت بولتزمان ،  $T$  درجة الحرارة المطلقة .

### الكفاءة (η) Efficiency

هي النسبة بين القدرة الكهربائية الخارجة من الخلية الشمسية  $(P_m)$  عند نقطة القدرة العظمى لخصائص التيار- الفولتية ( حاصل ضرب التيار والفولتية  $(I_m V_m)$  أعلى ما يمكن عند هذه النقطة ) و قدرة أشعة الشمس الساقطة عليها  $(P_{in})$  وتمثل بالمعادلة [١٠,١٨] :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}} \dots \dots \dots (1-5)$$

ويمكن كتابة المعادلة (١-٥) بدلالة  $V_{OC}$  و  $I_{SC}$  بالصيغة الآتية :

$$\therefore FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}}$$

$$\therefore \eta = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{P_{in}} \dots \dots (1-6)$$

**Fill Factor**

**عامل الملء**

**( FF )**

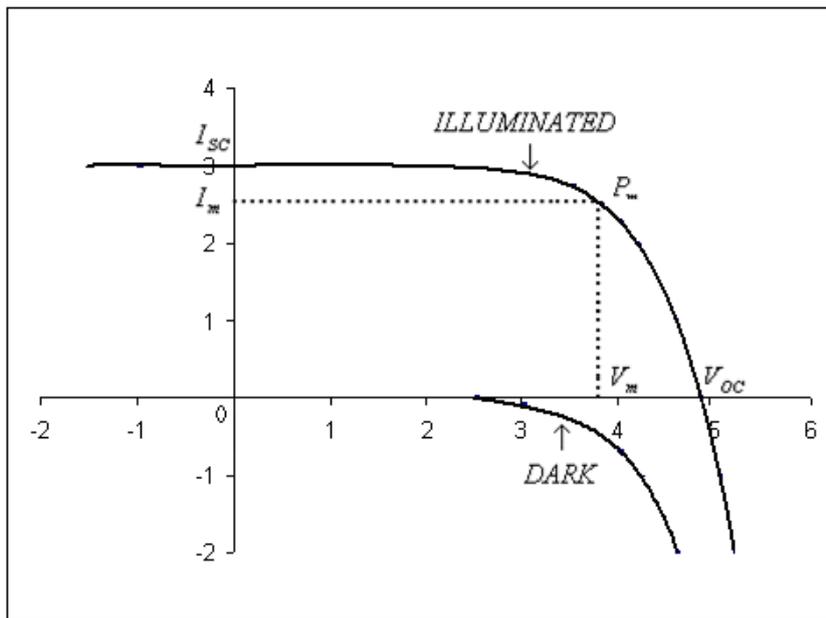
يعد عامل الملء مقياس للحدة (*Sharpness*) للركبة في بياني خصائص التيار- الفولتية للخلاية الشمسية المبين في الشكل (٣-١) [١٨] ، وفي الخلايا المثالية يكون عامل الملء دالة لفولتية الدائرة المفتوحة ، وبتحديد الفولتية المعيارية ( $v_{oc}$ ) بالمعادلة [١٠] :

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{\left(\frac{kT}{q}\right)} \dots \dots (1-7)$$

فأن العلاقة التي تربطها تجريبياً مع عامل الملء هي

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \dots \dots (1-8)$$

وقيمته بالنسبة للخلايا ذات الكفاءة المقبولة تكون بين (٠.٧٠-٠.٨٥) [١٠] .



شكل (٣-١) يبين خصائص التيار- الفولتية للخلية الشمسية [١٨] .

## **The Aim of the Present**

## **(٤-١) الهدف من البحث**

### **Work**

يهدف البحث إلى دراسة تأثير بعض العوامل على كفاءة الخلية الشمسية السليكونية للحصول على :

(١) أعلى كفاءة للخلية الشمسية من خلال مرشح بطول موجي معين .

(٢) الشدة المناسبة للإشعاع الساقط على الخلية الشمسية لتزداد كفاءتها بشكل ملحوظ .

(٣) درجة الحرارة المناسبة لتعمل الخلية بأعلى كفاءة .

## **Literature Survey**

## **(٥-١) الدراسات السابقة**

تنوعت البحوث المتعلقة بالخلايا الشمسية لما تمتلكه من تطبيقات كثيرة ، وأصبح استغلال الطاقة الشمسية للأغراض العملية في السنين الأخيرة يستحق الاهتمام والبحث المتواصل . وتعتبر الخلية الشمسية وسيلة للتحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية . فلا بد من زيادة الكفاءة وتقليل تكاليف هذه الخلايا ، ليتمكن منافسة مصادر الطاقة التقليدية الأخرى ولا يتم ذلك إلا بالبحث المتواصل وابتكار أجهزة جديدة ومواد رخيصة الثمن . ومن الدراسات التي أجريت هي :

في عام ١٩٨٦ قام الباحث (J.C.C.Fan) [١٩] بدراسة تم التوصل فيها إلى حساب المعالم

$(E_g, V_{OC}, J_{SC}, FF, \eta)$  لخلية شمسية أحادية البلورة عالية النوعية مصنوعة من السليكون نظرياً

عن طريق معادلات بسيطة تم اشتقاقها للحصول على هذه المعالم عند مدى درجة الحرارة

$(273 - 373)K$  تحت إشعاع مقداره  $1Sun$  عند  $AM1$  إذ اتضح إن زيادة درجة حرارة الخلية

الشمسية يؤدي إلى تناقص فجوة الطاقة بمقدار  $(2.64 \times 10^{-4} eV / K)$  وتناقص فولتية الدائرة المفتوحة

بمقدار  $(1.95 \times 10^{-3} Volt / K)$  وتزايد كثافة تيار الدائرة القصيرة بمقدار  $(0.012 mA.cm^{-2} / K)$

وتناقص عامل الملء بمقدار  $(7.6 \times 10^{-4} / K)$  وبالنتيجة تناقص كفاءة الخلية الشمسية بمقدار  $(0.0816 / K)$ .

وفي عام ١٩٩٣ أيضاً قام الباحث (Lioujj) [٢٠] بدراسة تأثير تركيز أشعة الشمس على كفاءة الخلية الشمسية ( $S_i / S_i$ ) إذ سجلت كفاءة لهذه الخلية (١٧.٨%) عند  $AM1,1.5Suns$  وعند تركيز الأشعة  $AM100,1.5Suns$  ازدادت الكفاءة إلى (٢٢.٢%).

وفي عام ١٩٩٤ درس الباحث (Yoon) وزملائه [٢١] تأثير درجة الحرارة على القدرة الخارجة أو كفاءة الخلية إذ تقل الكفاءة بزيادة درجة الحرارة ويعود السبب إلى نقصان  $V_{oc}$  بارتفاع درجة الحرارة من  $(298 - 338)K$  تحت إشعاع مقداره  $1Sun$  عند  $AM1.5$ .

وفي عام ١٩٩٥ درس الباحث (Guk) وزملائه [٢٢] خصائص الخلايا الشمسية السليكونية على نحو تجريبي عند درجتي الحرارة  $(278,293)K$  واتضح إن كفاءة الخلية الشمسية تعتمد وبقوة على معالم الخلية الشمسية تيار الدائرة القصيرة ، فولتية الدائرة المفتوحة ، عامل الملء .

في عام ٢٠٠٠ نشر الباحث (E.S.Hrayshat) [٢٣] دراسة تضمنت امتصاص الموجات القصيرة ( فوق البنفسجية التي تتراوح أطوال موجاتها بين  $(280 - 440)nm$  ) من قبل الخلية الشمسية وما ينتج عن ذلك من حرارة إذ تعتبر من المشاكل الخطيرة التي تؤثر على كفاءة الخلية ، وللتخلص من هذه الحرارة تم تصنيع خلية شمسية مكونة من ثلاث سلاسل ( $Three\ cascade\ solar\ cell$ ) من بلورة واحدة بمزج تقنيتين لتصنيعها مع فرق قليل بعرض فجوة الطاقة لعناصر السلاسل ، والفقدان الحراري يعتمد على الفرق بين فجوات الطاقة وهو يقل كلما قل الفرق . ترتبط سلاسل الخلية على التوازي ويزداد عرض فجوة الطاقة لها باتجاه السطح المضاء . وقد لوحظ من خصائص التيار- الفولتية اختلاف قيم تيار الدائرة القصيرة و فولتية الدائرة المفتوحة باختلاف شدة ضوء الشمس , كما إن الكفاءة اختلفت من (٤.٩%) إلى (٦.٣%) باختلاف ساعات النهار وان الخلية تعمل بنشاط عندما تكون الموجات القصيرة هي المسيطرة في الإشعاع الشمسي لذلك يمكن استخدام هذا التصميم كمتحسس للأشعة فوق البنفسجية .

وفي عام ٢٠٠٠ أيضاً قام الباحث (Maruyama) وزملائه [٢٤] باستخدام صفائح متفلورة ملونة ( $Fluorescent\ Plate$ ) كحماية للخلية الشمسية بدلاً من الزجاج . وقد قورنت كفاءة تحويل الطاقة للخلية الملونة مع غير الملونة ، فالتلويين باللون الأخضر أدى إلى زيادة الكفاءة بنسبة (٢.٧%).

بينما التلويين باللون البرتقالي والوردي والأحمر أدى إلى نقصان الكفاءة بنسبة % (0.5, 1.5, 5.5) على التوالي . فسرت الزيادة بسبب نقصان الانعكاسية في النموذج الملون عن النموذج غير الملون . كما إن تأثير التلويين على الكفاءة فسر على أساس النموذج البسيط للامتصاص وإعادة انبعاث الضوء من الصفائح المتفلورة وطيف الانعكاس في نموذج الخلية الشمسية .

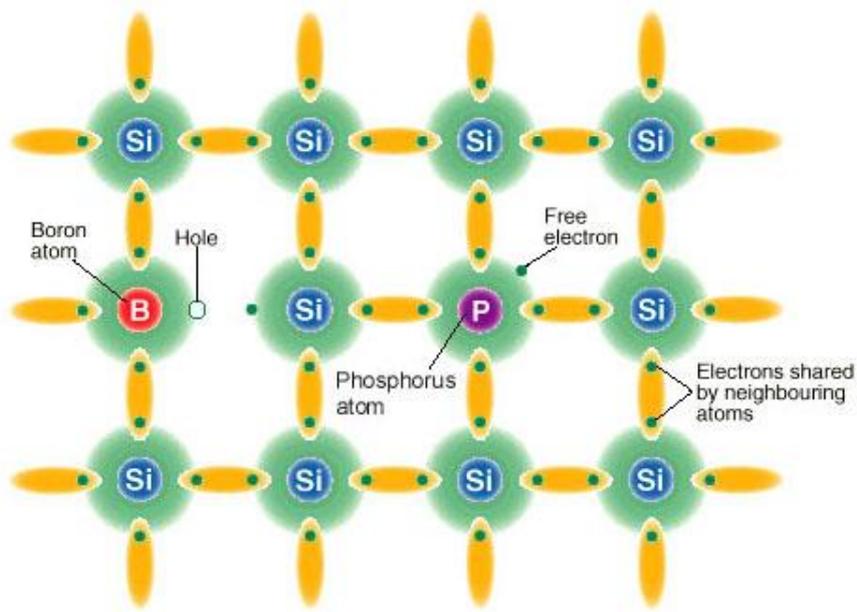
في عام ٢٠٠٣ قام الباحث (T.A.Yates) [٢٥] بدراسة تم التوصل فيها إلى قياس المعالم ( $V_{OC}, I_{SC}, FF, \eta$ ) لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة عملياً عند مدى درجة الحرارة  $(298 - 333)K$  إذ اتضح إن زيادة درجة حرارة الخلية الشمسية يؤدي إلى تناقص فولتية الدائرة المفتوحة بمقدار  $(2.122 \times 10^{-3} \text{ Volt} / K)$  وتزايد تيار الدائرة القصيرة بمقدار  $(2.857 \times 10^{-4} A / K)$  وتناقص عامل الملء بمقدار  $(1.457 \times 10^{-3} / K)$  وبالنتيجة تناقص كفاءة الخلية الشمسية بمقدار  $(0.092 / K)$  .

وفي عام ٢٠٠٤ قام الباحث وزملائه (Nakajima et al.) [٢٦] بدراسة معالم خلايا شمسية سليكونية في ضوء الشمس الطبيعي عند مواقع مختلفة لأكثر من ثلاث سنوات ومقارنة الكفاءة في مواقع الاختبار من خط العرض  $(12.8^\circ)$  إلى خط العرض  $(43.8^\circ)$  إذ اتضح إنها كانت مختلفة دورياً ومعظم الأداء المفيد تم الحصول عليه في الصيف عند كل المواقع وزيادة التيار الخارج ساهمت بشكل كبير في الأداء الرائع إذ اتضح إن التيار الخارج لهذه الخلايا لا يعتمد على تأثير درجة الحرارة والتلدين فقط ولكن على التغير الموسمي لكتلة الهواء والأحوال الجوية أيضاً مثل بخار الماء عند كل موقع وإن نسبة الأداء السنوي للكفاءة مقاسة تحت شروط الاختبار القياسية وصلت إلى (٨٢٪) في (Hamamatsu, Japan) .

## الفصل الثاني

### (١-٢) شوائب المجموعتين الثالثة والخامسة $Group^{3rd}$ and $5^{th}$

**Dopants** تدخل الذرات الشائبة في التركيب البلوري للمواد الصلبة عادةً بطريقتين فأما تتخلل الشوائب في مواضع محصورة بين ذرات البلورة المضيفة ، وفي هذه الحالة تعرف بالشوائب المتخللة أو تتبادل مع ذرات البلورة المضيفة بالتعاقب محافظةً على الترتيب الذري للتركيب البلوري وفي هذه الحالة تعرف بالشوائب المعوضة ، إن ذرات عناصر المجموعتين الثالثة والخامسة تعمل بوصفها شوائب معوضة في السليكون [١٠] كما في الشكل (١-٢) .



الشكل (٢-١) يبين شبكة السليكون البلورية مع الذرات الشائبة [٢٧] .

عندما ذرة الفسفور معوضة لذرة السليكون فان أربعة من خمسة الكترونات تكافؤية تكون أواصر قوية مع الكترونات السليكون الأقرب ، والالكترون المتبقي مرتبط على نحو طفيف جداً بالشحنة الموجبة لنواة ذرة الفسفور، وينتقل بسهولة حول الشبكة البلورية في مساحة ذرة الفسفور، والسليكون الذي يحتوي على عدد كبير من الذرات مع الكترون تكافؤ زائد يسمى سليكون نوع ( $n-n$ ) (*n-type Silicon*) ، والمواد التي لها الكترونات تكافؤية أكثر تسمى المانحات (*Donors*) . أما إذا كانت ذرة البورون معوضة لذرة السليكون فان ثلاثة الكترونات تكافؤية تكون أواصر قوية مع الكترونات السليكون الأقرب ، ويبقى الالكترون الرابع متحد مع فجوة ، والسليكون الذي يحتوي على عدد كبير من الذرات مع الكترون تكافؤ واحد أقل يسمى سليكون نوع ( $p$ ) (*p-type Silicon*) ، والمواد التي لها الكترونات تكافؤية أقل تسمى المتقبلات (*Acceptors*) [٢٨] ، عملية تعويض ذرات البورون أو الفسفور لذرات السليكون تسمى التشويب أو التطعيم (*Doping*) .

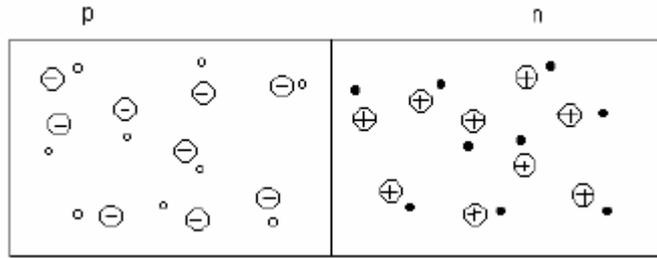
## *p-n Junction*

## (٢-٢) ثنائيات مفرق *p-n*

### *Diodes*

إن أغلب الخلايا الشمسية هي في الحقيقة مساحة كبيرة من ثنائيات مفرق  $p-n$  . وتتكون هذه الثنائيات من وصل مناطق نوع سالب ونوع موجب . ومن المتطلبات الأساسية للنبائط اللاتناظر

الالكتروني في تركيب شبه الموصل لتحويل الطاقة بظاهرة الفوتوفولتائية [١٠, ١١, ٢٥] كما في الشكل (٢-٢) .

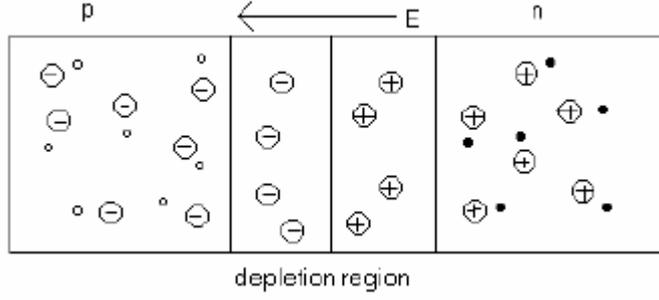


الشكل (٢-٢) يوضح مفرد  $p-n$  (الالكترونيات مرسومة كدوائر مملوءة والفجوات كدوائر فارغة ، الذرات المتقبلة المشحونة بشحنة سالبة في الجانب  $p$  والذرات المانحة المشحونة بشحنة موجبة في الجانب  $n$ ) [٢٥] .

### Depletion region

### (٣-٢) منطقة الاستنزاف

عند وضع شبه موصل نوع  $n$  سويةً مع شبه موصل نوع  $p$  يحدث انحدار كبير في كثافة الحاملات عند المفرد مما يسبب انتشار الحاملات والمنطقة التي يحدث فيها الانتشار تسمى منطقة الاستنزاف وتعتمد على كثافة تركيز الشوائب في شبه الموصل ، وتكون أكبر عندما يكون التركيز أقل ، ومع استمرار الفجوات في ترك المنطقة  $p$  نرى إن قسماً من الأيونات القابلة ذات الشحنة السالبة ( $N_a^-$ ) والقريبة من المفرد يبقى غير معوض لكون القابلات ثابتة في مشبك المادة في حين تكون الفجوات متحركة . وكذلك نجد قسماً من الأيونات المانحة ذات الشحنة الموجبة ( $N_d^+$ ) والقريبة من المفرد يبقى غير معوض عند ترك الالكترونيات للجانب  $n$  . ونتيجة لذلك ينشأ حيز مشحون سالب عند الجانب  $p$  من المفرد وحيز مشحون موجب عند الجانب  $n$  من المفرد وهذا الحيز المشحون يولد مجالاً كهربائياً يتجه من الشحنة الموجبة نحو الشحنة السالبة [١١, ٢٥, ٢٩, ٣٠, ٣١] كما في الشكل (٣-٢)



الشكل (٣-٢) يبين تكوين المجال الكهربائي الداخلي [٢٥] .

هذا المجال الكهربائي يعمل كحاجز مانعاً انتشار الكثير من الالكترونات ( ماعدا التي تملك طاقة كافية للتغلب على المجال ) من الجانب  $n$  إلى الجانب  $p$  وتكون أقصى قيمة له  $(E_{max})$  عند الحاجز وتصغر قيمته عند حافتي منطقة الاستنزاف كما في الشكل (٢-٤-ب) [١١, ٣٢] وان

$$W = x_n + x_p \dots\dots\dots(2-1)$$

حيث  $x_p$  و  $x_n$  هي عرض منطقة الاستنزاف في المنطقة نوع  $n$  والمنطقة نوع  $p$  على التوالي ،  
 $W$  عرض منطقة الاستنزاف الكلية .

التحليل العام يبدأ بمعادلة بوازن (*Poisson's equation*) وهي إحدى معادلات ماكسويل التي تبين علاقة تفريق المجال الكهربائي بكثافة شحنة الفضاء في بعد واحد وتأخذ الشكل التالي [١١, ٣٢] :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_s} = -\frac{q}{\epsilon_s} (p - n + N_d^+ - N_a^-) \dots\dots\dots(2-2)$$

حيث  $p$  و  $n$  هي كثافة كل من الفجوات والالكترونات ،  $N_d^+$  و  $N_a^-$  هي كثافة كل من المانحات والقابلات المتأينة على التوالي ، وبافتراض عدم وجود حاملات حرة في منطقة الاستنزاف فان كثافة الشحنة تعطى بالمعادلة [١١, ٣١, ٣٢] :

$$\rho = q(p - n + N_d^+ - N_a^-) \cong q(N_d^+ - N_a^-), \text{ for } -x_p \leq x \leq x_n \dots\dots\dots(2-3)$$

للتنائي  $p-n$  الحاد ( تغير تركيز الشوائب في شبه موصل تغيراً فجائياً ) من شوائب قابلة تركيزها  $N_a$  إلى شوائب مانحة تركيزها  $N_d$  يتكون مفرق حاد كما في الشكل (٢-٤-أ) ، كثافة الشحنة في كل منطقة تعطى بالقيم التالية

$$\rho(x) = 0$$

$$\rho(x) = -qN_a$$

$$\rho(x) = qN_d$$

$$\rho(x) = 0$$

الشحنة في المنطقة نوع  $n$  والمنطقة نوع  $p$  هي  $(Q_n, Q_p)$  على التوالي تعطى بالمعادلتين

[٣١,٣٢]

$$Q_n = qN_d x_n \dots\dots\dots(2-4)$$

$$Q_p = -qN_a x_p \dots\dots\dots(2-5)$$

المجال الكهربائي تم الحصول عليه من كثافة الشحنة باستعمال قانون كاوس والذي ينص على إن انحدار المجال يساوي كثافة الشحنة مقسومة على ثابت العزل وان :

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \cong \frac{q}{\epsilon_s} (N_d^+(x) - N_a^-(x)), \text{ for } -x_p \leq x \leq x_n \dots\dots\dots(2-6)$$

المجال الكهربائي حصلنا عليه من تكامل المعادلة (٦-٢) والشروط الحدودية متطابقة مع تقريب الاستنزاف الكلي (هذا التقريب تم الحصول عليه بافتراض إن شبه الموصل مستنزف كلياً على طول منطقة الاستنزاف وهذا الافتراض لا يوفر توزيع شحنة دقيق ويوفر تعبيرات تقريبية معقولة للمجال الكهربائي والجهد خلال شبه الموصل) وان المجال الكهربائي يساوي صفر عند حافات هذه المنطقة ( عند  $x = -x_p$  و  $x = x_n$  ) ، وبتكامل كثافة الشحنة في ثنائي  $p-n$  الحاد الموضح في الشكل (٢-٤-٤) نحصل على :

$$E(x) = 0$$

$$E(x) = -\frac{qN_a(x+x_p)}{\epsilon_s}$$

$$E(x) = \frac{qN_d(x-x_n)}{\epsilon_s}$$

$$E(x) = 0$$

المجال الكهربائي يتغير خطياً في منطقة الاستنزاف ويصل أعظم قيمة عند  $(x=0)$  كما في الشكل (b-٤-٢) [١١,٣٢].

وهذا المجال الأعظم يمكن حسابه على جانبي منطقة الاستنزاف وينتج :

$$E(x=0) = -\frac{qN_a x_p}{\epsilon_s} = -\frac{qN_d x_n}{\epsilon_s} \dots \dots \dots (2-7)$$

وهذا يعطينا العلاقة الأولى بين  $x_n$  و  $x_p$  وهي :

$$N_d x_n = N_a x_p \dots \dots \dots (2-8)$$

هذه المعادلة تعبر عن حقيقة إن الشحنة الموجبة الكلية في منطقة الاستنزاف نوع  $(Q_n)n$  تعادل تماماً الشحنة السالبة الكلية في منطقة الاستنزاف نوع  $(Q_p)p$  ، وبتعويض المعادلة (٢-٨) في المعادلة (٢-٨) لعرض منطقة الاستنزاف الكلية  $W$  ينتج :

$$x_n = W \frac{N_a}{N_a + N_d} \dots \dots \dots (2-9)$$

$$x_p = W \frac{N_d}{N_a + N_d} \dots \dots \dots (2-10)$$

الجهد في شبه الموصل كما في الشكل (c-٤-٢) تم الحصول عليه من المجال الكهربائي باستعمال المعادلة :

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = -E(x) \dots \dots \dots (2-11)$$

وان الجهد الكلي عبر شبه الموصل والذي يعطينا العلاقة الثانية بين  $x_n$  و  $x_p$  [١١,٣٢] هو

$$\phi_i - V_a = \frac{qN_d x_n^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a x_p^2}{2\epsilon_s} \dots\dots\dots(2-12)$$

وبتعويض المعادلتين (٢-٩) و (٢-١٠) بالمعادلة (٢-١٢) نحصل على عرض منطقة الاستنزاف :

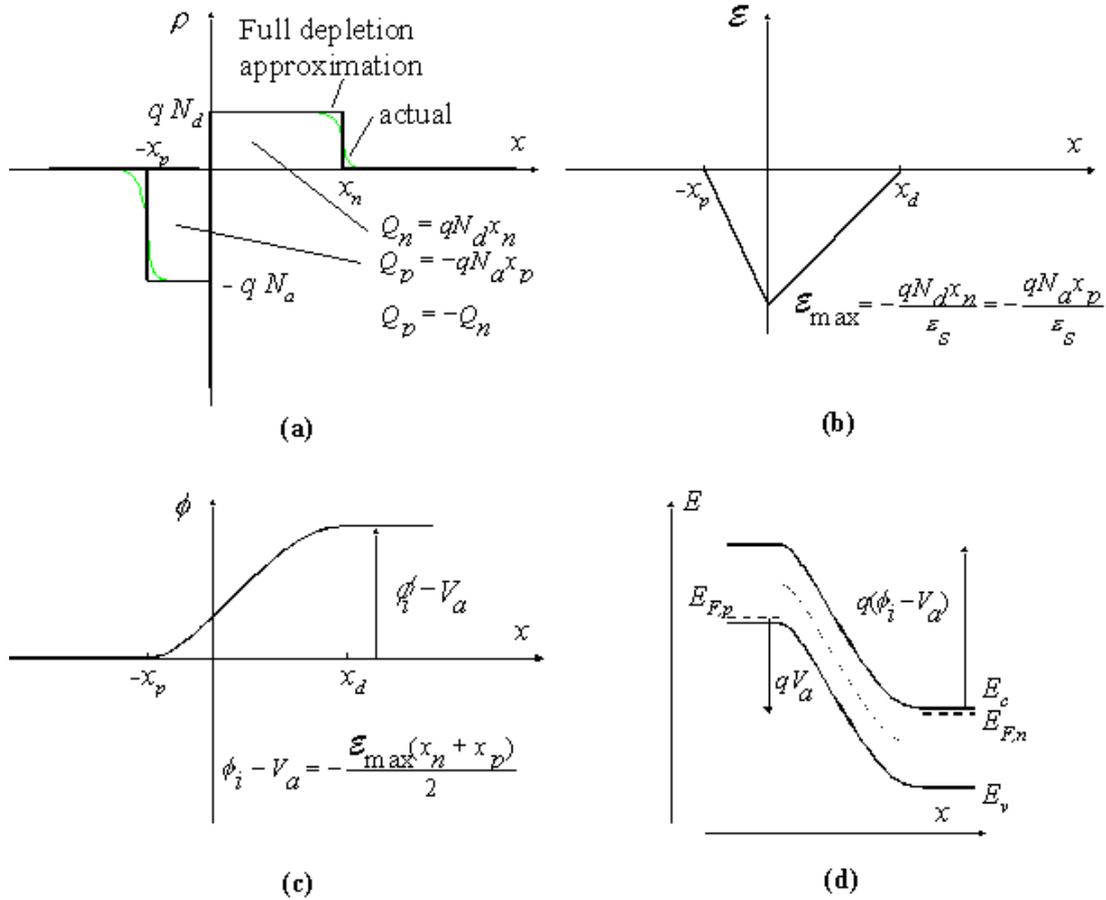
$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \dots\dots\dots(2-13)$$

ومنها يمكن الحصول على عرض مناطق الاستنزاف  $x_n$  و  $x_p$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_a}{N_d} \frac{1}{N_a + N_d} (\phi_i - V_a)} \dots\dots\dots(2-14)$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_d}{N_a} \frac{1}{N_a + N_d} (\phi_i - V_a)} \dots\dots\dots(2-15)$$

كما يبين الشكل (٢-٤-د) مخطط حزمة الطاقة لمفرق حاد نوع  $p-n$  .



