مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السادس والعشرون - المجلد الأول - علوم الفيزياء - أيلول 2025 م
doi.org/10.52866/esj.2025.01.26.09

دراسة تأثير تغيير الطيف الشمسي و مقاومات التوالي والتوازي والكفاءة الكمية ودرجات الحرارة على أداء الخلية الشمسية الكالكوبايرايت (CIGS/ZnSe/ZnS/SnO2)

عبدالمجيد احمد خضر [1] , رعد احمد رسول [2]
جامعة الموصل/ كلية التربية للعلوم الصرفة/ قسم الفيزياء
E-mail[1] : abdulmajid.23esp15@student.uomosul.edu.iq
E-mail[2] : dr.raadrasool@uomosul.edu.iq

مستخلص:
يتضمن البحث إجراء محاكاة إستخدام برنامج المحاكاة SCAPS-1D أحادية البعد لهيكل الخلية الشمسية الكالكوبايرايت (p-CIGS/n-ZnSe/ZnS/SnO_2)، لدراسة أداء الخلية الشمسية تحت تأثير عوامل مختلفة، إذ تم تحقيق أفضل كفاءة للخلية الشمسية وصلت إلى ٪11.42 بإستخدام الطيف الشمسي القياسي AM1.5G عندما كانت درجة حرارة 300K وسمك طبقة الإمتصاص CIGS كانت 5µm. كما أظهرت الدراسة أن الكفاءة تصل إلى ٪26.59 عند إستخدام الطيف الأحادي طول موجة ذو القدرة الثابتة، كما إجراء تحليلاً لتأثير ربط المقاومات على التوالي والتوازي على أداء الخلية الشمسية، إذ تبين أن زيادة مقاومة التوالي أدت إلى إنخفاض في كثافة تيار دائرة القصر J_{sc} وبالتالي إنخفاضاً في كفاءة الخلية الشمسية، بينما أدى تأثيرها على الكفاءة الكميةQE ضعيفاً، من ناحية أخرى، ساهمت زيادة مقاومة التوازي في تقليل الفقد الطفيلي وتحسين جهد الدائرة الفتح Voc وعامل المليء FF إضافة إلى الكفاءة η. كما تم دراسة تأثير تغيير درجات الحرارة على أداء الخلية الشمسية، وأظهرت النتائج أن إرتفاع درجة الحرارة أدى إلى إنخفاض من كفاءة الخلية الشمسية.
الكلمات الدالة: CIGS، برنامج المحاكاة SCAPS-1D، مقاومة التوالي والتوازي.

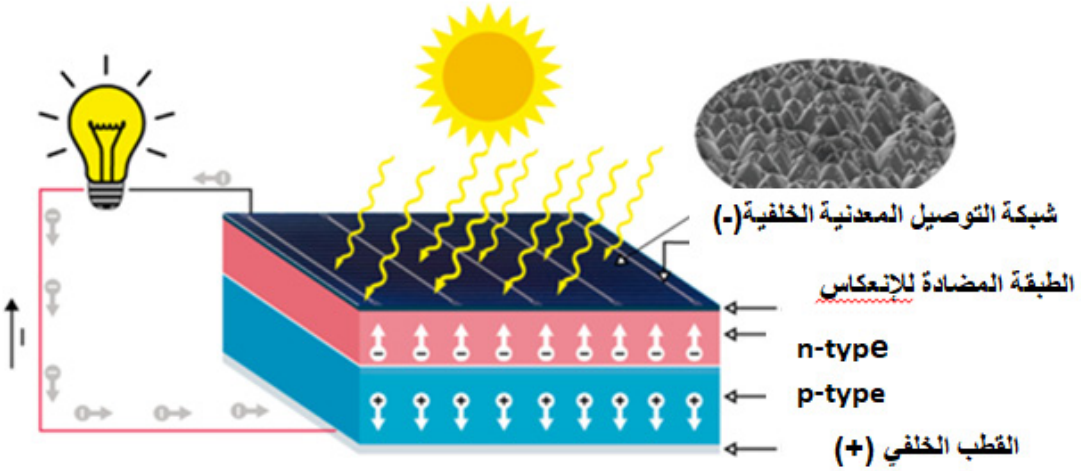
Study of the Effect of Varying the Solar Spectrum, Series and Shunt Resistances, Quantum Efficiency, and Temperature on the Performance of the Chalcopyrite (CIGS/ZnSe/ZnS/SnO_2) Solar Cell

Abdulmajid Ahmed Khudhr[1] , Raad Ahmed Rasool[2]
E-mail[1] : abdulmajid.23esp15@student.uomosul.edu.iq
E-mail[2] : dr.raadrasool@uomosul.edu.iq
University of Mosul / College of Education for Pure Sciences / Department of Physics

Abstract:
The study involved performing simulations using the one-dimensional simulation software SCAPS-1D for a chalcopyrite solar cell structure (p-CIGS/n-ZnSe/ZnS/SnO_2) to investigate the performance of the solar cell under various influencing factors. The highest achieved efficiency of the solar cell was 11.42% under the standard solar spectrum AM1.5G, at a temperature of 300K and with a CIGS absorber layer thickness of 5 µm. The study also showed that the efficiency could reach up to 26.59% when using a monochromatic spectrum with constant power. Additionally, an analysis was conducted to assess the impact of series and shunt resistances on solar cell performance. It was found that an increase in series resistance led to a reduction in the short-circuit current density (Jsc), and consequently, a decrease in solar cell efficiency. However, its effect on the quantum efficiency (QE) was minimal. On the other hand, an increase in shunt resistance helped reduce parasitic losses and improved the open-circuit voltage (Voc), fill factor (FF), and overall efficiency (η). The study also examined the effect of temperature variation on solar cell performance, and the results indicated that an increase in temperature led to a decline in the cell's efficiency.
Keywords:CIGS, SCAPS-1D Simulation Program, Series and Shunt Resistance.

1- المقدمة Introduction

تُعدّ الخلايا الشمسية من أبسط أجهزة أشباه الموصلات، إذ تمتلك القدرة على امتصاص الضوء وتحويل طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية عبر الإلكترونات والفجوات. تُبنى الخلية الشمسية على أساس صمام ثنائي شبه موصل يعمل على فصل وتجميع حاملات الشحنة وتوجيه التيار في اتجاه محدد [1]يوضح الشكل (1) مبدأ عمل الخلية الشمسية حيث يتكون الصمام الثنائي من التقاء أشباه الموصلات من نوع n–type وp-type لتشكيل وصلة معدنية، يتم تصنيعها عبر التشويب أو الانتشار. تسقط أشعة الشمس على سطح الخلية من الأعلى، وتمر بين خطوط شبكة معدنية موصلة تسمح بامتصاص الضوء. تُستخدم طبقة مضادة للانعكاس لزيادة كمية الإشعاع الداخل إلى شبه الموصل. يتم وضع طبقة معدنية على السطح الخلفي للخلية لتشكيل الاتصال الكهربائي الآخر. تعتمد كفاءة التحويل على الخصائص الطيفية للفوتونات القادمة من الشمس [2].



