

تأثير المقاومة التسلسلية والتفرعية على أداء الخلية الشمسية $\mu\text{c(a)-Si:H}$

الدكتور برهان دالاتي*

الدكتور علي درويشو**

فادي الحصري***

(تاريخ الإيداع 29 / 3 / 2012. قُبِلَ للنشر في 14 / 6 / 2012)

□ ملخص □

يهدف البحث إلى دراسة تأثير المقاومة التسلسلية والتفرعية على أداء الخلايا الشمسية بدلالة درجات حرارة مختلفة تحت تأثير الضوء وفي الظلام، وذلك من خلال دراسة المميز تيار- جهد للخلية الشمسية في مجال حراري واسع (233K-373K)، ومن ثم محاكاة هذه المميزات لإيجاد قيم المقاومة التسلسلية والتفرعية. جرى في هذا البحث دراسة عينة على شكل خلية شمسية (وصلة من النوع p-i-n) مكونة من طبقة من السيليسيوم النقي متوضعة بين بنية السيليسيوم الميكروبلوري والسيليسيوم اللابلوري المهدرج والمشار إليها اختصاراً بالرمز $\mu\text{c(a)-Si:H}$ ، سعياً لتعزيز أداء خلايا السيليسيوم اللابلورية المهدرجة. بينت النتائج أن تأثير المقاومة التسلسلية على أداء الخلية ضعيف، بينما تلعب المقاومة التفرعية دوراً سلبياً في أداء الخلية مع ازدياد درجة الحرارة حيث تؤدي إلى تراجع قيمة معامل الملء وبالتالي إلى تراجع في الاستطاعة المأخوذة من الخلية. أي إنه في درجات الحرارة العالية يجب تحسين قيمة هذه المقاومة لكي يتحسن أداء الخلية.

الكلمات المفتاحية: السيليسيوم اللابلوري المهدرج، السيليسيوم الميكروبلوري، معامل الملء، أداء الخلية الشمسية، المقاومة التسلسلية، المقاومة التفرعية.

* أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - اللاذقية - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - اللاذقية - سورية.

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم القوى - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية، سورية.

Influence of serial and shunt resistance on the performance of solar cell $\mu\text{c(a)-Si:H}$

Dr. Burhan Dalati*
Dr. Ali Darwicho**
Fadi Alhussary***

(Received 29 / 3 / 2012. Accepted 14 / 6 / 2012)

□ ABSTRACT □

The goal of this research is to study the effect of serial and parallel resistance on the performance of solar cells in terms of different temperatures under the influence of light and in darkness. This has been done by studying the current - voltage characteristics of a solar cell at the temperature range between 233 K and 373 K. These characteristics are stimulated to find the values of the serial and parallel resistance. In this study, a sample in the form of solar cell (p-i-n junction) with layer of pure silicon alloy between the structure of microcrystalline silicon and amorphous hydrogenated silicon, referred to short symbol $\mu\text{c(a)-Si:H}$, in order to improve the performance of hydrogenated amorphous silicon cells. The results showed that the effect of serial resistance on cell performance is weak, while the parallel resistance, a negative role in cell performance with increasing temperature which leads to a decrease in the value of fill factor and hence to a decrease in Power taken from the cell. In other words, at high temperatures, we must ameliorate the performance of this resistance in order to get a high quality cell.

Key Words: Hydrogenated amorphous silicon, Microcrystalline silicon, fill Factor, Performance of the solar cell, Serial resistance, Parallel resistance.

* Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate student, Department of mechanical forces, Faculty of Mechanical Engineering and Electrical, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تُشكل مادة السيليسيوم العصب الرئيس لصناعة الخلايا الشمسية، وتستحوذ على النسبة الأكبر من الخلايا الشمسية المنتشرة عالمياً، حيث تتمتع هذه المادة بمواصفات فريدة تجعل منها الخيار الأكيد لهذا التطبيق. فهي من جهة متوفرة بكثرة في الطبيعة، كما أنها مادة غير سامة وتدخل بشكل واسع في صناعة الأدوات اليومية التي يستعملها الإنسان منذ القدم. كما تجعل المواصفات الإلكترونية منها مادة يمكن تطعيمها بسهولة بحيث تُصبح من النوع السالب (n) أو الموجب (p). كما يمكن تصنيعها بناقلية منخفضة أو عالية. وإن عملية أكسدة السيليسيوم السهلة إلى السيليسيوم العازل جعلت منه المادة المفضلة في صناعة الدارات الإلكترونية المتكاملة. كل هذه الخبرات المتراكمة مع السيليسيوم تم الاستفادة منها في موضوع الخلايا الشمسية [1].

وعند صناعة الخلايا الشمسية من السيليسيوم أحادي التبلور والسيليسيوم متعدد التبلور فإن جزءاً كبيراً من التكاليف يذهب عند صناعة الخلية لتصنيع الصفائح وعملية تصنيع الخلية منها. ومن هنا برزت فكرت تصنيع الخلية على أساس أفلام رقيقة مما يختصر عدة خطوات. وبالفعل فإن عملية تصنيع الخلايا على أساس الأفلام الرقيقة خفضت الكثير من تكاليف إنتاج الخلايا، ولكن لكي تتجح عملية إنتاج هذه الخلايا كان من الواجب تحقق عدة شروط أهمها وجود المادة المناسبة بحيث يمكن امتصاص الضوء في فلم رقيق تتناسب سماكته مع سرعة ترسيب منطقية وعملية بحيث تصبح فترة الترسيب قصيرة. من أهم المواد المستعملة في هذا الإطار هي أطوار مختلفة من السيليسيوم اللابلوري مثل السيليسيوم اللابلوري (a-Si:H) amorphous silicon والسيليسيوم المكروبلوري microcrystalline (μc-Si:H) silicon [2].

