

Studying the effect of temperature and resistances of series (R_s) and parallel (R_{sh}) on the performance of the solar cell (FTO/Zn₂SnO₄/CdS:O/CdTe/Cu₂Te) using the SCAPS-1D program

Awad Khudair Mahmoud^{1*}, Raad Ahmed Rasoul²

^{1,2}Department of Physics, Education College for Pure Science, University of Mosul, Mosul, Iraq

E-mail: ^{1*}wwd1876@gmail.com, ²dr.raadrasool@yahoo.com

(Received July 07, 2022; Accepted September 22, 2022; Available online December 01, 2022)

DOI: [10.33899/edusj.2022.134830.1264](https://doi.org/10.33899/edusj.2022.134830.1264), © 2022, College of Education for Pure Science, University of Mosul.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract

For the purpose of knowing the effect of temperature, series resistance and parallel resistance on the performance of the solar cell (FTO/ Zn₂SnO₄/ CdS:O/ CdTe/ Cu₂Te), Using the simulation program SCAPS-1D, the study was carried out in three stages. The first stage of this study is to study the effect of temperature on the parameters of the solar cell. It was found that the efficiency η decreases with increasing temperature. The second stage is to study the effect of series resistance (R_s) as an external factor and it was found that increasing the series resistance reduces the performance of the solar cell. The third stage of the study is to study the effect of parallel resistance (R_{sh}) as an external factor as well on the performance of the solar cell. It was also found that increasing the parallelism resistance improves the performance of the solar cell and increases the output parameters. All phases of the study were installed by installing the default lighting spectrum on the global scale Am1.5, the temperature is 300K, the frequency is 1MHz, and the voltage is 0V. Also, the series resistance (R_s) and the parallel resistance (R_{sh}) were not activated in the first stage of the research, considering that the cell is an ideal cell.

Keyword: SCAPS-1D simulation program, series resistance (R_s) and parallel resistance (R_{sh}), the effect of temperature on the solar cell

دراسة تأثير درجة الحرارة ومقاومتي التوالي (R_s) والتوازي (R_{sh}) على أداء الخلية الشمسية SCAPS-1D باستخدام برنامج (Cu₂Te/CdTe/CdS:O/Zn₂SnO₄/FTO)

عوض خضير محمود^{1*}، رعد أحمد رسول²

^{2,1*} قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، الموصل، العراق

الخلاصة:

لغرض معرفة تأثير كل من درجة الحرارة ومقاومة التوالي ومقاومة التوازي على أداء الخلية الشمسية (FTO/Zn₂SnO₄/CdS:O/CdTe/Cu₂Te)، باستخدام برنامج المحاكاة SCAPS-1D تمت الدراسة على ثلاث مراحل. المرحلة

الأولى من هذه الدراسة هي دراسة تأثير درجات الحرارة على معلمات الخلية الشمسية باستخدام برنامج المحاكاة إذ وجد أن الكفاءة η تتناقص مع زيادة درجات الحرارة. والمرحلة الثانية دراسة تأثير مقاومة التوالي (R_s) كعامل خارجي ووجد أن زيادة مقاومة التوالي تعمل على خفض أداء الخلية الشمسية والمرحلة الثالثة دراسة تأثير مقاومة التوازي (R_{sh}) كعامل خارجي أيضاً على أداء الخلية الشمسية، كما وجد أن زيادة مقاومة التوازي تعمل على تحسين أداء الخلية الشمسية وزيادة معلمات الإخراج. جميع مراحل الدراسة تمت بتثبيت طيف الإضاءة الافتراضي على المقياس العالمي Am1.5 ودرجة الحرارة 300K والتردد 1MHz والفولتية 0V، كما أن مقاومة التوالي Series Resistance (R_s) ومقاومة التوازي Shunt Resistance (R_{sh}) لم يتم تفعيلها في المرحلة الأولى للبحث عن إعتبار أن الخلية هي خلية مثالية.

الكلمات المفتاحية: برنامج المحاكاة SCAPS-1D، مقاومة التوالي (R_s) ومقاومة التوازي (R_{sh})، تأثير درجات الحرارة على الخلية الشمسية

1-1 المقدمة Introduction

بسبب الازدياد المتسارع على الطاقة الكهربائية في العقود الأخيرة وكون مصادر الوقود الحالية أصبحت مكلفة التي بدأت تتضرب فاصبح البحث عن مصادر بديلة للطاقة أمراً ضرورياً ومن هذه الطاقات هي الطاقة الشمسية ومن هنا بدأت فكرة كيفية تحويل هذه الطاقة إلى طاقة كهربائية ومن هنا بدأت فكرة صناعة الخلايا الشمسية. إن فكرة صناعة الخلايا الشمسية قديمة فقد صنع أول فرن يستخدم الطاقة الشمسية على يد العالم إنطوان لافوزيه [1] 1772. تُعد الخلايا الشمسية متعددة البلورات (Poly crystalline) من تطبيقات الأغشية الرقيقة المهمة وتعد هذه الخلايا واعدة في مجال تحويل الطاقة الكهربائية هي أفضل من نظيراتها من خلايا الأغشية الرقيقة لأنها أقل كلفة وأعلى نسبة [2]. الخلايا الشمسية هي نبائط ضوئية تعمل على تحويل الأشعة الكهرومغناطيسية الآتية من الشمس إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام، تعتبر الخلايا الشمسية المعتمدة على كادميوم تيلوريد (CdTe) من أفضل المرشحات لصناعة خلايا تحويل الطاقة الكهروضوئية. وذلك بسبب الامكانية العالية لهذه المادة على تكوين خلايا شمسية قليلة التكلفة وكفاءة عالية وذات استقرارية تشغيل عالية [3]، كذلك تمتاز بان لها فجوة طاقة شبه مثالية بحدود 1.45eV وتعتبر فجوة مثالية لأن أغلب الطيف المرئي يُمتص عند $E_g = 1.5eV$ وأن معامل الامتصاص البصري لهذه الأغشية (α) عالٍ بحدود أكبر من 10^4 cm^{-1} فبذلك يكون إمتصاص الضوء الساقط على الخلية تقريبا 100% عندما يكون سُمك الغشاء بحدود $2\mu\text{m}$ و 90% عندما يكون سُمك الغشاء $1\mu\text{m}$ [4-5]. توجد مخاوف تتعلق بما يُثار بسمية عنصر الكادميوم، لكن وفقاً لدراسة حديثة أنه مادامت كمية عنصر الكادميوم المستخدمة في هذه الخلايا قليلة جداً ومادام مغطى بالزجاج بصورة كاملة، فان تأثيره البيئي لا يكاد يُذكر [6]. المقصود بالتأثير الكهروضوئي هو عملية توليد فرق جهد عند مفرق مادتين مختلفتين نتيجة لسقوط الضوء المرئي أو غيره عليه، بذلك فان الخلية الشمسية عبارة عن نبيطة ذات طرفين وفي الظلام تعمل كدايود مقوم وتولد الجهد الكهروضوئي عند إضاءتها بشعاع الشمس ولذا تظهر لنا منحنيات (I-V)، إذ يعتمد عمل الخلايا على التأثير الكهروضوئي معتمد على عدد من الخطوات الرئيسية من أهمها:

- 1- إمتصاص الفوتون وتوليد الإلكترونات الحرة.
- 2- توجيه الإلكترونات الحرة المتولدة إلى الحمل الخارجي .
- 3- نفاذ الفوتون الساقطة إلى القسم النشط من الخلية الشمسية.
- 4- الخروج الانتقائي للإلكترونات إلى جهات الاتصال (2 على الأقل).

عندما تكون طاقة الفوتون الساقطة من الشمس إلى طبقة الإمتصاص في الخلية كافية لفصل الإلكترونات عن الفجوات ومن الممكن ان تكون طاقة الفوتون بقدر يمكنها من نقل الإلكترونات في منطقة التكافؤ إلى منطقة التوصيل في الشريحة السالبة n-Type، وتنتقل الفجوات إلى منطقة التوصيل بالشريحة الموجبة p-Type، لينتج عن ذلك فرق جهد بين p-n، ويمكننا بعد الربط بين السطحين بواسطة موصل كهربائي الحصول على تيار كهربائي حيث تنتقل الإلكترونات من n-Type إلى p-Type خلال الدائرة الكهربائية وبذلك تتحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية [7].