الشكل (1): رسم تخطيطي لخلية كهروضوئية

2 - المواد وطرق البحث
Materials and Research Methods

إن برنامج SCAPS-1D الأحادي البعد الذي تم تصميمه لمحاكاة الخلايا الشمسية، غالباً ما يستخدم في نمذجة ومحاكاة الخصائص الكهربائية والبصرية للوصلات غير المتجانسة DC وAC تم إنشاءه في المقام الأول للخلايا الشمسية القائمة على CIGS و CdTe، [3]، إن هذا البرنامج يحاكي الخلية التي تكون فيه طبقة الماصة عبارة عن p-CIGS، ويحل برنامج الـ SCAPS-1D معادلات أشباه الموصلات الرئيسية في بعد واحد، مثل معادلة الإستمرارية Continuity Equation ومعادلة بواسون Poissons Equation وكثافة الحاملات (الإلكترونات والفجوات)، وهذه المعادلات تتضمن معادلة الإنجراف الناتجة عن المجال الكهربائي ومعادلة الإنتشار التي يتم فيها حساب الفرق في تركيز ناقلات الشحنة وإعادة الإتحاد [4]، وهذه المعادلات كالأتي:

$$Jn = q\mu n\, n\varepsilon + qDn\frac{dn}{dx} = q\mu n\left(n\varepsilon + \frac{KT}{q}\frac{dn}{dx}\right) = nn\frac{dEFn}{dx} \dots\dots\dots (1)$$

$$Jp = q\mu pP\varepsilon + qDp\frac{dp}{dx} = q\mu p\left(P\varepsilon + \frac{KT}{q}\frac{dp}{dx}\right) = \mu pP\frac{dEFn}{dx} \dots\dots\dots (2)$$

يمثل المجال الكهربائي بوحدات (V/cm) وتمثل كل من μn و μp قيم سعة الإلكترونات والفجوات على التوالي بوحدات (cm^2/V.s)، أما Jn و Jp فهما قيم كثافة تيار الإلكترونات والفجوات على التوالي بوحدات (mA/cm^2)، Dn و Dp معاملات الإنتشار للإلكترونات والفجوات على التولي بوحدات (cm^2/s).

وبالإمكان كتابة معادلة الاستمرارية للإلكترونات بالشكل الآتي:

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = Gn(x) - Rn(x) \dots\dots\dots (3)$$

حيث أن $Gn(x)$ تمثل عملية التوليد للإلكترونات، ويمثل $Rn(x)$ معدل إعادة الاتحاد للإلكترونات.

ويمكن كتابة معادلة الاستمرارية للفجوات بالشكل التالي [5].

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = Gp(x) - Rp(x) \dots\dots\dots (4)$$

يمثل $Gp(x)$ عملية توليد الفجوات holes، وأن $Rp(x)$ تمثل عملية إعادة إتحاد الفجوات.

إن معادلة بواسون تربط ما بين معادلة كثافة الشحنة وجهد الإلكترونات الذي يعرف بالجهد الكهروستاتيكي وهي نقطة البدء في الحصول على الحلول المحددة في الكهرباء الساكنة للمواد الشبه موصلة [6] ويمكن كتابتها بالشكل الآتي:

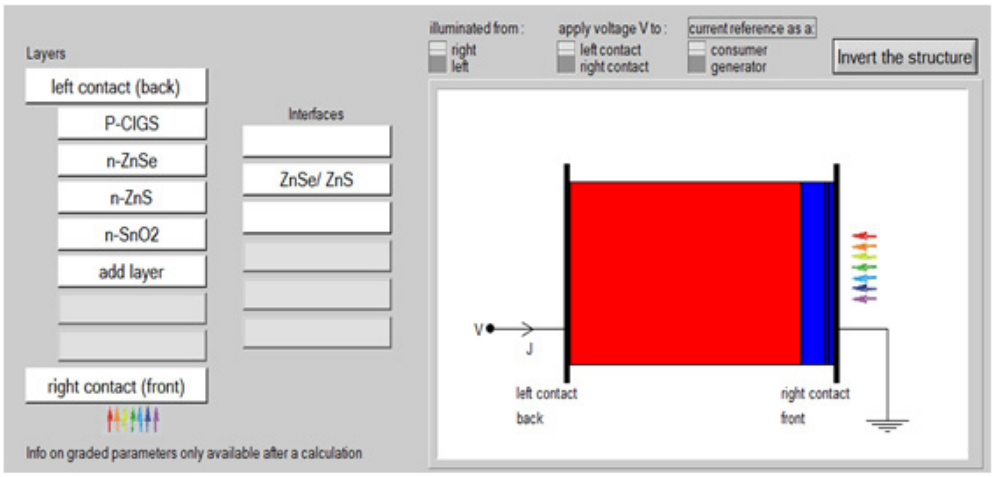
$$\frac{d\,In(E(x))}{\partial x}\frac{d\Phi(x)}{dx} + \frac{d2\Phi}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon_\circ} \dots\dots\dots (5)$$

بتم التعبير عن معادلة بواسون في حالة الثابت $\mathcal{E}_\circ$ كالتالي:

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_\circ} \dots\dots\dots (6)$$

حيث أن $\mathcal{E}_\circ$ تمثل نفاذية الإلكترون (F/cm^3) وأن $\rho(x)$ تعني كثافة الشحنة (C/cm^2) .

يتكون هيكل الخلية في هذه الدراسة من عدة طبقات مع السِماك المُثلى لكل طبقة وهي طبقة الامتصاص CIGS عند سمك 5 µm وطبقة الخازنة ZnSe عند سمك µm0.5 والطبقة النافذة ZnS عند سمك µm0.1 و طبقة أوكسيد الموصل الشفاف SnO_2 عند سمك µm0.1، وكانت أعلى كفاءة تم التوصل إليها هي η=11.42٪، الشكل (2) يبين طبقات الخلية الشمسية .