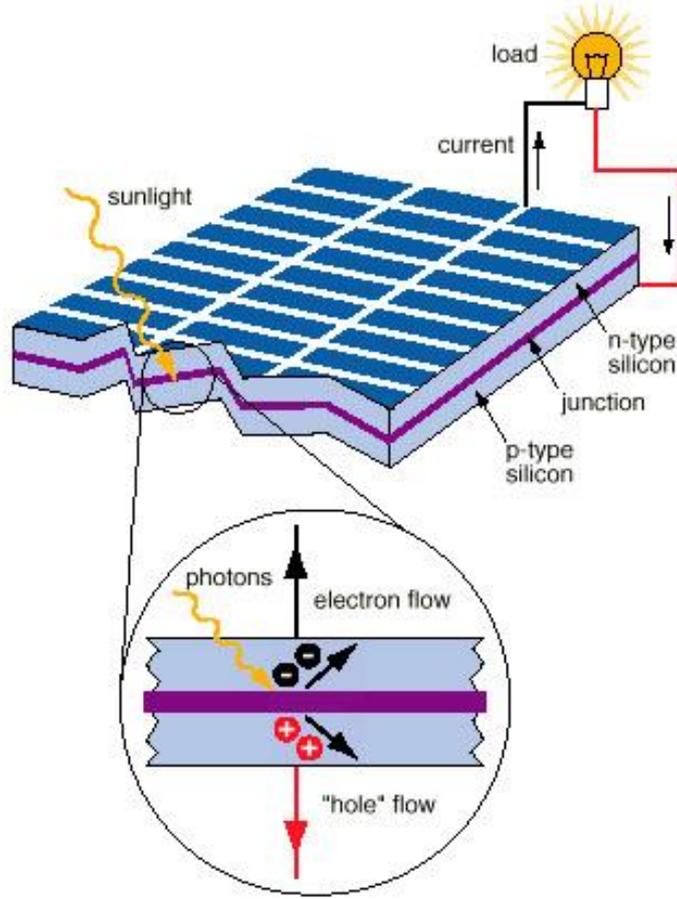
الشكل (٤-٢) يبين مفرد حاد نوع  $p-n$

(a) كثافة الشحنة (b) المجال الكهربائي (c) الجهد (d) مخطط حزمة الطاقة [١١, ٣٢].

## (٤-٢) التأثير الفوتوفولتائي في الخلية الشمسية

### Photovoltaic Effect in Solar Cell

عند سقوط فوتونات ضوئية ذات طاقة أكبر من فجوة الطاقة ( $E_g$ )، فإنها تمتص من قبل شبه الموصل، كما إن كل فوتون يولد زوج الكترولون - فجوة، وتتحد هاتان الشحنتان بسرعة ونتيجةً لذلك يتحول الفوتون إلى حرارة. وبوجود منطقة الحاجز، فإن الالكترولون المتولد من امتصاص الفوتون، يتجه نحو الموصل الخارجي في منطقة  $n$  وتتجه الفجوة نحو الموصل الخارجي الآخر في منطقة  $p$ . وتتجمع هذه الالكترولونات والفجوات على الطرفين، فيتولد جهد يؤدي إلى مرور تيار كهربائي بوجود حمل خارجي كما في الشكل (٥-٢).



الشكل (٥-٢) يبين التأثير الفوتوفولتائي في الخلية الشمسية [٢٧].

فعند تصميم الخلية الشمسية يجب الأخذ بنظر الاعتبار الفعل المتبادل بين الضوء وشبه الموصل . إذ يتكون الضوء من فوتونات ، ذات مدى معين من أطوال الموجات ، وهناك حالات عديدة لتعامل شبه الموصل مع الفوتون [٢٧] ، كما موضح في الشكل (٦-٢) ، إذ :

(١) ينعكس الفوتون من سطح الخلية الخارجي .

(٢) يمتص الفوتون من قبل شبه الموصل ، ويتولد زوج الكترون- فجوة لكل فوتون . ولكن الالكترتون يتحد مرة ثانية مع الفجوة قبل أن يصل إلى الحاجز ( $p - n$ ) ، وتتحول طاقتاهما إلى طاقة حرارية .

(٣) و(٤) يمتص الفوتون ويكون زوجا الكترون- فجوة ضمن طول انتشاري ( $L_{e,h}$ ) من حاجز الجهد ، بحيث تنفصل الحاملات بسبب المجال الكهربائي خلال منطقة الاستنزاف ، فيتجه الالكترتون إلى منطقة  $n$  والفجوة إلى منطقة  $p$  .

(٥) لايملك الفوتون طاقة كافية لتحرير زوج الكترون- فجوة إذ يمر خلال الخلية من دون أن يسبب عملية توليد ، ويتحول إلى حرارة عندما يصل إلى الموصل الخلفي .

الحالتان (٣) و(٤) تولدان الطاقة الكهربائية ، أما الحالات الثلاث الأخرى (١,٢,٥) ، فتمثل خسارة أو فقدان ميكانيكية تحويل الطاقة .

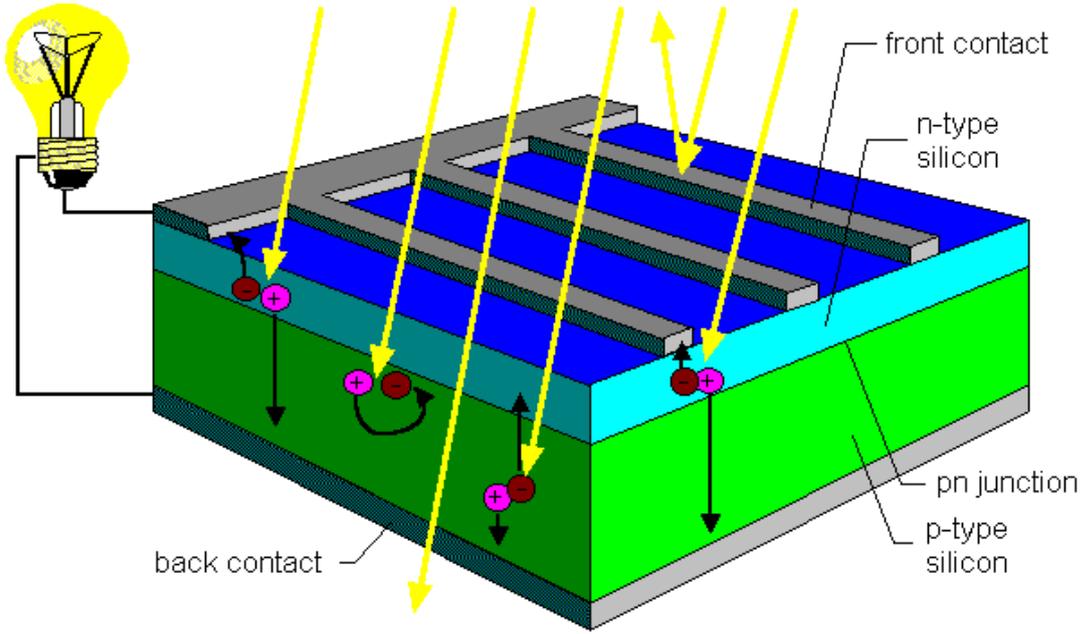
إن الحالة (١) سببها الانعكاس من السطح العلوي لمادة الخلية . ويمكن تقليل الخسارة الناتجة عنها وذلك بتغطية سطح الخلية الشمسية بمواد ذات معامل انعكاس مختلفة ، أي الطبقة المضادة للانعكاس (*Antireflection*) . أما الحالة (٢) ، فهي الأهم ، حيث تحدد كفاءة الخلية ، لأن الخسارة الناتجة عن هذه الحالة تتأثر بالعوامل التي تدخل في تصميم الخلية الشمسية .

إن معظم الفوتونات الممتصة تكون أزواج الكترون- فجوة . فإذا تكونت هذه الحاملات على مسافات أكبر من طول الانتشار ( $L_{e,h}$ ) عن الحاجز كما في الحالة (٢) ، فإنها تتحد مع بعضها من جديد . وتحدث عملية إعادة الإتحاد في شبه الموصل خارج منطقة الحاجز ، وهكذا يخسر الالكترتون والفجوة الحرين نتيجة هذه العملية . كما تفقد بعض الحاملات المتولدة من الضوء على سطح الخلية ، بسبب وجود حالات السطح التي تتكون من الأواصر المتدللية (*Dangling Bonds*) والتي تجهز أماكن للالكترونات لكي تعيد الإتحاد مع الفجوات [٣٣] .

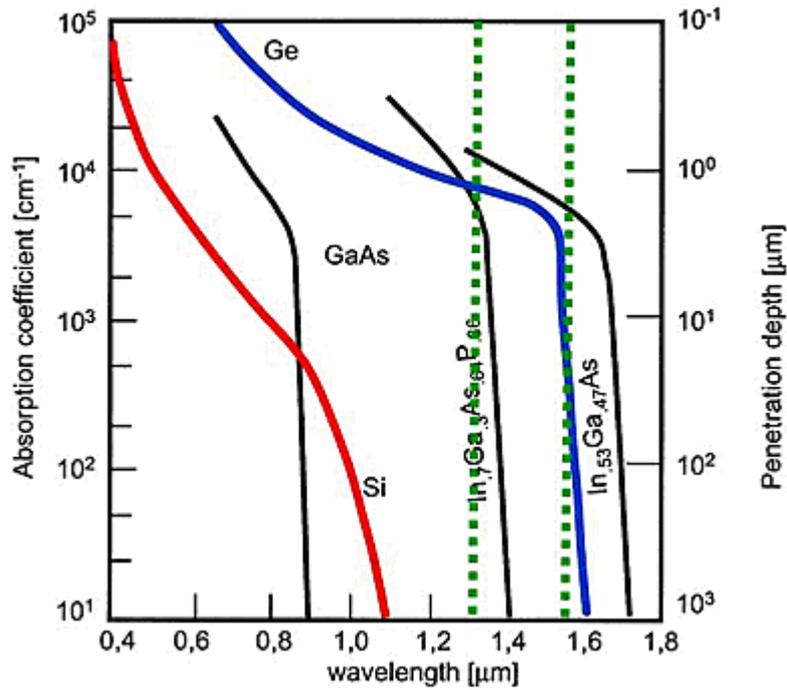
أما إذا تكونت أزواج الكترون- فجوة ، ضمن طول الانتشار ، أي قريباً من الحاجز ، فاحتمال وصولها إلى الحاجز تكون كبيرة قبل إعادة اتحادها ، كما في الحالتان (٣) و(٤). وهذه الأزواج من الكترون- فجوة هي التي تولد التيار والجهد الضوئيين في الخلية الشمسية .

إن قابلية امتصاص المادة للضوء ضمن طول موجي معين تعرف بمعامل الامتصاص ( $\alpha$ ) وهو دالة للطول الموجي الساقط ومهم جداً عند تصميم الخلية الشمسية ، وذلك لأنه يعطي مدى امتصاص الخلية الشمسية للضوء الساقط عند طول موجي معين كما في الشكل (٢-٧).

(١) (٣) (٥) (٢) (٤)



الشكل (٦-٢) يبين مبدأ الخلايا الفوتوفولتائية [٢٧] .



الشكل (٧-٢) يوضح علاقة معامل الامتصاص ( $\alpha$ ) وعمق الاختراق مع الطول الموجي للفوتون لبعض أشباه الموصلات .

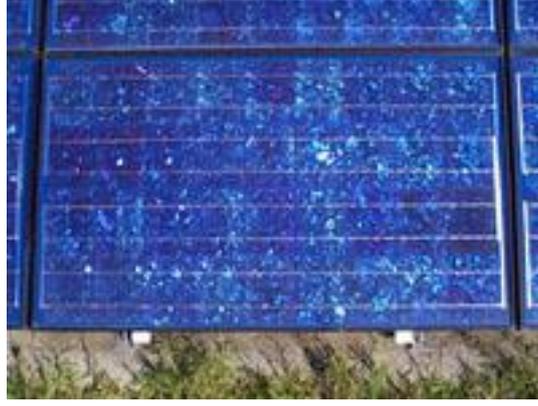
## (٥-٢) الخلية الشمسية ومعالم الخرج لها

## Solar Cell and Its Output Parameters

تصنع الخلايا الشمسية غالباً من رقائق من السليكون ( نوع  $n$ - أو  $p$  ) بسمك يتراوح بين  $(0.40 - 0.75)mm$  . يكون الأساس نوع  $p$ - يرسم على سطحه طبقة رقيقة من نوع  $n$ - ويثبت قطب معدني على السطح الخلفي للأساس وقطب شبكي دقيق على السطح الأمامي الذي يغطي عادةً بطلاء غير عاكس لتقليل انعكاسية الضوء الساقط على الخلية ومن ثم يحسن أداء الخلية الشمسية وتكون خلايا السليكون الشمسية على ثلاثة أنواع ، يصنع النوع الأول من رقائق أحادية البلورة تؤخذ من بلورة أحادية كبيرة (*ingot*) يتم إنمائها بدرجة حرارة  $(1400^\circ C)$  وتكون غالية الثمن وذات كفاءة عالية تصل إلى  $(24.7\%)$  [٣٤] كما في الشكل (٢-٨-٢). يصنع النوع الثاني من رقائق متعددة البلورات بعملية صب السليكون بعد إذابته بقوالب خاصة ثم يقطع على شكل رقائق وتبلغ كفاءة هذه الخلية أقل من  $(20\%)$  كما في الشكل (٢-٨-٢). أما النوع الثالث فيصنع من السليكون العشوائي بترسيب السليكون بإحدى تقنيات الأغشية الرقيقة على أرضية من الزجاج أو البلاستيك كما مبين في الشكل (٢-٨-٢) وتصل كفاءة هذه الخلية إلى أقل من  $(10\%)$  وتكون زهيدة الثمن وسهلة التصنيع . تعتبر الخلية الشمسية أحد نباتات أشباه الموصلات التي تحول طاقة الشمس مباشرةً إلى طاقة كهربائية حسب الظاهرة الفوتوفولتائية .



a- لوح شمسي أحادي البلورة .



b- لوح شمسي متعدد البلورات .



c- لوح شمسي مكون من خلايا شمسية من السليكون العشوائي .

الشكل (٨-٢) يوضح أنواع الخلايا الشمسية السليكونية [٢٧] .

لدراسة أداء الخلية الشمسية هناك ثلاثة معالم (*Parameters*) تستخدم لهذا الغرض ، هي فولتية الدائرة المفتوحة  $V_{oc}$  ، تيار الدائرة القصيرة  $I_{sc}$  ، عامل الملء  $FF$  [١٠] .

عندما تسقط الطاقة الشمسية على ثنائي القطب فان قسماً من الفوتونات تقوم بخلق أزواج الكترول - فجوة التي بدورها تولد التيار الضوئي (*Photo current*) الذي يسري من طبقة  $n$  إلى طبقة  $p$  كما في الشكل (٥-٢) ويمكن تمثيله بالمعادلة :

$$I_L = qn\dot{\quad} \dots \dots \dots (2-16)$$

إذ إن  $n\dot{\quad}$  هي معدل توليد أزواج الكترول - فجوة . فإذا كان الثنائي معزول كهربائياً عن الدائرة الخارجية ، فان صافي التيار في حالة الاستقرار يجب أن يساوي صفراً . وهذا يعني أنه يجب أن

يكون هناك تيار رجعي يعرف بتيار المفرق  $I_j$  ، وهذا التيار يجب أن يساوي التيار الضوئي . ويسري تيار المفرق من مادة نوع  $p$  إلى مادة نوع  $n$  ولذا يعد التيار الضوئي تيار أمامي ويعبر عنه بالمعادلة [١٧]:

$$I_L = I_j = I_0 (e^{qV_{oc}/kT} - 1) \dots \dots \dots (2-17)$$

إذ إن  $I_0$  يمثل تيار الإشباع للثنائي والذي يساوي

$$I_0 = DT^3 e^{-E_g/kT} \dots \dots \dots (2-18)$$

أما  $I_L$  فيساوي :

$$I_L = qAG(L_e + W + L_h) \dots \dots \dots (2-19)$$

إذ إن  $D$  ثابت مميز للمفرق ويساوي  $(0.2A/cm^3.K^3)$  ،  $T$  درجة حرارة الخلية الشمسية ،  $k$  ثابت بولتزمان ،  $E_g$  فجوة الطاقة ،  $q$  شحنة الإلكترون ،  $A$  مساحة الخلية الشمسية ،  $G$  معدل توليد زوج الكترون- فجوة ضوئياً ،  $W$  عرض منطقة الاستنزاف ،  $L_e$  طول الانتشار للإلكترون في النوع  $p$  ،  $L_h$  طول الانتشار للفجوة في النوع  $n$  ، وتملك الخلايا الشمسية عادةً مقاومة متواليّة ذاتية  $R_S$  ، وأخرى متوازية  $R_{SH}$  مترابطة معها والشكل (٢-٩) يبين الدائرة المكافئة للخلية الشمسية المتكونة من مصدر تيار في توازي مع ثنائي القطب والمقاومتين  $R_S$  و  $R_{SH}$  . الشكل (٢-٩-أ) يبين فولتية الدائرة المفتوحة  $V_{oc}$  التي يمكن الحصول عليها من المعادلة (٢-١٧)

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln[(I_L/I_0) + 1] \approx \frac{kT}{q} \ln(I_L/I_0) \dots \dots \dots (2-20)$$

$I_L \gg I_0$  وقيمة  $(I_L/I_0)$  كبيرة جداً تتراوح بين  $(10^{10} - 10^{14})$  لذا يهمل العدد (١) . يتضح من المعادلة (٢-٢٠) اعتماد  $V_{oc}$  على درجة الحرارة  $T$  والتيار الإشباع  $I_0$  والتيار الضوئي  $I_L$  . إذا جعلنا قطبي الخلية الفوتوفولتائية دائرة قصيرة ، فإن التيار الضوئي الكلي سيرجع خلال الدائرة الخارجية ويتلاشى تيار المفرق ، وبذلك تكون الفولتية على قطبي الخلية صفراً كما في الشكل (٢-٩-ب) وبهذا يكون تيار الدائرة القصيرة مساوياً للتيار الضوئي .

$$I_{SC} = I_L, V_{OC} = 0 \dots \dots \dots (2-21)$$

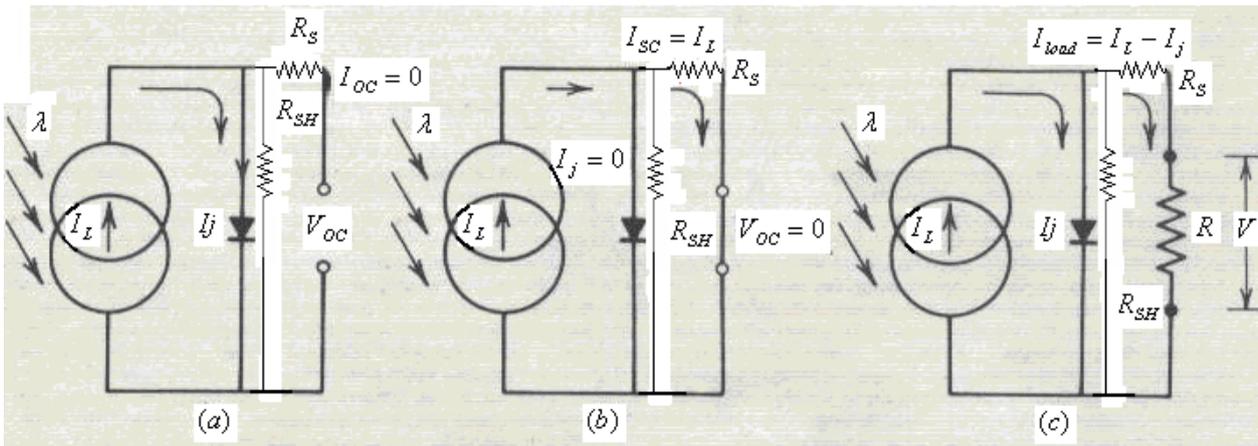
أما إذا ربطنا مقاومة حمل بين قطبي الخلية ، فان جزء من التيار الضوئي يمر عبر ثنائي القطب ، والجزء المتبقي سيجهد إلى الحمل  $I_{load}$  كما في الشكل (2-9-2) ، ويمكن التعبير عن تيار الحمل  $I_{load}$  بالمعادلة :

$$I_{load} = I_L - I_j$$

$$I_{load} = I_L - I_0(e^{qV/kT} - 1) \dots \dots \dots (2-22)$$

وبحل هذه المعادلة للفولتية سيكون لدينا

$$V = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_L - I_{load}}{I_0} + 1 \right) \dots \dots \dots (2-23)$$



الشكل (2-9) نموذج الكتروني بسيط لخلية فوتوفولتائية يتكون من مصدر تيار ضوئي مربوط على التوازي مع ثنائي القطب (a) عمل الدائرة المفتوحة . (b) عمل الدائرة القصيرة . (c) تجهيز تيار لمقاومة حمل خارجية [17] .

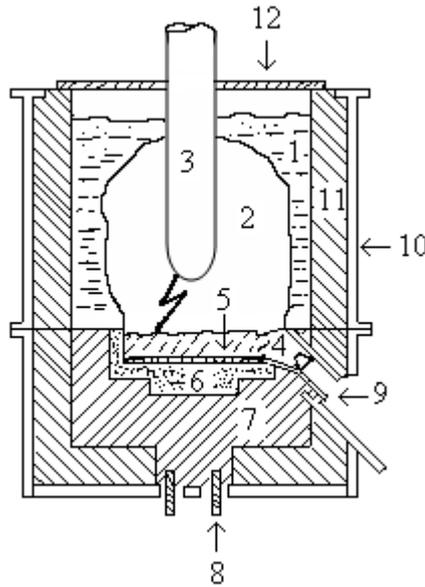
## (2-6) تحويل الرمل إلى خام السليكون المعدني

### Sand to metallurgical – grade silicon

يأتي السليكون في المرتبة الثانية من حيث الوفرة في القشرة الأرضية حيث يوجد على شكل مركبات السليكون ( $SiO_2$ ) التي تشكل الجزء الأعظم من الرمل . ويستخدم في الوقت الحاضر الشكل البلوري لثاني اوكسيد السليكون لاستخلاص السليكون تجارياً ، إذ تختزل هذه المادة بواسطة أفران قوسية كما في الشكل (٢-١٠) ويتم تسخينها بالكاربون ( مزيج من نشارة الخشب وفحم الكوك والفحم الحجري ) للحصول على السليكون حسب التفاعل التالي [١٠,٣٥] :



يصب سائل السليكون بشكل دوري ويمرر غاز الأوكسجين أو مزيج الأوكسجين - كلور فوق سائل السليكون ليصير أكثر نقاوة ثم يصب في قوالب غير عميقة وبعد تبريدها تقطع إلى قطع صغيرة . وتتم تنقية جزء قليل من هذا الخام لتحويله إلى شبه الموصل ( $SeG$ ) واستخدامه في صناعة الالكترونيات إذ تستعمل آلاف الأطنان من مادة ( $SeG$ ) النقية في هذه الصناعة سنوياً .

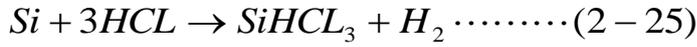


الشكل (٢-١٠) مقطع عرضي يبين المعالم النموذجية للفرن القوسي الذي يستخدم لإنتاج خام السليكون المعدني ١- الكربون والكوارتز ٢- حجرة ٣- القطب ٤- السليكون ٥- سليكون كاربايد ٦- موقد ٧- عجينة القطب ٨- أقطاب نحاسية ٩- صنوبر التفريغ ١٠- قالب حديدي واق ١١- الخزف - ١٢ الغطاء الكربوني [٣٥] .

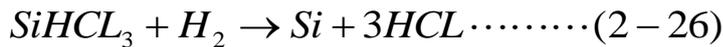
## (٧-٢) تحويل خام السليكون المعدني إلى خام سليكون شبه موصل

### **Metallurgical – grade silicon to semiconductor-grade silicon**

إن السليكون المستعمل في الخلايا الشمسية والنبائط شبه الموصلة الأخرى يجب أن يكون أنقى بكثير من خام السليكون المعدني والطريقة النموذجية للحصول على مادة نقية تعرف بعملية سيمنس [١٠,٣٦]. ففي هذه العملية يحول خام السليكون إلى مركب كيميائي متطاير ثم يكتف ويكرر بواسطة التقطير الجزئي وبعد هذه المعالجات يصبح السليكون نقياً جداً. وتجري بعد ذلك معالجات متتالية أخرى، فيذوب قليلاً من بلورات خام السليكون المعدني في حامض (HCL) وبوجود النحاس كعامل مساعد للحصول على التفاعل الآتي:



وتمرر الغازات الناتجة من التفاعل خلال مكثف لتحول إلى سائل يخضع لعملية التقطير الجزئي المضاعف للحصول على  $SeG - SiHCL_3$  الذي يعتبر المصدر الأساس لصناعة السليكون ولاستخلاص  $SeG - Si$  يختزل المركب  $SeG - SiHCL_3$  بواسطة الهيدروجين وذلك بتسخين المزيج حيث يترسب السليكون على شكل حبيبات بلورية على قضيب سليكوني مسخن كهربائياً حسب التفاعل الآتي:

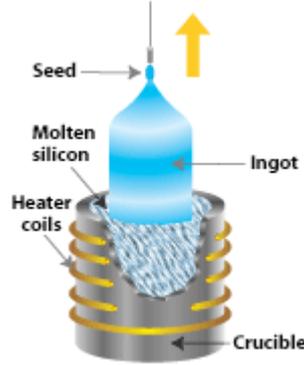


## (٨-٢) تحويل خام سليكون شبه موصل متعدد البلورات إلى رقائق أحادية البلورة

### **Semiconductor-grade Polysilicon to Single-crystal Wafers**

إن السليكون المستعمل في صناعة الالكترونيات لا يكفي أن يكون نقياً جداً فحسب بل يجب أن يكون على شكل تركيب أحادي البلورة خال من العيوب تماماً. وان الطريقة الرئيسية المستخدمة لإنتاج مثل هذه المواد هي عملية جوكرالسكي (Czochralski Process) المبينة في الشكل (٢-١١) ففي هذه العملية يصهر سليكون متعدد البلورات ( $SeG - Si$ ) في بودقة صلبة مع كميات ضئيلة من الشوائب اللازم إدخالها في التركيب ويستخدم البورون عادةً لعمل طبقة  $p$ . باستخدام بلورة البذرة (*Seed Crystal*)، وبالسيطرة الدقيقة على درجة الحرارة يمكن سحب اسطوانة أحادية البلورة من

السليكون ، إذ يمكن بهذه الطريقة تنمية بلورات كبيرة اسطوانية الشكل بقطر  $12.5\text{cm}$  وبطول  $(1-2)\text{m}$  وبصورة مستمرة [١٠,٣٧] .



الشكل (١١-٢) يبين المعالم الأساسية في عملية جوكرالسكي لإنماء قالب اسطواني كبير من السليكون أحادي البلورة [١٠,٣٧] .

إن الخلايا الشمسية تحتاج إلى سمك  $100\text{micron}$  أو أقل لتستطيع امتصاص غالبية الأطوال الموجية في الطيف الشمسي ، لذا تقطع البلورة الكبيرة إلى شرائح رقيقة ومنتظمة كما في الشكل (١٢-٢) ، غير إن تقنية التقطيع هذه تلاقي صعوبة في تقطيع البلورة الأسطوانية إلى رقائق بسمك أقل من  $300\text{micron}$  مع المحافظة على إنتاجية مقبولة ، إذ إن أكثر من نصف السليكون المنتج يهدر ويضيع عند القطع على شكل نشارة القطع أو قطع غير ملائمة . وهذا الإنتاج القليل لهذه المرحلة أي تحويل ( $SeG$ ) إلى شرائح أحادية البلورة عامل سلبي آخر يضاف إلى سلبيات التقنية القياسية للسليكون [١٠,٣٧] .



الشكل (١٢-٢) يبين قطع الشرائح الرقيقة من القالب الأسطواني حيث يضيع نصف القالب

تقريباً كَنَشَارَة أو الكسر عند القطع في هذه العملية [١٠,٣٧] .

(٩-٢) عمليات إعادة الاتحاد في أشباه الموصلات

## Recombination Processes in Semiconductors

عند سقوط ضوء ذي طول موجي مناسب على شبه موصل سيؤدي إلى توليد أزواج من الكترولون- فجوة ، وبذلك يؤدي إلى زيادة في تركيز حاملات الشحنة عما كان عليه في الظلام . فإذا قطع الضوء فإن هذه الزيادة في التركيز تعود تدريجياً إلى قيمها الأولية المتوازنة . إن عملية الاضمحلال هذه تعرف بعملية إعادة الإتحاد (*recombination*) ( إعادة الإتحاد للالكترولونات والفجوات هي العملية التي بواسطتها يفني كلا الحاملات كل منهما الآخر) وهناك آليات مختلفة لعملية إعادة الإتحاد [ ١٠ ] .

الشكل (١٣-٢) يبين هذه العمليات وهي :

### Radiative

### (١-٩-٢) إعادة الإتحاد الإشعاعي

#### *recombination*

هي عملية معاكسة لعملية امتصاص الضوء وتحدث عندما ينتقل الالكترولون من حزمة التوصيل إلى حزمة التكافؤ مع انبعاث كل أو معظم فرق الطاقة بين المرتبتين على شكل ضوء . ويبين الشكل (a-١٣-٢) هذه العملية [ ١٠, ٣٨, ٣٩ ] .

### Recombination through traps

### (٢-٩-٢) إعادة الإتحاد خلال القائنات

تحدث الشوائب والعيوب في أشباه الموصلات مستويات طاقة مسموحة في الفجوة المحظورة ، وهذه المستويات تسبب عملية إعادة الإتحاد ذات المرحلتين حيث يسترخي الالكترولون في حزمة التوصيل إلى المستويات الناتجة من العيوب ويستمر في الاسترخاء إلى أن يصل إلى حزمة التكافؤ ويتحد مع الفجوة فتتلاشى [ ١٠ ] . الشكل (b-١٣-٢) يبين هذه العملية .