1-الجانب النظري Theoretical side

أثبتت المحاكاة الرقمية لأجهزة الخلايا الشمسية على مر السنين أنها كانت فعالة في دراسة وفهم الكثير من الخواص الفيزيائية للخلايا الشمسية المعقدة، أستخدم في هذه الدراسة برنامج المحاكاة الحاسوبي (SCAPS-1D) Solar Cell Capacitance Simulator للخلية المكونة من سبع طبقات كحد أقصى مع خصائص أخرى متغيرة. برنامج المحاكاة SCAPS-1D يعمل على حل معادلات أشباه الموصلات الأحادية البعد مثل معادلة الإستمرارية Continuity Equation ومعادلة بوايزون Poisson's Equation وكثافة حاملات الشحنة الموجبة (الإلكترونات والفجوات)، إذ تحتوي هذه المعادلة على معادلات الانجراف والتي يُسببها المجال الكهربائي ومعادلة الإنتشارية التي يُسببها الاختلاف في تركيز حاملات الشحنة وإعادة التركيب، وهذه المعادلات تكون على النحو الآتي:

a - معادلة بوايزون Poisson's Equation تربط هذه المعادلة بين معادلة كثافة الشحنات Charge density Equation وجهد

الإلكترونات Electrical Potential (الجهد الكهروستاتيكي Φ)، وتعتبر هذه المعادلة هي بداية الحصول على حل نوعي

للمتغيرات في الكهربائية الساكنة في أشباه الموصلات.
$$\frac{d}{dx} (-\epsilon(x) \frac{d\theta}{dx}) = q[p(x) + n(x) + N_D^+(X) - N_A^-(X) +$$

$$p_t(x) - n_x(x)$$

إذ أن $-p$ تمثل كثافة الفجوات الحرة و n تمثل كثافة الإلكترونات الحرة.

أما $N_D^+(X) - N_A^-(X)$ - تمثلان كلا من كثافة القابلات والمانحات المتأينة على التوالي.

و $p_t(x) - n_t(x)$ - تمثلان كلا من كثافة الإلكترونات والفجوات المقيدة على التوالي.

و ϵ - يمثل ثابت العزل الكهربائي للوسط.

يستطيع برنامج SCAPS-ID أن يحدد المتغيرات غير المعروفة عن محاكاة الخلية الشمسية مثل تركيز حاملات p, n وكذلك الجهد

الكهربائي (Φ) [8].

b- كثافة الحاملات Carrier Density

تتحرك ناقلات الشحنة (الإلكترونات والفجوات) في شبه الموصل بسبب تأثير قوى مختلفة من المجالات الكهربائية والمغناطيسية، فيكون الإنتشار Diffusion ناتجاً عن الفرق في تركيز حاملات الشحنة عند تسليط مجال كهربائي على شبه الموصل ستتحرك الشحنات بفعل هذا المجال وهذه الحركة تسمى الإنجراف Drift، حيث تتحرك الشحنات الموجبة باتجاه والشحنات السالبة باتجاه معاكس عليه فان كثافة التيار الناتج من الإنتشار سيتمثل بالمعادلات الآتية [9]:

$$J_{diff} = J_{ndiff} + J_{pdiff} \dots \dots \dots (2)$$

$$J_{diff} = q \left(D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right) \dots \dots \dots (3)$$

أما كثافة التيار من الإنجرافية فانه يتمثل بالمعادلات الآتية:

$$J_{drif} = J_{ndrif} + J_{pdrif} \dots \dots \dots (4)$$

$$J_{drif} = nq(\mu_n + \mu_p)E \dots \dots \dots (5)$$

إذ أن $-D$ تمثل ثابت معامل الانتشار و $-q$ الشحنة الكهربائية و μ_n, μ_p - التحركية لكل من الفجوات والإلكترونات على التوالي و $-E$ تمثل المجال الكهربائي.

يمكن حساب كثافة التيار الكلي J_n (الإلكترونات) الناتج عن مركبتي الانتشار والإنجراف، كما يأتي [9]:

$$J_n = J_n(\text{drift}) + J_n(\text{diffusion}) \dots \dots \dots (6)$$

$$J_n = qn\mu_n E + q D_n \frac{dn}{dx} \dots \dots \dots (7)$$

أما العلاقة بين التحركية μ وثابت الانتشار D_n تكون وفقاً لمعادلات أينشتاين وتعطى بالصورة الآتية:

$$D_e = \left[\frac{KT}{q} \right] \mu_e \dots \dots \dots (8)$$

بالمثل نستطيع حساب كثافة التيار الكلي للفجوات J_p :

$$J_p = qp\mu_p E - D_p \frac{dp}{dx} \dots \dots \dots (9)$$

بذلك تكون كثافة التيار الكلية الناتجة من المعادلتين (7) و (9):

$$J_{tot} = J_n + J_p \dots \dots \dots (10)$$

c- معادلة الإستمرارية Continuity Equation

تصف هذه المعادلة كل من الانجرافية الإنتشارية وعملية إعادة الالتحام خلال مراكز الالتحام ذات المستويات الوسطية في آن واحد [10]. إن معدل الإستمرارية تنطبق على كل من الإلكترونات والفجوات ويمكن كتابة معادلة الإستمرارية في تدفق التيار الأحادي البعد باتجاه x-direction لمقطع عرضي لشبه موصل مساحته A وبطول dx ، إذ يمثل كلا من $J_n(x)$ و $J_n(x+dx)$ كثافة تيار الإلكترونات الداخل والخارج على التوالي، وتمثل (G_n و U_n) المعدل لعمليتي التوليد وإعادة الإتحاد على التوالي، وكما موضح في الشكل (1) يتم إعطاء عدد الإلكترونات الحرة في الحجم Adx كدالة للوقت أي أن معدل (تدفق-هروب) الشحنات + معدل (التوليد مع إعادة الإتحاد) للشاحنات عند ذلك الحجم:

$$A = \frac{dn}{dt} dx = A \left(\frac{J_n(x)}{-q} - \frac{J_n(x+dx)}{-q} \right) + A(G_n - U_n) dx \dots \dots \dots (11)$$

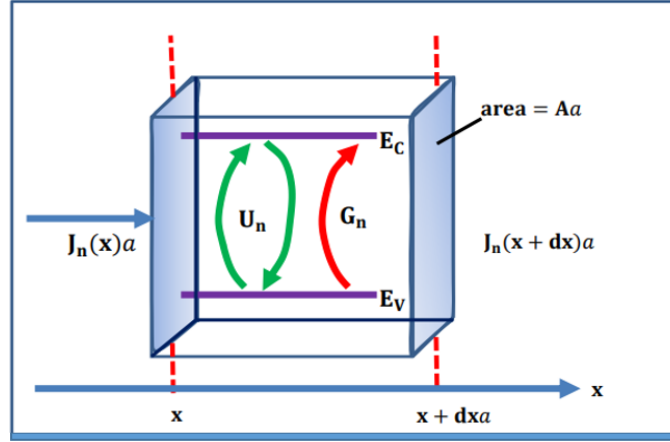
وباستعمال قاعدة السلسلة فان: $(J_n(x+dx) = J_n(x) + \frac{dJ_n(x)}{dx} dx + \dots)$

يمكن كذلك استعمال النتيجة التي تم الحصول عليها في كتابة معادلة الإستمرارية للإلكترونات:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} + (G_n - U_n) \dots \dots \dots (12)$$

بنفس الطريقة يمكن الحصول على معادلة الإستمرارية للفجوات:

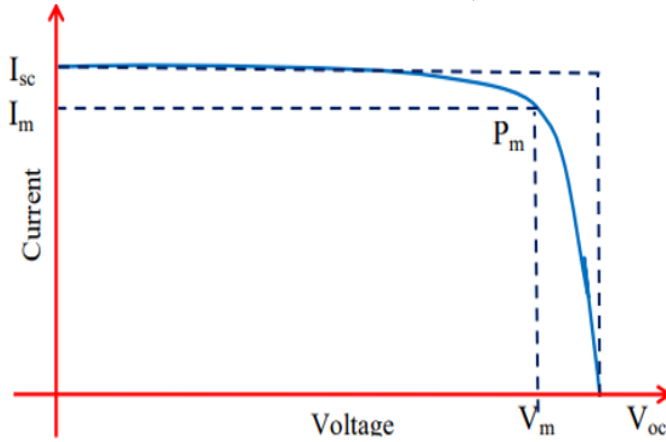
$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} + (G_n - U_n) \dots \dots \dots (13)$$



الشكل (1): مخطط لحجم معين من شبه موصل لحساب معادلة الإستمرارية بالنسبة للإلكترونات ولبيعد واحد [10].

