المجلة العراقية للبحوث الإنسانية والإجتماعية والعلمية
Iraqi Journal of Humanitarian, Social and Scientific Research
Print ISSN 2710-0952 Electronic ISSN 2790-1254
العـــــدد 19A تشر2ين 2025
No.19A Nov. 2025

محاكاة الخلية الشمسية البيروفسكايت ($CH_3NH_3PbCl_3$) باستخدام برنامج المحاكاة (SCAPS 1-D) ودراسة تأثير تغيير سمك الطبقات على كفاءتها

رداد سالم محمود سليم[1]
[1]، وزارة التربية / المديرية العامة للتربية في محافظة نينوى
*Corresponding Author E-mail: * Raddad.20esp33@student.uomosul.edu.iq
Mob: 07717288588
عوض خضير محمود[2]
[2]وزارة التربية / المديرية العامة للتربية في محافظة نينوى/قسم الاشراف الاختصاصي
*Corresponding Author E-mail: wwd1876@gmail.com
Mob: 07703794931

الخلاصة:

يهتم هذا البحث بمحاكاة الخلية الشمسية البيروفسكايت ذات الخمس طبقات $Cu_2O/CH_3NH_3PbCl_3/TiO_2/Zn_2SnO_4/ZnO$ باستخدام برنامج محاكاة الخلايا الشمسية (SCAPS-1D) ودرس تأثير تغيير السمك لكل طبقة على حدا لجميع طبقات الخلية على مخرجات الخلية الشمسية واختيار السمك الافضل لكل طبقة للحصول على أعلى كفاءة للخلية الشمسية البيروفسكايت ، حيث اعتمدت مادة البيروفسكايت ($CH_3NH_3PbCl_3$) كطبقة امتصاص في هذه الخلية الشمسية واختبر سمك الطبقة الماصة من (0.5-5 µm) وبزيادة مقدارها (0.5µm) .للحصول على أفضل سمك معقول لهذه الطبقة بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة للخلية الشمسية وتبين بعد الاختبار ان أفضل سمك للطبقة الماصة هو (3µm) و تم اختبار سمك طبقة الخازنة أوكسيد التيتانيوم (TiO_2) من(0.05 -1.05µm) وبزيادة مقدارها (0.1µm) وكان أفضل سمك للطبقة الخازنة هو (0.05µm) واختبر سمك طبقة اوكسيد التوصيل الشفافة (TCO) من (0.1 -1µm) وبزيادة مقدارها (0.1µm) وكان أفضل سمك لطبقة (TCO) هو(0.1µm) . كذلك تم اختبار سمك الطبقة النافذة (Zn_2SnO_4) من سمك (0.1-1µm) وبزيادة مقدارها (0.1µm) وكان أفضل سمك لها هو (0.1µm) كذلك تم اضافة طبقة الانعكاس الخلفية وهي (Cu_2O) ودراسة تأثير تغيير سمكها على مخرجات ألخلية من سمك (0.1-1µm) وبزيادة مقدارها (0.1µm) وكان أفضل سمك لها هو (0.1µm) وتم دراسة تأثير الطبقة العاكسة على سمك طبقة الامتصاص واختبر سمك الطبقة الماصة من (0.5-4 µm) وبزيادة مقدارها (0.5µm) .للحصول على أفضل سمك لهذه الطبقة بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة للخلية الشمسية وتبين بعد الاختبار ان أفضل سمك للطبقة الماصة بعد اضافة طبقة الانعكاس الخلفية هو (1.5µm) وبعد دراسة سمك جميع طبقات الخلية واختيار السمك المناسب لكل طبقة كانت مخرجات الخلية الشمسية البيروفسكايت النهائية بالشكل الاتي: V_{oc}=1.407(V), J_{sc}=25.88mA/cm^2, FF=84.36%, η=30.73 %

الكلمات المفتاحية: ألخلية الشمسية، SCAPS- 1D، البيروفسكايت

Simulation of the perovskite solar cell ($CH_3NH_3PbCl_3$) using the simulation software (SCAPS 1-D) and studying the effect of changing layer thickness on its efficiency

.1Raddad Salem Mahmoud Salim
.1Ministry of Education / Directorate General of Education in Nineveh Governorate
.2Awad Khudair Mahmoud
2. Ministry of Education / Directorate General of Education in Nineveh Governorate / Specialized Supervision Department