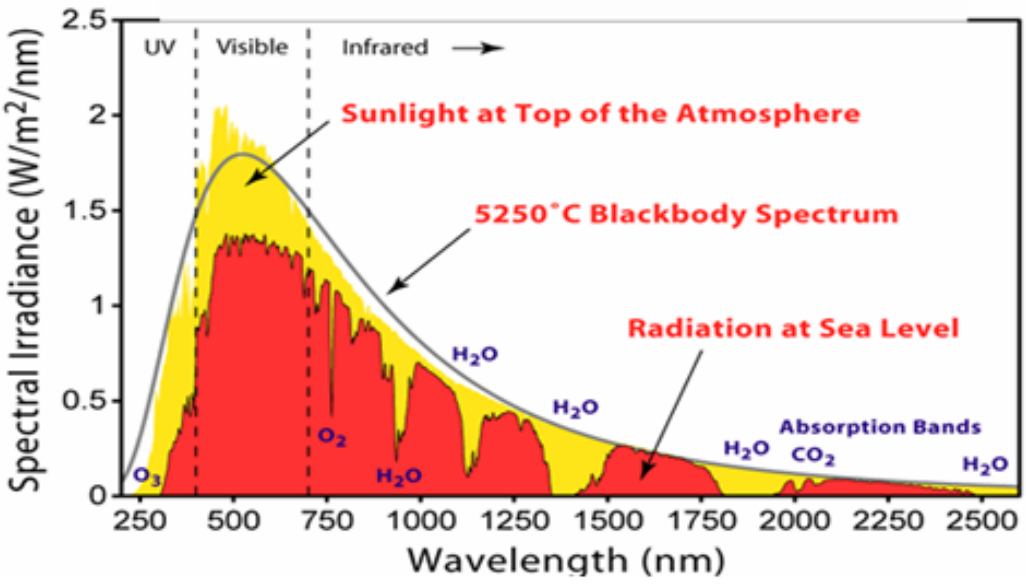
الشكل (2): واجهة برنامج SCAPS-1D توضح طبقات الخلية الشمسية المستخدمة في الدراسة الحالية

ومن خلال استخدام بيانات برنامج SCAPS-1D تم رسم تلك الأطياف كما مبين في الشكل(3)، على النحو الآتي:

1 – الطيف الشمسي القياسي العادي

AM1_5G 1 sun. spectrum (AM1.5)

الطيف الشمسي العادي في الشكل (3)، اطواله الموجية تتراوح من nm250 إلى nm2500 وبلغت أقصى شدة للإشعاع الشمسي كأقصى حد لها هي E-5W/m2/nm 2.00 عند الطول الموجي nm500، والشكل يشير إلى طيفين للإشعاع الشمسي، هما الإشعاع الشمسي المباشر الرأسي والإشعاع الشمسي الكلي الساقط على الأرض نصف الكروي 2π على الألواح الشمسية المائلة بزاوية 38° [7] .



الشكل (3): مخطط لطيف الإشعاع الشمسي القياسي (AM1.5) الساقط على الأرض

2 – طيف الجسم الأسود Black body spectrum

طيف الجسم الأسود المبين في الشكل (4-a) يكون شابه لحد الطيف الشمسي الطبيعي، وتشير معاملاته إلى مدى أطواله الموجية التي تتراوح ما بين nm(300–4000) وأقصى كثافة تصل إلى 1.43E-04 W/cm2/nm عند طول الموجي 500 nm.

3 – طيف الضوء الأبيض ذو الفيض الفوتوني الثابت White spectrum, constant photon flux

يظهر هذا الطيف في الشكل (4-b)، هذه المنطقة شملت جميع الأطياف الشمسية، وهذا يدل على مدى الأطوال الموجية من nm400 إلى nm800، وأن أقصى شدة للإشعاع الشمسي بلغت 7.75E-05 W/ cm2/nm عند طول الموجي nm400، إلا إن مساحة شدة الإضاءة كانت أكبر من مساحة طيف الإشعاع المنبعث من الجسم الأسود وكان مجموع الفوتونات الكلي الواردة 6.242E-16 Photon cm2/s.

4 – طيف الضوء الأبيض ذو القدرة الفوتونية الثابتة White spectrum constant photon power

كما مبين في الشكل (4-c) هذه المنطقة تضمنت كافة الأطياف الشمسية ما بين nm(400–800)، إذ

كانت أقصى للإشعاع الشمسي في هذه المنطقة هي 2.50E-04W/cm²/nm، حيث كانت مساحة شدة الإضاءة أكبر من مساحة طيف الفوتون الثابت للضوء الأبيض.