●معلومات الخلية الشمسية Solar Cell Parameter

معلومات مهمة تصف أداء الخلية الشمسية منها القدرة القصوى (MPP) Maximum power. وعامل المليء (FF) Factor وتيار دائرة القصر (Jsc) short circuit current وفولتية الدائرة المفتوحة (Voc) Open Circuit voltage ويتم تحديد هذه المعلومات اعتماداً على خصائص المنحني (I-V) كما هو موضح في الشكل (2) ومن هذه المعلومات يمكن تحديد كفاءة الخلية الشمسية.



الشكل (2): خصائص المنحني (I-V) للخلية الشمسية [11].

* تيار الدائرة القصيرة (Jsc) Circuit Current Short

هو الحد الأقصى للتيار الذي تنتجه الخلية الشمسية عندما تكون أطرافها على اتصال مع بعضها. إذ إن كل فوتون يسقط على الخلية الشمسية وبطاقة أكبر من طاقة الفجوة المحصورة لطبقة الامتصاص سيكون قادراً على إثارة إلكترون تحسب طاقته اعتماداً على المعادلة الآتية [10]:

$$E(\text{eV})=h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \dots\dots\dots (14)$$

وأن تيار دائرة القصر في الخلية يعتمد على فجوة الطاقة، أي كلما قلت قيمة فجوة الطاقة المحصورة كلما زادت كثافة تيار الدائرة القصيرة وذلك لأن عدد كبير من الفوتونات الساقطة تمتلك طاقة كافية لتوليد الأزواج (إلكترون- فجوة) [12-13].

*** فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) Open Circuit Voltage**

وهو أقصى جهد يمكن توفيره للخلية الشمسية أن توفره، ويمثل الجهد الذي لا يتدفق فيه التيار خلال الدائرة الخارجية عندما تكون أطراف الخلية غير متصلة مع بعضها،

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \dots \dots \dots (15)$$

إذ إن I_L - يمثل التيار المتولد ضوئياً و I₀ - تمثل تيار التشبع الثنائي (p-n)، لأجل الحصول على أعلى قيمة لـ V_{oc} فإنه يجب أن يكون تيار الإشباع I₀ أقل ما يمكن. كما أن V_{oc} تتناقص مع تناقص فجوة الطاقة المحصورة عكس I_{sc} [12-13].

*** عامل المليء (FF) Fill Factor**

هو النسبة بين القدرة القصوى للخلية أي أقصى فولتية وكثافة تيار يمكن أن تولدها الخلية الشمسية مقسوماً على فولتية الدائرة المفتوحة والتيار دائرة القصر:

$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp} \dots \dots \dots (16)$$

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \dots \dots \dots (17)$$

*** كفاءة الخلية الشمسية (η) Efficiency of Solar Cell**

هي النسبة بين القدرة القصوى المتولدة من الخلية الشمسية إلى القدرة الساقطة عليها، وتعطى بالمعادلة.

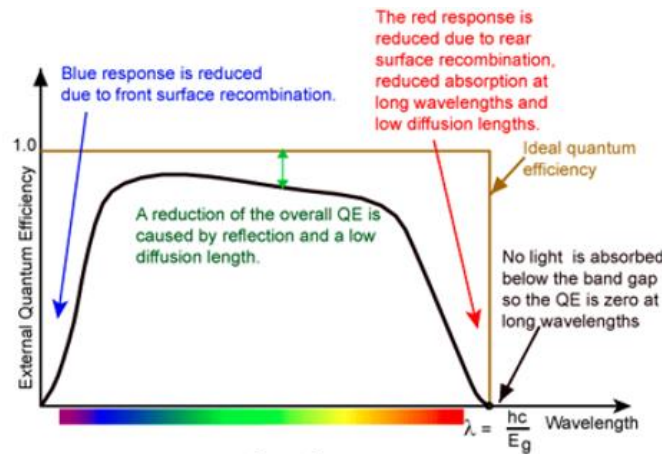
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (18)$$

وقد اعتمدت قيمة الإشعاع الساقط على الخلية الشمسية عند القيمة (1000 W/m²) من الطيف AM1.5 كمعيار لقياس كفاءة

تحويل الخلايا الشمسية [14]

الكفاءة الكمية (QE) Efficiency Quantum

تعتبر الكفاءة الكمية من أهم العوامل البصرية في الخلايا الشمسية، وتعرف بأنها نسبة حاملات الشحنة المتولدة إلى الفوتونات الساقطة على الخلية الشمسية، وتشير للطريقة التي تستجيب بها الخلية الشمسية للأطوال الموجية المختلفة للضوء الساقطة عليها ونتيجة لذلك توصف الكفاءة الكمية QE بأنها دالة للطول الموجي أو الطاقة [15] وكما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (3): الكفاءة الكمية QE نسبة للطول الموجي [16]

• الخسائر في الخلايا الشمسية Solar Cells Losses in

توجد عدة خسائر في الخلايا الشمسية منها فقدان طاقة الفوتون (جزئياً أو كلياً) أو عدم القدرة على إخراج إلكترون من الخلية الشمسية ويكون السبب الرئيس مرتبطاً بخصائص المواد أو لأسباب تكنولوجية مرتبطة بقدرات معالجة الخلية، أخيراً يمكن تحديد الخسائر التي تحدث في الخلية الشمسية وتكون إما خسائر كهربائية أو خسائر بصرية.

1-3 تركيب الخلية الشمسية Solar cell Design

a - طبقة الإمتصاص Absorption Layer

تتكون الخلايا الشمسية من طبقات عدة منها طبقات هي الأساس في عمل الخلية الشمسية ومنها طبقات اضيفت لزيادة كفاءة الخلية الشمسية واستقرارها، إن أهم طبقة في الخلية الشمسية هي طبقة الامتصاص ويجب أن تصنع طبقة الامتصاص من مواد تكون قادرة على امتصاص الفوتونات ضمن الطيف الشمسي.

إذ تُعد خلايا كادميوم تيلورايد من المواد المستخدمة لتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية بسبب كون هذه الخلية واطئة التكلفة عالية الكفاءة واستقرارية عالية من بين بقية الخلايا الشمسية [17]، لكنها تعاني من مشكلة الاتصال الخلفي الأومي، وللمحافظة على إستقرارية الخلية يجب إضافة جهات اتصال مستقرة دون تأثير على كفاءتها ويتم ذلك بإضافة طبقة السطح الخلفي (BSF) ما بين طبقة الامتصاص وطبقة الاتصال المعدنية الخلفية [18].

b - الطبقة النافذة Window layer

تصنع هذه الطبقة من اشباه الموصلات المشوبة من نوع (n-Type) وتكون فجوة الطاقة لها أعلى من فجوة الطاقة لطبقة الامتصاص لضمان نفوذ الفوتونات من خلالها دون امتصاص، ويفضل أن يكون سمكها قليلاً لزيادة كمية الإشعاع التي تنفذ من خلالها في خليتنا تم اختيار كبريتيد الكادميوم المؤكسد (CdS:O)، وهو مركب متعدد التبلور Polycrystalline تركيبه البلوري اما أن يكون سداسياً من نوع Wurtzite الذي يكون أكثر استقراراً عند درجة حرارة الغرفة او يكون تركيبه مكعباً من نوع مشبك الزنك والذي يشبه الماس في تركيبه أو يكون من النوع المختلط، مع تحديد تركيبه البلوري يعتمد على درجة الحرارة له أثناء التحضير، يمكن تحضيره بعد طرق منها التبخير الحراري والفراغي والرش الكيميائي بالانحلال الحراري ويمتلك CdS فجوة طاقة من النوع المباشر Direct Band cap.