### Auger recombination

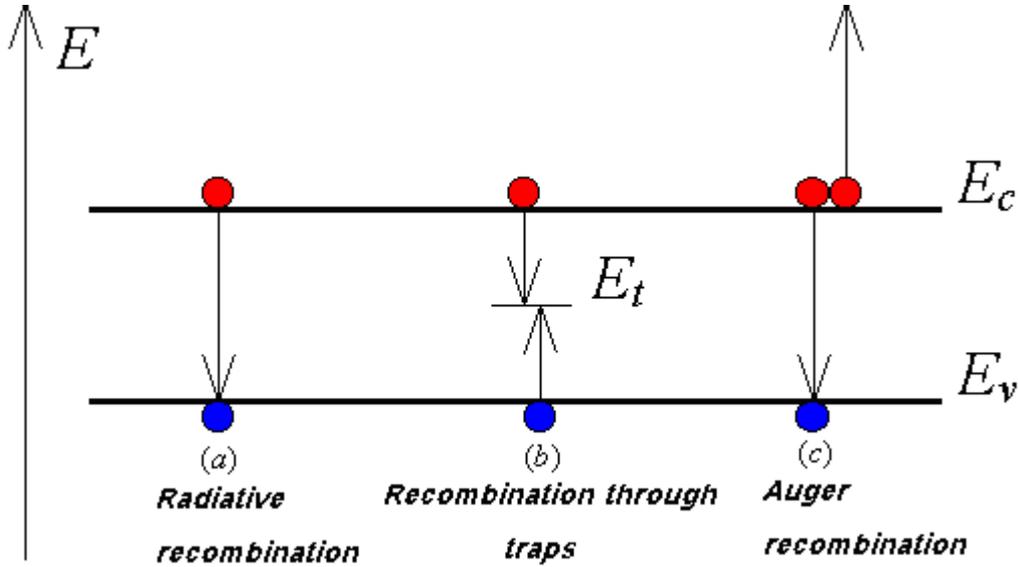
### (٣-٩-٢) إعادة اتحاد أوشي

في تأثير أوشي (*Auger effect*) يتحد الالكترولون مع الفجوة ويعطي الطاقة الزائدة إلى الكترولون ثان ( أما في حزمة التوصيل أو في حزمة التكافؤ ) بدلاً من أن يبعث الضوء [ ١٠, ٣٨, ٣٩ ] . الشكل (c-١٣-٢) يبين هذه العملية ، ثم يسترخي (*relax*) الالكترولون الثاني هذا ليرجع إلى طاقته الأولية بانبعاث الفوتونات . وهي عملية معاكسة لتأثير التأيّن التصادمي (*impact ionization effect*) المألوف والناتج عن كسر أصرة وتوليد زوج الكترولون- فجوة نتيجة تصادم الكترولون ذي طاقة عالية مع ذرة ، كما إنها أكثر عمليات إعادة الإتحاد حدوثاً في السليكون عالي الجودة ، وذي نسبة من التطعيم تزيد على  $(10^{17} \text{ cm}^{-3})$  [ ١٠ ] .

## Recombination at surfaces

## (٢-٩-٤) إعادة الإتحاد عند السطوح

تحتوي سطوح شبه الموصل على عدد كبير من مراكز إعادة الإتحاد بسبب النهاية الفجائية لبلورة شبه الموصل والتي تترك عدد كبير من الأواصر المتدلية الفعالة كهربائياً [٣٩, ٣٨].



الشكل (٢-١٣) يبين عمليات إعادة الإتحاد في أشباه الموصلات [٣٨].

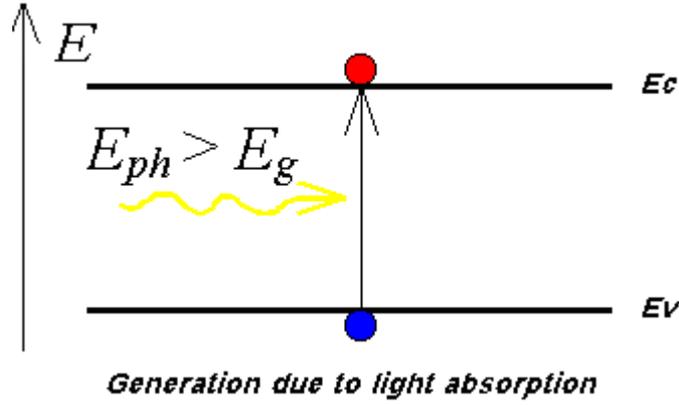
## (٢-١٠) عملية التوليد في أشباه الموصلات

### Generation Process in Semiconductors

توليد الحاملات بسبب امتصاص الضوء يحدث إذا كانت طاقة الفوتون كبيرة لرفع الإلكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل وتوليد زوج الكترون- فجوة واحد  $(E_{ph} > E_g)$ ، الفوتون ممتص في هذه العملية والطاقة الزائدة  $(E_{ph} - E_g)$  تضاف إلى الإلكترون والفجوة على شكل طاقة حركية [٣٨, ١١] كما في الشكل (٢-١٤).

إذا كان كل فوتون ممتص يخلق زوج الكترون- فجوة واحد فان معدل توليد الإلكترون والفجوة يعطى بالمعادلة التالية [٣٨]:

$$G_{p,light} = G_{n,light} = \alpha \frac{P_{opt}(x)}{E_{ph} A} \dots \dots \dots (2-27)$$



الشكل (٢-١٤) يبين توليد الحاملات بسبب امتصاص الضوء [٣٨] .

### (٢-١١) بعض العوامل المؤثرة على كفاءة الخلية الشمسية :

إن القدرة الخارجة لها تأثير على كفاءة الخلية الشمسية ، وتغير القدرة الخارجة معناه تغير الكفاءة . وفي الحقيقة توجد عدة عوامل تؤثر على كفاءة الخلية سواء أكانت هذه العوامل طبيعية منها شدة الضوء الساقط ومدة شروق الشمس وزاوية ميل الخلية بالنسبة إلى الشمس ، والزمن ودرجة الحرارة وموقع الخلية وكذلك الحالة الجوية . أو عوامل غير طبيعية مثل كفاءة البطارية المستعملة لخزن القدرة الكهربائية الخارجة ومقاومة الحمل والخسائر التي تحدث داخل الخلية ، أو العوامل الناتجة من تصنيع الخلية ، وكذلك متغيرات الدائرة المكافئة التي تعتمد على طرق التصنيع وهي :

#### ( Open– Circuit Voltage )

#### (٢-١١-١) فولتية الدائرة المفتوحة

( $V_{oc}$ )

فولتية الدائرة المفتوحة لها تأثير واضح ومباشر على كفاءة الخلية الشمسية كما هو موضح إليه في المعادلة (٦-١) [٤٠] إذ أنه بزيادتها تزداد كفاءة الخلية ، ويمكن الاستنتاج بأنها تزداد بصورة واضحة بنقصان قيمة  $R_S$  و  $1/R_{SH}$  [٤١] .

#### ( Short – Circuit Current )

#### (٢-١١-٢) تيار الدائرة القصيرة

( $I_{sc}$ )

إن تأثير تيار الدائرة القصيرة مماثل لتأثير فولتية الدائرة المفتوحة على الكفاءة كما في المعادلة (١-٦) فعند زيادته تزداد كفاءة الخلية الشمسية بالنسبة نفسها .

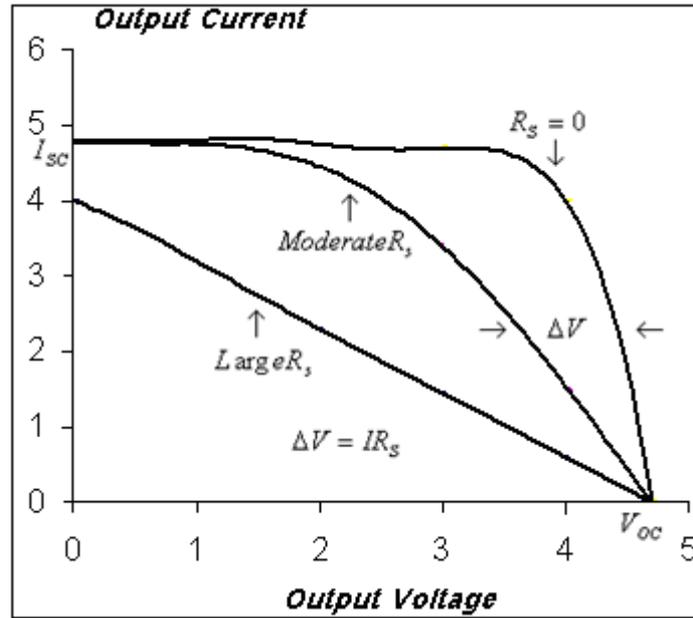
## (٣-١١-٢) مقاومة التوالي ومقاومة التوازي

### *Series resistance and Shunt resistance*

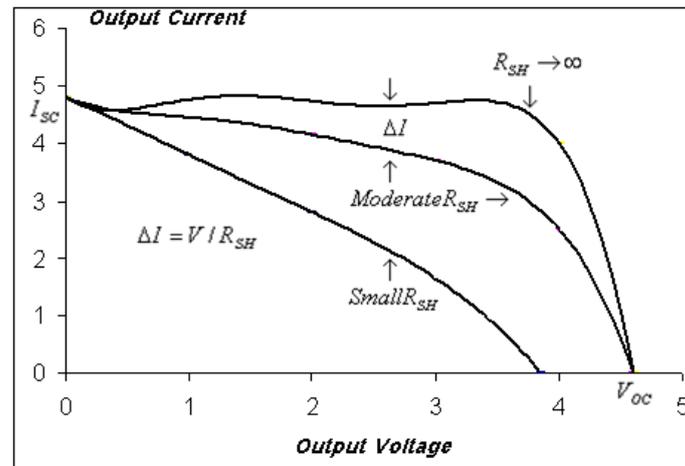
إن تأثير مقاومة التوالي في الخلية الشمسية موضح في الشكل (٢-١٥) ، إذ عند ازديادها لانتغير فولتية الدائرة المفتوحة لكن عامل الملاء يقل بصورة ملحوظة . ويحدث هبوطاً في تيار الدائرة القصيرة إلى قيمة أقل من قيمة التيار الضوئي بسبب تيار الإشباع المعاكس للتيار الضوئي ، وذلك نتيجة هبوط الفولتية خلال مقاومة التوالي عند الانحياز الأمامي [١٠,٣٣] .

ويوضح الشكل (٢-١٦) تأثير مقاومة التوازي إذ لا يتغير تيار الدائرة القصيرة ، ولكن يحدث هبوطاً في عامل الملاء وفولتية الدائرة المفتوحة كلما قلت مقاومة التوازي ، وهي لا تتغير من القدرة الخارجة للخلية بصورة كبيرة ، بينما تؤثر مقاومة التوالي على القدرة بشكل كبير، إذ إن القدرة تقل بنسبة (٣٠٪) في حالة وجود مقاومة متوالية مثلاً  $(R_S = 5\Omega)$  [١٠,٣٣] .

إن تأثير مقاومتي التوالي والتوازي على القدرة الخارجة للخلية تحت الضوء موضح في الشكل (٢-١٧) إذ يتم الحصول على أحسن حالة عندما تكون  $(R_S = 0, R_{SH} = \infty)$  فبتغيير إحدى هاتين المقاومتين تنخفض الفولتية أو ينخفض التيار فيحدد الأداء الكلي للخلية [٣٣] .

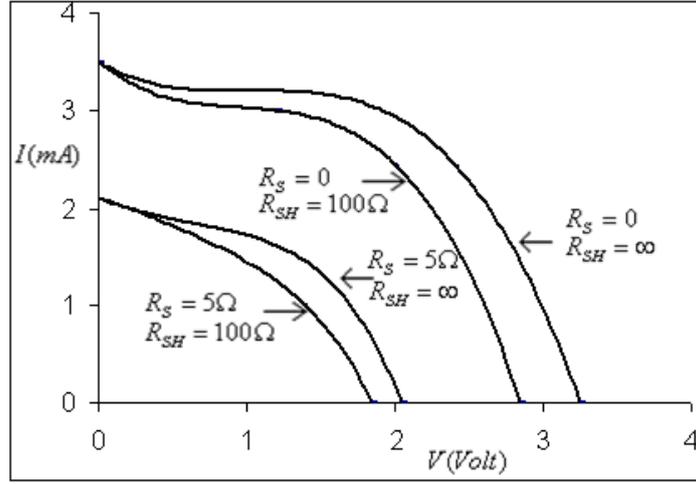


الشكل (١٥-٢) يبين تأثير المقاومة المتواليّة  $R_s$  على خصائص التيار- الفولتية للخلية الشمسية [١٠,٣٣]



الشكل (١٦-٢) يبين تأثير المقاومة المتوازية  $R_{sh}$  على خصائص التيار- الفولتية للخلية الشمسية

[١٠,٣٣]



الشكل (١٧-٢) يبين تأثير المقاومتين المتواليه والمتوازية  $R_S$  &  $R_{SH}$  على القدرة الخارجة للخلية الشمسية [٣٣].

### Grid Finger Spacing

### (٤-١١-٢) بعد أصابع الشبكة

البعد بين أصابع الشبكة للتوصيل الأمامي له أهميته وتأثيره على كفاءة الخلية ، إذ انه كلما زاد البعد بين الأصابع زادت مساحة الخلية المعرضة لضوء الشمس ، ومن ثم زيادة تيار الدائرة القصيرة بزيادة السطح المعرض ( $F_{exp}$ ) الذي يمكن التعبير عنه بالمعادلة [٤٢]:

$$F_{exp} = t_2 / (t_1 + t_2) \dots \dots \dots (2 - 28)$$

إذ إن  $t_1$  : عرض أصبع الشبكة ،  $t_2$  : البعد بين كل أصبعين .

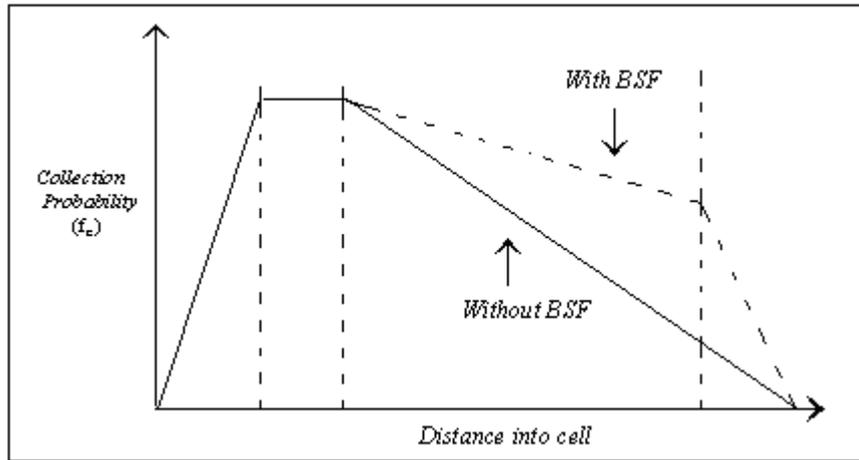
ولكن المقاومة المتواليه للخلية تزداد أيضا بزيادة البعد بين أصابع الشبكة ، وهذه المقاومة لها تأثير عكسي على عامل الملء وكفاءة الخلية . إن أمثل بعد بين إصبعي الشبكة هو  $[٤٢] (2 - 5)mm$  . أما الخلية التي تم استخدامها في البحث فكان البعد بين أصبعي الشبكة هو  $3.5mm$  .

### Junction Depth

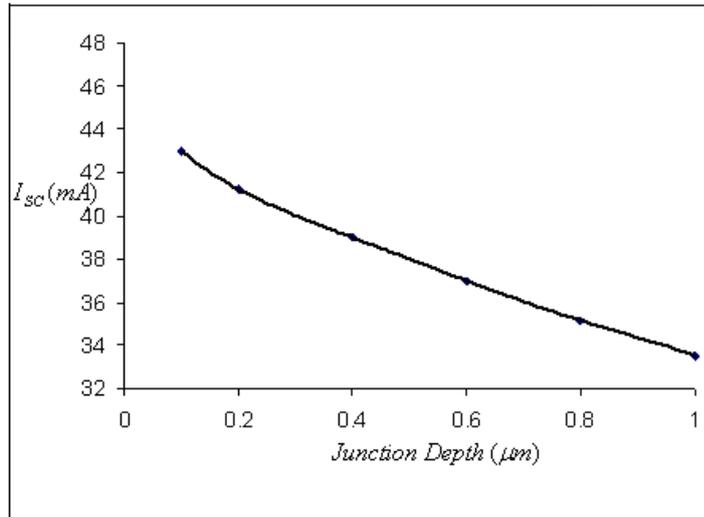
### (٥-١١-٢) عمق المفرق

السطوح المكشوفة كالتالي بين أصابع القطب المعدني عند السطح العلوي للخلية الشمسية تمتلك عموماً سرعة إعادة اتحاد عالية . والسطوح البينية (*interface*) بين التوصيلات الاومية وشبه

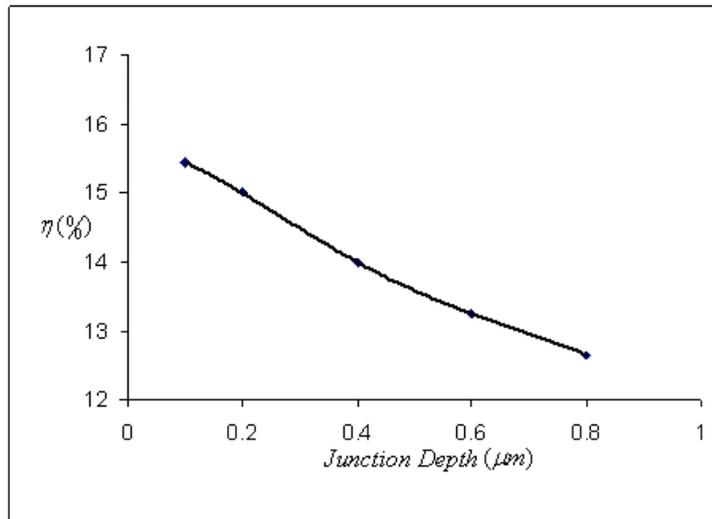
الموصلة تكون أيضاً مناطق سرعة إعادة اتحاد عالية . وان الطريقة الوحيدة لخلق سطح بيني ذي سرعة إعادة اتحاد واطئة هي تكوين مجال السطح الخلفي (*Back Surface Field*) ( وهي إحدى التقنيات التي تستخدم لتقليل سرعة وفعالية إعادة الاتحاد في السطح الخلفي للخلية الشمسية ) وذلك بتكوين مفرق يجمع منطقة مطعمة بدرجة عالية مع منطقة مطعمة بدرجة واطئة والنوع نفسه من الشائب ) ، إذ إن مجال السطح الخلفي يحسن احتمالية التجميع ( هي احتمالية مساهمة الحاملات الأقلية المتولدة ضوئياً في تيار الدائرة القصيرة للخلية الشمسية كما إنها دالة للموقع الذي تتولد عنده الحاملات داخل الخلية وهي مهمة وجوهرية في تصميم الخلايا الشمسية من الناحية الفيزيائية ) للحاملات المتولدة قرب القطب الخلفي كما في الشكل (٢-١٨) وهذا بدوره يزيد من تيار الدائرة القصيرة للخلية كما إن احتمالية التجميع للحاملات المتولدة قرب السطح العلوي تكون واطئة ويمكن تقليل أثر هذا الخلل بجعل المفرق قريباً من السطح [١٠] . إن معظم خلايا *p-n* المصنوعة لها عمق مفرق في المدى  $(0.3 - 0.5) \mu m$  ، والشكل (٢-١٩) يبين تيار الدائرة القصيرة بوصفه دالةً لعمق المفرق كما يبين الشكل (٢-٢٠) التحسين لكفاءة الخلية الشمسية الناتج من تقليل عمق المفرق [٣٣] .



الشكل (٢-١٨) يبين احتمالية التجميع لخلية محدودة الأبعاد مع مجال السطح الخلفي وبدونه [١٠] .



الشكل (٢-١٩) يبين تيار الدائرة القصيرة لمفرق  $p-n$  من السليكون عند  $AM_0$  بوصفها دالةً لعمق المفروق [٣٣].



الشكل (٢-٢٠) يبين الكفاءة لمفرق  $p-n$  من السليكون عند  $AM_0$  بوصفه دالةً لعمق المفروق [٣٣].

## Zenith Angle

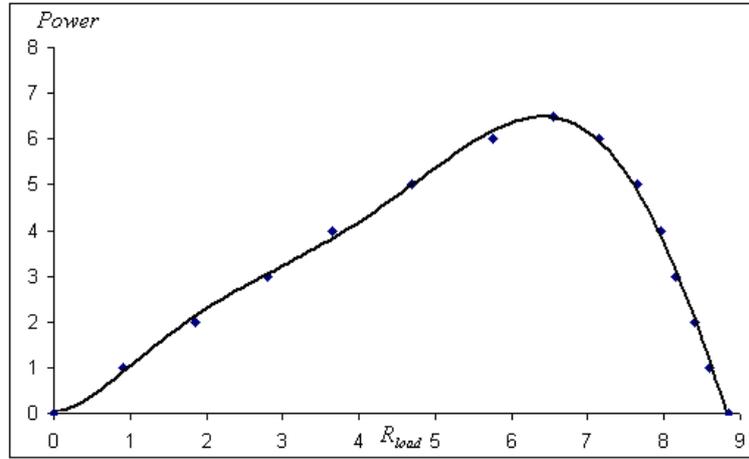
## (٢-١١-٦) زاوية الميل

إن تأثير زاوية الميل على كفاءة الخلية الشمسية مهم جداً ، وذلك لأنه باختلاف زاوية الميل تختلف شدة الضوء الساقط على الخلية والقدرة الخارجة من الخلية تتناسب طردياً مع شدة الضوء الساقط ، وما يترتب على هذا من تغيير في تيار الدائرة القصيرة وفولتية الدائرة المفتوحة مع زيادة شدة الضوء الساقط ، كذلك يحصل تغير في كل من مقاومتي التوالي والتوازي وتيار الإشباع وغيرها ،

وتعرف بأنها الزاوية المحصورة بين شعاع الضوء الساقط والعمود المقام على السطح ( للخلية مثلا ) [٤٣] .

## Load Resistance (٧-١١-٢) مقاومة الحمل

وهي من أهم العوامل التي تؤثر على كفاءة الخلية الشمسية وتتحكم بصورة مباشرة بالقدرة الخارجة من الخلية ، الشكل (٢-٢١) يبين تأثير مقاومة الحمل على القدرة الخارجة لشدة معينة للضوء الساقط . لذلك يجب معرفة قيمة هذه المقاومة لكل شدة ولكل ربط معين وتعرف بأنها مقاومة الحمل عند نقطة القدرة العظمى لخصائص التيار- الفولتية ( المقاومة التي يتم عندها نقل أعظم قدرة من الخلية إلى الحمل المرغوب لشدة معينة ) [٤٤] .



الشكل (٢-٢١) يبين تغير القدرة الخارجة مع تغير مقاومة الحمل المربوط لخلية شمسية سليكونية [٤٤] .

## (١٠-٢) الاستجابة الطيفية للتيار الضوئي

### Spectral Response to the Photocurrent

نفرض إن  $F_{\lambda}$  تمثل دالة التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي الساقط وهذه الدالة الطيفية تمثل الطاقة الإشعاعية في الثانية لوحدة المساحة ولوحدة الأطوال الموجية الساقطة على الطبقة السطحية للخلية الفوتوفولتائية .

بما إن الفوتون الذي طوله الموجي  $\lambda$  يحمل طاقة  $E_{\lambda} = h\nu = hc / \lambda$  فإن عدد الفوتونات الساقطة لوحدة الزمن ولوحدة المساحة ولوحدة الأطوال الموجية يساوي [١٧]

$$\dot{N}_\lambda = F_\lambda / E_\lambda = F_\lambda \lambda / hc \dots \dots \dots (2-29)$$

وان

$$\dot{n}_\lambda = \beta_\lambda \dot{N}_\lambda \dots \dots \dots (2-30)$$

إذ إن  $\dot{n}_\lambda$  تمثل معدل توليد الأزواج لوحدة المساحة بواسطة  $\dot{N}_\lambda$  و  $\beta_\lambda$  التي تمثل الكفاءة الكمية (Quantum Efficiency) للفوتون ذي الطول الموجي  $\lambda$ . وتكون قيمة المتغير  $\beta_\lambda$  صفراً لجميع الأطوال الموجية التي تكون أكبر من  $\lambda_0$  الذي يمثل الطول الموجي لفوتون طاقتة تساوي طاقة فجوة الحزمة، والفوتونات التي تملك طاقة أعلى من طاقة فجوة الحزمة تكون أكثر فعالية لتوليد التيار الضوئي.

باستخدام العلاقة  $I_{L,\lambda} = q \dot{n}_\lambda$  والمعادلتين (2-29) و (2-30) نجد أن

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

ويمكن كتابة هذه المعادلة بشكل أبسط

$$I_{L,\lambda} = K_\lambda F_\lambda \dots \dots \dots (2-31)$$

إذ  $I_{L,\lambda}$  هو التيار الضوئي الطيفي و  $K_\lambda = \frac{q \beta_\lambda \lambda}{hc}$  وتعرف  $K_\lambda$  بالاستجابة الطيفية للخلية الفوتوفولتائية. ويبين الشكل (2-22) الاستجابة الطيفية لخلية سليكونية نموذجية.

ويمكن التعبير عن التيار الضوئي الكلي المتولد من الطيف الكلي بالمعادلة الآتية:

$$I_L = \int I_{L,\lambda} d\lambda = \int_0^{\lambda_0} K_\lambda F_\lambda d\lambda = \bar{K} F \dots \dots \dots (2-32)$$

إذ

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda$$

و

$$\bar{K} = \int_0^{\lambda_0} K_{\lambda} F_{\lambda} \frac{d\lambda}{F}$$

$\lambda_0$ : طول موجة القطع وتساوي  $\frac{hc}{E_g}$  والمتغير  $\bar{K}$  هو معدل الاستجابة الطيفية ويعتمد على

التوزيع الطيفي للإشعاع الساقط ويقاس بالأمتير/ واط . وبتعويض المعادلة (٢-٣٢) في المعادلتين (٢-٢٢) و(٢-٢٣) سنجد

$$I_{load} = \bar{K} F - I_0 (e^{qV/kT} - 1)$$

أو

$$V = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{\bar{K} F - I_{load}}{I_0} + 1 \right] \dots \dots \dots (2-33)$$

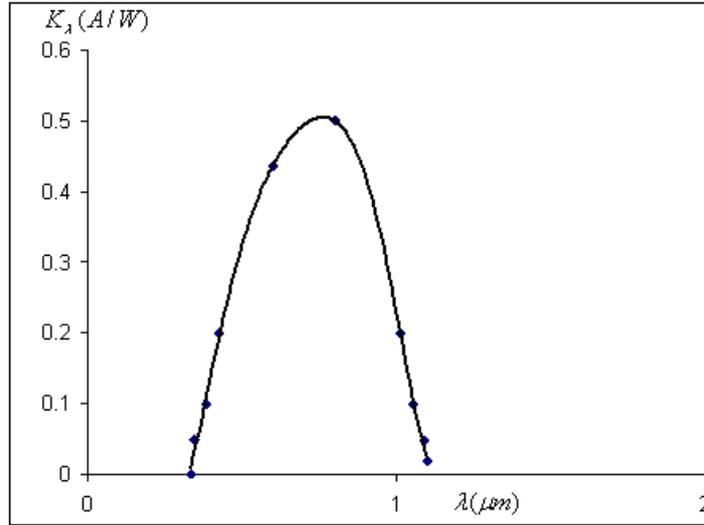
كذلك نجد تيار الدائرة القصيرة وفولتية الدائرة المفتوحة هما :

$$I_{SC} = \bar{K} F \dots \dots \dots (2-34)$$

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{\bar{K} F}{I_0} + 1 \right] \dots \dots \dots (2-35)$$

نلاحظ من المعادلتين إن تيار الدائرة القصيرة يتناسب خطياً مع الفيض الشمسي الساقط ( شدة الأشعة الشمسية الساقطة) بينما فولتية الدائرة المفتوحة تتناسب أسياً مع الفيض الشمسي الساقط

[١٧،٤٥] F



الشكل (٢-٢٢) يبين الاستجابة الطيفية لخلية شمسية سليكونية نموذجية [١٧] .

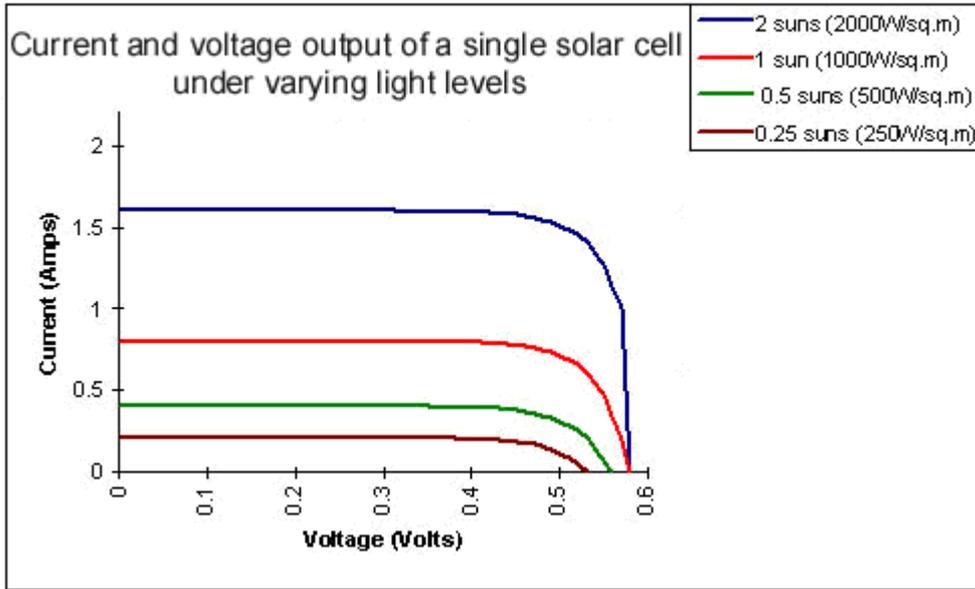
## (١١-٢) تغير الشدة عند درجة حرارة ثابتة

### *Intensity change at constant temperature*

لدراسة تأثير الشدة بصورة واضحة ، نفرض إن جميع القياسات التي أجريت على الخلية هي ضمن درجة حرارة ثابتة (درجة حرارة الغرفة) فعند ثبوت درجة الحرارة فإن التيار الخارج يقل بصورة خطية مع نقصان شدة الضوء الساقط والفولتية الخارجة تتناقص أسياً [٤٦] . في هذه الحالة مقاومة التوالي  $R_S$  تكون مهملة التأثير نسبياً عند قيم الشدة القليلة ، ولكن مقاومة التوازي  $R_{SH}$  لها تأثير بالغ الأهمية ، إذ إن التيار المتسرب مقارنةً مع التيار المتولد ضوئياً يقل بشدة كل من فولتية الدائرة المفتوحة وعامل الملاء [٤٧] .