بعد الانتهاء من عملية تصنيع الخلية الشمسية يتم قياس منحنيات كثافة تيار- جهد لتحديد كفاءة الخلايا الشمسية، ونقطة الاستطاعة العظمى والآليات التي تحد من الكفاءة مثل خسائر المقاومة وإعادة اتحاد الزوج (الكترن - ثقب) [2]. حيث تُعتبر معرفة معاملات الخلية الشمسية من مميز تيار- جهد ذات أهمية كبيرة وذلك لمراقبة جودة وأداء الخلايا الشمسية، وهناك طرائق عديدة لإيجاد قيم هذه المعاملات، وهذه المعاملات هي تيار الإشباع والمقاومة التسلسلية وعامل المثالية والمقاومة التفريعية والتيار الضوئي [3].

كما أن توفر الإشعاع الشمسي باستطاعات أعلى من الاستطاعات المنتشرة في أوروبا وعلى فترات زمنية أطول يجعل تكلفة التيار الشمسي أقل في المنطقة العربية، وإن وجود درجات حرارة أعلى واستطاعات شمسية أعلى في المنطقة العربية يجعل نوعية الخلايا التي تتناسب مع مناخ هذه المنطقة مختلفة. ففي حين تُناسب الخلايا ذات الفجوة الطاقة الصغيرة المناطق الباردة، تُناسب منطقتنا العربية خلايا ذات ثبات حراري أقوى وخاصة الخلايا المصنوعة من مواد تملك فجوة طاقة كبيرة. لأن مردود الخلية مرتبط بالفجوة الطاقة والتي بدورها تُحدد طاقة الفوتونات الممتصة [4].

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في المساهمة في دراسة استقرار أداء الخلايا الشمسية في مجال حراري معين والمصنوعة من السيليسيوم اللابلوري المهدرج في الطور المكروبلوري، كما يهدف إلى دراسة تأثير المقاومة التسلسلية والتفريعية على أداء الخلية للمساهمة في تطوير أداء الخلية الشمسية.

طرائق البحث ومواده:

استخدمت في هذه الدراسة خلية شمسية pin مرسبة باستخدام تقنية (PECVD)، حيث الطبقة P و n من السيليسيوم اللابلوري أما الطبقة (i) النقية فهي مصنوعة من خليط من السيليسيوم اللابلوري والمكروبلوري المهدرج الذي يشكل طوراً مشتقاً من السيليسيوم اللابلوري ويرمز لها اختصاراً $\mu\text{c(a)-Si:H}$.

بلغت درجة حرارة ترسيب الطبقة الذاتية الفعالة من السيليسيوم المكروبلوري 175°C والضغط (1.19mbar)، وبلغ معدل تدفق السيلان SiH_4 (6sccm) والهيدروجين H_2 (200 sccm). بينما بلغت استطاعة البلازما 10W. كما بلغت سماكة الطبقة الذاتية الفعالة 625nm، وذات درجة بلورية منخفضة. وهذا يوضح القسم المنخفض للبنية المكروبلورية المتضمن في منشأ اللابلوري. ولهذا السبب يجب أن تكون الطبقة مأخوذة بعين الاعتبار كخليط بين بنية الميكروبلوري واللابلوري وسيشار إليها كما يلي: $\mu\text{c(a)-Si:H}$.

تم الترسيب على ركيزة زجاجية مغطاة بأوكسيد الزنك ZnO كأوكسيد ناقل شفاف. وبلغت سماكة طبقة السيليسيوم اللابلوري من النوع p ومن النوع n في الديدود pin 25nm و 25nm على التوالي. من أجل القياسات التي أجريت في هذا العمل تم وضع العينة ضمن حجيرة تفريغ (كريوستات) تعمل على الأزوت السائل حيث يمكن لنا التحكم بدرجة الحرارة بين (100K) إلى (450K).

أنجزت الوصلات الكهربائية اللازمة باستخدام مادة الفضة السائلة التي يتم بواسطتها وصل سلكين إلى قطبي العينة ومن ثم إلى قطبي حجيرة التفريغ. هذه الحجيرة مجهزة بنافذة ضوئية من زجاج الكوارتز المطلي بمادة تعمل مرشحاً لتمرير الضوء المرئي فقط.

من أجل قياس مميزات تيار-جهد فقد حصل ذلك باستعمال وحدة قياس من شركة Keithly مزود ببرنامج تحكم على الحاسوب حيث تم الحصول على هذا المنحني من أجل درجات الحرارة بين (233K) و (373K) في الظلام وتحت الإضاءة باستخدام لمبة هالوجين عادية باستطاعة (100W).

من أجل الحصول على معاملات الخلية الشمسية مثل تيار الإشباع ومعامل الجودة ومقاومة التسلسل ومقاومة التفرع وتيار الإضاءة تم ملائمة مميزات تيار جهد التجريبية على المعادلة (1) في الظلام وتحت الإضاءة باستخدام برنامج OriginPro.

الدراسة النظرية:**1- خلايا السيليسيوم اللابلوري المهدرج:**

تختلف تركيبة الخلية الشمسية المصنوعة من السيليسيوم اللابلوري من حيث البنية عن باقي الخلايا الشمسية. فبينما تُصنع الخلايا عادة على شكل وصلة (pn) تُصنع هذه الخلية على شكل وصلة (pin) والسبب في ذلك يعود إلى طول الانتثار الصغير في السيليسيوم اللابلوري. حيث تحوي الخلايا العادية على منطقة نضوب كبيرة حول السطح البيني وتستطيع كل حوامل الشحنة المتولدة في هذه المنطقة المساهمة بالتيار الشمسي. أما في حالة الخلايا الشمسية اللابلورية فتتوضع منطقة ذاتية بين الطبقتين الناقلتين بحيث تتمكن حوامل الشحنة المولدة ضوئياً في هذه المنطقة من الوصول إلى الأقطاب والمساهمة في التيار الضوئي.