تكون قيمتها 2.4eV ذات شفافية ضوئية كبيرة تتراوح من % (60-90) في منطقة الطيف الشمسي المرئي تمتاز أغشية CdS بخصائص فيزيائية جعلتها تلعب دوراً كبيراً في تكنولوجيا الكهروضوئية [19].

c - الطبقة الخازنة Buffer Layer (BL)

هي إحدى طبقات الخلية الشمسية توضع بين طبقة أكسيد الموصل الشفاف TCO والطبقة النافذة Window Layer، تمكن أهميتها في العمل على تقليل تيار التسريب الأمامي، كما تُساعد على تقليل سمك الطبقة النافذة و بالتالي منع الخسارة في حاملات الأقلية مما يؤدي إلى زيادة فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} وعامل المليء FF ، كذلك تقلل من عمليات إعادة الاتحاد السطحي Surface Recombination [20].

شروط يجب مراعاتها عند اختيار الطبقة الخازنة BL

- 1- أن تكون المادة من نوع n لتعمل تقاطع pn مع طبقة الامتصاص.
- 2- أن تكون فجوة الطاقة لها واسعة للتقليل من إمتصاص الإشعاع.
- 3- أن تكون عملية الترسيب مناسبة منخفضة التكلفة.

- 4- أن تكون حزمة التوصيل لها محاذاة لحزمة التوصيل لطبقة الامتصاص .
- 5- أن تكون لها إمكانية إخراج الحاملات المتولدة ضوئياً بأقل عمليات إعادة التركيب بأقل مقاومة كهربائية متوالية [21]. وقد استعمل ستانيت الزنك Zn_2SnO_4 في الخلية قيد الدراسة.

d- الأكاسيد الموصلة الشفافة (TCO) Transparent Conductive Oxides

هي عبارة عن أغشية رقيقة شفافة ضمن الضوء المرئي ويقع مستوى فيرمي لها قريباً من حزمة التوصيل، يدخل في هيكل الخلية الشمسية كأقطاب كهربائية امامية شفافة أو أقطاب كهربائية خلفية غير شفافة ومغلقة في أكثر الأحيان، يستخدم في صناعتها الفولاذ المقاوم للصدأ المطلي بالموليبيدوم MO [22].

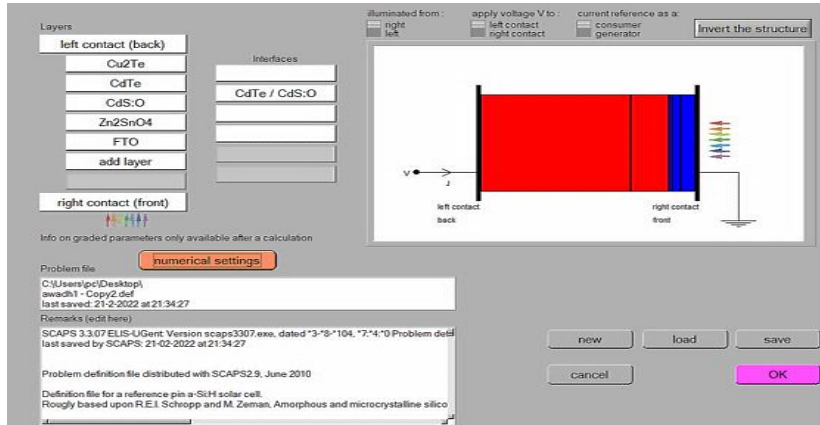
صفات يجب ان تتوفر في المواد لإختبارها كطبقة أكاسيد موصلة شفافة:

- 1- أن تكون فجوة الطاقة لها أكبر من 3.5eV.
 - 2- أن تكون ذات نفاذية عالية للضوء المرئي أكثر من 90% لتقليل انعكاس الضوء الساقط عليها.
 - 3- ان تكون مقاومتها صغيرة بحدود 10Ω أو أقل [23].
- وفي دراستنا تم اختيار أوكسيد القصدير المطعم بالفلور FTO كطبقة TCO في خليتنا المعتمدة في هذه الدراسة .

e- طبقة مجال السطح الخلفي (BSF) Back Surface Field Layer

تقع هذه الطبقة بين طبقة الاتصال الخلفية المعدنية و طبقة الامتصاص، تتم اضافتها للتغلب على مشكلة الاتصال الخلفي غير الأومي التي تعاني منها طبقة الامتصاص CdTe فهي تساعد على ايجاد جهة اتصال مستقرة دون التأثير على كفاءة الخلية [18]، والدور الرئيس لطبقة السطح الخلفي هي:

- 1- تقليل من عملية إعادة الاتحاد في جهة الإتصال الخلفية .
 - 2- تعزيز الناقلات الأقلية من خلال عكسها نحو الوصلة الرئيسة.
 - 3- تحسين كفاءة الخلية مع سمك قليل لطبقة الامتصاص لتقلل من تكلفة إنتاج الخلية [24] .
 - 4- تساهم في زيادة V_{oc} وتيار دائرة القصر J_{sc} .
 - 5- تُضيف طبقة إمتصاص إضافية إلى هيكل الخلية مما يزيد من عدد الحاملات الشحنة. ففي هذه الدراسة اختير تيلورايد النحاس Cu_2Te كطبقة (BSF) في دراسة الخلية.
- في هذه الدراسة تم العمل على الخلية تيلورايد الكادميوم الشمسية الموضحة في الشكل (4).



الشكل (4): واجهة برنامج SCAPS-1D للخلية الشمسية قيد الدراسة

باستخدام المعلمات المذكورة في الجدولين (1) و (2) معلمات طبقات الخلية الشمسية [25-26-27].

الجدول (1) معلمات طبقات الخلية الشمسية قيد الدراسة

Parameter	p-Cu ₂ Te	p-CdTe	n-CdS:O	n-Zn ₂ SnO ₄	n-FTO
Thikness (μm)	1	0.25	0.025	0.05	0.1
Bandgap (eV)	1.18	1.45	2.8	3.35	4.2
Electron affinity (eV)	4.2	4.28	4.5	4.5	4.5
Dielectric permittivity (relative)	10	9.4	9.4	9	10
CB.effective density of states (1/Cm ³)	7.80E+17	7.50E+17	2.20E+18	2.00E+18	1.20E+20
V.B. effective density of states (1/Cm ³)	1.60E+19	1.80E+19	1.80E+19	1.80E+19	7.00E+20
Electron thermal velocity(Cm/s)	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Hole thermal velocity (Cm/s)	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Electron Mobility (Cm ² /Vs)	5.00E+02	5.00E+02	1.00E+02	3.20E+01	2.00E+01
Hole Mobility (Cm ² /Vs)	1.00E+02	6.00E+01	2.50E+01	3.00E+00	1.00E+02
Shallow uniform donor density N _D (1/Cm ³)	0.00E+00	0.00E+00	1.00E+17	1.00E+19	1.00E+19
Shallow uniform acceptor density N _A (1/Cm ³)	1.00E+19	1.00E+15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Defect type	single Acceptor	single Acceptor	single Donor	single Donor	single Donor
Capture cross section Electrons (Cm ²)	1.00E-12	1.00E-12	1.00E-17	1.00E-15	1.00E-15
Capture cross section Hole (Cm ²)	1.00E-15	1.00E-15	1.00E-15	1.00E-12	1.00E-12
Nt (1/Cm ³)	1.00E+10	1.00E+10	1.00E+15	1.00E+15	1.00E+15