عند ازدياد شدة الضوء الساقط مع ثبات درجة الحرارة فإن مقاومة التوازي  $R_{SH}$  تكون مهملة التأثير ، ولكن مقاومة التوالي  $R_S$  لها تأثير كبير ، وذلك لأن النبيطة لها مقاومة توالي واطئة على نحو ممتاز [٣٣] . ويوضح الشكل (٢-٢٣) منحنيات التيار- الفولتية لخلية شمسية مفردة بوصفها دالةً لشدة الضوء الساقط .

إن الخلية الشمسية السليكونية الأحادية البلورة النموذجية التي مساحتها  $100cm^2$  يمكن أن تنتج قدرة حوالي  $1.5W$  عند فولتية  $0.5VDC$  و تيار  $3A$  عند ضوء الشمس في فصل الصيف  $1000W / m^2$  [٢٧] .



الشكل (٢-٢٣) يبين التيار والفولتية الخارجين لخلية شمسية سليكونية مفردة عند قيم مختلفة للشدة [٢٧]

## (١٢-٢) تأثير درجة الحرارة على معالم الخلية الشمسية السليكونية

### *Effect the temperature on the silicon solar cell parameters*

عند زيادة درجة حرارة الخلية ، فإنها تسبب زيادة مقاومة التوالي  $R_S$  وتناقص التوصيلية . هذا بسبب حقيقة إن حركية حاملات الشحنة ،  $\mu$  ، تتناسب عكسياً مع درجة الحرارة [٢٥,٢٩]

$$\mu \propto T^{-3/2} \dots\dots\dots (2-36)$$

في مدى التشغيل الاعتيادي للخلية الشمسية ،  $(300-380)K$  ، تكون الزيادة في  $R_S$  صغيرة جداً . كما تحدث زيادة قليلة في تيار الدائرة القصيرة ( تيار الدائرة القصيرة من الخلية الشمسية هو التيار الضوئي) . عند الطول الموجي المعطى للضوء فإن التيار الضوئي هو :

$$I_L(\lambda) = \eta_\lambda q N_\lambda \dots\dots\dots (2-37)$$

إذ  $N_\lambda$  هو عدد الفوتونات عند طول موجي معين ،  $\eta_\lambda$  كفاءة الخلية الشمسية عند ذلك الطول الموجي ، وتعرف أيضاً بالاستجابة الطيفية . أما قدرة الإشعاع فتعطى بالمعادلة [٢٥,٢٩] :

$$P_{\lambda} = N_{\lambda} \frac{hc}{\lambda} \dots \dots \dots (2-38)$$

بتعويض المعادلة (٢-٣٨) في المعادلة (٢-٣٧) ينتج :

$$I_L(\lambda) = \eta_{\lambda} q \frac{P_{\lambda} \lambda}{hc} \dots \dots \dots (2-39)$$

لإيجاد التيار الضوئي الكلي يجب إجراء تكامل المعادلة (٢-٣٩) على جميع الأطوال الموجية الممتصة بواسطة الخلية الشمسية . الفوتون يجب أن يكون له طاقة أكبر من فجوة الطاقة للخلية الشمسية لكي يساهم في التيار الضوئي . هذا يقدم الطول الموجي الأعظم للفوتون  $\lambda_1$  . التيار الضوئي الكلي هو [٢٥,٢٩]

$$I_L = \frac{q}{hc} \int_0^{\lambda_1} \eta_{\lambda} P_{\lambda} \lambda d\lambda \dots \dots \dots (2-40)$$

وهذا يقابله حقيقة هي إن زيادة درجة الحرارة يؤدي إلى تناقص الفولتية لمفروق  $p-n$  التي تعطى بالمعادلة [٢٥,٢٩] :

$$V_o = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \dots \dots \dots (2-41)$$

إذ إن  $N_D, N_A$  هي عدد الذرات القابلة والمانحة على التوالي ،  $n_i$  تركيز الحاملات الذاتية للمفروق . في السليكون ،  $n_i$  تتبع المعادلة [٢٥,٢٩] :

$$n_i = 3.87 \times 10^{16} T^{3/2} \exp(-E_g / 2kT) \dots \dots \dots (2-42)$$

في الخلية الشمسية السليكونية عندما  $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ، فإن زيادة درجة الحرارة  $(300-380)K$  يسبب تناقص الفولتية  $(0.66-0.35)V$  . التيار الخارج للخلية الشمسية هو [٢٥,٢٩] :

$$I = I_L - I_o (e^{qV/kT} - 1) \dots \dots \dots (2-43)$$

عند شروط الدائرة المفتوحة ، التيار الخارج يساوي صفراً ، ولهذا يجب تساوي التيار الضوئي وتيار الثنائي [٢٥,٢٩] :

$$I_L = I_0 (e^{qV/kT} - 1) \dots \dots \dots (2-44)$$

وبترتيب المعادلة (٢-٤٤) نحصل على

$$V = V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \dots \dots \dots (2-45)$$

من المعادلة (٢-٤٥) يمكن ملاحظة إن زيادة تيار الإشباع للثنائي مع زيادة درجة الحرارة يؤدي إلى فولتية الدائرة المفتوحة الأقل .

## الفصل الثالث

### Introduction

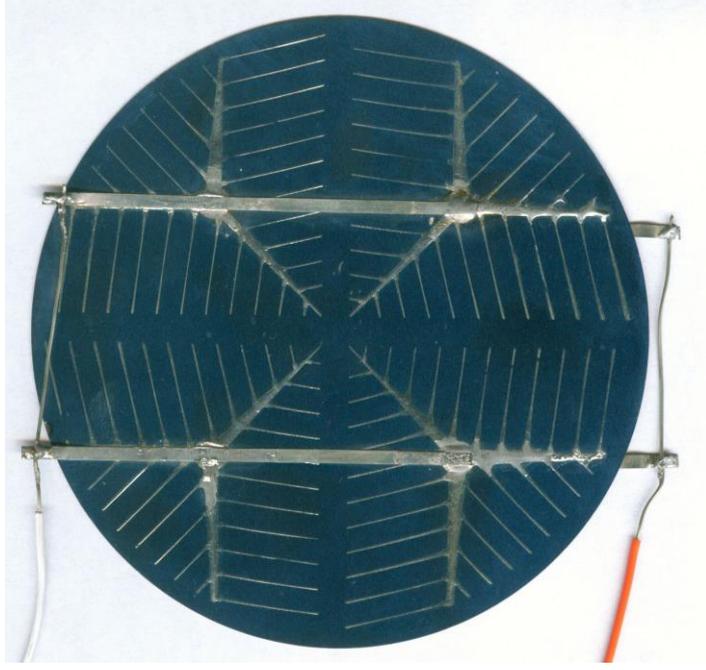
### (١-٣) المقدمة

في هذا الفصل تم استعراض الخلية الشمسية السليكونية المستخدمة في البحث وأجهزة القياس فضلاً عن خصائص التيار- الفولتية للخلية وحساب كفاءة الخلية الشمسية عملياً بتأثير عوامل الطول الموجي وشدة الضوء الساقط ودرجة الحرارة عليها مع حساب كفاءة الخلية نظرياً بواسطة برنامج الحاسبة الإلكترونية بلغة فيجول بيسك وتأثير العوامل نفسها .

### (٢-٣) الخلية الشمسية

### Solar Cell

استخدمت خلية شمسية من السليكون أحادي البلورة مصنوعة بطريقة جوكرالسكي نوع P - من مصنع المنصور ذات شكل دائري قطرها (10cm) وسمكها (0.5±0.15)mm . معامل الانكسار للطلاء غير العاكس n = 2.2 . مساحة الخلية (78.5±1.5)cm<sup>2</sup> ، وزن الخلية (9 grams) كما في الشكل (١-٣) .



الشكل (١-٣) يبين الخلية الشمسية السليكونية المستخدمة في البحث .

### (٣-٣) أجهزة القياس :-

١- مقياس التيار والفولتية ودرجة الحرارة .

- لقياس خصائص التيار- الفولتية للخلية الشمسية أستخدم مقياس متعدد رقمي عدد (٢) ، واحد لقياس التيار وآخر لقياس الفولتية وهما من شركة (Aswar) طراز (DT 9201 ACE) ، وتم قياس درجة الحرارة باستخدام محرار رقمي وهو مجهز من شركة (Cole-Parmer Instrument Company) .
- ٢- مصدر ضوئي محاكي للشمس (Sun Simulator) (قريب بدرجة مقبولة من طيف ضوء الشمس) .

تم استخدام مصدر ضوئي موضوع على مسافة ثابتة (30cm) وعمودياً على الخلية الشمسية  
مجهاز من (PHILIPS) وطرزته (٠٢١٣٥٩) ومواصفاته هي :

( SPOTONE , PAR ٣٨ Economy , ٢٤٠ V , ١٢٠ W , Royal Philips Electronics )

٣- جهاز قياس شدة الطيف الشمسي (Solar Meter) .

أستخدم هذا الجهاز لقياس شدة الطيف الشمسي الساقط على الخلية بوحدة ( $W / m^2$ ) وهو  
مجهاز من شركة (Crystal Production) ونوعية (BTU/HR/SQ.FT) وهو مصنع في مدينة (Colorado) .

٤- مسخن عادي (Heater) ( يفصل مسافة (5cm) عن الخلية الشمسية ) لرفع درجة حرارة الخلية  
الشمسية.

٥- مجزئ جهد (Rotary Regavolt) .

وهو جهاز من شركة (The British Electric Resistance Co.LTD.) وقد استخدم هذا  
الجهاز للتحكم بشدة الضوء الساقط على الخلية وهو مربوط مباشرةً مع المصدر الضوئي ، ويمتلك هذا  
الجهاز المواصفات الآتية :

(Type ٧١C , Input ٢٣٠V , Output ٠-٢٧٥V , ٥٠/٦٠Hz , Current ٦A).

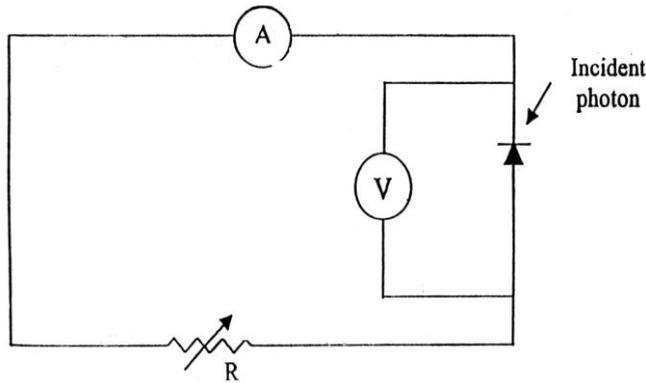
٦- مرشحات (Filters) بأطوال موجية (452,509,587,614,656)nm .

٧ - صندوق مقاومة  $\Omega(0 - \infty)$  .

### (٤-٣) خصائص التيار- الفولتية

#### I-V Characteristics

تعد خصائص التيار- الفولتية من القياسات الهامة لتحديد الأداء الحقيقي للخلية الشمسية وذلك بحساب قيم عدد من المتغيرات . للحصول على منحنى التيار- الفولتية للخلية في حالة الإضاءة تم ربط الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (٢-٣) . بعد إسقاط الأشعة الضوئية المجهزة من مصدر ضوئي بصورة عمودية ( $\theta = 0$ ) بشدة معينة على الخلية ، ومن تغيير قيمة مقاومة الحمل ( $R_L$ ) بصورة تدريجية في المدى ( $0 - \infty$ ) ، أمكن قياس خصائص التيار- الفولتية باستخدام الاميتر والفولتميتر الرقميين والتأكد من ثبوت درجة الحرارة وشدة الإضاءة المسطحة على الخلية الشمسية خلال فترة إجراء القياسات ( قياس التيار والفولتية لكل قيمة من قيم المقاومة ) ، إذ قيست قيمة ( $V_{OC}$ ) عند ( $R_L = \infty$ ) وقيمة ( $I_{SC}$ ) عند ( $R_L = 0$ ) ومن ثم حساب ( $FF$ ) من المعادلة (١-٨) لأجل حساب كفاءة الخلية الشمسية ( $\eta(\%)$ ) من المعادلة (١-٦) .



الشكل (٢-٣) يبين الدائرة الكهربائية المستخدمة لقياس خصائص التيار- الفولتية للخلية الشمسية.

### (٥-٣) حساب كفاءة الخلية الشمسية عملياً بتأثير عوامل الطول الموجي وشدة الإضاءة ودرجة الحرارة عليها :

في تأثير عامل الطول الموجي وبعد ربط الدائرة الكهربائية المبينة في الشكل (٣-٢) يتم وضع المصدر الضوئي (على مسافة  $30\text{cm}$ ) من الخلية الشمسية عمودياً عليها ومربوط مباشرةً بمجزيء الجهد) عند شدة معينة للضوء الساقط ( $100\text{W}/\text{m}^2$ ) عن طريق التحكم بمجزيء الجهد المذكور في الفقرة (٣-٣) مع المحافظة على درجة حرارة معينة للخلية الشمسية ( $296.5\text{K}$ ) ووضع مرشح معين (اللون الأزرق ( $452\text{nm}$ )) بين المصدر الضوئي والخلية الشمسية وقياس ( $I_{sc}, V_{oc}, FF$ ) ومن ثم حساب كفاءة الخلية الشمسية ( $\eta(\%)$ ) عند ذلك الطول الموجي وتكرر العملية لباقي المرشحات (الأطول الموجية) .

وفي عامل شدة الضوء الساقط التي تكون متغيرة ( $100 - 600$ ) $\text{W}/\text{m}^2$  عند طول موجي معين (اللون الأخضر ( $509\text{nm}$ )) ودرجة حرارة معينة ( $296.5\text{K}$ ) يتم تغيير قيم شدة الضوء الساقط وقياس

$(I_{SC}, V_{OC}, FF)$  ومن ثم حساب كفاءة الخلية الشمسية  $\eta(\%)$  عند كل قيمة من قيم شدة الضوء الساقط

أما في عامل درجة الحرارة فان شدة الضوء الساقط تكون عند قيمة معينة  $(100W / m^2)$  وكذلك الطول الموجي عند قيمة معينة ( اللون الأصفر  $(587nm)$  ) ودرجة الحرارة تكون متغيرة  $(296.5 - 358)K$  ، وقد تم رفع درجة حرارة الخلية باستعمال مسخن يفصل مسافة  $(5cm)$  عن الخلية الشمسية ، وتم قياس  $(I_{SC}, V_{OC}, FF)$  لأجل حساب كفاءة الخلية الشمسية  $\eta(\%)$  عند كل قيمة من قيم درجات الحرارة .

### (٦-٣) حساب كفاءة الخلية الشمسية نظرياً :

تم إعداد برنامج الحاسبة الالكترونية بلغة فيجول بيسك باستخدام المعادلات  $(1-3), (1-4), (1-6), (1-7), (1-8), (2-18), (2-19), (2-31)$  بعد إدراج قيم الثوابت  $(K, A, q, D, L_e, L_n, W)$  والمتغيرات  $(T, E_{ph}, E_g, \alpha, I)$  لحساب معالم الخلية الشمسية السليكونية  $(I_o, G, I_L, V_{OC}, I_{SC}, v_{oc}, FF, \eta)$  . ويبين ملحق رقم (١) وصف برنامج الحاسبة الإلكترونية وتطبيقات العوامل المؤثرة على الخلية الشمسية (الطول الموجي للضوء الساقط على الخلية الشمسية السليكونية في المدى  $(452 - 656)nm$  ، شدة الضوء الساقط على الخلية الشمسية السليكونية في المدى  $(100 - 600)W / m^2$  ، درجة حرارة الخلية الشمسية السليكونية في المدى  $(296.5 - 358)K$  ، كما يبين الجدول رقم (٢) في الملحق رقم (١) الرموز المستخدمة في برنامج الحاسبة الالكترونية ، أما الملحق رقم (٢) فيبين برنامج الحاسبة الإلكترونية بلغة فيجول بيسك .

## الفصل الرابع

### Introduction

### (١-٤) المقدمة

يتناول هذا الفصل النتائج العملية والنظرية لحساب كفاءة الخلية الشمسية السليكونية بتأثير عوامل الطول الموجي للضوء الساقط ، شدة الأشعة الساقطة ، ودرجة الحرارة على معالم الخرج  $(I_{SC}, V_{OC}, FF)$  ومن ثم على كفاءة الخلية الشمسية السليكونية الأحادية البلورة . وكذلك تم استخدام

المعادلات والثوابت المنشورة في البحوث السابقة لحساب معالم الخرج ( $I_{SC}, V_{OC}, FF$ ) ومن ثم كفاءة الخلية الشمسية السليكونية الأحادية البلورة ( $\eta(\%)$ ). وأجريت مقارنة بين تلك النتائج مع النتائج العملية والنظرية المستخرجة .

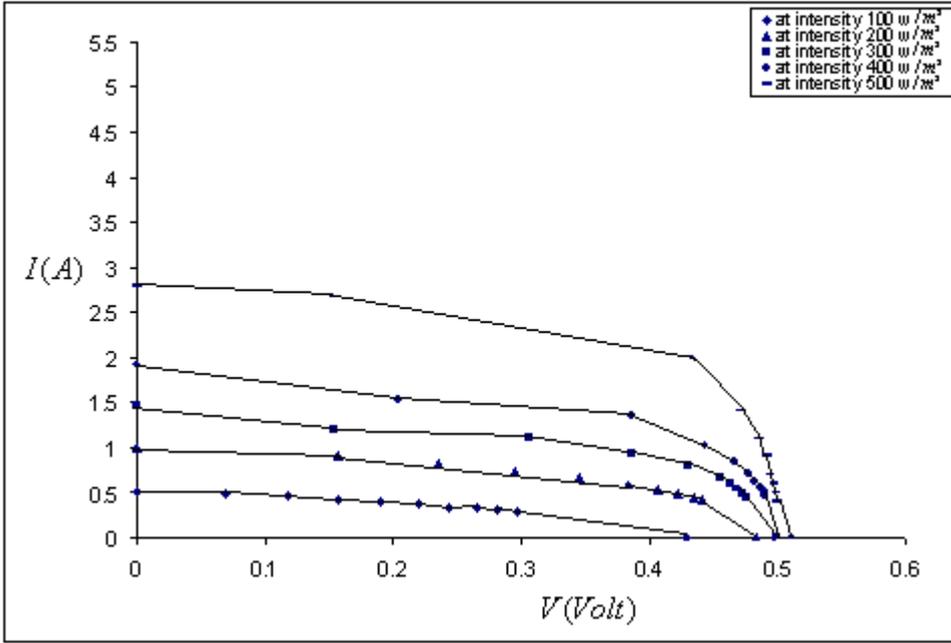
## (٢-٤) تغير خصائص التيار - الفولتية

*I-V change*

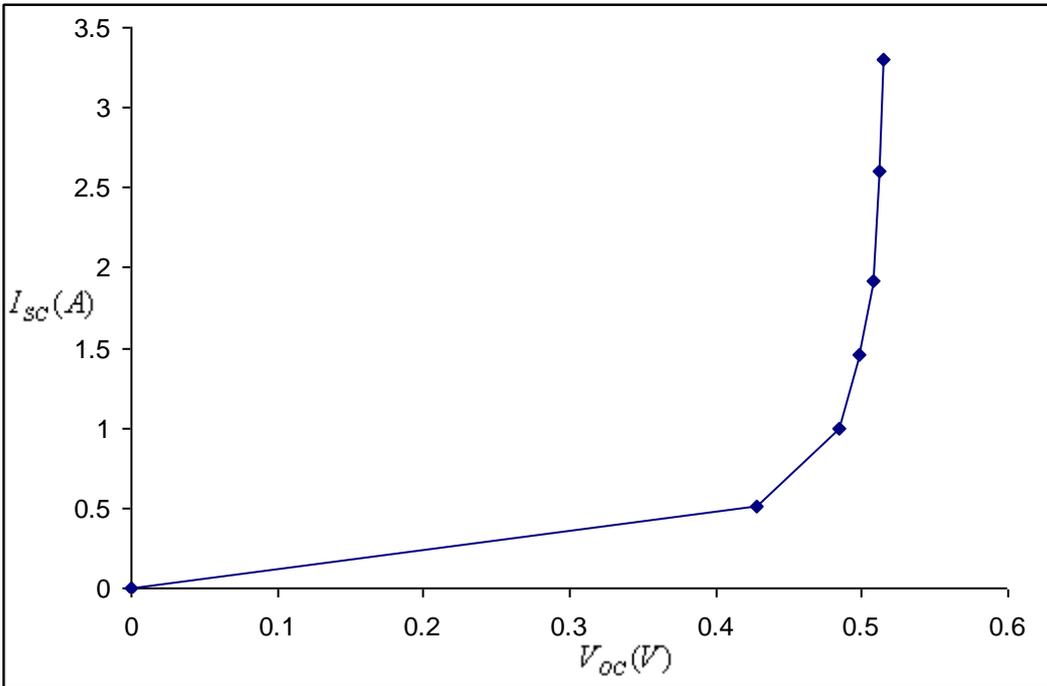
### *Characteristics*

يمكن الملاحظة بأن خصائص التيار - الفولتية تتغير تبعاً لتغير شدة الضوء الساقط أي أن المساحة تحت المنحني تزداد مع زيادة شدة الضوء الساقط كما في الشكل (١-٤). وان تيار الدائرة القصيرة يتغير طردياً مع شدة الأشعة الشمسية الساقطة ، وذلك لزيادة عدد الفوتونات المولدة لأزواج الكترون- فجوة بعد سقوطها على سطح الخلية مما يزيد من قيم التيار المار في الدائرة ، في حين إن فولتية الدائرة المفتوحة تتغير أسياً مع شدة الأشعة الساقطة . وعند دراسة تيار الدائرة القصيرة بوصفه دالةً لفولتية الدائرة المفتوحة فإن العلاقة بينهما تكون أسية حسب المعادلة (١-٣) كما في الشكل (٢-٤) حيث يزداد تيار الدائرة القصيرة مع زيادة فولتية الدائرة المفتوحة فعند قيمة  $V_{OC} = 0.484\text{Volt}$  يبدأ التيار بالازدياد بدرجة أكبر بسبب تزايد شدة الأشعة الساقطة على الخلية وبالتالي تزايد أعداد أزواج الكترون- فجوة المتولدة .

إن ميل المنحنيات ( $dV / dI$ ) يزداد كلما زادت شدة الضوء الساقط ، وان نسبة التغير في الميل تخضع إلى زيادة تيار الدائرة القصيرة طردياً مع زيادة شدة الضوء الساقط ، في حين إن فولتية الدائرة المفتوحة تزداد ببطء وخاصةً عند القيم العالية للشدة .



الشكل (١-٤) يبين خصائص التيار – الفولتية للخلية الشمسية عملياً.



الشكل (٢-٤) يبين تيار الدائرة القصيرة بوصفه دالةً لفولتية الدائرة المفتوحة عملياً.

#### (٣-٤) تأثير عامل الطول الموجي على كفاءة الخلية الشمسية عملياً ونظرياً :

تتغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير الطول الموجي للضوء الساقط على الخلية الشمسية عند شدة إضاءة ( $100W/m^2$ ) ودرجة حرارة ( $296.5K$ ) كما في الجدول (١-٤) .

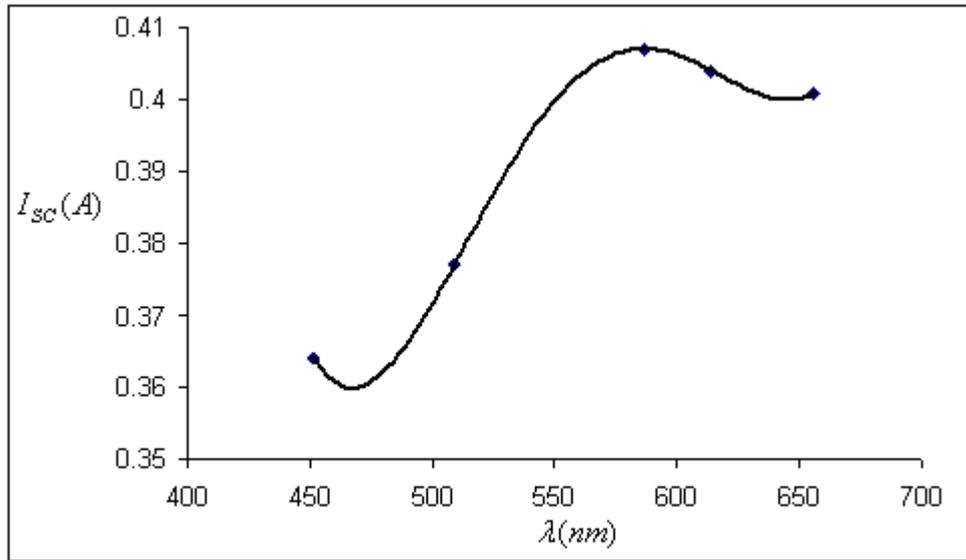
جدول (١-٤) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير الطول الموجي عملياً.

$\lambda(nm)$	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$FF$	$\eta(\%)$
٤٥٢	٠.٣٦٤	٠.٣٧٢	٠.٧٦٠٣	١٣.١١٤
٥٠٩	٠.٣٧٧	٠.٣٧٧	٠.٧٦٢٥	١٣.٨٠٥
٥٨٧	٠.٤٠٧	٠.٣٨٩	٠.٧٦٧٥	١٥.٤٧٩
٦١٤	٠.٤٠٤	٠.٣٨٧	٠.٧٦٦٧	١٥.٢٧٠
٦٥٦	٠.٤٠١	٠.٣٨٤	٠.٧٦٥٤	١٥.٠١٣

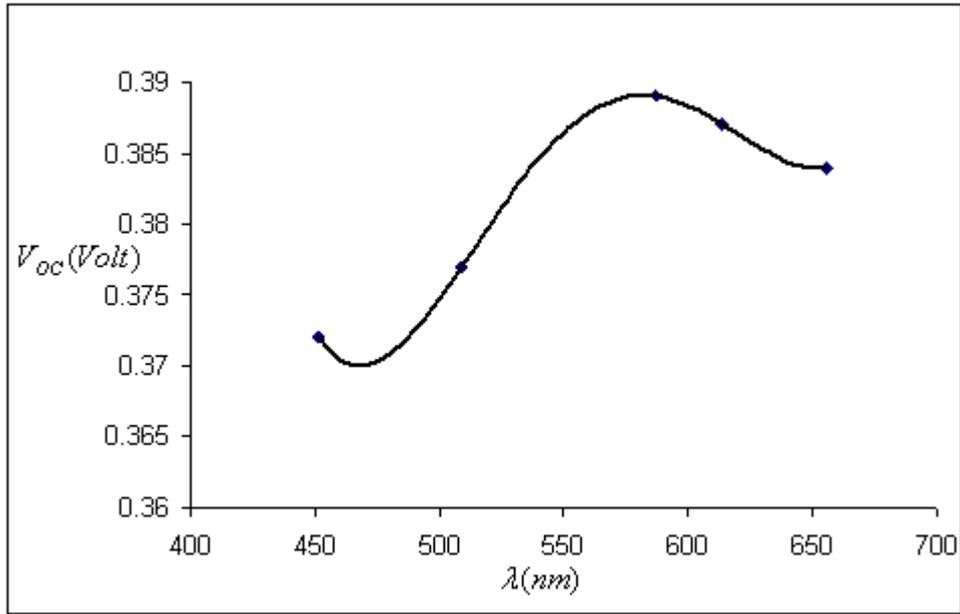
يتغير تيار الدائرة القصيرة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع الطول الموجي في المدى  $(452 - 656)nm$  ، حيث يلاحظ وجود استجابة طيفية قليلة للخلية عند الطول الموجي ( $452nm$ ) (اللون الأزرق) ويمكن تفسير ذلك بسبب اعتماد الطول الموجي على معامل الامتصاص فمن المتوقع إن الفوتونات وبطاقات عالية في الجزء فوق البنفسجي والأزرق من الطيف الشمسي (الأطوال الموجية القصيرة ) تكون ممتصة قريباً جداً من السطح ولهذا فإن إعادة الاتحاد عند السطح يكون أكثر أهمية للأطوال الموجية القصيرة [١٨,٤٨] والحاملات الضوئية المتولدة قرب سطح الخلية تكون مقتنصة بواسطة حالات السطح (*Surface states*) مما يسبب توهين التيار الضوئي ، وتتزايد الاستجابة الطيفية عند الطول الموجي ( $509nm$ ) (اللون الأخضر) مما يؤدي إلى تزايد التيار الضوئي . أما عند الطول الموجي ( $587nm$ ) (اللون الأصفر) فإن معظم الحاملات المتولدة والقريبة لمفروق ( $p - n$ ) تصل المفروق ولهذا فإن توهين التيار الضوئي هو غائب وأعلى استجابة يتم الحصول عليها عند هذا الطوال الموجي وأعظم قيمة للتيار الضوئي والنتيجة هي الحصول على أعظم قيمة للكفاءة . للأطوال الموجية الأطول ،  $(614,656)nm$  ( اللون البرتقالي ، اللون الأحمر) فإن الفوتونات وبطاقات أقل في الجزء

الأحمر وتحت الحمراء من الطيف الشمسي تكون ممتصة وعمق في البلورة وبعيدة من المفرق ولهذا فإن إعادة الاتحاد في المناطق شبه المتعادلة (*quasi-neutral region*) المنتظمة التطعيم هو أكثر أهمية للأطوال الموجية الطويلة [١٨, ٤٨] والحاملات المتولدة فوق منطقة القاعدة للخلية وبعيدة من مفرق  $p-n$  ولهذا يحدث توهين للتيار الضوئي ( تيار الدائرة القصيرة من الخلية الشمسية هو التيار الضوئي ) كما في الشكل (٣-٤) .