Abstract:
This research is concerned with simulating the five-layer perovskite solar cell $Cu_2O/CH_3NH_3PbCl_3/TiO_2/Zn_2SnO_4/ZnO$ using the solar cell simulation program (SCAPS -1D) and studied the effect of changing the thickness of each layer separately for all layers of the cell on the output of the solar cell and choosing the best thickness for each layer. To obtain the highest efficiency of the perovskite solar cell, the perovskite material ($CH_3NH_3PbCl_3$) was adopted as the absorption layer in this solar cell, and the thickness of the absorbing layer was tested from (0.5-5 µm) with an increase of (0.5 µm). To obtain the best reasonable thickness for this layer, so that the best efficiency of the solar cell. After testing, it was found that the best thickness of the absorbent layer was (3µm), and the thickness of the titanium oxide (TiO_2) buffer layer was tested from (0.05 - 1.05µm), with an increase of (0.1µm), and the best thickness of the buffer layer was (0.05µm). The thickness of the transparent conductive oxide (TCO) layer was tested from (0.1-1µm) with an increase of (0.1µm), and the best thickness of the (TCO) layer was (0.1µm). The thickness of the window layer (Zn_2SnO_4) was also tested from (0.1-1µm) with an increase of (0.1µm), and the best thickness was (0.1µm). The back-surface field layer was also added, which is (Cu_2O), and the effect of changing its thickness on the cell outputs was studied. From a thickness of (0.1-1µm) and an increase of (0.1µm), the best thickness was (0.1µm). The effect of the back - surface field layer on the thickness of the absorption layer was studied, and the thickness of the absorbent layer was tested from (0.5-4µm) and an increase of (0.5µm). To obtain the best thickness for this layer was obtained so that the best efficiency of the solar cell was obtained. After testing, it became clear that the best thickness of the absorbing layer after adding the back-surface field layer was (1.5µm). After studying the thickness of all layers of the cell and choosing the appropriate thickness for each layer, the final perovskite solar cell outputs were as follows:

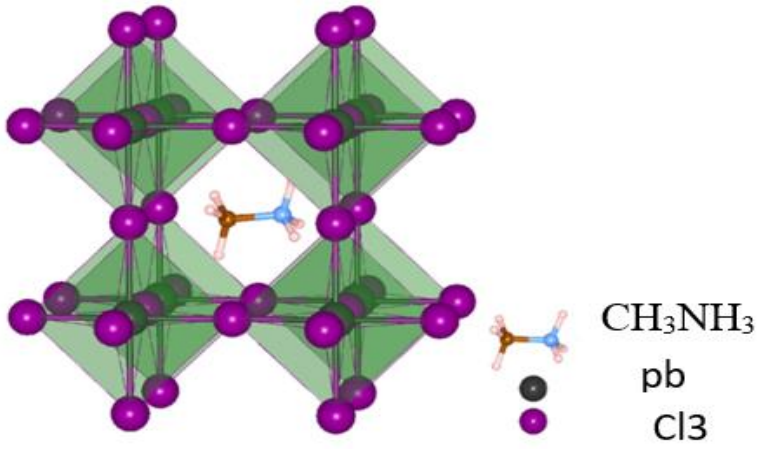
V_{oc}=1.407(V), J_{sc}=25.88mA/cm^2, FF=84.36%, η=30.73%

Keywords: solar cell, SCAPS -1D, perovskite

المقدمة: Introduction

الخلية الشمسية عبارة عن نبائط ضوئية تقوم بتحويل الاشعاع الكهرومغناطيسي القادم من الشمس الى طاقة كهربائية يمكن استخدامها في تطبيقات كثيرة على سطح الأرض وفي القضاء (Chandrasekharan, 2012). حيث ان الخلايا الشمسية تقوم بتجهيز الطاقة للتوابع الأرضية لفترات طويلة جدا، كذلك تُعد بديلاً قوياً كمصدر للطاقة للتطبيقات الأرضية، حيث أنها يمكن أن تحوّل الطاقة الضوئية مباشرة الى طاقة كهربائية وبكفاءة تحويل عالية كما أنها تعد صديقة للبيئة ولا تسبب التلوث (Rassol et al., 2021). في السنوات الاخيرة ازدادت دراسة المركبات الثنائية بغية إنتاج مواد جديدة لتصنيع الخلايا الشمسية، وركزت الدراسات على الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة لتحقيق كفاءة جيدة وبكلفة منخفضة نسبياً