الجدول (2) معلمات السطح البيئي لمحاكاة الخلية الشمسية

Parameter	n-Cds:O/p-CdTe
Defecte type	Neutral
Capture Cross Section Electron(cm ²)	1X10 ⁻¹⁵
Capture Cross Section Hole (cm ²)	1X10 ⁻¹⁵
Nt (1/cm ³)	1X10 ⁸

النتائج والمناقشة

• دراسة تأثير تغير درجة الحرارة على معلمات الخلية الشمسية المعتمدة

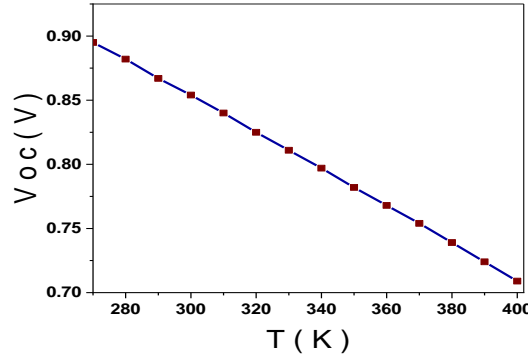
Effect of Changing Temperature Solar Cell Dependent on Parameters

درس تأثير التغير في درجة الحرارة على معلمات الخلية الشمسية المتمثلة بفولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} ، وكثافة تيار دائرة القصر J_{sc} ، وعامل المليء FF ، وكفاءة الخلية الشمسية η حيث قمنا بتغيير درجة الحرارة من (K) (270-400) وبواقع تغير 10K عند كل قياس مع تثبيت بقية معلمات الخلية الشمسية المثبتة في الجداول (1) و (2) ووجد ما يأتي:

a- فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} تتناسب عكسيا مع درجة الحرارة، لأن ارتفاع درجة حرارة تُزيد من حاملات الأقلية، مما يزيد من قيمة

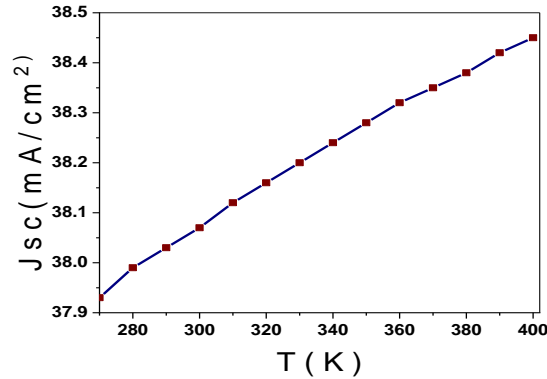
تيار التشعب العكسي ونقصان قيمة فجوة الطاقة [19]، وبذلك يقل مقدار V_{oc} حسب المعادلة (4)، إذ بلغ مقدار $V_{oc} = 0.895V$

عند درجة حرارة 270K في حين بلغ $V_{oc} = 0.71V$ عند درجة حرارة 400K وكما موضح في الشكل (5).



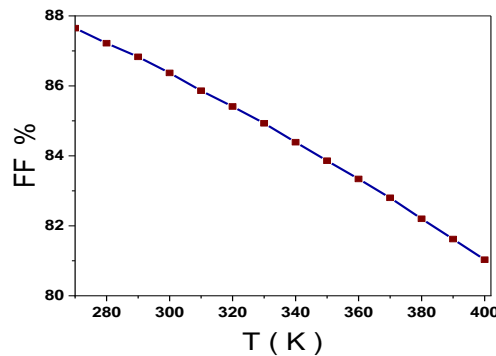
الشكل(5): تأثير تغير درجة الحرارة على تيار فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc}

b- تيار دائرة القصر J_{sc} يزداد بزيادة طفيفة مع زيادة درجة الحرارة ويعود سبب هذه الزيادة الى النقصان الحاصل في فجوة الطاقة نتيجة ارتفاع درجة الحرارة مما يؤدي إلى زيادة إمتصاص الفوتونات الساقطة [19]. اذا بلغ $J_{sc} = 37.93 \text{mA/cm}^2$ عند درجة حرارة النقصان 270K في حين بلغ $J_{sc}=38.45 \text{mA/cm}^2$ عند درجة حرارة 400K وكما موضح في الشكل(6).



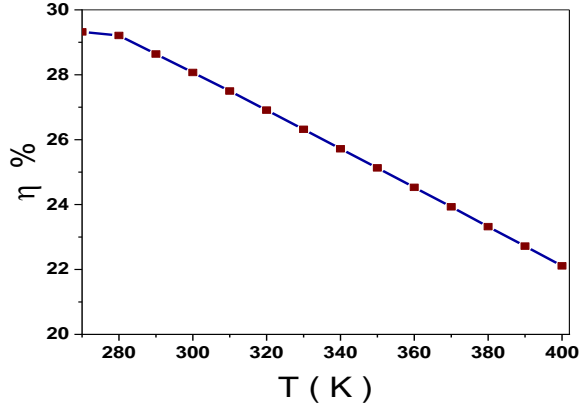
الشكل(6): تأثير تغير درجة الحرارة على تيار دائرة القصر J_{sc}

c- أما عامل المليء FF فبدأ بالتناقص مع زيادة درجة الحرارة، لأن ارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى ارتفاع تيار التشبع العكسي وانخفاض في مقدار فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} مما يؤدي إلى زيادة عملية إعادة الاتحاد عند السطح البيني [27]. بلغت قيمته FF=87.65% عند درجة حرارة 270 K . أما عند درجة حرارة 400K فقد بلغت قيمته FF=81,03% وكما هو موضح في الشكل(7).



الشكل(7): تأثير تغيير درجة الحرارة على عامل المليء.

d- كذلك نلاحظ تناقص في كفاءة الخلية الشمسية مع زيادة درجة الحرارة اذ كانت $\eta = 29.8\%$ عند درجة حرارة 270K، في حين بلغت قيمتها $\eta = 22.11\%$ عند درجة حرارة 400K بسبب الزيادة الحاصلة في تيار التشبع العكسي والذي يؤدي إلى نقصان فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} مما يؤدي إلى نقصان كفاءة الخلية حسب العلاقة (18) وكما هو في الشكل (8).

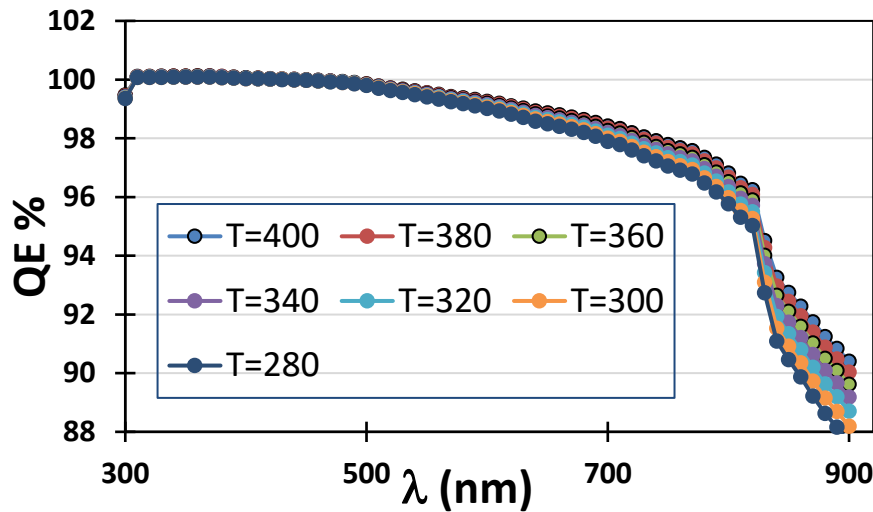


الشكل(8): تأثير تغيير درجة الحرارة على كفاءة الخلية.

• تأثير تغير درجة الحرارة على الكفاءة الكمية .