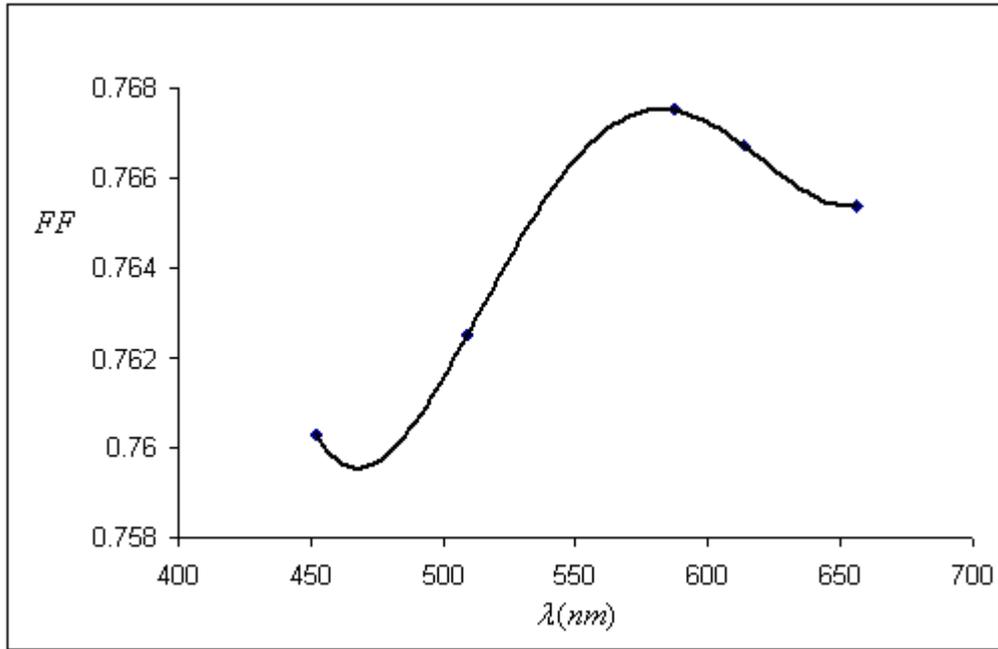
من المعادلة (١-٤) نلاحظ اعتماد فولتية الدائرة المفتوحة على التيار المتولد ضوئياً  $I_L$  [٣٣, ٤٩] وهذا يفسر تزايد وتناقص فولتية الدائرة المفتوحة مع تزايد الطول الموجي كما في الشكل (٤-٤) وبالتالي تزايد وتناقص الفولتية المعيارية ( $v_{oc}$ ) مع تزايد وتناقص فولتية الدائرة المفتوحة مما يؤدي إلى تزايد وتناقص عامل الملء ( $FF$ ) [٤٩] كما في الشكل (٥-٤) .



الشكل (٣-٤) يبين تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير الطول الموجي عملياً .



الشكل (٤-٤) يبين تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير الطول الموجي عملياً.



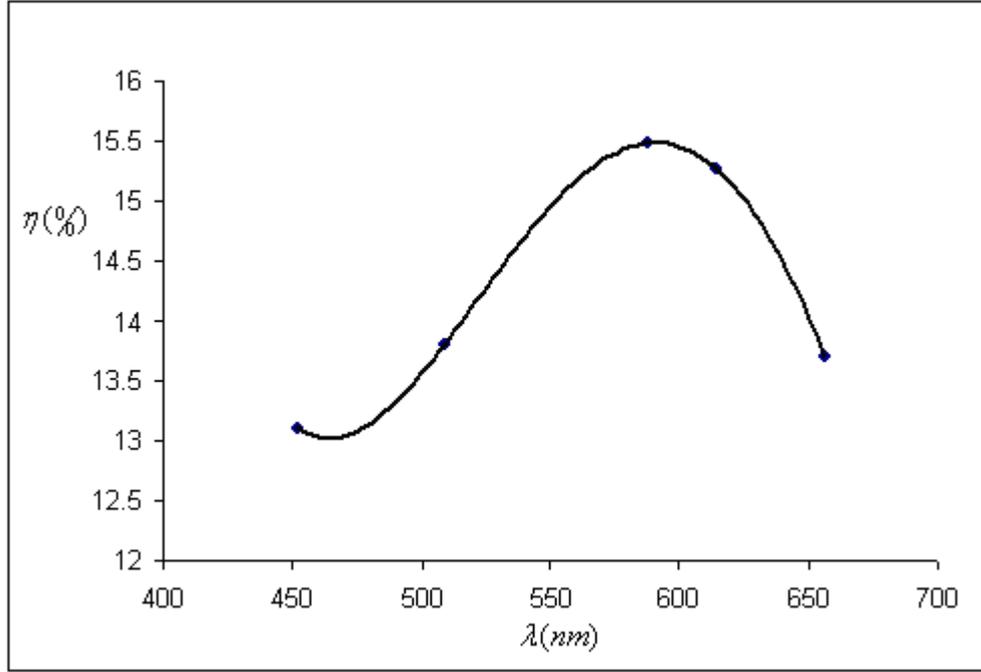
الشكل (٥-٤) يبين تغير عامل الملء مع تغير الطول الموجي عملياً.

الخسائر الطيفية الجوهرية في خلية شمسية مصنوعة من مادة شبه موصلة مثل السليكون هي بحدود (٥٠٪). وهذا ناتج من عدم التوافق بين الطيف الشمسي الساقط وصفات الامتصاص الطيفي

للمادة [٥٠] وان أجزاء كبيرة من الطيف الشمسي غير ممتصة بسبب وجود فجوة الطاقة ( $E_g$ ) للمادة والفوتونات مع طاقة  $E_g \langle E_{ph} \rangle$  هي ممتصة أما الفوتونات وبطاقة  $E_g \langle E_{ph} \rangle$  فتكون غير ممتصة وكل هذه المفاهيم تتركز على الاستخدام الأفضل للطيف الشمسي [٥١].

إن الأداء الأمثل للخلايا الشمسية المفردة المفروق (*Single-junction solar cells*) يتم الحصول عليه عند الضوء الأحادي اللون ذي الطول الموجي  $\lambda_{opt} \cong 1240 / E_g$  . للخلايا الشمسية السليكونية المتعددة البلورات ،  $\lambda_{opt} = 1100nm$  (With  $E_g = 1.1eV$ ) ، وللخلايا (*a-Si:H*) فان الطول الموجي الأمثل هو  $\lambda_{opt} = 700nm$  (With  $E_g = 1.77eV$ ) والاستجابة الطيفية الأمثل تحدث عند حوالي الطول الموجي (550nm) [٥٢,٥٣]. كفاءة التحويل لهذه الأنواع من الخلايا مقاسة عند الضوء الأحادي اللون ذي الطول الموجي (550nm) هي بحدود (20%) [٥٤].

عند الأطوال الموجية (452,509)nm تكون قيمة معامل الامتصاص  $\alpha$  كبيرة حيث يمتص الضوء بسرعة عند دخوله شبه الموصل ، ولا تكون الخلايا الشمسية الاعتيادية فعالة جداً في التقاط الحاملات المتولدة قرب السطح ، وإذا عرفنا كفاءة التجميع الكمي ( $\eta_Q$ ) بأنها عدد الالكترونات الجارية في الدائرة القصيرة الخارجية لكل فوتون ساقط من الضوء أحادي اللون وان كفاءة التجميع الكمي تكون مساوية إلى % (13.114,13.805) على التوالي . أما عند الطوال الموجي (587nm) فتكون قيمة معامل الامتصاص صغيرة ، وان نسبة كبيرة من الحاملات تتكون في المناطق التي تكون عندها احتمالية التجميع عالية فتكون كفاءة التجميع الكمي عالية كما إن تحويل الطيف الشمسي الساقط إلى ضوء أحادي اللون يزيد الكفاءة بشكل كبير وللحصول على هذه النتيجة يجب أن تكون طاقة الفوتونات الساقطة ( $E_{ph}$ ) مساوية أو أكبر قليلاً من فجوة الطاقة ( $E_g$ ) [٥٤] وهذا يفسر الحصول على أعظم قيمة لكفاءة التجميع الكمي وتكون مساوية إلى % (15.479) . عند الأطوال الموجية (614,656)nm يكون الامتصاص ضعيفاً وتكون نسبة الحاملات المتولدة في المنطقة الفعالة من الخلية واطئة ولذا تنخفض كفاءة التجميع الكمي وتكون مساوية إلى % (15.270,15.013) على التوالي كما في الشكل (٤-٦) .



الشكل (٦-٤) يبين تغير الكفاءة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع تغير الطول الموجي عملياً.

وعند إجراء مقارنة بين النتائج النظرية التي حصلنا عليها من هذه الدراسة ونتائج دراسات سابقة نجد نتائج هذه الدراسة متطابقة مع الدراسة السابقة [٢٤].

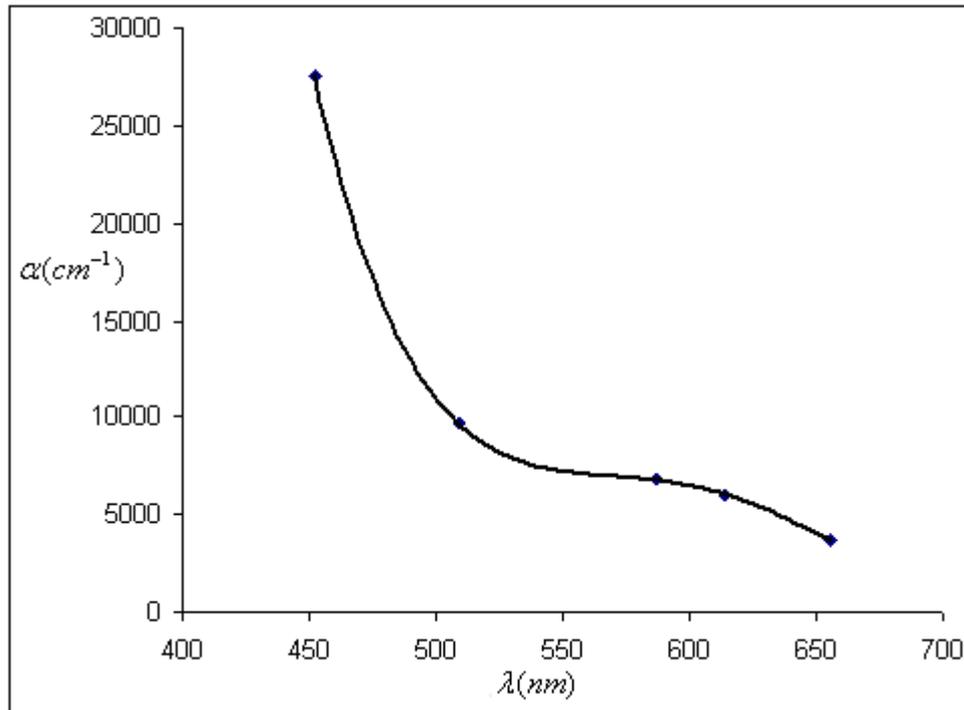
كما تتغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير الطول الموجي للضوء الساقط على الخلية الشمسية عند شدة إضاءة ( $100W / m^2$ ) ودرجة حرارة ( $296.5K$ ) كما في الجدول (٢-٤).

الجدول (٢-٤) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير الطول الموجي نظرياً.

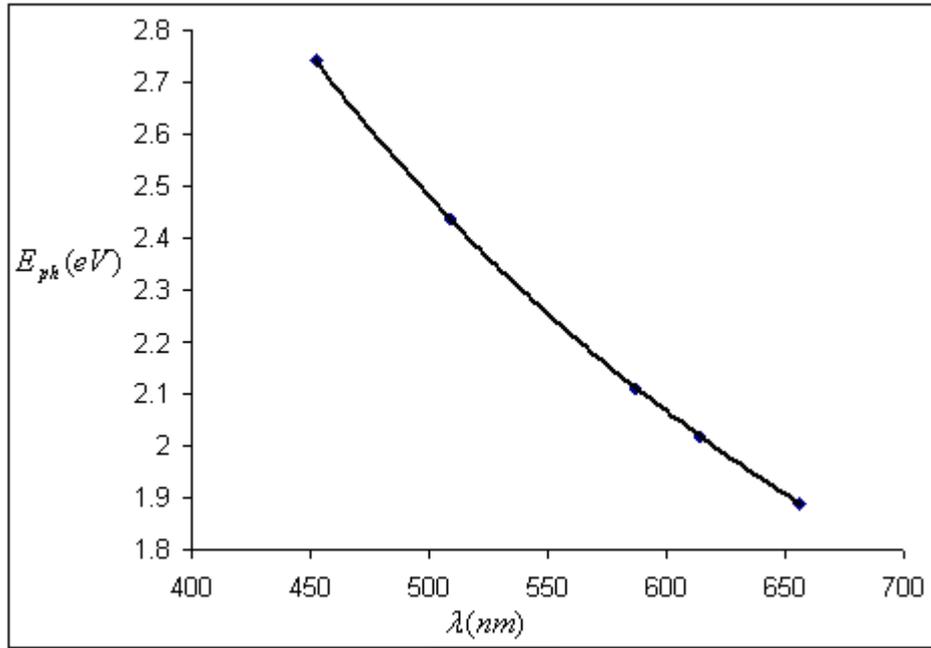
$\lambda(nm)$	$E_{ph}(eV)$	$G \times 10^{20}(cm^{-3}s^{-1})$	$I_L(A)$	$V_{oc}(V)$	$I_{sc}(A)$	$v_{oc}(V)$	$FF$	$\eta(\%)$
٤٥٢	٢.٧٤٣٣٦٢	٣.١٣٥٨٦٣١١٢٧١٣٦	٨٥.٣٥٤	٠.٨٤٣٥	٨٥.٣٥٤	٣٢.٩٨٧٥	٠.٨٦٧	٧٩.٥٣

			٤		٤		٠	٣
٥٠٩	٢.٤٣٦١٤٩	١.٢٤١٩٧٠.٢٦٢٣٥٢٨	٣٣.٨٠٤ ٩	٠.٨١٩٩	٣٣.٨٠٤ ٩	٣٢.٠٦١٣	٠.٨٦٤ ١	٣٠.٥١ ٣
٥٨٧	٢.١١٢٤٣٦	١.٠٠٩٣٥٠٠٥٠٢٠٨٨	٢٧.٤٧٣ ٣	٠.٨١٤٦	٢٧.٤٧٣ ٣	٣١.٨٥٣٩	٠.٨٦٣ ٥	٢٤.٦١ ٨
٦١٤	٢.٠١٩٥٤٣	٠.٩٤١١١٥٩٢٧٥٠.٨٥	٢٥.٦١٦ ٠	٠.٨١٢٨	٢٥.٦١٦ ٠	٣١.٧٨٣٩	٠.٨٦٣ ٣	٢٢.٨٩ ٨
٦٥٦	١.٨٩٠٢٤٣	٠.٦٠٢٩٣١٤٥١٧٩٢٨	١٦.٤١١ ٠	٠.٨٠١٤	١٦.٤١١ ٠	٣١.٣٣٨٦	٠.٨٦١ ٨	١٤.٤٣ ٩

معامل الامتصاص دالة للطول الموجي للضوء الساقط ، وان منطقة الامتصاص الضعيفة عند أطوال موجية أكبر من (500nm) تشير إلى عمليات الامتصاص للفجوة غير المباشرة . أما عند أطوال موجية أقل من (500nm) فان معامل الامتصاص يزداد فجأة ويمكن أن ينسب هذا إلى عمليات الامتصاص للفجوة المباشرة [١٠] كما في الشكل (٤-٧) وتتناسب طاقة الفوتون عكسياً مع الطول الموجي وان العلاقة بينهما هي  $E_{ph} (eV) = 1240 / \lambda (nm)$  كما في الشكل (٤-٨).



الشكل (٤-٧) يبين معامل الامتصاص للسليكون بوصفه دالة للطول الموجي نظرياً.



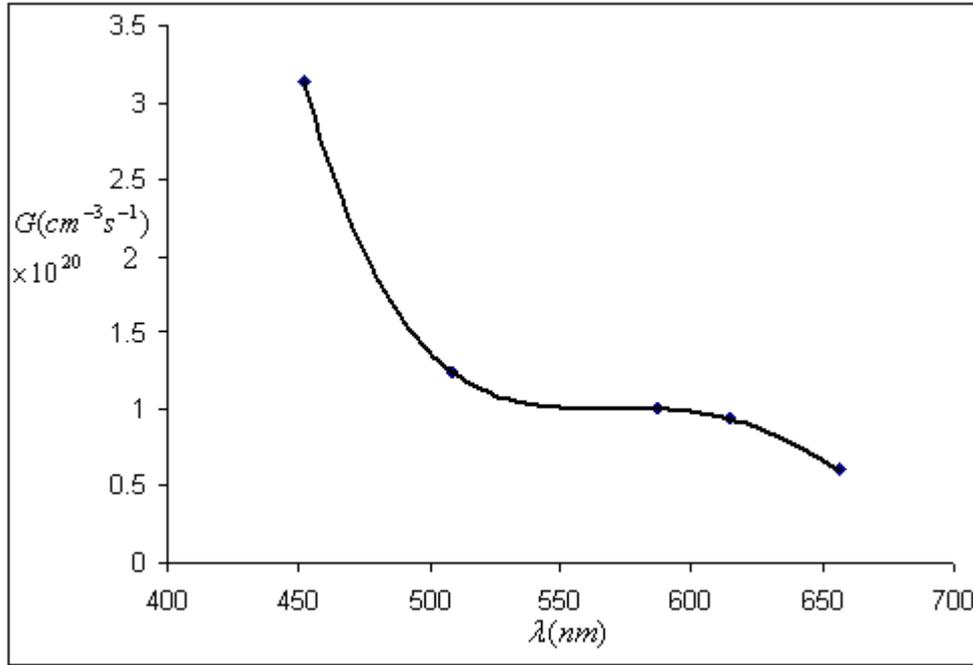
الشكل (٨-٤) يبين تغير طاقة الفوتون مع تغير الطول الموجي نظرياً.

إن الأطوال الموجية القصيرة هي الأكبر في معدل التوليد لأزواج الكترون- فجوة وبزيادة الطول الموجي يتناقص معدل التوليد ويمكن تفسير ذلك إلى إن الطول الموجي يتناسب عكسياً مع معامل الامتصاص كما يتناسب معامل الامتصاص طردياً مع معدل التوليد لأزواج الكترون- فجوة [٣٨] كما في الشكل (٩-٤) .

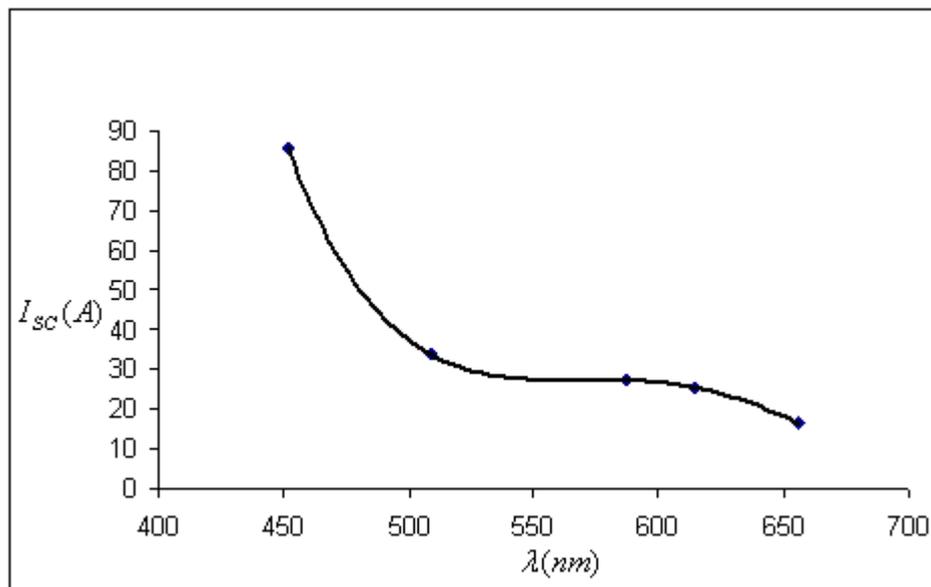
إن معدل التوليد لأزواج الكترون- فجوة الأكبر يعني التيار المتولد ضوئياً (تيار الدائرة القصيرة) الأكبر [٤٩] وبتناقص معدل التوليد يتناقص التيار المتولد ضوئياً (تيار الدائرة القصيرة) كما في الشكل (١٠-٤) .

من المعادلة (١-٤) نلاحظ اعتماد فولتية الدائرة المفتوحة على التيار المتولد ضوئياً  $I_L$  [٣٣, ٤٩] وهذا يفسر تناقص فولتية الدائرة المفتوحة مع تناقص التيار المتولد ضوئياً كما في الشكل (١١-٤) وبالتالي تناقص الفولتية المعيارية ( $V_{oc}$ ) مع تناقص فولتية الدائرة المفتوحة مما يؤدي إلى تناقص عامل الملء ( $FF$ ) كما في الشكل (١٢-٤) والنتيجة هي تناقص كفاءة الخلية الشمسية ( $\eta(\%)$ ) [٤٩] ، وان الاستجابة الطيفية العالية تكون عند الأطوال الموجية القصيرة [٥٤] وهذا يفسر الحصول

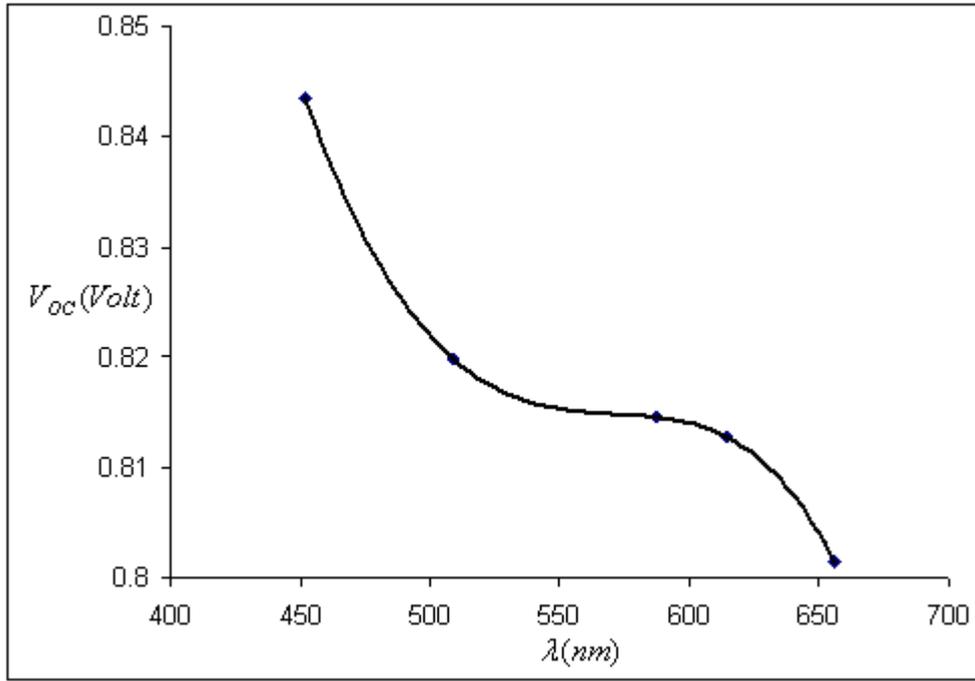
على أعظم قيمة لكفاءة التجميع الكمي عند الطول الموجي (452nm) (اللون الأزرق) كما في الشكل (١٣-٤) .



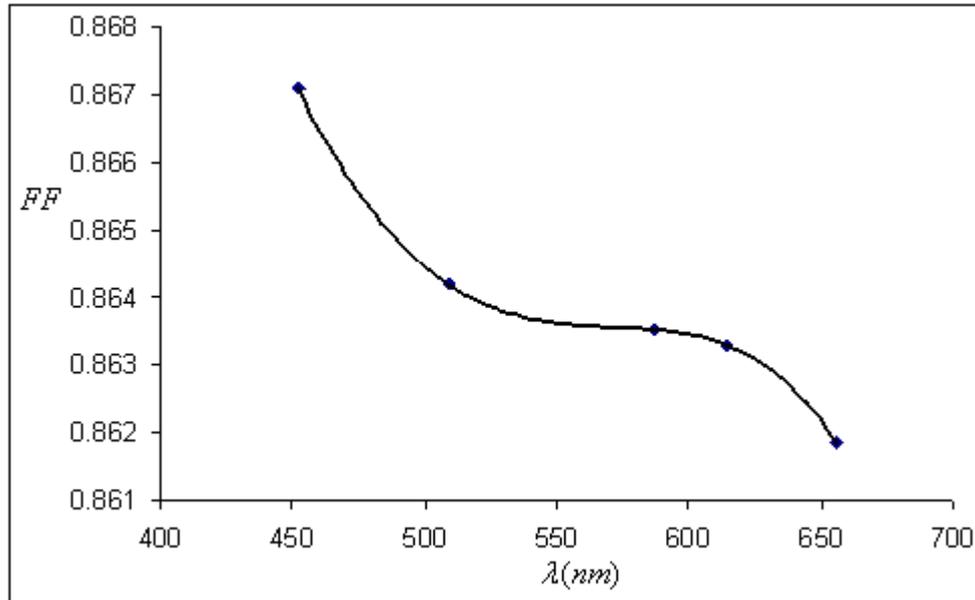
الشكل (٩-٤) يبين تغير معدل توليد أزواج الكترولون - فجوة مع تغير الطول الموجي نظرياً.



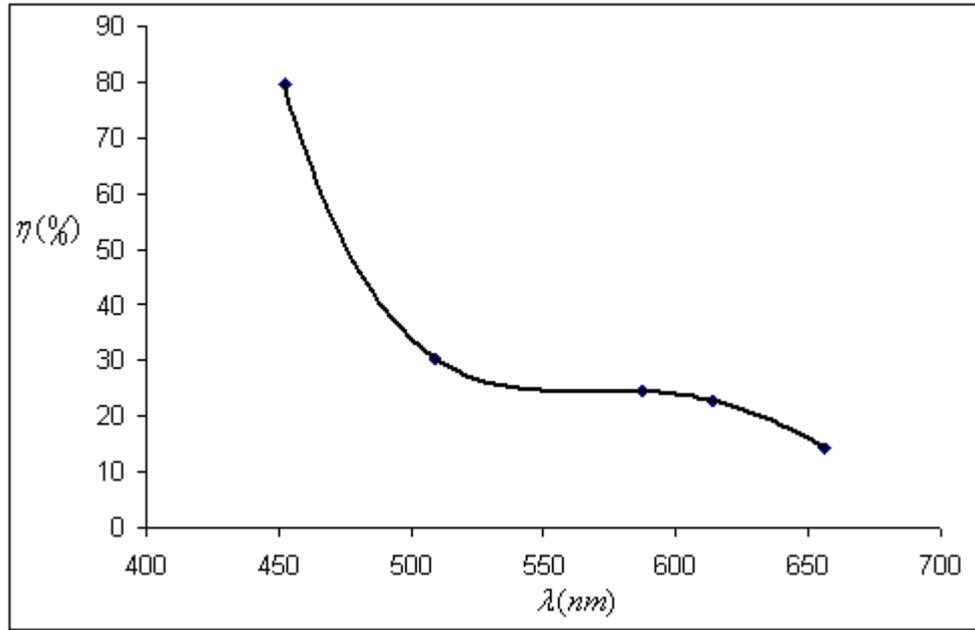
الشكل (١٠-٤) يبين تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير الطول الموجي نظرياً.



الشكل (١١-٤) يبين تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير الطول الموجي نظرياً.



الشكل (١٢-٤) يبين تغير عامل الملء مع تغير الطول الموجي نظرياً.