5- طيف الأحادي الطول الموجي ذو الفيض الثابت

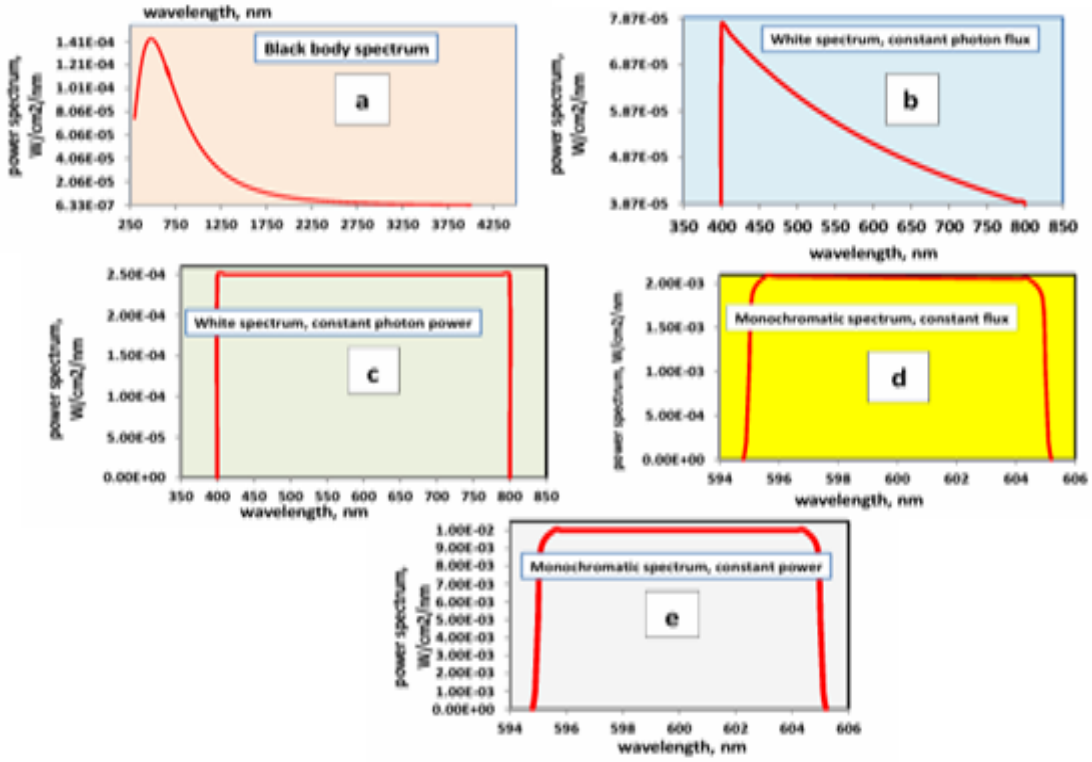
Monochromatic spectrum constant flux

كما هو مبين في الشكل (4-d)، هذه المنطقة تضمنت كافة الأطياف الشمسية ما بين (605.1-594.8)nm حيث كانت أقصى شدة للإشعاع الشمسي تصل إلى 2.07E-03W/cm²/nm، وكانت ذات إضاءة أعلى من أطياف السابقة.

6- طيف الأحادي الطول الموجي ذو القدرة الثابتة

Monochromatic spectrum constant power

كما هو مبين في الشكل (4-e)، وهذه المنطقة تضمنت كافة الأطياف الشمسية بين nm(605.1-594.8)، وكانت أقصى شدة للإشعاع الشمسي حوالي 1.00E-02 W/cm²/nm، وهذه أعلى شدة إضاءة للطيف أحادي اللون ذو الموجة الثابتة [8].



الشكل (4): أطياف الخلية الشمسية المستخدمة في هذه الدراسة

الجدول (1): معلمات الخلية الشمسية قيد الدراسة

Parameter	P-CIGS	n-ZnSe	n-ZnS	n-SnO_2
Thickness (μm)	5	0.5	0.1	0.1
Band gap(eV)	1.2	3.3	3.9	3,6
Electron affinity(eV)	4.5	4.1	4.5	4.5
Dielectric permittivity	10	10	10	9
CB effective density of states (cm^{-3})	2.00 E^{+18}	1.80E^{+18}	1.80 E^{+18}	2.20E^{+18}
VB effective density of states (cm^{-3})	2.2 E^{+19}	1.8 E^{+19}	1.8E^{+19}	1.80E^{+19}
Electron thermal velocity (cms^{-1})	1.00E^{+7}	1.00E^{+7}	1.00E^{+7}	1.00E^{+7}
Hole thermal velocity (cm/s)	1.0E^{+7}	1.0E^{+7}	1.0E^{+7}	1.0E^{+7}
Electron Mobility (cm^2 /Vs)	50	100	100	100
Hole Mobility (cm^2/Vs)	20	25	25	25
Shallow uniform donor density , N_D (cm^{-3})	0	1.0E^{+19}	1.0E^{+19}	1.0E^{+19}
Shallow uniform acceptor density , N_A (cm^{-3})	5.500E^{+15}	0	0	0
Defect type	Neutral	Single Donor	Single Donor	Single Donor
Capture Cross Section Electron (cm^2)	1. 0E^{-15}	1. 0E^{-15}	1.0 E^{-15}	1.0 E^{-15}
Capture Cross Section Hole (cm^2)	1.0E^{-15}	1.0E^{-12}	1.0E^{-12}	1.0E^{-12}
N_t ($1/cm^2$)	1.00E^{+18}	1.00E^{+15}	1.0E^{+15}	1.0E^{+15}

[9][10]

4 - النتائج والمناقشة

Results and discussion

1 . دراسة تأثير الطيف الشمسي على أداء الخلية الشمسية Study the effect of solar spectrum on solar cell performance

تم محاكاة الخلية الشمسية (P-CIGS/n-ZnSe/n-ZnS/n-SnO_2) والمبينة في الشكل(2) أعلاه، بأطياف ضوئية متنوعة والتي تم ذكرها سابقاً وبدرجة حرارة 300 K وتم الحصول على أفضل كفاءة مع طيف الأحادي الطول الموجي ذو القدرة الثابتة التي بلغت 26.59٪، حيث كانت مخرجات الخلية كما في الجدول(2).

الجدول (2): نتائج مخرجات الخلية الشمسية الناتجة من اختبار الأطياف الشمسية.

	Spectrum Model	V_{oc}(-Volt)	Jsc(mA/cm^2)	FF%	Ƞ%	V_{MPP}(-Volt)	J_{MPP}(mA/cm^2)
1	Black body spectrum	0.8491	20.6237	67.039	11.72	0.6870	17.0899
2	AM1_5G 1 sun. spectrum	0.8604	22.9466	66.408	13.11	0.6913	18.9643
3	White spectrum, constant photon flux	0.7865	8.4131	68.864	21.20	0.6488	7.0230
4	White spectrum, constant photon power	0.9450	40.8084	62.348	24.03	0.7156	33.5967
5	Monochromatic, spectrum constant flux	0.7907	9.0605	69.514	24.18	0.6530	7.6264
6	Monochromatic spectrum, constant power	0.9645	44.0201	62.417	26.59	0.7208	36.7649

2 . دراسة تأثير ربط مقاومة التوالي (Rs) على الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية

Effect of Series Resistance (Rs) on Electrical Properties of Solar Cell

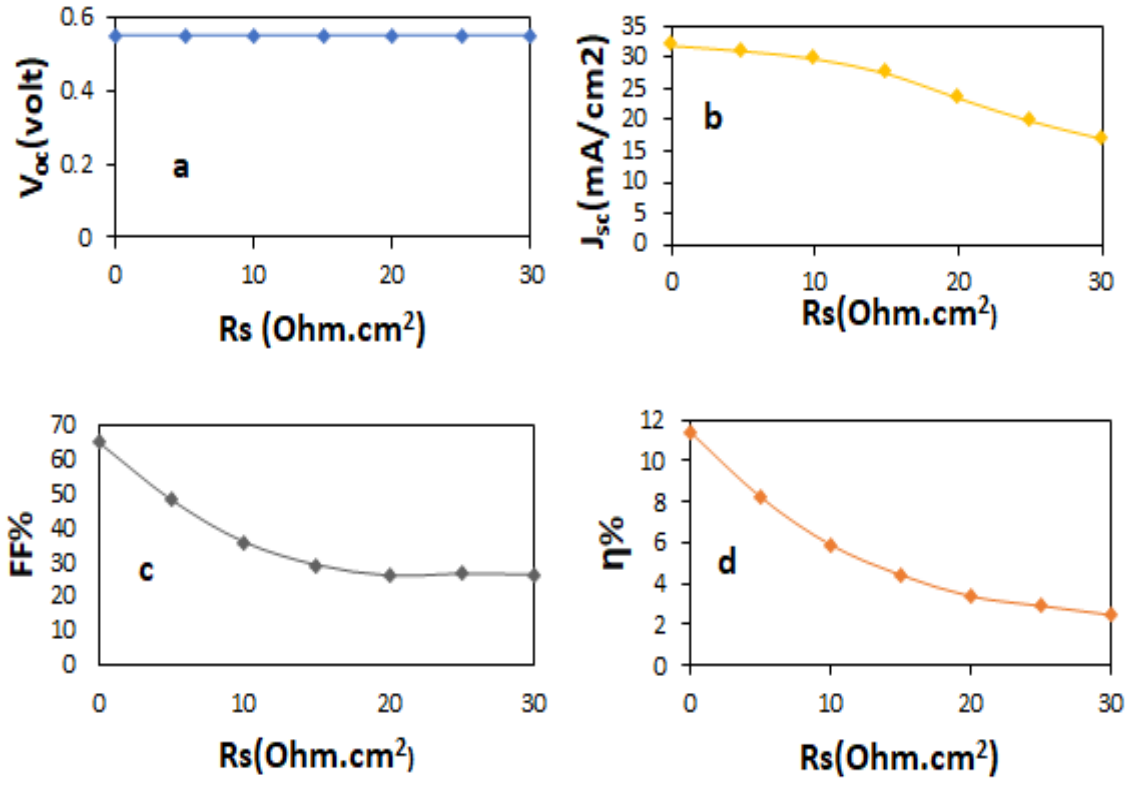
المصدر الأساسي لمقاومة التوالي في الخلية الشمسية هي مقاومة شبه الموصل التي تصنع منها الخلية الشمسية والمقاومة بين المعدن وشبه الموصل، تم دراسة تأثير مقاومة التوالي بحدود ($\Omega.cm^2$ 30–0) بواقع زيادة $\Omega.cm^2$5، إذ تبين عند زيادة مقاومة التوالي تم الحصول على النتائج الآتية:

a– قيمة فولتية الدائرة المفتوحة Voc تبقى ثابتة لا تتأثر عند زيادة مقاومة التوالي لإن التيار عندها يساوي صفر وكما مبين في الشكل (3 - a).

b– تنخفض قيمة تيار دائرة القصر Jsc لأن توصيلية ناقلات الشحنة ستقل وكما هو معلوم عندما زيادة مقاومة التوالي ينخفض التيار الكهربائي وكما هو موضح بالشكل (5-b).

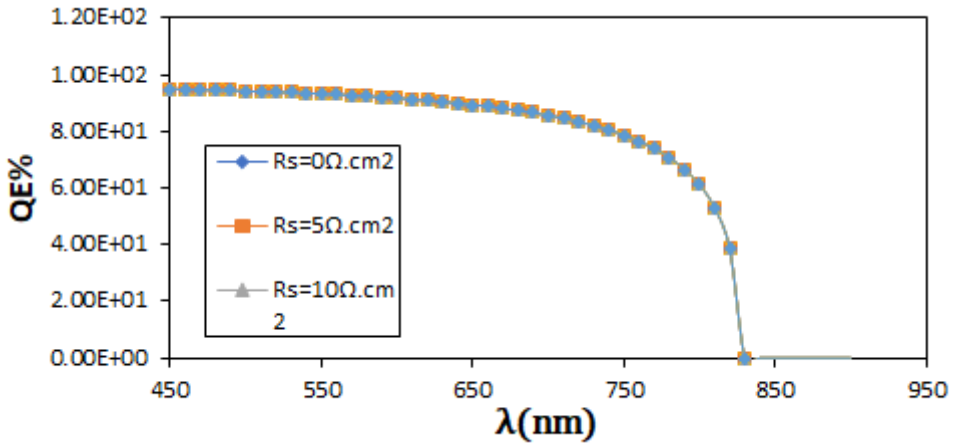
c– تقل قيمة عامل المليء (FF) لأن زيادة مقاومة التوالي تساعد على تقليل التيار وانخفاض في القدرة الخارجية وبالتالي ينخفض عامل المليء كما مبين في الشكل (5-c).

d– تنخفض كفاءة الخلية (η) فتنخفض عند زيادة قيمة مقاومة التوالي لأن القدرة الخارجة تنخفض نسبة إلى القدرة الداخلة إليها وكما مبين في الشكل (5-d) [11].



الشكل (5): تأثير ربط مقاومة التوالي Rs على خصائص (I-V) للخلية الشمسية.

أما الكفاءة الكمية فتعد من العوامل البصرية المهمة في تطبيقات الخلايا الشمسية والتي تعرف بأنها عدد الأزواج (إلكترون- فجوة) التي يولدها كل فوتون التي يولدها كل فوتون ممتص من قبل الخلية، وتستخدم لمعرفة طول انتشار الحاملات وثبات حاملات الشحنة وسرعة إعادة الإتحاد [12]، وكان تأثير ربط مقاومة التوالي (Rs) على الكفاءة الكمية (QE) للخلية الشمسية يكون ضعيفاً جداً لأن الخواص البصرية تعتمد بشكل رئيسي على مقدار إمتصاص الأشعة الساقطة، وتعتمد أيضاً على معدل توليد الأزواج (إلكترون- فجوة)، وكما مبين في الشكل (6).



الشكل (6): تأثير مقاومة التوالي (Rs) على الكفاءة الكمية (QE).