Effect of changing Temperature Dependent on Quantum Efficiency

بنفس الطريقة قمنا بتغيير درجة الحرارة من (280-400)K وبواقع تغيير 20K ومدى تأثرها على الكفاءة الكمية للخلية فوجدنا ان تأثير التغير في درجة الحرارة قليل على الكفاءة الكمية QE. وذلك لأن تيار دائرة القصر J_{sc} يتأثر بشكل طفيف مع ارتفاع درجات الحرارة، في حين تنخفض فولتية دائرة المفتوحة V_{oc} مع ارتفاع درجات الحرارة وذلك بسبب زيادة تيار التشبع نتيجة النقصان في فجوة الطاقة المحصورة كون كثافة حاملات الشحنة تتناسب أسياً مع ارتفاع درجات الحرارة [28]. وبذلك يكون تأثير درجة الحرارة على الكفاءة الكمية QE ضعيفاً جداً، كما هو موضح في الشكل (9).



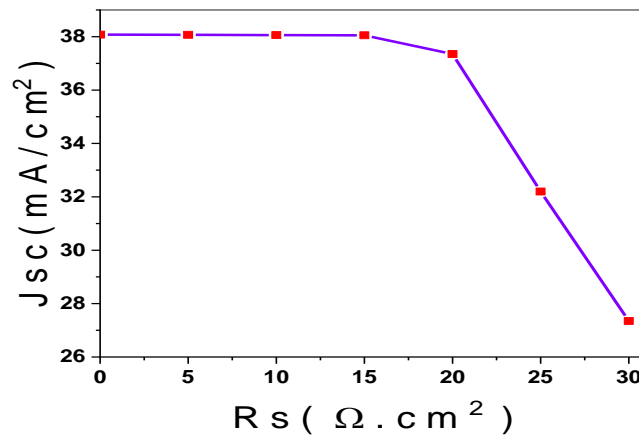
شكل(9) تأثير درجة الحرارة على الكفاءة الكمية QE

2- دراسة تأثير مقاومة التوالي (R_s) على الخواص الكهربائية والبصرية للخلية الشمسية .

Effect of Series Resistance (R_s) on Electrical and Optical Properties of Solar Cell.

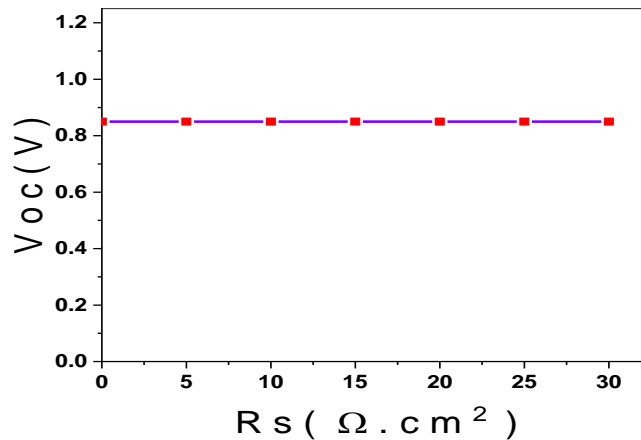
المصدر الرئيس لمقاومة التوالي للخلية الشمسية هي مقاومة شبة الموصل الذاتية المصنوع منها الخلية الشمسية إضافة إلى المقاومة بين المعدن وشبه الموصل R_s Contact Resistance وقد درس تأثير مقاومة التوالي بحوالي $0-30 \Omega \cdot \text{cm}^2$ بواقع زيادة $5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ تبين أنه عند زيادة قيمة مقاومة التوالي تم الحصول على النتائج الآتية:

a- ينخفض تيار الدائرة القصيرة J_{sc} لأن التوصيلية لحاملات الشحنة ستقل لأنه كما هو معروف كلما ازدادت مقاومة التوالي ينخفض التيار الكهربائي وكما هو مبين في الشكل (10).



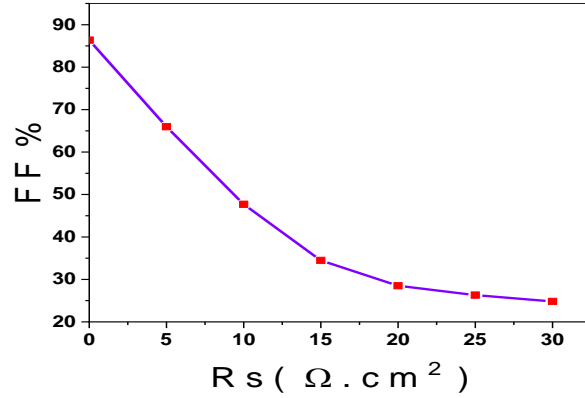
الشكل (10): تأثير مقاومة التوالي R_s في تيار دائرة القصر J_{sc}

b- أما فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} فان قيمتها ستبقى ثابتة لا تتأثر لأن التيار عندها يساري صفرًا [12] كما هو موضح في الشكل (11).



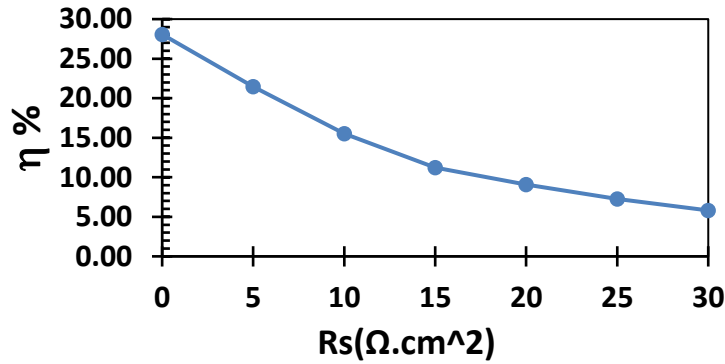
الشكل (11): تأثير مقاومة التوالي R_s في فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc}

c- عامل المليء (FF) تقل قيمته لأن زيادة مقاومة التوالي R_s تعمل على تقليل التيار وإنخفاض في القدرة الخارجية فينخفض عامل المليء كما في الشكل (12).



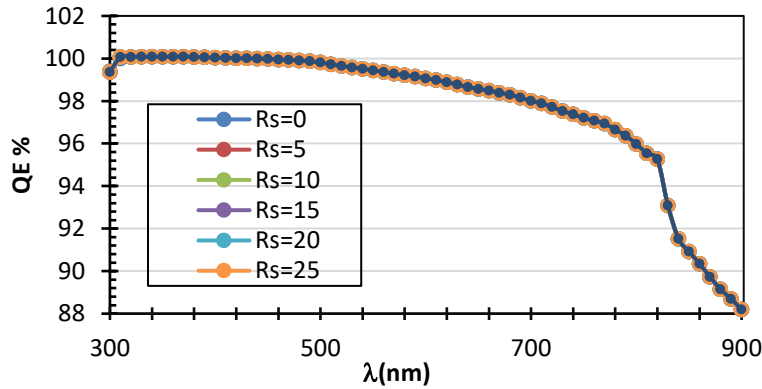
الشكل (12): تأثير مقاومة التوالي (R_s) على عامل المليء

d- أما كفاءة الخلية (η) فتنخفض مع ازدياد قيمة مقاومة التوالي لأن القدرة الخارجة تقل نسبة إلى القدرة الداخلة إليها [29] وكما هو موضح في الشكل (13).



الشكل (14): تأثير مقاومة التوالي على كفاءة الخلية η

أما تأثير مقاومة التوالي (R_s) على الكفاءة الكمية (QE) للخلية الشمسية يكون معدوماً أو قليلاً جداً لأن الخواص البصرية للخلايا الشمسية تعتمد بشكل أساسي على امتصاص الأشعة الساقطة (الفوتونات) وتعتمد أيضاً على معدل توليد الأزواج (الكترن-فجوة) ولا تعتمد على مقاومات الخلية الشمسية وكما موضح في الشكل (15).