الشكل (٤-١٣) يبين تغير الكفاءة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع تغير الطول الموجي نظرياً.

وعند إجراء مقارنة بين النتائج النظرية التي حصلنا عليها من هذه الدراسة ونتائج دراسات سابقة نجد نتائج هذه الدراسة متطابقة مع الدراسة السابقة [٢٣].

من النتائج التي حصلنا عليها ، يتضح إن القيمة العملية العظمى للكفاءة تساوي (15.479%) عند الطول الموجي (587nm) (اللون الأصفر) وشدة إضاءة ( $100W/m^2$ ) ودرجة حرارة (296.5K) ، كما في الشكل (٤-٦) . أما القيمة النظرية العظمى للكفاءة فتساوي (79.533%) عند الطول الموجي (452nm) (اللون الأزرق) وشدة إضاءة ( $100W/m^2$ ) ودرجة حرارة (296.5K) عن طريق برنامج الحاسبة الالكترونية بلغة فيجول بيسك (ملحق رقم (٢)) كما في الشكل (٤-١٣) ، كما إن القيمة النظرية للكفاءة هي أعلى من القيمة العملية بسبب إهمال بعض العوامل المؤثرة على كفاءة الخلية الشمسية ( مثل مقاومتي التوالي والتوازي ، مقاومة الحمل ، وغيرها ) عند التطبيق النظري للمعادلات المستخدمة لحساب معالم الخرج للخلية الشمسية السليكونية الأحادية البلورة .

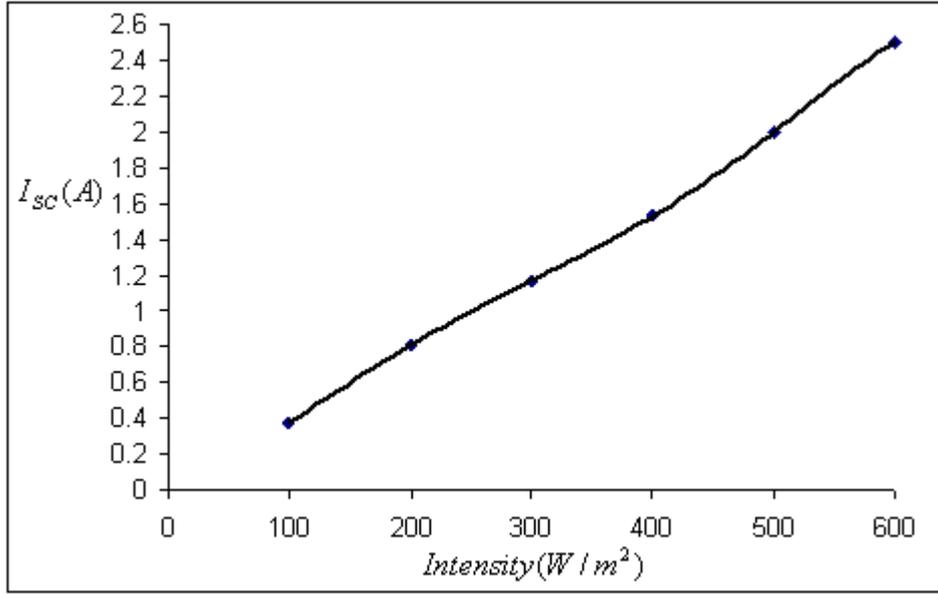
#### (٤-٤) تأثير عامل شدة الضوء الساقط على كفاءة الخلية الشمسية عملياً ونظرياً :

تتغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير شدة الأشعة الساقطة عليها عند طول موجي (509nm) ودرجة حرارة (296.5K) كما في الجدول (٣-٤) .

جدول (٣-٤) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير شدة الأشعة الساقطة عليها عملياً .

$Intensity(W / m^2)$	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$FF$	$\eta(\%)$
١٠٠	٠.٣٧٧	٠.٣٧٧	٠.٧٦٢٥	١٣.٨٠٥
٢٠٠	٠.٨٠٨	٠.٤٧٥	٠.٧٩٧٧	١٩.٥٠٠
٣٠٠	١.١٦٩	٠.٤٩١	٠.٨٠٢٣	١٩.٥٥٦
٤٠٠	١.٥٣١	٠.٥٠٥	٠.٨٠٦٢	١٩.٨٥٣
٥٠٠	٢	٠.٥١٢	٠.٨٠٨١	٢١.٠٨٤
٦٠٠	٢.٥	٠.٥١٧	٠.٨٠٩٥	٢٢.٢١٤

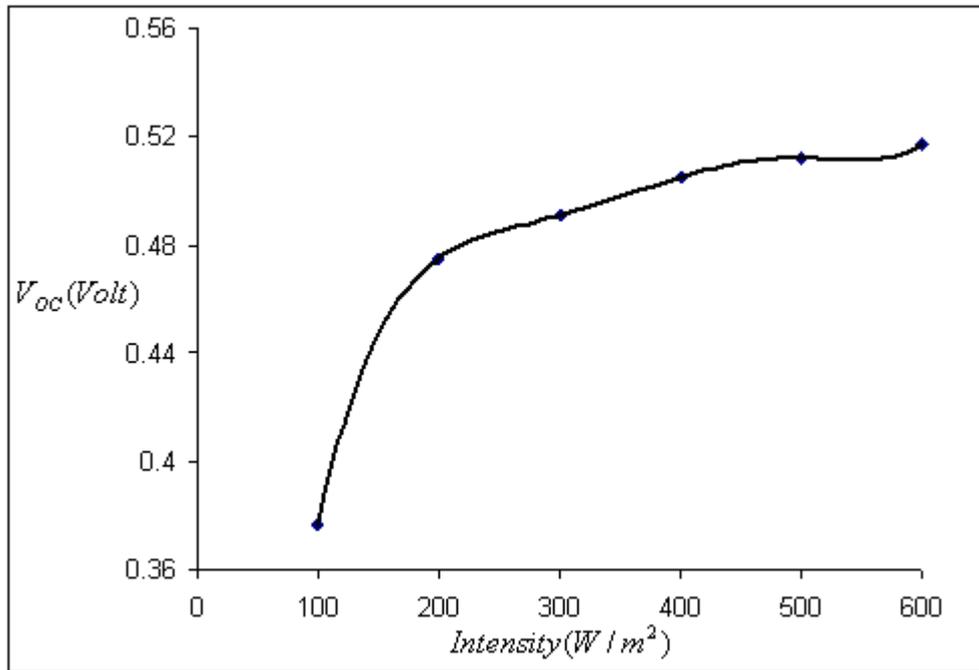
في الخلايا الشمسية السليكونية البلورية فان التيار المتولد بواسطة الإشعاع لتركيب طيفي معين يتناسب طردياً مع شدة الإشعاع أي يزداد تيار الدائرة القصيرة بزيادة شدة الضوء الساقط فعند زيادة شدة الضوء الساقط على الخلية الشمسية يزداد عدد الفوتونات الساقطة وبالتالي زيادة أعداد أزواج الكترون- فجوة المتولدة إذ إن كل فوتون يولد زوج الكترون- فجوة واحد [٢٨] مما يؤدي إلى تزايد تيار الدائرة القصيرة كما في الشكل (٤-٤) .



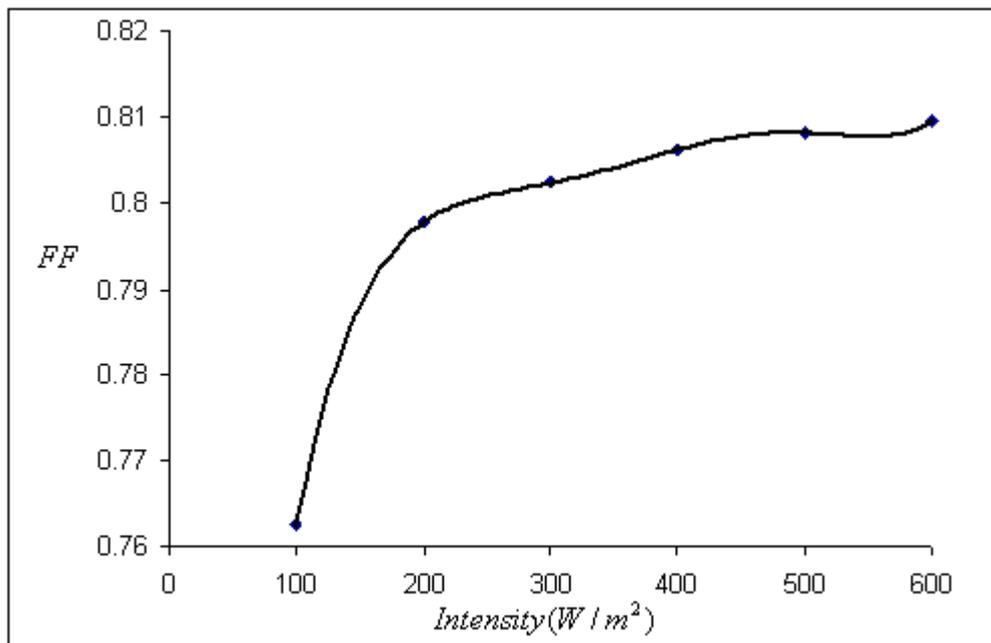
الشكل (١٤-٤) يبين تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير شدة الضوء الساقط عملياً.

وبما إن المقاومة المتوازية تساوي مقلوب الميل ، إذن نسبة التغير فيها تكون أعلى عند القيم الواطئة لشدة الأشعة الساقطة . وهذا يفسر تغير فولتية الدائرة المفتوحة أسياًً مع شدة الأشعة الساقطة ، وذلك بسبب تأثرها بالمقاومة المتوازية إذ كلما كانت نسبة التغير في المقاومة المتوازية عالية كانت نسبة التغير في فولتية الدائرة المفتوحة عالية .

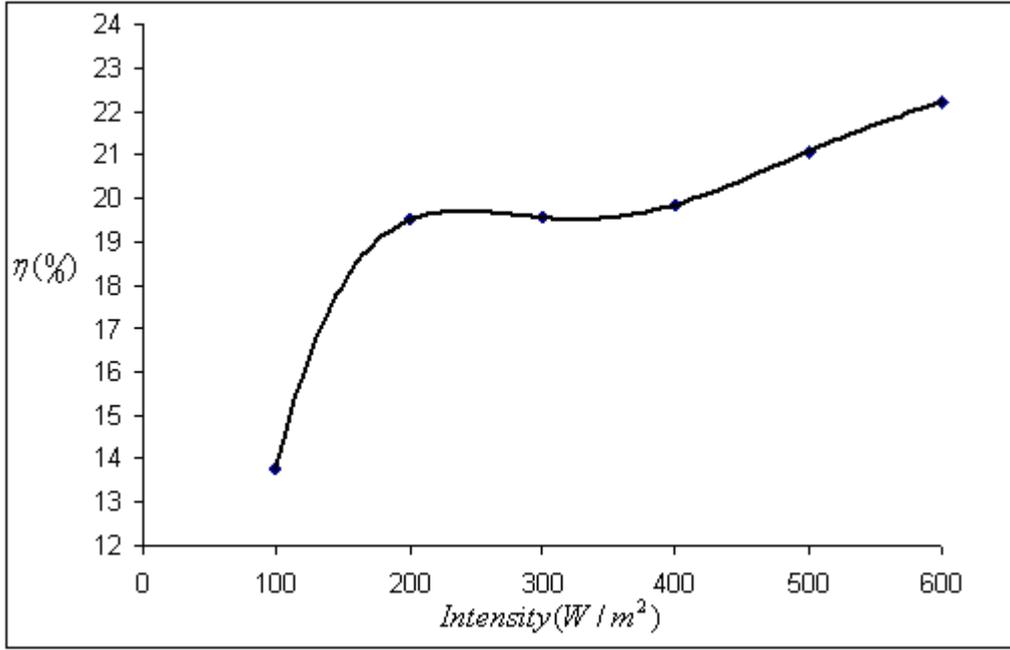
ومن المعادلة (١-٤) نلاحظ اعتماد فولتية الدائرة المفتوحة على التيار المتولد ضوئياًً  $I_L$  [٣٣,٤٩] وهذا يفسر تزايد فولتية الدائرة المفتوحة مع تزايد التيار المتولد ضوئياًً كما في الشكل (١٥-٤) وبالتالي تزايد الفولتية المعيارية ( $v_{oc}$ ) مع تزايد فولتية الدائرة المفتوحة مما يؤدي إلى تزايد عامل الملء ( $FF$ ) كما في الشكل (١٦-٤) والنتيجة هي تزايد كفاءة الخلية الشمسية ( $\eta(\%)$ ) [٤٩] كما في الشكل (١٧-٤) .



الشكل (٤-١٥) يبين تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير شدة الضوء الساقط عملياً.



الشكل (٤-١٦) يبين تغير عامل الملء مع تغير شدة الضوء الساقط عملياً.



الشكل (٤-١٧) يبين تغير الكفاءة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع تغير شدة الضوء الساقط عملياً.

وعند إجراء مقارنة بين النتائج العملية التي حصلنا عليها من هذه الدراسة ونتائج دراسات سابقة نجد نتائج هذه الدراسة متطابقة مع الدراسات السابقة [٢٠, ٢٣, ٢٦].

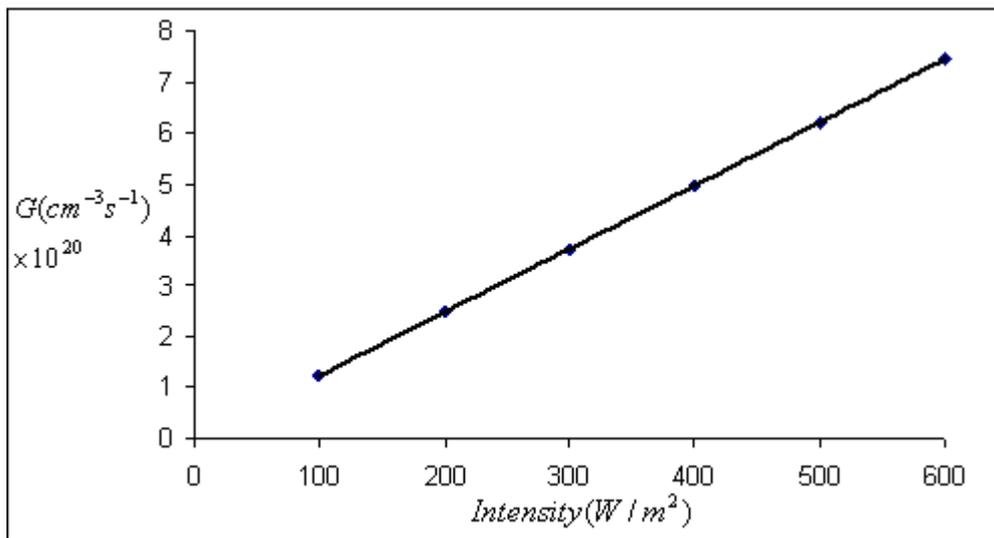
كما تتغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير شدة الأشعة الساقطة عليها عند طول موجي (509nm) ودرجة حرارة (296.5K) كما في الجدول (٤-٤).

الجدول (٤-٤) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير شدة الأشعة الساقطة عليها نظرياً.

Intensity (W / m <sup>2</sup> )	$G \times 10^{20} (cm^{-3} s^{-1})$	$I_L (A)$	$V_{oc} (V)$	$I_{sc} (A)$	$v_{oc} (V)$	FF	η(%)
١٠٠	١.٢٤١٩٧٠٢٦٢٣٥٢٨١	٣٣.٨٠٤٩	٠.٨١٩٩	٣٣.٨٠٤٩	٣٢.٠٦١٣	٠.٨٦٤ ١	٣٠.٥١ ٣
٢٠٠	٢.٤٨٣٩٤٠٥٢٤٧٠٥٦١	٦٧.٦٠٩٩	٠.٨٣٧٦	٦٧.٦٠٩٩	٣٢.٧٥٤٤	٠.٨٦٦ ٣	٣١.٢٥ ١
٣٠٠	٣.٧٢٥٩١٠٧٨٧٠٥٨٤٢	١٠١.٤١٤ ٨	٠.٨٤٨٠	١٠١.٤١٤ ٨	٣٣.١٥٩٩	٠.٨٦٧ ٥	٣١.٦٨ ٣
٤٠٠	٤.٩٦٧٨٨١٠٤٩٤١١٢٢	١٣٥.٢١٩ ٨	٠.٨٥٥٣	١٣٥.٢١٩ ٨	٣٣.٤٤٧٦	٠.٨٦٨ ٤	٣١.٩٨ ٩
٥٠٠	٦.٢٠٩٨٥١٣١١٧٦٤٠٣	١٦٩.٠٢٤	٠.٨٦١٠	١٦٩.٠٢٤	٣٣.٦٧٠٧	٠.٨٦٩	٣٢.٢٢

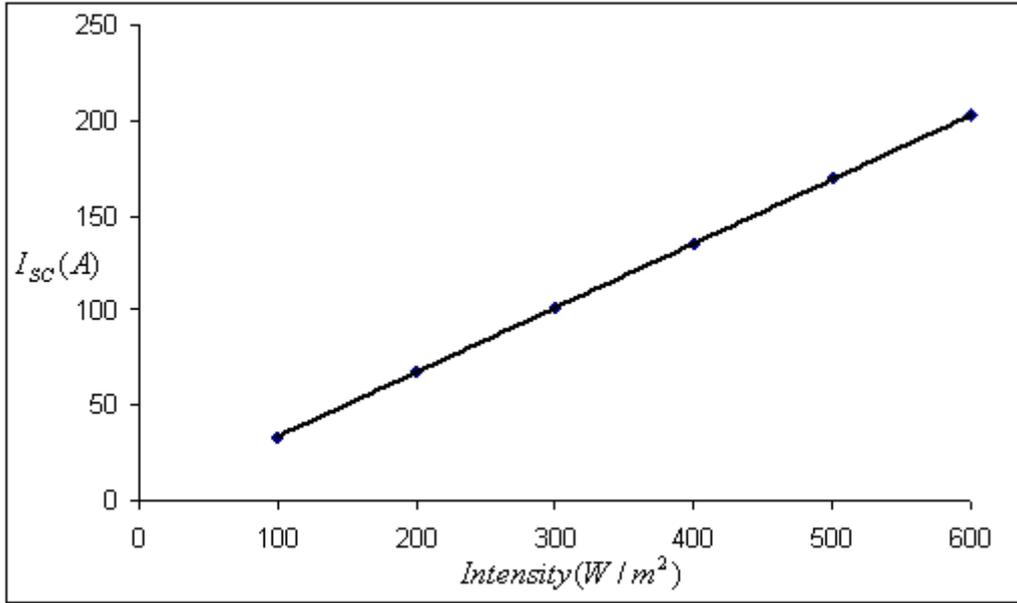
		٧		٧		١	٧
٦٠٠	٧.٤٥١٨٢١٥٧٤١١٦٨٣	٢٠٢.٨٢٩	٠.٨٦٥٧	٢٠٢.٨٢٩	٣٣.٨٥٣٠	٠.٨٦٩	٣٢.٤٢
		٧		٧		٦	١

إن شدة الضوء الساقط تؤثر على تركيز الحاملات في الخلايا الشمسية وان عددها يتناسب طردياً مع شدة الإضاءة . وهكذا فان الضوء الممتص الأكثر على سطح الخلية يؤدي إلى حاملات متولدة أكثر والافتراض المعقول يتضمن نسبة التوليد الأعلى بسبب شدة الإضاءة الأعلى [٥٥] كما في الشكل (١٨-٤) .

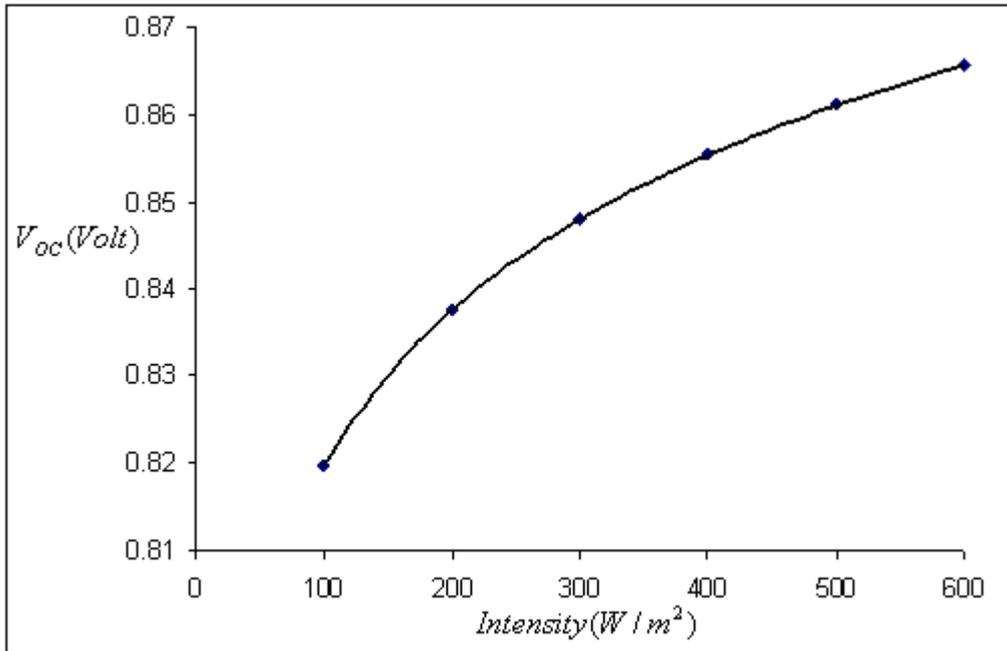


الشكل (١٨-٤) يبين تغير معدل التوليد لأزواج الكترون - فجوة مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً .

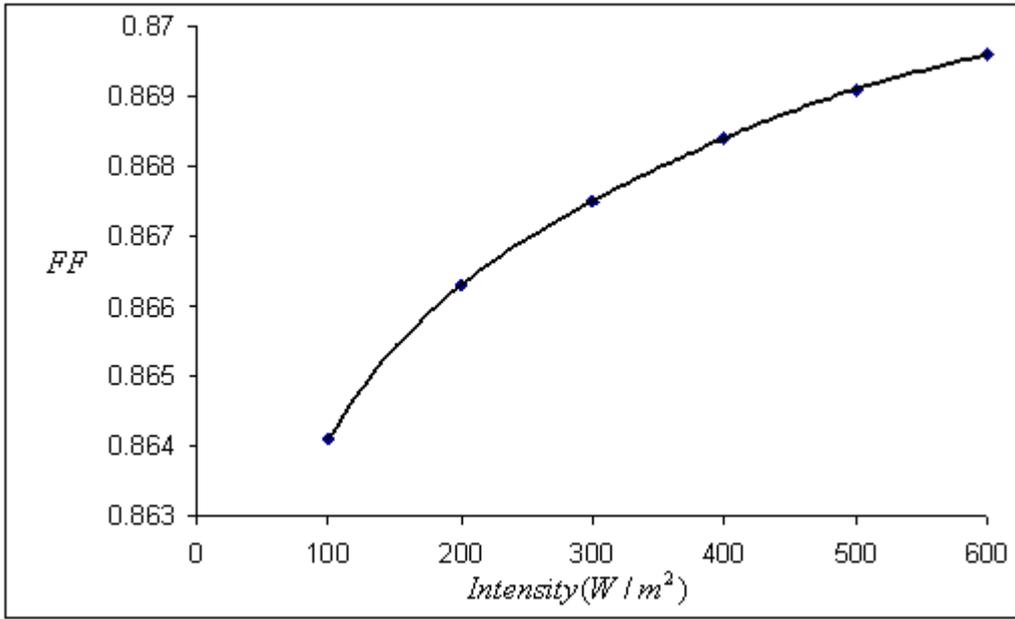
إن معدل التوليد لأزواج الكترون- فجوة الأكبر يعني التيار المتولد ضوئياً (تيار الدائرة القصيرة الأكبر) [٤٩] وبتزايد معدل التوليد يتزايد التيار المتولد ضوئياً (تيار الدائرة القصيرة) كما في الشكل (١٩-٤) . ومن المعادلة (١-٤) نلاحظ اعتماد فولتية الدائرة المفتوحة على التيار المتولد ضوئياً  $I_L$  [٣٣, ٤٩] وهذا يفسر تزايد فولتية الدائرة المفتوحة مع تزايد التيار المتولد ضوئياً (تيار الدائرة القصيرة) كما في الشكل (٢٠-٤) وبالتالي تزايد الفولتية المعيارية ( $v_{oc}$ ) مع تزايد فولتية الدائرة المفتوحة كما مبين في الجدول (٤-٤) مما يؤدي إلى تزايد عامل الملء ( $FF$ ) كما في الشكل (٢١-٤) والنتيجة هي تزايد كفاءة الخلية ( $\eta(\%)$ ) [٤٩] كما في الشكل (٢٢-٤) .



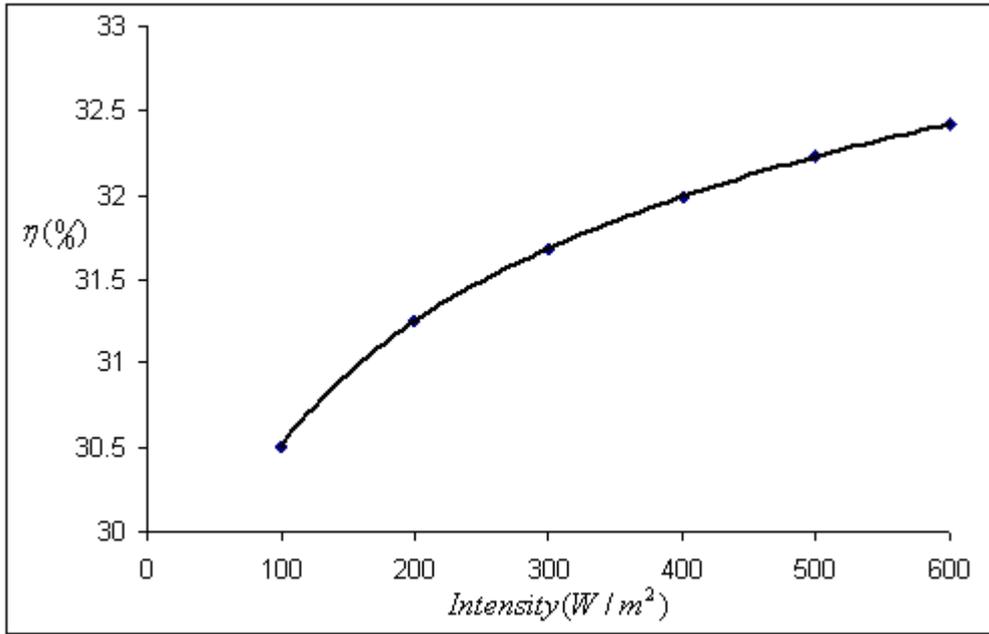
الشكل (١٩-٤) يبين تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.



الشكل (٢٠-٤) يبين تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.



الشكل (٤-٢١) يبين تغير عامل الملاءم مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.



الشكل (٤-٢٢) يبين تغير الكفاءة لخلية شمسية سليكونية أحادية البلورة مع تغير شدة الضوء الساقط نظرياً.

وعند إجراء مقارنة بين النتائج النظرية التي حصلنا عليها من هذه الدراسة ونتائج دراسات سابقة نجد نتائج هذه الدراسة متطابقة مع الدراسات السابقة [٢٠,٢٣,٢٦].

من النتائج التي حصلنا عليها ، يتضح إن القيمة العملية العظمى للكفاءة تساوي (22.214%) عند الطول الموجي (509nm) وشدة إضاءة ( $600W / m^2$ ) ودرجة حرارة (296.5K) كما في الشكل (١٧-٤) ، أما القيمة النظرية العظمى للكفاءة وعند الظروف نفسها فتساوي (32.421%) بالطريقة السابقة نفسها عن طريق برنامج الحاسبة الالكترونية بلغة فيجول بيسك كما في الشكل (٤-٢٢) . وبذلك فإن هناك تطابق في إن أعلى قيمة للكفاءة عملياً ونظرياً هي عند الظروف نفسها ماعدا إن القيمة النظرية للكفاءة هي أعلى من القيمة العملية بسبب إهمال بعض العوامل المؤثرة على كفاءة الخلية الشمسية ( مثل مقاومتي التوالي والتوازي ، مقاومة الحمل ، وغيرها ) عند التطبيق النظري للمعادلات المستخدمة لحساب معالم الخرج للخلية الشمسية السليكونية الأحادية البلورة .