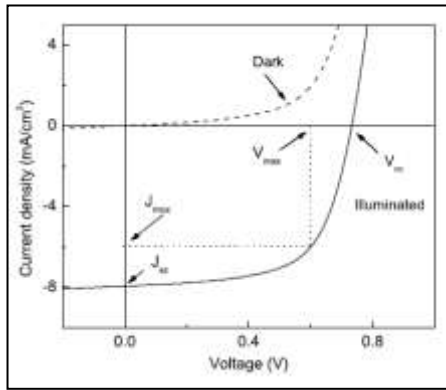
إن وجود هذه الطبقة الذاتية النقل يزيد من طول الانتثار، حيث لم يكن سابقاً من الممكن توليد تيار ضوئي في مثل هذه الخلايا حتى تم إضافة الهيدروجين إلى الطبقات ذاتية النقل وذلك بسبب ارتفاع تركيز العيوب الصائفة لحوامل الشحنة. فعندما يدخل الضوء الشمس كتيار من الفوتونات إلى الخلية الشمسية يتم امتصاصه بواسطة الطبقة (i) وكل

فوتون ممتص يخلق زوجاً (إلكترون - ثقب)، ثم يتحرك الإلكترون باتجاه الطبقة n والثقب إلى الطبقة p بسبب الحقل الكهربائي الموجود بين هذه الطبقات. وهذا لأن الخلايا الشمسية المبنية على أساس الوصلة pin أساسها الانجراف وليس أساسها الانتشار. ثم يُضاف للوصلة (pin) في الجهة التي يرد منها الضوء طبقة ناقلة وشفافة تسمى طبقة الأكسيد الناقل الشفاف (TCO) Transparent Conducting Oxide وفي الجهة الأخرى تُضاف طبقة وصل معدني metal contact وتسمح هاتان الطبقتان بإجراء وصلات معدنية ناقلة تسمح بأخذ التيار [4].

يُرسب السيليسيوم اللابلوري بالدرجة الأولى بطريقة البلازما انطلاقاً من غازات مناسبة حيث تُفكك البلازما الراديوية خليطاً غازياً مكوناً من غاز السيلان (SiH₄) الذي يشكل المصدر التقليدي للسيليسيوم النقي المناسب للصناعة ومن غازات أخرى تُفيد في التطعيم أو الخلط مثل غاز الفوسفين (PH₃) الخ [1].

2- المميز تيار - جهد (IV-characteristic):

تسمى العلاقة ما بين الجهد المطبق على أقطاب الخلية والتيار المار فيها بالمميزة (تيار - جهد). يمكن أن تُقاس



الشكل 1: يبين المنحني المميز تيار - جهد للخلية في حالة الظلام والإضاءة.

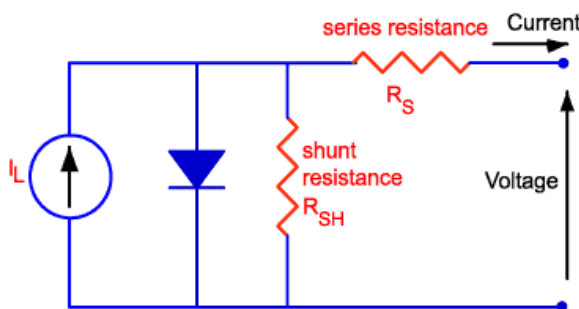
هذه المعطيات بمعزل عن الضوء وتُسمى عندئذ بالمميزة (I-V) في الظلام أو تُقاس تحت تأثير الضوء وتُسمى عندئذ بالميزة (I-V) عند الإضاءة.

وتعتبر الخلية الشمسية بمثابة ثنائي قطب (دايود) عندما تكون غير مضاءة وعند دراسة تغير التيار بدلالة الجهد المطبق في حالتي الانحياز الأمامي والعكسي نحصل على المنحني المنقط المبين في الشكل (1).

عند إضاءة الخلية الشمسية وفي الحالة المثالية سيتولد أزواج من (إلكترون - ثقب) بواسطة الضوء بصورة منتظمة وذلك عندما تكون الخلية مضاءة بضوء

طول موجته مناسب يعطي فوتونات بطاقة أكبر أو تساوي طاقة المجال المحظور في نصف الناقل. وبالتالي عند دراسة علاقة التيار بالجهد المطبق في هذه الحالة سنحصل على المنحني المستمر المبين في الشكل (1) [6]. وبوضوح الشكل (2) الدارة المكافئة للخلية الشمسية بعد الأخذ بعين الاعتبار المقاومة التسلسلية والتفرعية، وبالتالي يمكن أن توصف مميزات تيار - جهد للخلايا الشمسية pin بالمعادلة التالية [5]:

$$J(V) = J_0 \left[\exp\left(\frac{q(V - JR_s)}{AKT}\right) - 1 \right] + \frac{V - JR_s}{R_p} - J_{ph}(V) \quad (1)$$



الشكل (2) يبين الدارة المكافئة للخلية الشمسية بعد الأخذ بعين الاعتبار المقاومة التسلسلية والتفرعية.

حيث: $J(V)$ كثافة التيار الكلي.

V فرق الكمون المتولد بين قطبي الخلية.

R_s المقاومة التسلسلية للديود pin.

R_p المقاومة التفرعية للديود pin.

A عامل المثالية.

J_0 كثافة تيار الإشباع.

T درجة الحرارة المطلقة بالكلفن.

$J_{ph}(V)$ كثافة التيار الضوئي.