2. دراسة تأثير ربط مقاومة التوازي (Rs) على الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية

Effect of Shunt Resistance (Rs) on Electrical Properties of Solar Cell

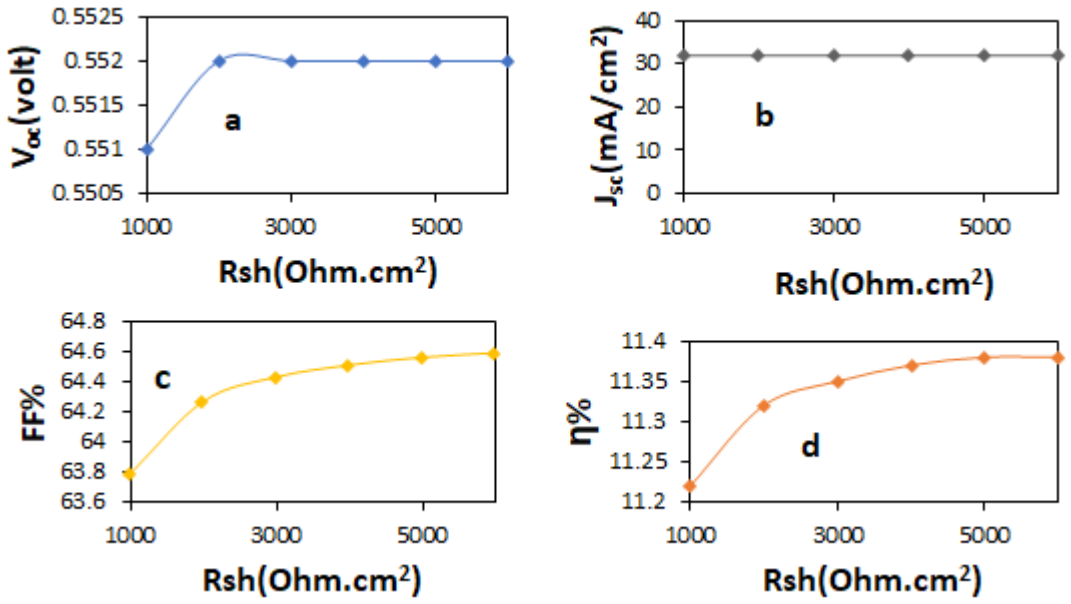
إن القيم الصغيرة لمقاومة التوازي (Rs) تعمل على خفض أداء الخلية الشمسية بسبب فقد الطاقة وإنخفاض قيم عامل المليء ولهذا ينبغي أن تكون قيم مقاومة التوازي كبيرة من أجل إنتاج طاقة عالية وعامل مليء مرتفع [13]، تم تأثير ربط مقاومة التوازي ضمن نطاق (1000-6000) $\Omega.cm^2$ على معلمات الخلية الشمسية وتم الحصول على النتائج كما يأتي:

a- تزداد فولتية دائرة الفتح Voc بشكل طفيف مع زيادة مقاومة التوازي نتيجة لزيادة قدرة الخرج وكما موضح في الشكل (7-a).

b- تبقى قيمة تيار دائرة القصر Jsc مع زيادة مقاومة التوازي عبر الوصلة (pn) وكما مبين في الشكل (7-b).

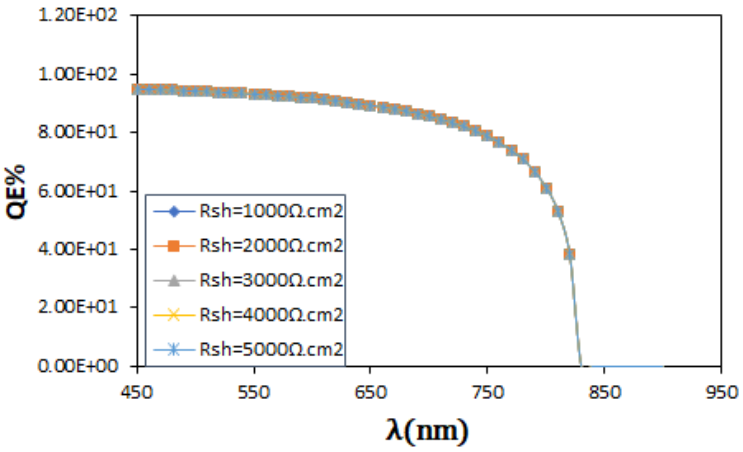
c- زيادة مقاومة التوازي تؤدي إلى ارتفاع عامل المليء بشكل طفيف بسبب زيادة مسار منحني (I-V) وكما مبين في الشكل (7-c).

d- أما كفاءة الخلية فيظهر تأثيرها عند القيم العالية لمقاومة التوازي،لإن عند القيم الأدنى لمقاومة التوازي يحصل نقصان في كفاءة الخلية الشمسية [11]، وكما في الشكل (7-d).



الشكل(7): تأثير ربط مقاومة التوازي (Rsh) على خصائص (I-V) للخلية الشمسية.

أما تأثير ربط مقاومة التوازي (Rsh) على الخصائص البصرية (QE) فهو معدوم تماماً ويمكن إهماله، كما موضح في الشكل (8).



الشكل (8): تأثير مقاومة التوازي (Rsh) في الكفاءة الكمية (QE)

3. تأثير تغير درجة الحرارة على معلمات الخلية الشمسية

Effect of temperature change on solar cell parameters

تم دراسة تأثير تغير درجة الحرارة على معلمات الخلية الشمسية (%Voc, Jsc, FF%, η)، إذ تم تغيير درجة الحرارة من K290 إلى K330 بزيادة قدرها (K10)، وتم الحصول على النتائج التالية:

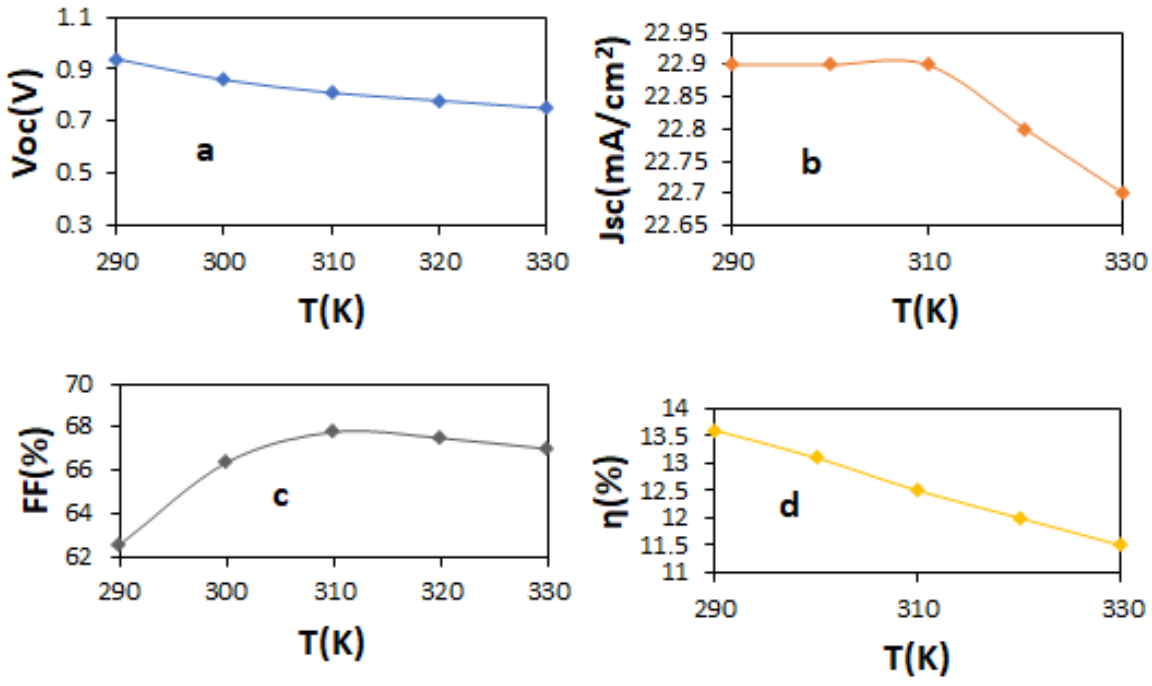
1- إنخفاض في فولتية الدائرة المفتوحة مع زيادة درجة الحرارة حيث أن V_{oc} يتناسب عكسياً مع