#### (٥-٤) تأثير عامل درجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية عملياً ونظرياً:

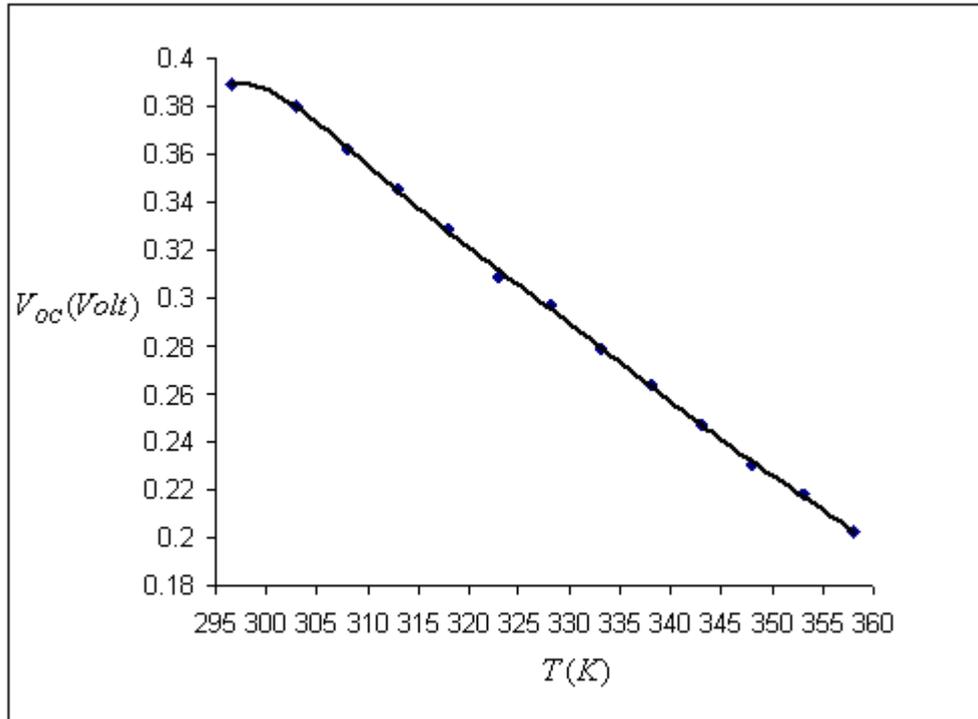
تتغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير درجة الحرارة عند طول موجي (587nm) وشدة إضاءة ( $100W / m^2$ ) كما في الجدول (٥-٤) .

جدول (٥-٤) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير درجة حرارة الخلية عملياً.

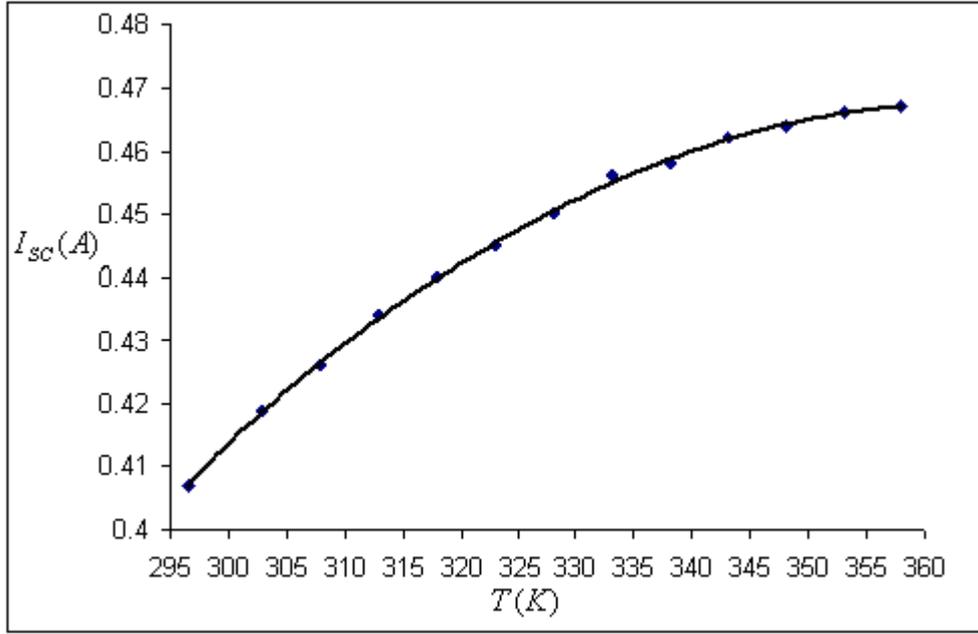
$T(K)$	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$FF$	$\eta(\%)$
٢٩٦.٥	٠.٤٠٧	٠.٣٨٩	٠.٧٦٧٥	١٥.٤٧٩
٣٠٣	٠.٤١٩	٠.٣٨٠	٠.٧٦٠٢	١٥.٤٢٠
٣٠٨	٠.٤٢٦	٠.٣٦٢	٠.٧٤٩٥	١٤.٧٢٤
٣١٣	٠.٤٣٤	٠.٣٤٥	٠.٧٣٨٥	١٤.٠٨٧
٣١٨	٠.٤٤٠	٠.٣٢٩	٠.٧٢٧٣	١٣.٤١٣
٣٢٣	٠.٤٤٥	٠.٣٠٩	٠.٧١٣١	١٢.٤٩١
٣٢٨	٠.٤٥٠	٠.٢٩٧	٠.٧٠٢٧	١١.٩٦٥
٣٣٣	٠.٤٥٦	٠.٢٧٩	٠.٦٨٧٧	١١.١٤٦
٣٣٨	٠.٤٥٨	٠.٢٦٤	٠.٦٧٣٨	١٠.٣٧٨
٣٤٣	٠.٤٦٢	٠.٢٤٧	٠.٦٥٧٢	٩.٥٥٣
٣٤٨	٠.٤٦٤	٠.٢٣١	٠.٦٤٠٠	٨.٧٢٩
٣٥٣	٠.٤٦٦	٠.٢١٨	٠.٦٢٤٤	٨.٠٨١
٣٥٨	٠.٤٦٧	٠.٢٠٢	٠.٦٠٤٥	٧.٢٦٤

عند زيادة درجة حرارة المادة شبه الموصلية فإن الكثير من الإلكترونات قادرة على التحرك من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل ، الإلكترونات الإضافية ( الزائدة ) في حزمة التوصيل والفجوات في حزمة التكافؤ تؤدي إلى زيادة تيار الإشباع مما يؤدي إلى تناقص فولتية الدائرة المفتوحة [٢٥,٢٩] بمقدار ( $3.040 \times 10^{-3} Volt / K$ ) كما في الشكل (٤-٢٣) . هذا التناقص في الفولتية يسمح لحاملات الشحنة المثيجة حرارياً لكي تعبر على المفرد  $p-n$  في كلا الاتجاهين ، كما إن الفولتية هي أيضاً أقل فاعلية بكثير عند فصل أزواج الكترون- فجوة ، بسبب هذين العاملين ، يزداد تيار الدائرة القصيرة

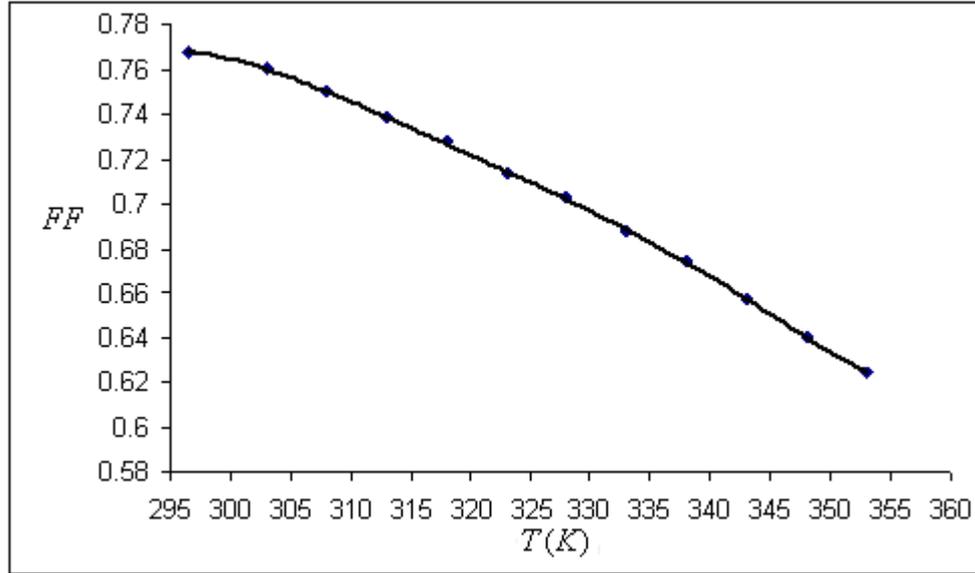
للخلية بمقدار  $(9.756 \times 10^{-4} A / K)$  كما في الشكل (٢٤-٤) . وبالتالي تناقص الفولتية المعيارية ( $v_{oc}$ ) مع تناقص ( $V_{oc}$ ) مما يؤدي إلى تناقص ( $FF$ ) بمقدار  $(2.650 \times 10^{-3} / K)$  كما في الشكل (٢٥-٤) . والنتيجة هي تناقص كفاءة الخلية الشمسية [٤٩] بمقدار  $(0.133 / K)$  كما في الشكل (٢٦-٤) .



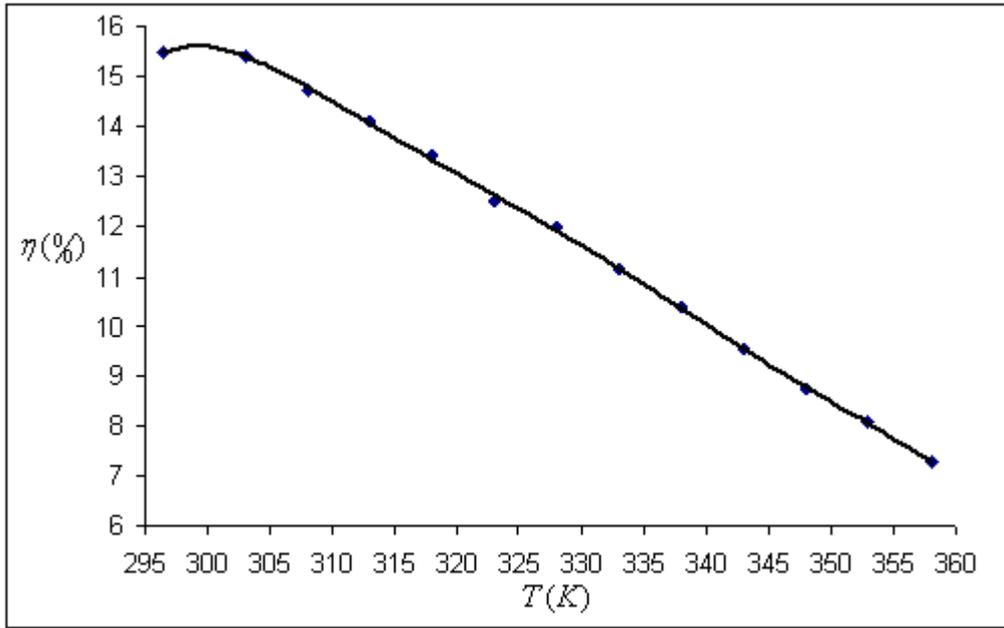
الشكل (٢٣-٤) يبين تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً .



الشكل (٤-٢٤) يبين تغير تيار الدائرة القصيرة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.



الشكل (٤-٢٥) يبين تغير عامل الملاءم مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.



الشكل (٢٦-٤) يبين تغير الكفاءة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عملياً.

وعند إجراء مقارنة بين النتائج العملية التي حصلنا عليها من هذه الدراسة ونتائج دراسات سابقة نجد نتائج هذه الدراسة متطابقة مع الدراسات السابقة [٢١, ٢٢, ٢٥].

كما تتغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية عند طول موجي (587nm) وشدة إضاءة ( $100W/m^2$ ) كما في الجدول (٦-٤).

الجدول (٦-٤) يبين تغير معالم خرج الخلية الشمسية مع تغير درجة حرارة الخلية نظرياً.

$T(K)$	$E_g (eV)$	$I_o (A)$	$I_{sc} (A)$	$V_{oc} (V)$	$FF$	$\eta(\%)$
٢٩٦.٥	١.١٢٥٤٠٧٥١٣	$4.026 \times 10^{-13}$	٢٧.٤٧٣٣٠٦٤٧٠٢٧١٤	٠.٨١٤٦	٠.٨٦٣٥	٢٤.٦١٨
٣٠٣	١.١٢٣٧٥٣٢٩٤	$1.176 \times 10^{-12}$	٢٧.٤٧٣٣٠٦٤٧٠٢٧١٣	٠.٨٠٤٤	٠.٨٥٩٩	٢٤.٢١١

٣٠٨	١.١٢٢٤٦٧٥٠٩	$2.607 \times 10^{-12}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٥	٠.٧٩٦٥	٠.٨٥٧٢	٢٣.٨٩٧
٣١٣	١.١٢١١٧.٣٥١	$5.638 \times 10^{-12}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٥	٠.٧٨٨٦	٠.٨٥٤٤	٢٣.٥٨٣
٣١٨	١.١١٩٨٦٢	$1.191 \times 10^{-11}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٣	٠.٧٨٠٧	٠.٨٥١٥	٢٣.٢٦٩
٣٢٣	١.١١٨٥٤٢٦٣١	$2.463 \times 10^{-11}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٤	٠.٧٧٢٨	٠.٨٤٨٦	٢٢.٩٥٤
٣٢٨	١.١١٧٢١٢٤١٥	$4.985 \times 10^{-11}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٤	٠.٧٦٤٨	٠.٨٤٥٧	٢٢.٦٣٩
٣٣٣	١.١١٥٨٧١٥٢	$9.891 \times 10^{-11}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٤	٠.٧٥٦٨	٠.٨٤٢٨	٢٢.٣٢٣
٣٣٨	١.١١٤٥٢٠١١١	$1.924 \times 10^{-10}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٥	٠.٧٤٨٧	٠.٨٣٩٨	٢٢.٠٠٨
٣٤٣	١.١١٣١٥٨٣٤٨	$3.677 \times 10^{-10}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٤	٠.٧٤٠٦	٠.٨٣٦٨	٢١.٦٩٢
٣٤٨	١.١١١٧٨٦٣٩	$6.903 \times 10^{-10}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٥	٠.٧٣٢٥	٠.٨٣٣٧	٢١.٣٧٦
٣٥٣	١.١١٠٤٠٤٣٩١	$1.274 \times 10^{-9}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٤	٠.٧٢٤٤	٠.٨٣٠٦	٢١.٠٥٩
٣٥٨	١.١٠٩٠١٢٥٠٣	$2.313 \times 10^{-9}$	٢٧.٤٧٣٣٠.٦٤٧٠.٢٧١٥	٠.٧١٦٢	٠.٨٢٧٤	٢٠.٧٤٣

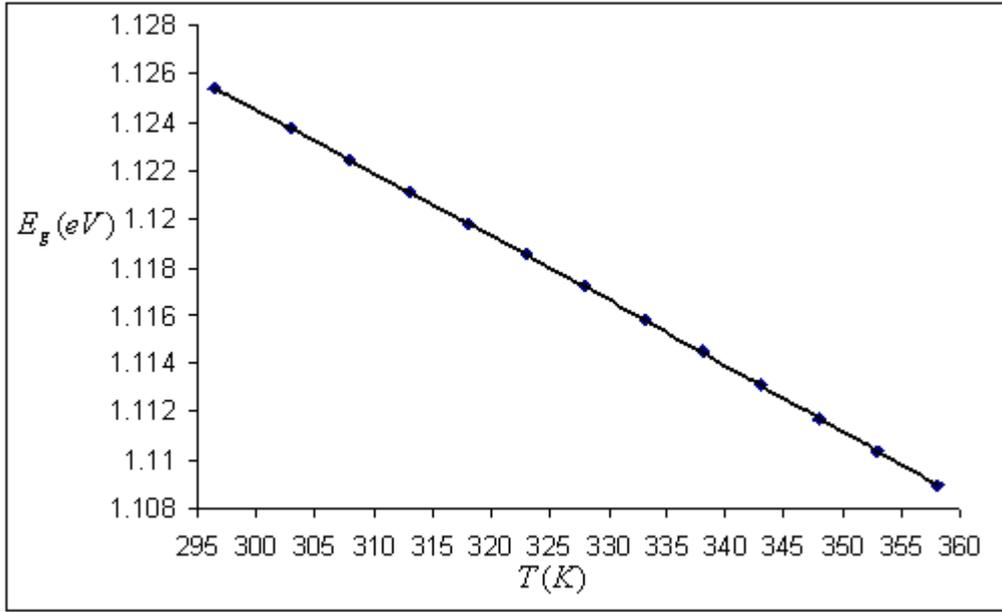
عند زيادة درجة حرارة الخلية الشمسية فان عدداً معيناً من الالكترونات الموجودة في حزمة التكافؤ يمكن أن تثار حرارياً وتنتقل إلى حزمة التوصيل تاركين مكانهم فجوات . إن الالكترونات التي تصل حزمة التوصيل ستملاً هذه الحزمة جزئياً . للتقريب الخطي ، فجوة الطاقة تتبع المعادلة [٥٦] :

$$E_g(T) = E_g(300K) + \frac{dE_g}{dT}(T - 300K) \dots \dots \dots (4-1)$$

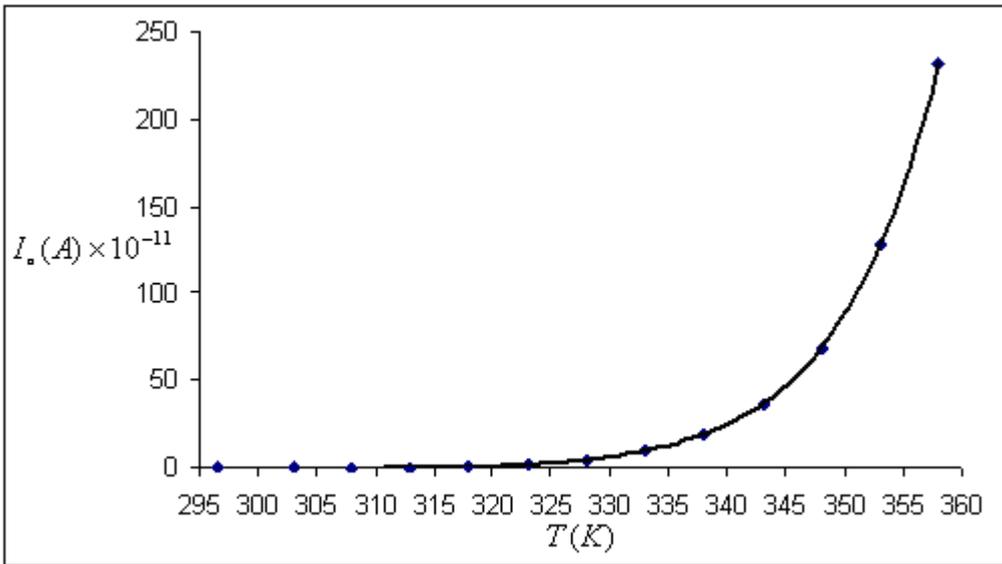
للسليكون  $\frac{dE_g}{dT} = -2.3 \times 10^{-4} eV/K$  . تتناقص  $(E_g)$  بمقدار  $(2.665 \times 10^{-4} eV/K)$  كما

في الشكل (٤-٢٧) ، هذا التناقص في فجوة الطاقة يسمح للفوتونات مع أطوال موجية أطول وطاقة أقل لكي تكون ممتصة بواسطة الخلية الشمسية ، ونتيجة ذلك هي حدوث زيادة قليلة في تيار الدائرة القصيرة مع زيادة درجة حرارة الخلية [٢٥,٢٩] .

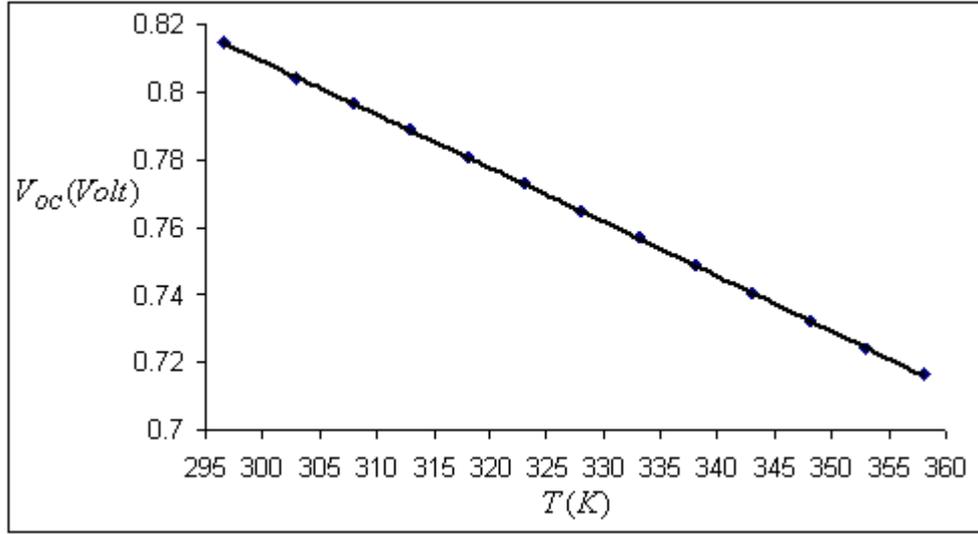
إن زيادة درجة حرارة الخلية الشمسية يؤدي إلى زيادة تيار الإشباع  $I_0$  [٢٥,٣٣] بمقدار  $(1.348 \times 10^{-10} A/K)$  كما في الشكل (٤-٢٨) ، وبالتالي فان تزايد تيار الإشباع مع زيادة درجة الحرارة يؤدي إلى فولتية الدائرة المفتوحة الأقل [٢٥,٣٣,٤٩] إذ تتناقص فولتية الدائرة المفتوحة للخلية بمقدار  $(1.598 \times 10^{-3} Volt/K)$  كما في الشكل (٤-٢٩) ، وبالتالي تناقص الفولتية المعيارية مع تناقص  $(V_{oc})$  مما يؤدي إلى تناقص  $(FF)$  بمقدار  $(5.862 \times 10^{-4} / K)$  كما في الشكل (٤-٣٠) والنتيجة هي تناقص  $\eta(\%)$  [٤٩] بمقدار  $(0.063 / K)$  كما في الشكل (٤-٣١) .



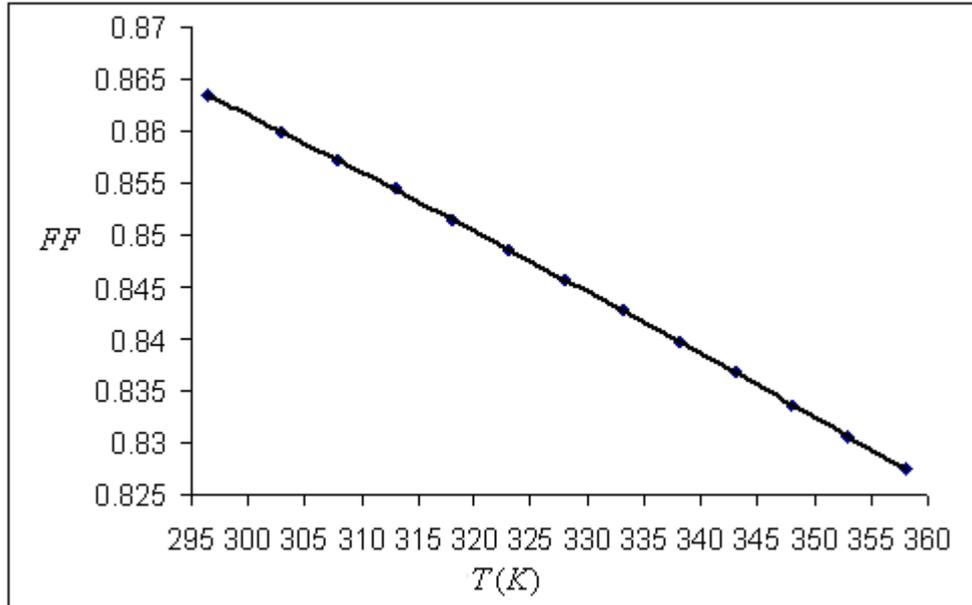
الشكل (٢٧-٤) يبين تغير فجوة الطاقة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.



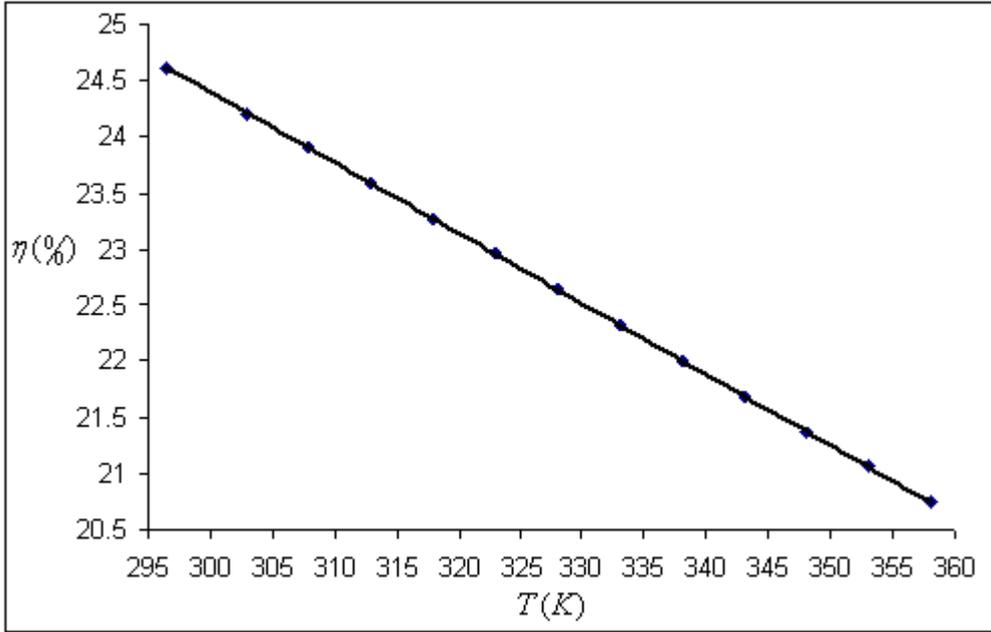
الشكل (٢٨-٤) يبين تغير تيار الإشباع مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.



الشكل (٢٩-٤) يبين تغير فولتية الدائرة المفتوحة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.



الشكل (٣٠-٤) يبين تغير عامل الملء مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.



الشكل (٤-٣١) يبين تغير الكفاءة مع تغير درجة حرارة الخلية الشمسية نظرياً.

وعند إجراء مقارنة بين النتائج النظرية التي حصلنا عليها من هذه الدراسة ونتائج دراسات سابقة نجد نتائج هذه الدراسة متطابقة مع الدراسة السابقة [١٩] .

من النتائج التي حصلنا عليها ، يتضح إن القيمة العملية العظمى للكفاءة تساوي (15.479%) عند الطول الموجي (587nm) (اللون الأصفر) وشدة إضاءة ( $100W / m^2$ ) ودرجة حرارة (296.5K) ، كما في الشكل (٤-٢٦) . أما القيمة النظرية العظمى للكفاءة وعند الظروف نفسها فتساوي (24.618%) وبالطريقة السابقة نفسها عن طريق برنامج الحاسبة الالكترونية بلغة فيجول بيسك كما في الشكل (٣١-٤) . وبذلك فإن هناك تطابق في إن أعلى قيمة للكفاءة عملياً ونظرياً هي عند الظروف نفسها ماعدا إن القيمة النظرية للكفاءة هي أعلى من القيمة العملية بسبب إهمال بعض العوامل المؤثرة على كفاءة الخلية الشمسية (مثل مقاومتي التوالي والتوازي ، مقاومة الحمل ، وغيرها) عند التطبيق النظري للمعادلات المستخدمة لحساب معالم الخرج للخلية الشمسية السليكونية الأحادية البلورة .



## (٧-٤) المقترحات

### Suggestions

- ١- تقليل درجة حرارة الخلية بوساطة تقليل الحرارة الناتجة من :  
أولاً: الامتصاص غير الفعال للفوتونات التي لاتولد أزواج الكترون- فجوة .  
ثانياً: إعادة الإتحاد لأزواج الكترون- فجوة .  
ثالثاً: التيار الضوئي ( الحرارة المتولدة خلال انسياب التيار في مقاومة التوالي لمفرق  $p-n$  ) .
- ٢- وضع الخلايا الشمسية في مواقع ، أو أماكن تكون فيها درجات الحرارة ملائمة لعمل الخلية الشمسية لأن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى تناقص كفاءتها .
- ٣- التخلص من تشقق الخلية بعمل نظام لتبريد الخلية لامتصاص الحرارة من الأشعة الشمسية الساقطة على الخلية .
- ٤- زرع حزام نباتي ومصدات للرياح من أجل الحد من تأثير الرياح على الخلايا لما تنقله إليها من غبار وأتربة تقلل من كفاءة الخلية لامتصاص ضوء الشمس .
- ٥- إضافة منظومات الخزن الكهربائي للإفادة من الطاقة الشمسية وخبزنها من النهار إلى الليل .

### References:-

[١]E.Seale , " History and background " , Solar Cells , Shedding a little light on photovoltaics , ٢٨ February , (٢٠٠٢).

[٢]Solar Resources , Sun Power Corporation , (٢٠٠٤).

(<http://www.sunpowercorp.com/html/resources/resources.html>).

[٣]W.G.Adams and R.E.Day . " The action of light on selenium " , Proc. Roy. Soc. London Ser. A , ٥ , p.١١٣ , (١٨٧٦).

[٤] **D.Massey** , Bell Labs - The Solar Battery (Photovoltaics),(٢٠٠٥).

([http://www.bellsystemmemorial.com/belllabs\\_photovoltaics.html](http://www.bellsystemmemorial.com/belllabs_photovoltaics.html)).

[٥] **D.M.Chapin , C.S.Fuller and G.L.Pearson** , " A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power " Journal of Applied Physics , ٢٥ , p.٦٧٦-٦٧٧, (١٩٥٤).