يعطي الحدان الأوليان من المعادلة تيار الظلام للديود بينما يضيف الحد الثالث تأثير الضوء. كما نشاهد فإن تيار الضوء هو تيار عكسي يسير في عكس التيار المار في الديود عند تطبيق فرق كمون أمامي مما يجعل إمكانية استثمار الخلية كمنبع تيار صالح في الربع الرابع من مخطط تيار جهد. ويمكن استخراج القدرة الخارجة من الخلية الشمسية في الشكل السابق وذلك برسم أكبر مستطيل ممكن ضمن المنحني الموجود في الربع الرابع حيث تُمثل مساحته هذه القدرة.

3-بارامترات الخلية الشمسية:

تُستخدم عادة أربع بارامترات مميزة لدراسة ما يخرج من الخلية الشمسية، الشكل (1). وهذه البارامترات هي:

1- تيار دارة القصر I_{sc} (short circuit current): ويساوي التيار الناتج بواسطة الضوء عند فرق كمون قيمته صفر، أي يتم الحصول عليه عند قصر الدارة.

$$=J_{ph} I_{sc} \quad (2)$$

حيث J_{sc} : كثافة تيار دارة القصر.

2- جهد الدائرة المفتوحة V_{oc} (open circuit voltage): ونحصل عليه عندما لا يمر تيار عبر الخلية،

أي بجعل التيار معدوماً في المعادلة (1)، وبالتالي نجد أن:

$$= \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) V_{oc} \quad (3)$$

وتتحد قيمة V_{oc} بخصائص نصف الناقل لاعتمادها على تيار الإشباع، ولا تتولد أي قدرة في الدارة المفتوحة أو المقصورة. وتؤخذ الاستطاعة من الخلية عند نقطة الاستطاعة العظمى P_m أي عند النقطة العاملة المعينة بـ I_{mp} ، V_{mp} ، في الربع الرابع وتكون مساوية لمساحة المستطيل في الشكل (1)، بحيث نجعل هذه الاستطاعة أكبر ما يمكن. أي:

$$P_m = J_m \cdot V_m \quad (4)$$

3- عامل الملاء FF : وهو يعطي نسبة السطح المحصور عند نقطة العمل المثلى إلى السطح المحصور من

مميزات تيار - جهد في الربع الرابع للخط البياني. أي هو مقياس لمدى مربعة خصائص الخرج [6].

$$FF = \frac{J_{mp} \cdot V_{mp}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (5)$$

4- مردود تحويل الطاقة الشمسية μ (المردود) فيمكن التعبير عنها بالعلاقة التالية:

$$\mu = \frac{J_{mp} \cdot V_{mp}}{M} = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{M} \quad (6)$$

حيث M تُمثل القدرة الكلية للضوء الداخل إلى الخلية. ومعدل كفاءة تحويل الطاقة الشمسية للخلايا الشمسية

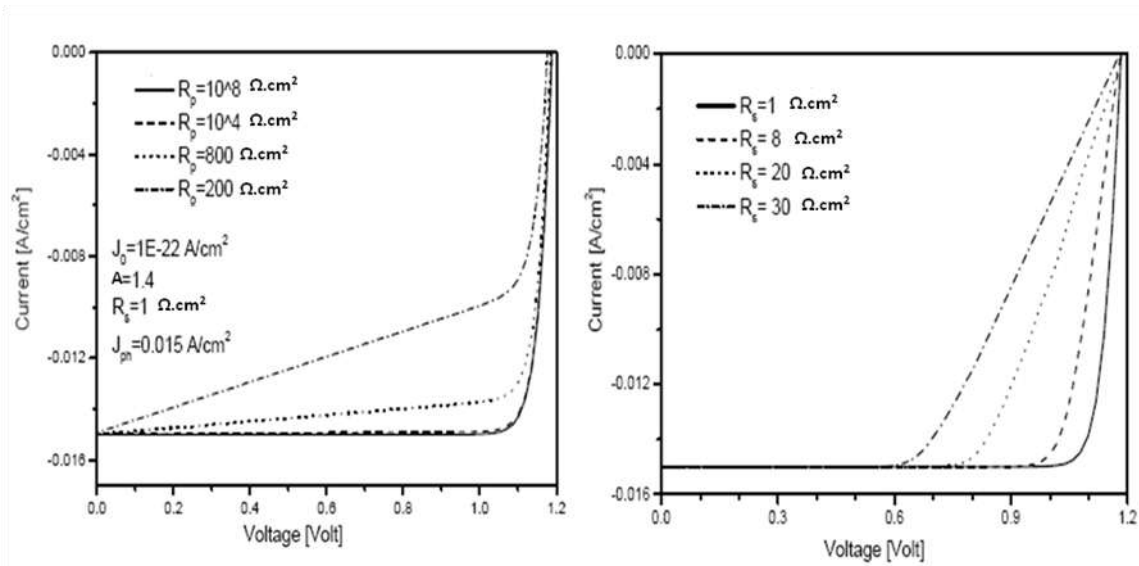
التجارية يقع عادة بين (12%-14%) [6].

4-تأثير مقاومة التسلسل والتفرعية على مميزات تيار - جهد:

للمقاومة التسلسلية في الخلية الشمسية ثلاثة مصادر: أولاً مقاومتا الطبقتين المشكلتين للوصلة أي مقاومة الطبقة الماصة السطحية والطبقة المجمع، ثانياً مقاومة التلامس بين معدن الوصل والسيليسيوم، ثالثاً مقاومة الوصلات العلوية والسفلية. والتأثير الرئيسي لمقاومة التسلسل هو التقليل من عامل الملاء، على الرغم من أن القيم العالية جداً، ربما تقلل أيضاً من تيار دارة القصر. أما المقاومة التفرعية فتسبب خسائر كبيرة في القدرة، وعادة ما تكون نتيجة عيوب في التصنيع وتسريبات عند حواف الخلية، وإن انخفاض هذه المقاومة يتسبب في خسائر القدرة في الخلايا الشمسية من

خلال إزاحة مسار التيار المتولد ضوئياً، مثل هذا الانحراف يقلل من التيار الذي يتدفق من خلال وصلة الخلايا الشمسية وكذلك يقلل من الجهد للخلايا الشمسية [7,8].