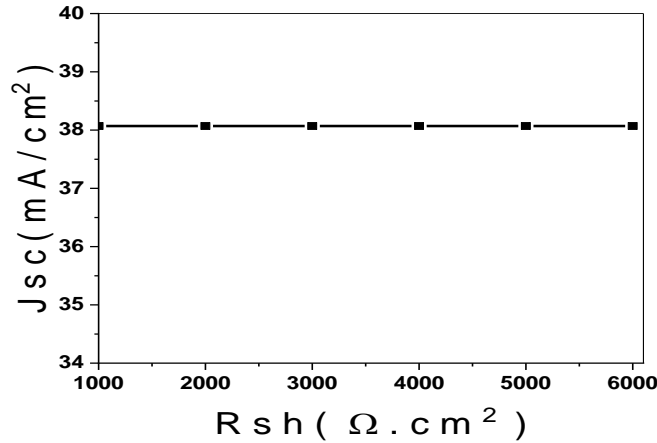
الشكل(15): تأثير مقاومة التوالي على الكفاءة الكمية QE

3- دراسة تأثير مقاومة التوازي (R_{sh}) على الخواص الكهربائية والبصرية للخلية الشمسية

Effect of Shunt Resistance (R_{sh}) on Electrical and Optical Properties of Solar Cell

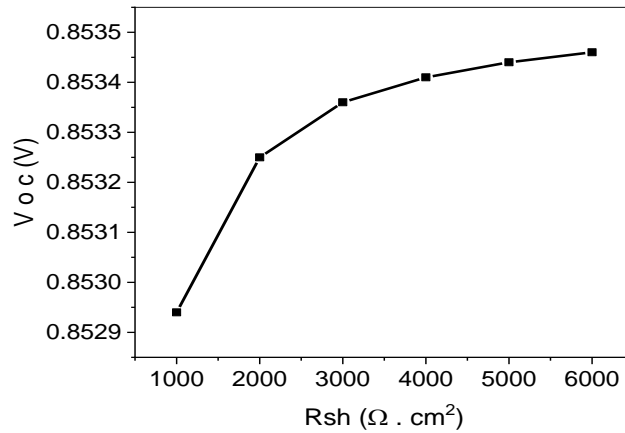
مقاومة التوازي في الخلية الشمسية يجب أن تكون كبيرة لإنتاج طاقة عالية وعامل مليء كبير، من الملاحظ أن القيمة الصغيرة لقيمة مقاومة التوازي تسبب في خفض أداء الخلية الشمسية بسبب فقد للطاقة وانخفاض قيم عامل المليء [30]، درس تأثير مقاومة التوازي ضمن المدى $2(6000-1000)\Omega.cm^2$ وبزيادة مقدارها 1000 على معاملات الخلية الشمسية وتبين ما يأتي:

a- زيادة مقدار مقاومة التوازي لا تؤثر على تيار دائرة القصر J_{sc} عبر الوصلة (p-n) وكما هو موضح في الشكل (16).



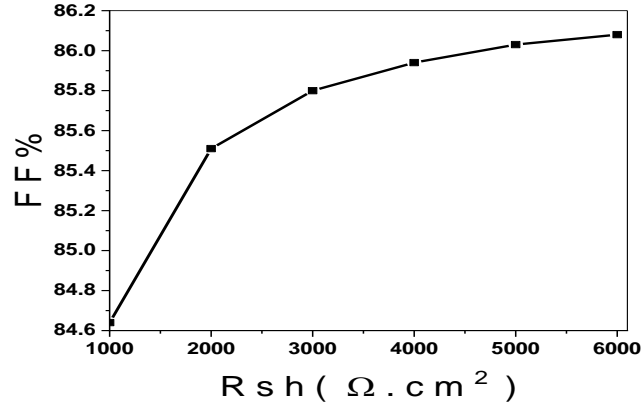
الشكل(16): تأثير مقاومة التوازي R_{sh} على تيار الدائرة القصيرة J_{sc}

b- أما فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} فإن قيمتها ستبقى ترتفع بشكل طفيف مع ارتفاع مقاومة التوازي نتيجة لزيادة قدرة الخرج وكما هو مبين في الشكل (17)



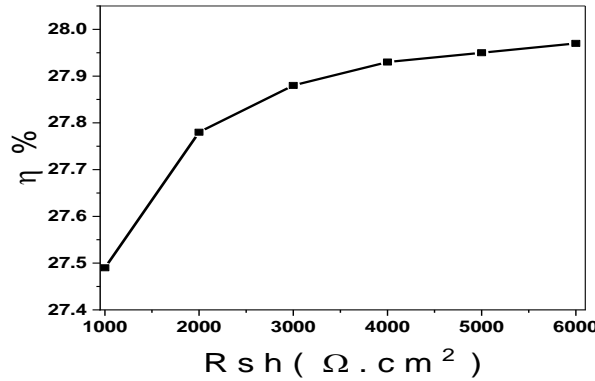
الشكل(17): تأثير مقاومة التوازي على فولتية الدائرة المفتوحة

c- أما عن تأثير مقاومة التوازي R_{sh} على عامل المليء FF يلاحظ هنالك ارتفاع طفيف في قيم FF مع ارتفاع R_{sh} بسبب زيادة مسار منحنى (I-V) وكما في الشكل (18).



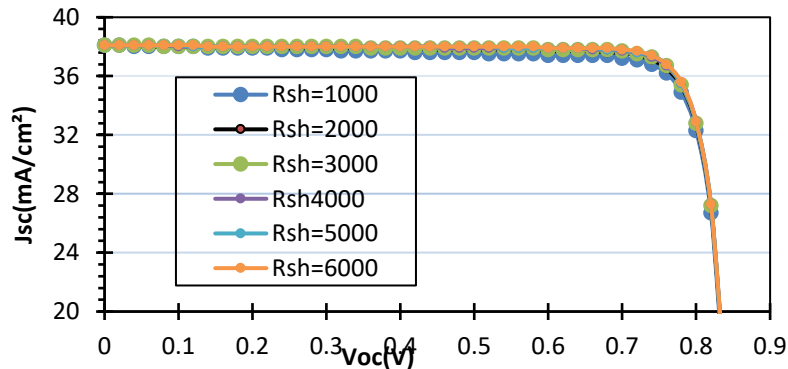
الشكل (18): تأثير مقاومة التوازي على عامل المليء FF

d- أما كفاءة الخلية η فإن تأثيرها يظهر عند القيم العالية لمقاومة التوازي، وانخفاض في قيم مقاومة التوازي تسبب في فقدان للطاقة ولهذا فان قيمة مقاومة التوازي الواطئة تكون غير شائعة الاستعمال خصوصاً في تقنيات الاغشية الرقيقة [30]. وكما هو موضح في الشكل (19).



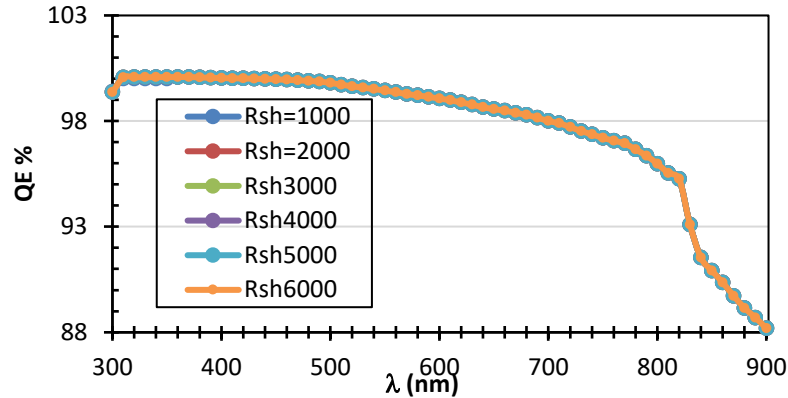
الشكل (19): تأثير مقاومة التوازي Rsh على كفاءة الخلية

وعليه يكون تأثير مقاومة التوازي على المنحني (I-V) كما في الشكل (20)