[٦] **J.Perlin** , Making Electricity Directly from Sunlight , Rarus Institute ,(٢٠٠٢).

(<http://www.californiasolarcenter.org/solareclips/2002.07/20020709-8.html>).

[٧] **D.E.Carlson and C.R.Wronski** , " Amorphous silicon solar cell " , Applied Physics Lett. , ٢٨ , p.٦٧١, (١٩٧٦).

[٨] Center for Photovoltaic Engineering Time line , University of New

(<http://www.pv.unsw.edu.au/online-course/world-records.asp>). South Wales ,

[٩] **D.Lenardic** , " History of photovoltaics " , PVResources.com,(٢٠٠٥).

(<http://www.pvresources.com/en/history.php>).

[١٠] **مارتن . أ. كرين** ( الخاليا الشمسية مبادئ العمل ، التقنية وتطبيقات المنظومة ) ترجمة د . **يوسف مولود حسن** ، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي ، جامعة الموصل ، (١٩٨٩) .

[١١] **S.M.Sze** . " Physics of Semiconductors Devices " . A Wiley –Interscience Publication . John Wiley & Sons , (١٩٨١).

[١٢] **ميسل وبتلر** " الطاقة الشمسية " ترجمة د . **عاصم عبد الكريم عزوز** . وزارة التعليم العالي والبحث العلمي ، جامعة الموصل ، (١٩٨٢) .

**منال مدحت عبد الله** " زيادة كفاءة الخلية الشمسية باستخدام [١٣]

المواد المتوهجة " (رسالة ماجستير) ، قسم العلوم التطبيقية في الجامعة التكنولوجية (١٩٨٩) .

[١٤] ي.هاماكوا، " الطاقة الكهروضوئية (الفوتوفولتائية) " ،  
مجلة العلوم ، الترجمة العربية لمجلة العلوم الأمريكية ، طاقة في الشمس – ج ٤ - العدد ١، كانون  
الثاني (١٩٨٨) .

[١٥] **A.Goetzberger** , " Applied Solar Energy " , Fraunhofer Institute for Solar  
Energy Systems (ISE) , RIO ٠٢-World Climate & Energy Events , January ٦-  
١١,(٢٠٠٢).

[١٦] **G.Busch and H.Schade** , " Lectures on Solid State Physics " , Pergamon ,  
(١٩٧٦).

[١٧] "سول وايدر" مقدمة في الطاقة الشمسية لطلبة العلوم والهندسة "  
ترجمة د . شاكرا جابر، د . خليل إبراهيم سعيد ، د . يوسف مولود حسن والسيد عماد ممدوح ،  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي ، جامعة الموصل (١٩٨٩) .

[١٨] **D.L.Pulfrey** , " Photovoltaic Power Generation " ,Van Nostrand Reinhold  
Company , Oxford , p.٥٦-٧٢ , (١٩٨٨).

[١٩] **J.C.C.Fan** , " Theoretical temperature dependence of solar cell parameters  
" , Solar Cells , ١٧ , p.٣٠٩-٣١٥ , (١٩٨٦).

[٢٠] **Lioujj** , " Physical models for predicting the performance of Si/SiGe , Si/Si  
and AlGaAs/GaAs Solar Cells " , Solar Energy Materials and Solar Cells , ٢٩ , ٣ ,  
٢٦١ , (١٩٩٣).

[٢١] **Yoon , S.Garboushian and Vahan** , " Reduced temperature dependence of  
high concentration photovoltaic solar cell open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) at high  
concentration levels " , IEEE Electron Device Society , ٢ , ١٥٠٠ , (١٩٩٤).

[٢٢] **EG.Guk , VB.Shuman and AS.Zubrilov** , " Low - temperature  
characteristics of solar cells " , Semiconductors .٢٩(٨) : p.٧٧٩-٧٨٠ , (١٩٩٥).

[٢٣] **E.S.Hrayshat** , " Investigation of three cascade solar cells under various air mass condition " , WREC , p.١٨٩٤-١٨٩٧,(٢٠٠٠).

[٢٤] **T.Maruyama , R.Kitamura , A.Enomoto and K.Shirasawa** , " Solar cell module colored with fluorescent plate " , Solar Energy Materials and Solar Cells , ٦٩ , ٦١ , (٢٠٠٠).

[٢٥] **T.A.Yates** , " Solar Cells in Concentrating Systems and their High Limitations " , Senior Thesis , University of California (Santa Cruz) , p.٨-١٢ , September ٢(٢٠٠٣).

[٢٦] **Nakajima , M.Ichikawa , M.Kondo , K.Yamamoto , H.Yamagishi and Y.Tawada** , " Spectral effects of a single-junction amorphous silicon solar cell on outdoor performance", Japanese Journal of Applied Physics Part ١ - Regular Papers Short Notes and Review Papers.٤٢(٥A) :p.٢٤٢٥-٢٤٣١, (٢٠٠٤).

[٢٧] **ACRE Australian CRC for Renewable Energy Lid .** " Solar Cell , Principles and applications " , p.١,(٢٠٠٠).

[٢٨] **H.J.Hovel** , " Solar Cells " , Semiconductors and Semimetals , Academic Press. , New York , p. ٣٣٤-٣٣٩, (١٩٩٠).

[٢٩] **E.Radziemska** and **E.Kleugmann** , " Thermally Affected Parameters of the Current-Voltage Characteristics of Silicon Photocell " , Energy Conversion and Managements , ٤٣ , p.١٨٨٩-١٩٠٠ , (٢٠٠٢).

[٣٠] **D.Hettelsater** , Solar Cell Lab. University of California , (Santa Cruz),(٢٠٠٢).

[٣١] **H.F.Wolf** . " Semiconductors " . Wiley – Interscience , (١٩٧١).

[٣٢] **B.Van Zeghbroeck** , " Electrostatic analysis of a p-n diode " , Chapter ٤ : p-n Junctions , Boulder , December (٢٠٠٤).

[33] **R.K. Willardson H.J. Hovel and Beer** , " Solar Cells " , Semiconductors and Semimetals Series , Academic Press , New York , Vol.11,(1970).

[34] **M.A.Green** , " Status of crystalline photovoltaic technology " , World Renewable Energy Congress (WREC) , p.2630-2630 , (2000).

[35] **L.P.Hunt** , " Total Energy Use in the Production of Silicon Solar Cells from the Raw Material to Finished Product " , Conference Record , 12<sup>th</sup> IEEE photovoltaic Specialists Conference , Baton Rouge , p.347-352,(1976).

[36] **C.L.Yaws et al.** , " Polysilicon Production : Cost Analysis of Conventional Process , " Solid – State Technology , p.63-67, January , (1979).

[37] **J.Zhao , A.Wang and M.A.Green** , " High Efficiency PERL and PERT Silicon Solar Cells on FZ and MCZ Substrates " , Solar Energy Materials and Solar Cells , in press.,(2000).

[38] **B.Van Zeghbroeck** , " Carrier recombination and generation " , Chapter 2 : Semiconductor Fundamentals , Boulder , December (2004).

[39] **B.M.Damiani** , " Investigation of light induced degradation in promising photovoltaic grade silicon and development of porous silicon anti-reflection coatings for silicon solar cells " , Ph.D Thesis , Georgia Institute of Technology , April (2004).

[40] **M.H.Brodsky** , " Topic in applied physics " , Amorphous Semiconductors , 36 , (1979).

[41] **W.Palz** , " Solar electricity " , (Butterworths) , (1979).

[42] **C.M.Singal** , " Efficiency of Conventional Silicon Solar Cells " (International Solar Energy Society Congress . New Delhi – India ) , p.766-771,(1979).

[<sup>ε</sup><sub>3</sub>] **J.C.McWeigh** , " Sun power " , An Introduction to the Application of Solar energy , (pergamon) , (<sup>1</sup><sub>9</sub><sup>7</sup><sup>7</sup>).

[<sup>ε</sup><sub>4</sub>] **A.Bhaskara and G.R.Dadmanabhan** , " A method for estimating the optimum Load resistance for a silicon solar cell used in terrestrial power application " , Solar Energy , Vol.<sup>1</sup><sub>0</sub> , p.<sup>1</sup><sub>7</sub><sup>1</sup>-<sup>1</sup><sub>7</sub><sup>7</sup> , (<sup>1</sup><sub>9</sub><sup>7</sup><sup>3</sup>).

[<sup>ε</sup><sub>5</sub>] **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) , <sup>2</sup> , p.<sup>7</sup><sub>0</sub><sup>9</sup> , (<sup>1</sup><sub>9</sub><sup>7</sup><sup>8</sup>).

[<sup>ε</sup><sub>6</sub>] **W.E.Spear , P.G.Lecomber** , Solid State Commun. Vol.<sup>1</sup><sub>7</sub> , p.<sup>1</sup><sub>1</sub><sup>9</sup><sup>3</sup> , (<sup>1</sup><sub>9</sub><sup>7</sup><sup>2</sup>).

[<sup>ε</sup><sub>7</sub>] **D.E.Cartson , C.R.Wronski** , Appl. Phys. Lett. <sup>2</sup><sub>8</sub> , p.<sup>6</sup><sub>7</sub><sup>1</sup> , (<sup>1</sup><sub>9</sub><sup>7</sup><sup>6</sup>). [<sup>ε</sup><sub>8</sub>] **B.Van Zeghbroeck** , " Solar Cells " , Chapter <sup>ε</sup> : p-n Junctions , Principles of Semiconductor Devices , Boulder , December (<sup>2</sup><sub>0</sub><sup>0</sup><sup>ε</sup>).

[<sup>ε</sup><sub>9</sub>] **J.P.McKelvey** , Solid State and Semiconductor Physics , New York : Harper and Row , p.<sup>ε</sup><sub>2</sub><sup>2</sup> , (<sup>1</sup><sub>9</sub><sup>6</sup><sup>6</sup>).

[<sup>ο</sup><sub>0</sub>] **M.A.Green** , Solar Cells : Operating Principles , Technology and Systems Application , Prentice Hall , Englewood Cliffs , N.J. , (<sup>1</sup><sub>9</sub><sup>8</sup><sup>2</sup>).

[<sup>ο</sup><sub>1</sub>] **M.A.Green** , " Third Generation Photovoltaics " , Advanced Solar Energy Conversion , Berlin , (<sup>2</sup><sub>0</sub><sup>0</sup><sup>3</sup>).

[<sup>ο</sup><sub>2</sub>] **R.E.I.Schropp and M.Zeman** , " Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells : Modeling , Materials , and Device Technology " , Kluwer Academic , Boston , (<sup>1</sup><sub>9</sub><sup>9</sup><sup>8</sup>).

[<sup>ο</sup><sub>3</sub>] **W.G.J.H.M.VanSark** , " Thin Films and Nanostructures " , Ed. by **M.H.Francombe** , Academic , San Diego , Vol.<sup>3</sup><sub>0</sub> , p.<sup>1</sup> , (<sup>2</sup><sub>0</sub><sup>0</sup><sup>2</sup>).

[٥٤] **W.G.J.H.M.VanSark , A.Meijerink , R.E.I.Schropp , J.A.M.van Roosmalen and E.H.Lysen** , " Modeling Improvement of Spectral Response of Solar Cells by Deployment of Spectral Converters Containing Semiconductor Nanocrystals " , Semiconductors , Vol.٣٨ , No.٨ , p.٩٦٢-٩٦٩ , (٢٠٠٤).

[٥٥] **H.Hashigami , Y.Itakura and T.Saitoh** , " Effect of illumination conditions on Czochralski – grown silicon solar cell degradation " , Journal of Applied Physics , ٩٣ , p.٤٢٤٠ , (٢٠٠٣).

[٥٦] **Moslem Shaltout , M.A.EL-Nicklawy , M.M.Hassan , A.F.Rahoma , M.Sabry** , The Temperature Dependence of the Spectral and Efficiency Behavior of Si Solar Cell Under Low Concentrated Solar Radiation . Renewable Energy , ٢١ , p.٤٤٥-٤٥٨ , (٢٠٠٠).

## ملحق رقم (١)

### وصف برنامج الحاسبة الإلكترونية :-

يضيف فيجول بيسك مسبقاً سطر نص يمثلان بداية ونهاية الإجراء الخاص بالكائن المحدد والحادثة المختارة ، في إطار نص البرنامج :

Private Sub Command Exit\_Click ()

End Sub

ويكتب نص البرنامج ضمن هذين السطرين.

الكلمة Private هي لاستدعاء ( تنفيذ ) الإجراءات في لغة فيجول بيسك أما الكلمة Sub فهي عبارة عن كلمة محجوزة في هذه اللغة تدل على أن الإجراء Procedure يبدأ من هنا . والإجراء Procedure عبارة عن نص برنامج مكرس لحادثة خاصة واسم الإجراء هو Command Exit\_Click () إذ Command Exit يمثل القسم الأول من اسم الإجراء أما () Click فيمثل القسم الثاني من اسم الإجراء . القوسين () هما آخر رمزين في اسم الإجراء . أما العنوان الافتراضي الذي يعطيه فيجول بيسك لزر الأمر هو Command1 .

تمثل الكلمة grd اسم الجدول أما Text Matrix فتتمثل الموقع إذ تم حجز مواقع للمعالم المطلوب حسابها . ثم يتم إدراج قيم الثوابت  $(K, A, q, D, L_e, L_h, W)$  وباستعمال كلمة Const التي تمثل كلمة محجوزة ( قيم الثوابت  $L_e, L_h$  بالوحدات الصغيرة [١٨] ) , أما  $W$  فقد تم حسابها من المعادلة :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(\phi_i - V_a)}{qN_d}}$$

إذ

$$\varepsilon_s = 105.3626 \times 10^{-14} F / cm$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} col.$$

$$\phi_i = 0.8 Volt (for Silicon)$$

$$N_d = 10^{19} cm^{-3}$$

يتم الآن ذكر المتغيرات  $(T, E_{ph}, E_g, \alpha, I)$  التي تسبق بكلمة Dim للتصريح عنها . تم

حساب فجوة الطاقة من المعادلة :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)}$$

إذ  $E_g(0) = E_g$  at  $T = 0K$  و  $\alpha$  ،  $\beta$  معالم تجريبية قيمها لخلية أحادية البلورة هي :

جدول (١) يبين معالم فجوة الطاقة لـ  $GaAs, Si, Ge$  [١٩] .

<i>MonocrystallineCell</i>	$E_g(0)(eV)$	$\alpha(eV \text{ deg}^{-1})$	$\beta(\text{deg})$
GaAs	١.٥١٩	$5.405 \times 10^{-4}$	٢٠٤
Si	١.١٧٠	$4.730 \times 10^{-4}$	٦٣٦
Ge	٠.٧٤٣٧	$4.774 \times 10^{-4}$	٢٣٥

ومن ثم تستخدم الطريقة For. Next التي تعد وسيلة لصنع الحلقات في لغة فيجول بيسك .

بعدها تذكر المعادلات :

((1-3), (1-4), (1-6), (1-7), (1-8), (2-18), (2-19), (2-31)) المستخدمة

لحساب معالم الخلية الشمسية ( $I_o, G, I_L, V_{OC}, I_{SC}, v_{oc}, FF, \eta$ ) .

يليه استعمال العبارة `grd.TextMatrix` حيث تتوقع الخاصية `Text` أن يسند لها قيمة نصية

(سلسلة كتابية) ، أما الخاصية `Value` فهي عبارة عن قيمة عددية . مما يعني أنه يجب استخدام التابع

الوظيفي (`Str`) لتحويل القيمة العددية إلى سلسلة كتابية . يكتب ضمن قوسي التابع الوظيفي `Str`

(القيمة العددية المطلوب تحويلها إلى سلسلة كتابية ، فمثلاً يستخدم التابع (`Str(١١)`) لتحويل العدد ١١

إلى السلسلة الكتابية "١١" .

السطر الأخير من نص البرنامج كتب أيضاً من قبل لغة فيجول بيسك . العبارة `EndSub`

تشير لنهاية الإجراء .

في عامل الطول الموجي استخدم الإيعاز `Form٢.Show` لكي يظهر نافذة عامل الشدة

والإيعاز `Form١.Hide` لكي يخفي نافذة عامل الطول الموجي ، أما في عامل الشدة فقد استخدم

الإيعاز `Form٣.Show` لكي يظهر نافذة عامل درجة الحرارة ، والإيعاز `Form٢.Hide` لكي يخفي

نافذة عامل الشدة ، ولتضعيف عرض العمود وارتفاع الصف على التوالي تم استعمال الإيعازين

`grd.ColWidth(c) = grd.ColWidth(c) * ٢`

`grd.RowHeight(c) = grd.RowHeight(c) * ٢`

كما تم استعمال الإيعاز  $grd.Col = c$  لجعل العمود نشط والإيعاز  $grd.Row = r$  لجعل الصف نشطاً.

تساوي القيمة الافتراضية للخاصية Alignment لمربع النص إلى Left Justify . مما يعني أن النص في مربع النص يبدأ من اليسار . نغير هذه الخاصية وذلك لإظهار النص في وسط مربع النص وقد تم استعمال الإيعاز  $grd.CellAlignment = 4$  .

المعالم	
i <sub>o</sub>	تيار الإشباع للثنائي
G,g	معدل توليد زوج (إلكترون- فجوة)
IL,il	التيار المتولد ضوئياً
VOC,voc	فولتية الدائرة المفتوحة
ISC,isc	تيار الدائرة القصيرة
VV,vv	الفولتية المعيارية
FF,ff	عامل الملء للخلية الشمسية
N,n	كفاءة الخلية الشمسية
المتغيرات	
T,t	درجة حرارة الخلية الشمسية
EPH,eph	طاقة الفوتون
eg	فجوة الطاقة
alfa	معامل الامتصاص لمادة شبه الموصل المصنوعة منه الخلية الشمسية
i	شدة الضوء الساقط على الخلية الشمسية
الثوابت	
K	ثابت بولتزمان
a	مساحة الخلية الشمسية
q	شحنة الإلكترون

d	ثابت مميز للمفرق
le	طول الانتشار للإلكترون في النوع p
lh	طول الانتشار للفجوة في النوع n
w	عرض منطقة الاستنزاف

جدول رقم (٢) يبين الرموز المستخدمة في برنامج الحاسبة الإلكترونية .

## ملحق رقم (٢)

برنامج الحاسبة الإلكترونية : -

عامل الطول الموجي : -

FALAH HASSON PHY.SCIE. \*\*

Private Sub Command1\_Click ()

grd.TextMatrix (٠, ٠) = "EPH"

grd.TextMatrix (٠, ١) = "G"

grd.TextMatrix (٠, ٢) = "IL"

grd.TextMatrix (٠, ٣) = "VOC"

grd.TextMatrix (٠, ٤) = "ISC"

grd.TextMatrix (٠, ٥) = "VV"

grd.TextMatrix (٠, ٦) = "FF"

```
grd.TextMatrix (·, ʏ) = "N"
```

```
Const k = 1.28 * 1. ^ -23
```

```
Const a = ʏ ^ 0
```

```
Const q = 1.6 * 1. ^ -19
```

```
Const d = 0.2
```

```
Const le = 210 * 1. ^ -9
```

```
Const lh = 1.7 * 1. ^ -9
```

```
Const w = 0.010264628 * 1. ^ -9
```

```
Dim t As Variant, eph As Variant, eg As Variant, alfa As Variant, i As Variant
```

```
t = Array (296.0, 3.3, 3.8, 313, 318, 323, 328, 333, 338, 343, 348, 353, 358)
```

```
eg = Array (1.800602021, 1.79800027, 1.790948014, 1.793872061,  
1.7917792,  
1.789668209, 1.78703964, 1.780394432, 1.783232177, 1.78103307, 1.77880  
8224, 1.776647026, 1.774420000)
```

```
For c = 0 To 12
```

```
eg(c) = eg(c) * 1. ^ -19
```

```
Next c
```

```
alfa = Array (27029, 9682, 6823, 6082, 3647)
```

```
eph=Array(4.389380031, 3.897838899, 3.379897786, 3.231270308,  
3.024390243)
```

```
For c = 0 To 9
```

```
eph(c) = eph(c) * 1. ^ -19
```

```
Next c
```

```
i = Array (0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06)
```

```
i0 = d * t (0) ^ 3 * Exp (-eg (0) / (k * t (0)))
```

```

For c = 1 To 4
g = alfa(c) * i (1) / eph(c)
g = g / Ƴ
il = q * a * g * (le + w + lh)
voc = (k * t (1) / q) * Log ((il / i1) + 1)
isc = i1 * (Exp (q * voc / (k * t (1))) - 1)
vv = voc / (k * t (1) / q)
ff = (vv - Log (vv + 1. Ƴ)) / (vv + 1)
n = (voc * isc * ff) / (a * i (1))
grd.TextMatrix(c + 1, 1) = Str (eph(c))
grd.TextMatrix(c + 1, 2) = Str (g)
grd.TextMatrix(c + 1, 3) = Str (il)
grd.TextMatrix(c + 1, 4) = Str (voc)
grd.TextMatrix(c + 1, 5) = Str (isc)
grd.TextMatrix(c + 1, 6) = Str (vv)
grd.TextMatrix(c + 1, 7) = Str (ff)
grd.TextMatrix(c + 1, 8) = Str (n)
Next c
End Sub

Private Sub Command1_Click ()
Form1.Show
Form1.Hide

```

End Sub

Private Sub Form Load ()

For c = ٠ To ٧

grd.ColWidth(c) = grd.ColWidth(c) \* ٢

Next

For c = ٠ To ٥

grd.RowHeight(c) = grd.RowHeight(c) \* ٢

Next

For r = ٠ To ٥

For c = ٠ To ٧

grd.Col = c

grd.Row = r

grd.CellAlignment = ξ

Next

Next

End Sub

عامل الشدة : -

Private Sub Command1\_Click ()

grd.TextMatrix (٠, ٠) = "EPH"

grd.TextMatrix (٠, ١) = "G"

grd.TextMatrix (٠, ٢) = "IL"

grd.TextMatrix (•, ρ) = "VOC"

grd.TextMatrix (•, ξ) = "ISC"

grd.TextMatrix (•, ϖ) = "VV"

grd.TextMatrix (•, ϑ) = "FF"

grd.TextMatrix (•, γ) = "N"

Const k = 1.38 \* 10 ^ -23

Const a = 7λ.ϖ

Const q = 1.6 \* 10 ^ -19

Const d = 0.2

Const le = 210 \* 10 ^ -9

Const lh = 1.7 \* 10 ^ -9

Const w = 0.010264628 \* 10 ^ -9

Dim t As Variant, eph As Variant, eg As Variant, alfa As Variant, i As Variant

t = Array (296.0, 3.3, 3.8, 313, 318, 323, 328, 333, 338, 343, 348, 353, 358)

eg = Array (1.800602021, 1.79800027, 1.790948014, 1.793872061, 1.7917792, 1.789668209, 1.78703964, 1.780394432, 1.783232177, 1.78103307, 1.778808224, 1.776647026, 1.774420000)

For c = 0 To 12

eg(c) = eg(c) \* 10 ^ -19

Next c

alfa = Array (27029, 9682, 6823, 6082, 3647)

eph=Array(4.389380031, 3.897838899, 3.379897787, 3.231270308, 3.024390243)

For c = 0 To 4

$$\text{eph}(c) = \text{eph}(c) * \lambda * \Lambda^{-1} q$$

Next c

$$i = \text{Array}(\lambda, \lambda, \lambda, \lambda, \lambda, \lambda, \lambda)$$

$$i \cdot = d * t(\cdot)^\lambda * \text{Exp}(-eg(\cdot) / (k * t(\cdot)))$$

$$ic = \cdot$$

For cc = \cdot To \circ

$$g = \text{alfa}(\cdot) * i(cc) / \text{eph}(\cdot)$$

$$g = g / \lambda$$

$$il = q * a * g * (le + w + lh)$$

$$\text{voc} = (k * t(\cdot) / q) * \text{Log}((il / i \cdot) + \lambda)$$

$$\text{isc} = i \cdot * (\text{Exp}(q * \text{voc} / (k * t(\cdot))) - \lambda)$$

$$vv = \text{voc} / (k * t(\cdot) / q)$$

$$ff = (vv - \text{Log}(vv + \lambda)) / (vv + \lambda)$$

$$n = (\text{voc} * \text{isc} * ff) / (a * i(cc))$$

$$\text{grd.TextMatrix}(ic + \lambda, \cdot) = \text{Str}(\text{eph}(\cdot))$$

$$\text{grd.TextMatrix}(ic + \lambda, \lambda) = \text{Str}(g)$$

$$\text{grd.TextMatrix}(ic + \lambda, \lambda) = \text{Str}(il)$$

$$\text{grd.TextMatrix}(ic + \lambda, \lambda) = \text{Str}(\text{voc})$$

$$\text{grd.TextMatrix}(ic + \lambda, \lambda) = \text{Str}(\text{isc})$$

$$\text{grd.TextMatrix}(ic + \lambda, \circ) = \text{Str}(vv)$$

$$\text{grd.TextMatrix}(ic + \lambda, \lambda) = \text{Str}(ff)$$

$$\text{grd.TextMatrix}(ic + \lambda, \lambda) = \text{Str}(n)$$

$$ic = ic + \lambda$$

Next cc

End Sub

Private Sub Command $\Psi$ \_Click ()

Form $\Psi$ .Show

Form $\Psi$ .Hide

End Sub

Private Sub Form Load ()

For c =  $\cdot$  To  $\Upsilon$

grd.ColWidth(c) = grd.ColWidth(c) \*  $\Psi$

Next

For c =  $\cdot$  To  $\Upsilon$

grd.RowHeight(c) = grd.RowHeight(c) \*  $\Psi$

Next

For r =  $\cdot$  To  $\Upsilon$

For c =  $\cdot$  To  $\Upsilon$

grd.Col = c

grd.Row = r

grd.CellAlignment =  $\xi$

Next

Next

End Sub

عامل درجة الحرارة :-

```
Private Sub Command1_Click ()
```

```
grd.TextMatrix (0, 0) = "T"
```

```
grd.TextMatrix (0, 1) = "I0"
```

```
grd.TextMatrix (0, 2) = "ISC"
```

```
grd.TextMatrix (0, 3) = "VOC"
```

```
grd.TextMatrix (0, 4) = "FF"
```

```
grd.TextMatrix (0, 5) = "N"
```

```
Const k = 1.28 * 10 ^ -23
```

```
Const a = 78.0
```

```
Const q = 1.6 * 10 ^ -19
```

```
Const d = 0.2
```

```
Const le = 210 * 10 ^ -9
```

```
Const lh = 1.7 * 10 ^ -9
```

```
Const w = 0.010264628 * 10 ^ -9
```

```
Dim t As Variant, eph As Variant, eg As Variant, alfa As Variant, i As Variant
```

```
t = Array (297.0, 3.3, 3.8, 313, 318, 323, 328, 333, 338, 343, 348, 353, 358)
```

```
eg = Array (1.800602021, 1.79800027, 1.790948014, 1.793872061, 1.7917792, 1.789678209, 1.78703964, 1.780394432, 1.783232177, 1.78103307, 1.778808224, 1.776647026, 1.774420000)
```

```
For c = 0 To 12
```

```
eg(c) = eg(c) * 10 ^ -19
```

```
Next c
```

```
alfa = Array (27029, 9682, 6823, 6082, 3647)
```

```
eph=Array(ξ.۳۸۹۳۸.۰۳۱, ۳.۸۹۷۸۳۸۸۹۹, ۳.۳۷۹۸۹۷۷۸۶, ۳.۲۳۱۲۷.۳۰۸,  
۳.۰۲۴۳۹.۰۲۴۳)
```

```
For c = ۰ To ξ
```

```
eph(c) = eph(c) * ۱.۰ ^ -۱۹
```

```
Next c
```

```
i = Array (۰.۰۱, ۰.۰۲, ۰.۰۳, ۰.۰۴, ۰.۰۵, ۰.۰۶)
```

```
g = alfa (γ) * i (۰) / eph (γ)
```

```
g = g / γ
```

```
For c = ۰ To ۱۲
```

```
i۰ = d * t(c) ^ γ * Exp (-eg(c) / (k * t(c)))
```

```
il = q * a * g * (le + w + lh)
```

```
voc = (k * t(c) / q) * Log ((il / i۰) + ۱)
```

```
isc = i۰ * (Exp (q * voc / (k * t(c))) - ۱)
```

```
vv = voc / (k * t(c) / q)
```

```
ff = (vv - Log (vv + ۰.۷γ)) / (vv + ۱)
```

```
n = (voc * isc * ff) / (a * i (۰))
```

```
grd.TextMatrix(c + ۱, ۰) = Str (t(c))
```

```
grd.TextMatrix(c + ۱, ۱) = Str (i۰)
```

```
grd.TextMatrix(c + ۱, γ) = Str (isc)
```

```
grd.TextMatrix(c + ۱, ξ) = Str (voc)
```

```
grd.TextMatrix(c + ۱, ξ) = Str (ff)
```

```
grd.TextMatrix(c + ۱, ۰) = Str (n)
```

```
Next c
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click ()
```

```
End
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load ()
```

```
For c = 1 To 6
```

```
    grd.ColWidth(c) = grd.ColWidth(c) * 2
```

```
Next
```

```
For c = 1 To 12
```

```
    grd.RowHeight(c) = grd.RowHeight(c) * 2
```

```
Next
```

```
For r = 1 To 12
```

```
    For c = 1 To 6
```

```
        grd.Col = c
```

```
        grd.Row = r
```

```
        grd.CellAlignment = 3
```

```
    Next
```

```
Next
```

```
End Sub
```