يعرض الشكل (3) تأثير مقاومة التسلسلية في الجزء الأيمن وتأثير مقاومة التفرعية في الجزء الأيسر على تيار الإضاءة. كما هو واضح فإن تأثير المقاومة التسلسلية قوي عند فرق كمون موجب كبير وخاصة عندما يكبر التيار ويسبب ميولاً في الجزء الصاعد من التيار. بينما نلاحظ أن تأثير المقاومة التفرعية يشد عند فولتات أصغر ويظهر ميولاً قوياً عند نقطة الصفر فولت كلما صغرت المقاومة التفرعية. في كلا الحالتين ومن أجل معامل ملء كبير للخلية نحتاج إلى مقاومة تسلسلية أصغر ومقاومة تفرعية أعظمية مما يجعل شكل مميزات تيار - جهد أقرب إلى المربع في الربع الرابع من مميزات تيار جهد. وبالتالي فإن القدرة على التحكم بهذه القيم وتغييرها في الاتجاه المطلوب قدر الإمكان يُطور أداء الخلية.

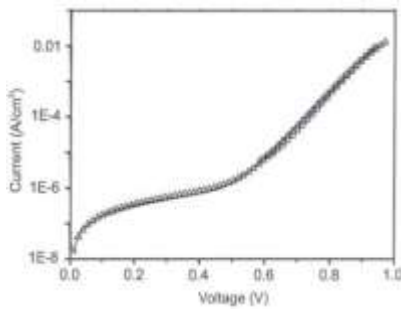


الشكل 3: تأثير مقاومة التسلسلية في الجزء الأيمن وتأثير مقاومة التفرعية في الجزء الأيسر على تيار الإضاءة.

النتائج والمناقشة:

1- مميزات تيار - جهد للخلية تحت الظلام:

يعرض الشكل (4) مميزات تيار - جهد المقاسة في الظلام وعملية ملائمتها حسب العلاقة (1) عند درجة الحرارة (T=303K). وكما هو واضح تُظهر عملية الملاءمة تطابقاً كبيراً مع النتائج التجريبية علماً أن النقاط تمثل القياسات بينما يمثل الخط المتصل عملية الملاءمة.



الشكل (4) يبين مميزات تيار - جهد للخلية في الظلام وعملية ملائمتها عند درجة الحرارة (T=303K).

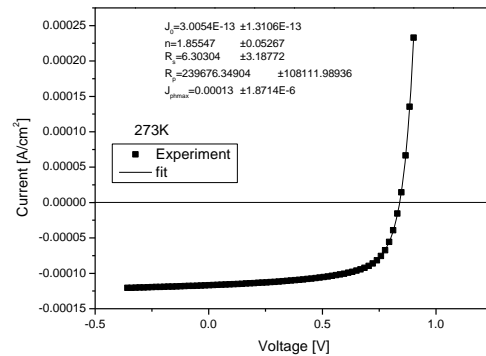
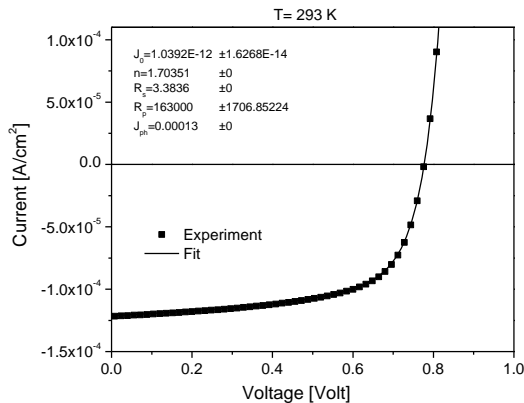
يعرض الجدول (1) معاملات الخلية الشمسية المصنوعة السيليسيوم المكروبلوري المهدرج المستتجة بواسطة عملية الملاعة لمميزات (تيار - جهد) المقاسة في الظلام عند درجات حرارة مختلفة. كما هو واضح تتأثر قيم مقاومتي التسلسل والتفرع بشكل قوي بدرجة الحرارة، حيث تتغير مع درجة الحرارة كما هو متوقع كونها مصنعة من مواد نصف ناقلة، مع ملاحظة أن مقاومة التفرع تتخفض بشكل قوي عند درجات الحرارة العالية مما يؤثر سلباً على أداء الخلية علماً أن هذه المشكلة تُعتبر رئيسة بالنسبة لهذا النوع من الخلايا وتحتاج إلى دراسة كي يتم التمكن من رفع قيمة هذه المقاومة وخفض التيارات الموازية التي تُضعف من مردود الخلية.

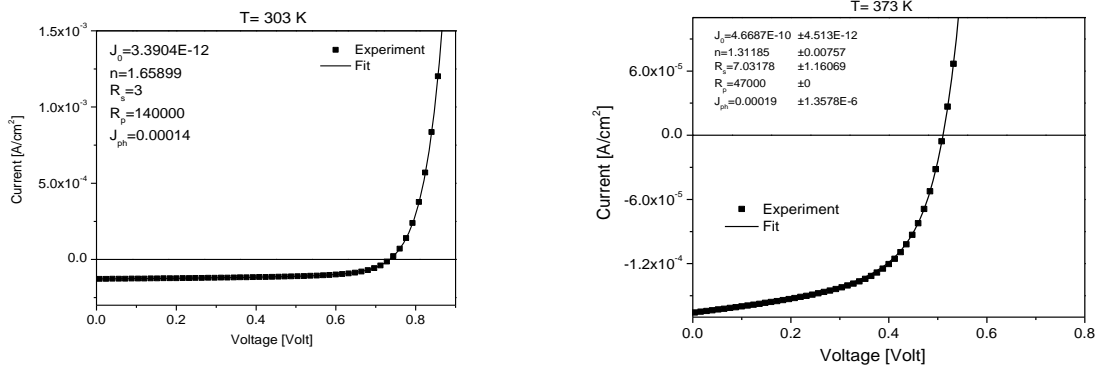
الجدول(1): يعرض قيم معاملات الخلية الشمسية الناتجة من عملية ملاعة مميزات تيار - جهد التجريبية.