درجة الحرارة لأن عند تزايد درجة الحرارة يزيد من الحاملات الأقلية مما يؤدي من قيمة تيار التشبع العكسي وبالتالي يحصل نقصان في قيمة فجوة الطاقة[14] وبذلك يحصل نقصان في فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} كما في الشكل (9-a) حيث بلغت فولتية الدائرة المفتوحة (Voc=0.94 V) عند درجة حرارة T=290 K في حين بلغت (Voc=330 V) عند درجة حرارة T=330 K.

2- من الشكل (9-b) لوحظ أن تيار دائرة القصر(J_{sc}) قد انخفض من 22.9 mA/cm^2 إلى 22.7 mA/cm^2 مع تغيير درجة الحرارة من 290K إلى 330K مع ملاحظة إنه عند درجات الحرارة الأقل من 310K يكون كثافة تيار دائرة القصر ثابت تقريباً لكن عند درجات الحرارة الأكبر من 310K يبدأ بالنقصان بسبب أن زيادة درجات الحرارة يزيد من معدل إعادة الاتحاد وانخفاض فجوة الطاقة مما يؤدي إلى انخفاض بشكل طفيف في كثافة تيار دائرة القصيرة.

3- من الشكل (9-c) لوحظ أن أعلى قيمة لعامل المليء بلغت 67.8٪ عند درجة حرارة 310K ثم يتناقص بشكل طفيف جداً مع ارتفاع درجات الحرارة الأكبر من 310K وذلك بسبب زيادة تيار التشبع العكسي ونقصان فولتية الدائرة المفتوحة Voc مما يؤدي إلى زيادة الالتحام عند السطح البيني [15].

4- أما بالنسبة لكفاءة الخلية الشمسية η فإنها تتناقص مع ارتفاع درجات الحرارة، إذ تكون أعلى قيمة للكفاءة 13.6٪ عند درجة حرارة 290K، في حين بلغت قيمة كفاءة الخلية 11.5٪ عند درجة حرارة 330 K، والسبب في ذلك نتيجة الزيادة الحاصلة في تيار التشبع العكسي مما يؤدي إلى نقصان فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} وبالتالي يحصل نقصان في كفاءة الخلية الشمسية كما في الشكل (9-d).

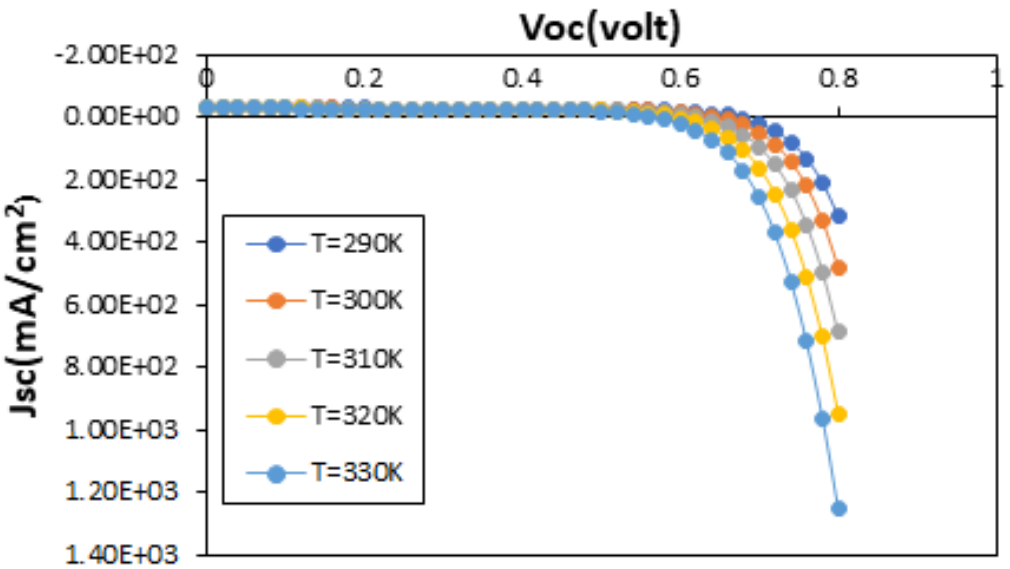


الشكل(9): تأثير درجات الحرارة على خصائص (I-V) للخلية الشمسية.

5 – تأثير تغيير درجة الحرارة على خصائص المنحني(I-V)

Effect of temperature change on curve properties

تم تغيير درجات الحرارة من 290K إلى 330K بمقدار تغيير 10K من أجل دراسة تأثير درجات الحرارة على خصائص المنحني (I-V)، وتبين أن ارتفاع درجة الحرارة يؤثر سلباً على خصائص المنحني(I-V)، وذلك بسبب التزايد الطفيف الحاصل في تيار دائرة القصر مع ارتفاع درجات الحرارة لأنه يتناسب بشكل خطي مع شدة الإشعاع الشمسي الساقط، كما لوحظ حصول انخفاض في فولتية الدائرة المفتوحة عند زيادة درجات الحرارة لأنها تتناسب أسياً مع الفيض الشمسي وكما مبين في الشكل(10)، تؤثر درجات الحرارة على الخواص الكهربائية للثنائي وذلك بسبب ازدياد حاملات الشحنة الأقلية نتيجة الزوج (إلكترون–فجوة) وتؤدي أيضاً إلى زيادة تيار التسرب الناتج عن الحاملات الأقلية، كما أن زيادة درجة الحرارة يؤدي إلى نقصان من قيمة فجوة الطاقة [16].