الشكل (20): تأثير مقاومة التوازي على المنحني (I-V)

f- أما عن تأثير مقاومة التوازي (R_{sh}) على الكفاءة الكمية QE فيكون معدوماً أيضاً، لأن الخواص البصرية للخلايا الشمسية تعتمد على مقدار امتصاص الفوتونات وعلى معدل توليد الأزواج (الكترن- فجوة) ولا تعتمد على مقاومات الخلية وكما موضح في الشكل (21)



الشكل(21):تأثير مقاومة التوازي (R_{sh}) على الكفاءة الكمية QE

الاستنتاج

نستنتج ان ارتفاع درجة الحرارة يسبب نقصان في كفاءة الخلية الشمسية بسبب حصول زيادة في تيار التشبع العكسي، كذلك نلاحظ ان كفاءة الخلية الشمسية تنخفض مع ازدياد مقاومة التوالي R_s في الخلية الشمسية بسبب انخفاض القدرة الخارجة من الخلية الشمسية نسبة الى القدرة الداخلة اليها. كذلك يجب أن تكون قيمة مقاومة التوازي R_{sh} في الخلية الشمسية كبيرة لإنتاج طاقة عالية وعامل مليء كبير، والملاحظ أن القيمة الصغيرة لمقاومة التوازي تسبب في خَفَض أداء الخلية الشمسية بسبب فقد الطاقة وإنخفاض قيم عامل المليء.

شكر وتقدير

بعد اتمام هذا البحث لا يسعني الا ان اتقدم بالشكر والامتنان الى اساتذة قسم الفيزياء كافة في كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، الذين لم يبخلوا علي بعلمهم وتشجيعهم لي لإتمام هذا البحث. واشكر جميع زملائي وزميلاتي الذين كانوا لي عون وسند في مسيرتي الدراسية . واخيراً اتقدم بالشكر والعرفان لأسرتي الذين قدموا لي الكثير من التشجيع والدعم طيلة فترة اعداد هذا البحث

المصادر Reference

- [1] Askari Bagher, Mirzaei Vahid, Mirhabibi Mohsen, "Types of solar cells and Application "American journal of optics and Photonics, Folder 3. Page 94. Edited. 2015.
- [2] M.A. Matin, M.M. Aliyu, H. Abrar Quadery, and A. Nowshed, "Prospects of novel front. and back contacts for high efficiency Cadmium telluride thin film solar cells from numerical analysis" , Solar Energy Materials and Solar cells 94 2010.
- [3] C. R. Corwine, A. O. Pudov, M. Gloeckler, S. H. Demtsu, and J. R. Sites "Copper inclusion and migration from the back Contact in CdTe Solar cells", Solar Energy Materials and Solar cells 2004.
- [4] A. V. Kokte, M. R. Asaba, P. P. Hankara and B. K. Chougule, "Effect of annealing on properties of electrochemically deposited CdTe thin films." Journal of Physics and Chemistry of Solids Vol . 68, 53-58. 2007.
- [5] A. Gupta, V. Parikh and A. Compaan "Solar Energy Materials and solar cells" Vol. 90, 2263. 2006.
- [6] Julian Chen, translated by Mustafa Mohamed Fouad "Solar Physics" Hendawy Foundation
- [7] W. F. Al-Jubouri, d.F. Ghalib Hayati, "The Electrical and Magnetic Properties of Materials", Mosul University Press 1985.
- [8] B. M. K. Decock, A. Niemegeers, J. Verschraegen, and S. Degrave. "SCAPS manual " .2016.
- [9] C. S. Solanki," solar photovoltaic Fundamentals Technologies and Applications", second. Edition, PHI learning private Limited, Delhi 110092. 2013.

- [10] J-P. Colinge, and A. Cynthia, “*Physics of semiconductor devices*”, Springer science and Business Media, 2005.
- [11] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E.R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltage Arrays", Vol. 24, No. 5, pp.1198 – 1208, 2009.
- [12] U. Martin, translated by Dr. Y. M. Hassan, "Solar Cells" Mosul University Press, 1986.
- [13] M. Burgelman et al.,” Modeling Thin - film PV Devices“, Prog. Photovoltaic, Vol. 12, PP.143-153. 2004.
- [14] W. Mohammad, A. F. Sherwani, and M. Suhaib., “Integration of Solar energy in electrical”, hybrid, autonomous vehicles: a technological review. *SN Applied Sciences* 1, No.11: 1459. 2019.
- [15] T. Markvart and L. Castaner, “*Principles of Solar cell operation*”, Elsevier Ltd, 2012.
- [16] A. A. Mohammed, and A. N. Saleh, “Simulation. Effect of Ga₂O₃ layer thickness on CdTe Solar cell by SCAPS-1D”, Tikrit Journal of Pure Science, 24 (6), 110-116. 2019.
- [17] S. Hossain, N. Amin, M. A. Martin, M. M. Aliyu, T. Razykov and K. Sopian “A numerical study on the prospects of high efficiency ultra-thin Zn x Cd1 – x S/CdTe Solar Cell” . Chalcogenide Letters, 8 (4). 2011.
- [18] T. Carlsson, A. Brikman, “Identification of degradation mechanisms in field - tested CdTe modules”, Progress in photovoltaic: research and applications, 14 (3), 213-224. 2006.
- [19] W. Ben Ali, “Preparation and study of cadmium sulfite (CdS) thin films deposited by the chemical bath method (CBD)” Faculty of Exact Sciences / Department of Physics, University of Martyr Hama Lakhdar, El Oued, People’s Democratic Republic of Algeria. 2018.
- [20] M. D. Archer, and M. A. Green, “Clean electricity from photovoltaic” (Vol. 4), World Scientific. 2014.
- [21] M. Rafee Mahbub, S. Islam, F. Anwar, S.S. Satter, and S. M. Ullah, “Simulation of CZTS thin film Solar cell of different buffer layers for high efficiency performance”. ENGINEERING AND ECHNOLOGY, 2 (52), 1-10. 2016.
- [22] T. L. Le, “Perparation of transition metal oxide thin films used as solar absorbers”, Doctoral dissertation, Universite Paul Sabatier - Toulouse III, 14- Solanki, C.S. (2015), solar photovoltaic: fundamentals, technologies and applications. Phi learning pvt. Ltd. 2016.
- [23] C.S. Solanki, “Solar photovoltaic: fundamentals, technologies and applications”, Phi learning pvt. Ltd. 2015.
- [24] N. Amin, K. Sopian, and M. Konawa, “Numerical modeling of Cds/CdTe and CdS/CdTe/ZnTe Solar Cell as a function of CdTe thickness”, Solar energy materials and Solar cells, 91 (13), 1202-1208. 2007.
- [25] M.A. Matin, M.U. Tomal and A. M. Robin, "Copper telluride as a nobel BSF material for high performance ultra-thin CdTe PV cell". In 2013 International Conference on Information, Electronics and Vision (ICIEV) (pp.1-5). 2013.
- [26] A. Islam, M. A. Matin, M. M. Aliyu, Y. Sulaman and N. Amin, "A numerical analysis on CdS:O window layer for higher efficiency CdTe solar cell". In (2009)1st International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET) (pp.1-4).IEEE, 2009 .
- [27] C. Matin, M.A., Tomal, M.U and Robin, A. M. "Copper telluride as anoble BSF material for high performance ultra-thin CdTe PV cell". In 2013 International Conference on Information, Electronics and Vision (ICIEV) (pp.1-5). 2013.
- [28] A. F. Ali, A. F. Hassoun, “The Effect of Some Factors on the Practical and Theoretical Values of the Maximum Efficiency of the Silicon Solar Cell”, Journal of Karbala International University - Volume Eight - Issue Two/Practical

- [29] J.E. Fink, "Fine line metallization of Silicon heterojunction solar cell via Collimated", aerosol beam direct write, North Dakota State University of Agriculture and Applied Science. 2012.
- [30] W. EL-Basit, A.A. EL-Maksood and F.A.E.M.S. Soliman "Mathematical model for photovoltaic cells", Leonardo Journal of Sciences, 23, PP.13-28, 2013.