T	$J_0(\text{A}/\text{cm}^2)$	A	$R_s(\Omega.\text{cm}^2)$	$R_p(\Omega.\text{cm}^2)$
233	1.03E-14	2.21	27	7E6
243	7.90E-15	2	23.24	4.6E6
253	8.60E-15	2	11.265	3.4E6
263	6.10E-14	1.86	11	2.5E6
273	4.00E-13	1.85	8.5	1.7E6
283	1.12E-12	1.78	5.4	1.05E6
293	3.17E-12	1.75	3.8	800000
303	8.02E-12	1.7	2.6	600000
313	1.90E-11	1.65	2.2	450000
323	5.30E-11	1.63	1.6	360000
333	1.29E-10	1.6	2	300000
343	4.08E-10	1.6	1.1	230000
353	6.58E-10	1.58	1.8	217000
363	2.50E-09	1.59	2.894	160000
373	6.40E-09	1.6	4.001	125000

2- قياسات مميزات تيار - جهد للخلية تحت تأثير الضوء:

نظراً للعدد الكبير من مميزات تيار - جهد بدلالة درجات حرارة مختلفة في المجال (233K-373K) سنكتفي بعرض بعض المميزات عند درجات حرارة مختلفة. يعرض الشكل (5) بعض مميزات تيار - جهد للخلية في درجات حرارة مختلفة. تعرض النقاط القيم التجريبية بينما تعرض الخطوط المتصلة الملائمة، كما هو واضح تحاكي عملية الملاعة القيم التجريبية إلى حد كبير وبالتالي تعطي قيم المعاملات بشكل جيد وخاصة قيم التيار الضوئي وقيم مقاومة التفرع ومقاومة التسلسل اللتان تؤثران بشكل قوي على شكل المنحني عند المرور بمحور التيار وعند قيم كمون عالية.





الشكل (5): يبين بعض مميزات تيار - جهد للخلية في درجات حرارة مختلفة. حيث $R_s(\Omega.cm^2)$: المقاومة التسلسلية، $R_p(\Omega.cm^2)$: المقاومة التفرعية، $J_0(A/cm^2)$: كثافة تيار الإشباع، $J_{ph}(A/cm^2)$: كثافة التيار الضوئي.

يلاحظ من الشكل (5) انزياح الخط البياني للمميزات بالاتجاه السالب للتيار مما يشير إلى تولد تيار شمسي في الخلية. كما يُلاحظ أن الخط البياني للمميزات عند فرق كمون يساوي الصفر يُظهر ميولاً واضحة إلى وجود مقاومة تفرع صغيرة تحت تأثير الضوء. يلعب هذا التراجع في المقاومة دوراً سلبياً في أداء الخلية ويبدو أنه حالة عامة في الخلايا المصنوعة من السيليسيوم المهدرج على أساس الأفلام الرقيقة. يقود هذا التراجع في قيمة المقاومة إلى تراجع في قيمة معامل الملء وبالتالي إلى تراجع في الاستطاعة المأخوذة من الخلية. لهذا يجب تحسين قيمة هذه المقاومة من أجل تحسين أداء الخلية وهذا يمر عبر فهم آلية نشوء مقاومة التفرع وخاصة تحت تأثير الضوء حيث يبدو أن هذا التأثير عكس يتراجع عند التعنيم على الخلية.

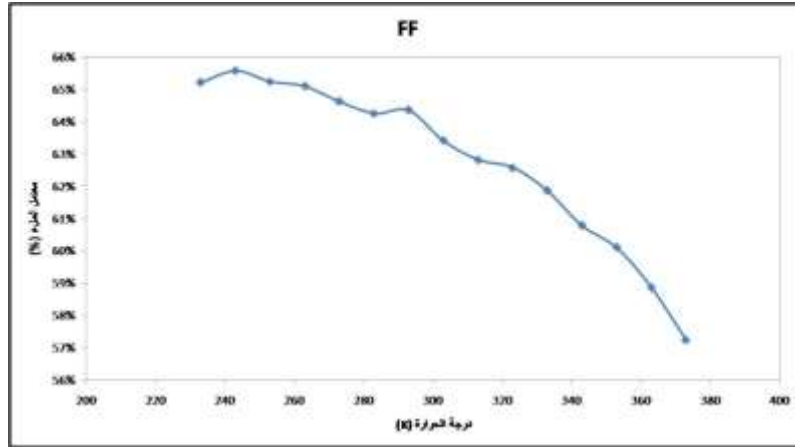
وعلى العكس من ذلك تبدي بقية المعاملات تأثيراً خفيفاً إن لم يكن معدوماً تحت تأثير الضوء وبالتالي تبدو مشكلة المقاومة التفرعية مشكلة مفصلية بالنسبة لأداء الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليسيوم المهدرج على أساس أفلام رقيقة.

الجدول (2) يعرض نتائج بارامترات خلية السيليسيوم الميكروبلورية المهدرجة من أجل درجات حرارة مختلفة.