الشكل(10): تأثير تغيير درجات الحرارة على المنحني (I-V).

6 - الإستنتاجات Conclusions

في هذه الدراسة إجريت محاكاة هيكل الخلية الشمسية الكالكوبرايت والمكون من (p-CIGS/n-ZnSe/ZnS/SnO_2) من خلال إستخدام المحاكي SCAPS-1D الأحادي البعد وكانت أفضل كفاءة تم الحصول عليها η=11.42٪ بإستخدام الطيف الشمسي العادي M1.5G1 وعند درجة حرارة تساوي 300K، عند سُمك 5µm لطبقة CIGS، كما تبين من خلال دراسة تأثير دراسة الأطياف الشمسية المختلفة أن أعلى قيمة لكفاءة الخلية بلغت 26.59٪ مع طيف الأحادي الطول الموجي ذو القدرة الثابتة، كما تم دراسة مقاومة التوالي على الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية وكذلك على الكفاءة الكمية وتم التوصل إلى أن زيادة مقاومة التوالي يؤدي إلى نقصان في قيمة كثافة

تيـار دائـرة القـصر وبالتـالي يـؤدي إلى انخفـاض في قيمـة كفـاءة الخليـة الشمسـية، ووجـد أن تأثـير مقاومـة التـوالي عـلى الكفـاءة الكميـة ضعيـف جـداً ممـا يعنـي أن العوامـل البصريـة للخليـة تعتمـد بشـكل رئيـسي عـلى امتصـاص الأشـعة السـاقة وليـس عـلى مقاومـة التـوالي، كذلـك عنـد دراسـة تأثـير مقاومـة التـوازي عـلى أداء الخليـة الشمسـية وتبـين أن لمقاومـة التـوازي تأثـير مبـاشر عـلى أداء الخليـة، ووجـد أن زيـادة مقاومـة التـوازي تقلـل مـن الفقـد الطفيـلي وتعمـل عـلى تحسـين بعـض الخصائـص مثـل Voc و FF و η ولكنهـا لا تؤثـر بشـكل ملحـوظ عـلى Jsc، وأن القيـم الصغـيرة لمقاومـة التـوازي تـؤدي إلى فقـدان في كفـاءة الخليـة، أمـا تأثيرهـا عـلى الكفـاءة الكميـة يكـون ضئيـل جـداً ومعدمـاً ويمكـن إهمالـه، كـما تـم دراسـة تأثـير درجـة الحـرارة عـلى أداء الخليـة الشمسـية وتبـين عنـد ارتفـاع درجـات الحـرارة يقلـل مـن كفـاءة وأداء الخليـة الشمسـية.

المصادر References

1. Askari Bagher, Mirzaei Vahid, Mirhabibi Mohsen (2015), "Types of solar cells and Application "American journal of optics and Photonics, Folder 3. Page 94. Edited.
2. Tolan, G. J. (2008). Electro-chemical development of CuInGaSe2- based photovoltaic solar cells (Doctoral dissertation, Sheffield Hallam University,).
3. Zyoud, S. H., Zyoud, A. H., Ahmed, N. M., & Abdelkader, A. F. (2021). Numerical modelling analysis for carrier concentration level optimization of CdTe heterojunction thin film–based solar cell with different non–toxic metal chalcogenide buffer layers replacements: using SCAPS–1D software. *Crystals*, *11*(12), 1454.
4. Ganvir, Rasika., 2016. "Modelling of the Nanowire CdS-CdTe Device Design for Enhanced Quantum Efficiency in Window-Absorber Type Solar Cells.".
5. Mouhammed, Adnan Alwan, and Ayed N. Saleh., 2019. "Simulation Effect of Ga_2O_3 Layer Thickness on CdTe Solar Cell by SCAPS-1D." Tikrit Journal of Pure Science, 24(6): 110-116.
6. Pourdadash, Mohammad Hossein, Veeraiyah Thangasamy, Jacqueline Lukose, Mohammadreza Aghaei, and Ajmal Hussain Shah., 2014, "Numerical Analysis on Prospects of High Efficiency CdS/CdTe Thin Film Solar Cell." In IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications (ISIEA), pp. 86-91. IEEE.
7. Burgelman, M. J. Verschraegen, S. Degrave, P. Nollet, Prog. Photovoltaics 12 (2–3) (2004).
8. Rasool, R., Mohammed, A. A., & Hasan, R. F. (2021). Study effects of illumination and temperature on performance of (pn-Si) device using simulation program SCAPS-1D. *Iraqi Journal of Science*, 1524-1536.
9. Zyoud, S. H., & Zyoud, A. H. (2023). Investigating the Impact of Temperature and Interlayer Defects on the Efficiency of Mo/ZnTe/ZnSe/SnO2 Heterojunction Thin Film Solar Cells: A SCAPS-1D Simulation Study. Int. Rev. Model. Simul, 16, 120-128.

10. Mebelson, T. J., & Elampari, K. (2019). Numerical simulation for optimal thickness combination of CdS/ZnS dual buffer layer CuInGaSe2 solar cell using SCAPS 1D. Indian Journal of Science and Technology, 12(45), 1-6.
11. Fink, (2012) Fine line metallization of silicon heterojunction solar cells via collimated aerosol beam direct write, North Dakota State University of Agriculture and Applied Science.
12. Scheer, Roland, and Hans-Werner. 2011. "Schock. Chalcogenide Photovoltaics: Physics, Technologies, and Thin Film Devices", John Wiley & Sons, (BOOK) 17. Tress, Wolfgang, Karl Leo, and Moritz Riede. 2012.
13. Mahmoud, A. K., & Rasool, R. A. (2022). Studying the Effect of Temperature and Resistances of Series "Rs" and Parallel "Rsh" on the Performance of the Solar Cell "FTO/Zn2SnO4/CdS:O/CdTe/Cu2Te" Using the SCAPS-1D Program. Journal of Education and Science, 31(4), 49-66.
14. Green, M.A. (2003) : General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modeling. Prog. Photovolt. Res. Appl. 11(5), 333–340.
15. Wahid, M. F., Howlader, M. N., Ahasan, N., & Rahman, M. M. (2023). Performance improvement of CIGS Solar cell: A Simulation Approach by SCAPS-1D. Energy and Power Engineering, 15(8), 291-306.
16. Singh, P., Singh, S. N., Lal, M., & Husain, M. (2008). Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. Solar Energy Materials and Solar Cells, 92(12), 1611–1616. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.07.010.