T (K)	$J_{sc}(A/cm^2)$	$V_{oc}(volt)$	$JV_{max}(watt/cm^2)$	FF
233	1.06E-04	0.951	6.56E-05	65%
243	1.09E-04	0.926	6.59E-05	66%
253	1.09E-04	0.9	6.40E-05	65%
263	1.16E-04	0.867	6.52E-05	65%
273	1.17E-04	0.838	6.33E-05	65%
283	1.20E-04	0.796	6.15E-05	64%
293	1.22E-04	0.775	6.07E-05	64%
303	1.28E-04	0.734	5.95E-05	63%
313	1.32E-04	0.701	5.83E-05	63%
323	1.39E-04	0.672	5.85E-05	63%
333	1.42E-04	0.639	5.62E-05	62%
343	1.47E-04	0.606	5.42E-05	61%
353	1.52E-04	0.579	5.29E-05	60%
363	1.59E-04	0.542	5.06E-05	59%
373	1.66E-04	0.51	4.84E-05	57%

وتبين نتائج الجدول (1) ارتفاع جهد الدارة المفتوحة مع انخفاض درجة الحرارة، وارتفاع قيمة تيار دارة القصر مع ارتفاع درجة الحرارة.

كما نلاحظ من أشكال المميزات تيار- جهد عند درجات حرارة مختلفة في الربع الرابع كيف يتغير شكل المميزات مشيراً إلى ارتفاع معامل الملء عند انخفاض درجة الحرارة وبالتالي ارتفاع المردود، أما عند درجات الحرارة المرتفعة فيلاحظ تراجع معامل الملء، وبالتالي انخفاض المردود. كما في الشكل (6).



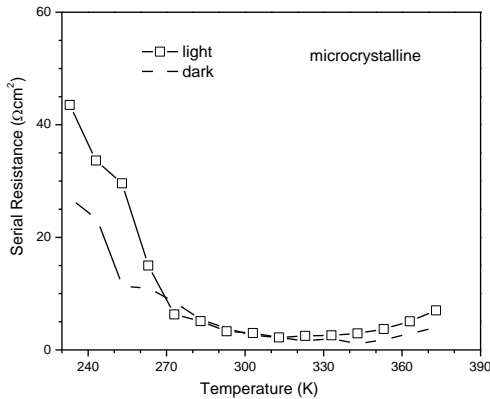
الشكل (6): يبين ارتفاع معامل الملء عند انخفاض درجة الحرارة

T (K)	$J_0(\text{A/cm}^2)$	A	$R_s(\Omega.\text{cm}^2)$	$R_p(\Omega.\text{cm}^2)$	$J_{phmax}(\text{A/cm}^2)$	$J_{sc}(\text{A/cm}^2)$	$V_{oc}(\text{volt})$	$JV_{max}(\text{watt/cm}^2)$
233	8.00E-14	2.4	43.51873	2.60E+06	1.14E-04	1.06E-04	0.951	6.56E-05
243	1.38E-13	2.25	33.64359	2.00E+06	1.16E-04	1.09E-04	0.926	6.59E-05
253	2.18E-13	2.12	29.60272	1.70E+06	1.20E-04	1.09E-04	0.9	6.40E-05
263	2.25E-13	1.97	15	1.50E+06	1.26E-04	1.16E-04	0.867	6.52E-05
273	3.00E-13	1.85	6.3	239000	1.30E-04	1.17E-04	0.838	6.33E-05
283	3.43E-13	1.71	5.1	220000	1.32E-04	1.20E-04	0.796	6.15E-05
293	1.03E-12	1.7	3.3	163000	1.37E-04	1.22E-04	0.775	6.07E-05
303	3.39E-12	1.65	3	140000	1.40E-04	1.28E-04	0.734	5.95E-05
313	7.24E-12	1.6	2.2	130000	1.46E-04	1.32E-04	0.701	5.83E-05
323	2.52E-11	1.6	2.5	68000	1.50E-04	1.39E-04	0.672	5.85E-05
333	4.15E-11	1.54	2.6	62000	1.57E-04	1.42E-04	0.639	5.62E-05
343	7.10E-11	1.46	2.92849	56000	1.60E-04	1.47E-04	0.606	5.42E-05
353	9.12E-11	1.37	3.72872	52000	1.70E-04	1.52E-04	0.579	5.29E-05
363	3.43E-10	1.38	5.09081	51000	1.80E-04	1.59E-04	0.542	5.06E-05
373	4.66E-10	1.32	7.03178	47000	1.90E-04	1.66E-04	0.51	4.84E-05

بالمقارنة بين بارامترات الخلية الشمسية المصنوعة من السيليسيوم المكروبلوري المهدرج في حالة الظلام

وتحت تأثير الإضاءة نجد مايلي:

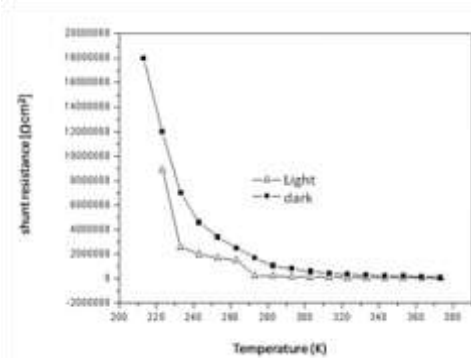
أولاً- مقاومة التسلسل (R_s):



الشكل (7): يبين قيم المقاومة التسلسلية للخلية تحت الإضاءة وفي الظلام عند درجات الحرارة مختلفة.

يعرض الشكل (7) قيم المقاومة التسلسلية المستخرجة من مميزات تيار- جهد للخلية تحت الإضاءة وفي الظلام عند درجات الحرارة مختلفة، ويلاحظ من هذا الشكل بأن المقاومة تزداد بسرعة مع تناقص درجة الحرارة وتأخذ قيمة أعلى في حالة الإضاءة من حالة الظلام وعند درجات الحرارة الأعلى من (270K) والقريبة من الصفر المئوي فإن تطابق قيم المقاومة في حالتي الظلام والإضاءة واضح ويشير إلى فعالية مبدأ التراكب الممتاز على حين الاختلاف يصبح ملحوظاً في درجات الحرارة المنخفضة (تحت 260K) ويمكن أن يعود ذلك على الأرجح إلى تغير جوهري في آلية النقل الكهربائي لحوامل الشحنة.

ثانياً - مقاومة التفرع (R_p):



الشكل (8): يبين قيم المقاومة التفرعية للخلية تحت الإضاءة وفي الظلام عند درجات الحرارة مختلفة.

كما يُلاحظ من مميزات تيار- جهد للخلية بأنها تُظهر ميولاً واضحة عند فرق كمون يساوي الصفر وهذا يُشير إلى وجود مقاومة تفرع صغيرة تحت تأثير الضوء. ويوضح الشكل (8) قيمة مقاومة التفرع المستنتجة من عملية الملاءمة عند درجات مختلفة في حالتي الظلام والإضاءة، حيث يُلاحظ تراجع قيمة هذه المقاومة مع ازدياد درجة الحرارة ويلعب هذا التراجع في المقاومة دوراً سلبياً في أداء الخلية ويبدو أنه حالة عامة في الخلايا المصنوعة من السيليسيوم المهدرج على أساس الأفلام الرقيقة. ويقود هذا التراجع في قيمة المقاومة إلى تراجع في قيمة

معامل الملاءمة وبالتالي إلى تراجع في الاستطاعة المأخوذة من الخلية. كما يُلاحظ بأن فروق قيمة معامل مقاومة التفرع تكون طفيفة وغير ذات أهمية عند درجات الحرارة المرتفعة بين حالتي الظلام والإضاءة ثم تصبح الفروق جلية في درجات الحرارة المنخفضة.

الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال الدراسة السابقة تم الحصول على النتائج التالية:

1- يُلاحظ تراجع قيمة المقاومة التفرعية مع ازدياد درجة الحرارة ويلعب هذا التراجع في المقاومة دوراً سلبياً في أداء الخلية. حيث يؤدي هذا التراجع في قيمة المقاومة إلى تراجع في قيمة معامل الملاءمة وبالتالي إلى تراجع في الاستطاعة المأخوذة من الخلية. كما يُلاحظ بأن فروق قيمة المقاومة التفرعية بين حالتي الظلام والإضاءة تكون طفيفة

وغير ذات أهمية عند درجات الحرارة المرتفعة، ثم تصبح الفروق جلية في درجات الحرارة المنخفضة. مما يشير إلى أن التيارات المتسربة كثيرة وقد يكون ذلك عائداً إلى وجود عيوب قد تُسرب تيارات على سطوحها مما يقود إلى تردي الخلية الشمسية.

2- تُظهر مقاومة التسلسل قيمةً صغيرة عند درجات حرارة الأعلى من (270 K) مما يشير إلى جودة أفضل في الوصلة الكهربائية كما يشير أيضاً إلى تأثير ضعيف على أداء الخلية.

3- يُلاحظ أيضاً بأن تيارات الإشباع تأخذ قيمةً كبيرة ويمكن إرجاع ذلك إلى وجود عيوب والتي تؤثر بشكل كبير على أداء الخلية.

4- يُلاحظ أيضاً بأن معامل الملاء لدى السيليسيوم المكروبلوري يتمتع بثباتية حرارية مع رفع درجة الحرارة من (230 K) حتى (270 K) حيث تكون نسبة تراجع قيمة معامل الملاء صغيرة بينما تزداد نسبة التراجع عند درجات الحرارة الأعلى من (270 K) وبالتالي يكون المردود منخفضاً.

5- نستنتج بأن مردود الخلية الشمسية المصنوعة من السيليسيوم المكروبلوري المهدرج ضعيف عند درجات الحرارة المرتفعة. أي إنه في درجات الحرارة العالية لا يُفضل حالياً هذا النوع من الخلايا.

وفي نهاية هذا البحث نخلص إلى إنه يجب العمل على التحكم بقيم مقاومة التسلسل والتفرع وتغييرها في الاتجاه المطلوب قدر الإمكان، لما لها من فائدة كبيرة تتمثل في تطوير أداء الخلية الشمسية. كما يُعد تحسين مواصفات الخلية من جهة مقاومة التفرع ومن جهة تيار الإشباع عملاً أساسياً للوصول إلى مردود أفضل وخاصة عند درجات الحرارة المرتفعة.

المراجع:

- 1- HASBULLAH, BIN. ANTHONY HASBI, Structural properties of hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) thin film grown via radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (rf pecvd), Faculty of Science, Universiti Teknologi Malaysia, JUNE 2005, pp. 1,8-10,27-36.
- 2- CHOPRA, K. L. PAULSON, P. D.; DUTTA,V. Thin-Film Solar Cells, progress in photovoltaics: research and applications, 2004; 12:69–92.
- 3- M. Chegaar, Z. Ouennoughi, F. Guechi, and H. Langueur, Determination of Solar Cells Parameters under Illuminated Conditions, Journal of Electron Devices, Vol. 2, 2003, pp.17-21.
- 4- A. Luque and S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-471-49196-9, 2003, pp. 99-100.
- 5- Jan Willem Schüttauf, Thin Film Silicon Triple Junction Solar Cells: Device Characterization and Simulated Outdoor Performance, Universiteit Utrecht, Physics of Devices, 2007.01, NWS-I-2007-6.
- 6- الدكتور فاطمة الحلموشي والدكتور تيسير فرقماز، "فيزياء الطاقة" جامعة البعث، كلية العلوم، 2006-2007، 372-366.
- 7- أ.لوجي و ج.أ.روجي، ترجمة دنور الدين الأخوة، د.عبد الوهاب شيخ روجو، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم، "الخلايا الشمسية من المكونات إلى الجهاز ومن الجهاز إلى التطبيقات"، (1994)، 296-293.
- 8- www. pveducation.org, 27/01/2012.