(Mouhammed & Saleh, 2019). عند تعرض الخلية الشمسية الى الاشعاع الضوئي القادم من الشمس فأن الفوتونات التي طاقتها أكبر من فجوة الطاقة للطبقة الماصة تساهم في تهيج المادة بمقدار فجوة الطاقة أما الفوتونات التي طاقتها اقل من فجوة الطاقة فإنها لا تساهم في تهيج المادة وانما تتبدد على شكل حرارة (Ciesielski et al., 2010). تعد الخلايا الشمسية القائمة على مادة البيروفسكايت كطبقة امتصاص منافس قوي للخلايا الشمسية الأخرى لما تملكه هذه الخلايا الشمسية من كفاءة عالية. الصيغة العامة لمركب البيروفسكايت هي ABX_3 حيث ان الايون (X) هو ايون سالب يربط بين الاكاسيد والهاليدات ويمثل كل من A,B ايونين موجبين بحيث يكون الايون (A) أكبر من الايون B) والشكل (1) يبين الهيكل البلوري لمركب البيروفسكايت (Xiao et al., 2014).



الشكل (**1**) التركيبُ البلوري للبيروفسكايت

وتعد الخلايا الشمسية البيروفسكايت منافس لباقي الخلايا الشمسية الاعتيادية الأخرى ومنها خلايا السيليكون متعدد البلورات والتي ما تزال مسيطرة على سوق الطاقة الكهروضوئية المتواجدة حاليا. في هذا البحث تم محاكاة ألخلية الشمسية باستخدام البرنامج الحاسوبي(SCAPS- 1D) واختبر تأثير تغيير سمك كل طبقة من طبقات الخلية الشمسية على كفاءة الخلية وتم دراسة كل طبقة بشكل منفصل.

المواد وطرق العمل:Experimental methods and materials

تم الاعتماد في هذا البحث على البرنامج الحاسوبي SCAPS- 1D في محاكاة الخلية الشمسية البيروفسكايت ($CH_3NH_3PbCl_3$) المعتمدة وهو برنامج حاسوبي احادي البعد يستخدم لمحاكاة الخلايا الشمسية صمم البرنامج في جامعة (Gent) قسم الالكترونيات ونظم المعلومات في بلجيكا. يمكن من خلال هذا البرنامج محاكاة خلية شمسية تتكون من سبع طبقات كحد أقصى لطبقات الخلية والحصول على الخصائص الكهربائية والمخرجات للخلية الشمسية ومعرفة مواصفات الخلية ومنها السمك والعيوب والتطعيم ومعرفة تأثير كل منها على اداء الخلية والحصول على خصائص أخرى للخلية الشمسية منها التيار-فولتية (I-V) وكذلك خصائص (C-F) والكفاءة الكمية (QE) وخصائص (C-V) ويمكن للباحث أيضا اختيار نوع الطيف الشمسي وخزن وتحميل كل إعدادات الخلية كذلك يمكن من خلال برنامج (SCAPS 1-D) رسم المنحنيات البيانية مثل منحني(I-V) ومنحني (QE) (Koen Decock et al., 2011). برنامج SCAPS- 1D يعمل على حل معادلات أشباه الموصلات الأساسية مثل معادلة الاستمرارية ومعادلة بوايسون وكثافة

الموجة الحاملة (الإلكترونات والفجوات) وتضم هذه المعادلات معادلتي الانجراف والتي سببها المجال الكهربائي، ومعادلة الانتشار التي سببها الاختلاف في تركيز حاملات الشحنة وهذه المعادلات هي:

$$jn = q\mu n\, n\varepsilon + qDn\frac{dn}{dx} = q\mu n(n\varepsilon + \frac{KT}{q}\frac{dn}{dx}) = nn\frac{dEFn}{dx} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

$$jn = q\mu p\, P\varepsilon + qDn\frac{dn}{dx} = q\mu p(p\varepsilon + \frac{KT}{q}\frac{dn}{dx}) = \mu pP\frac{dEFp}{dx} \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

حيث ان:

ε: يمثل المجال الكهربائي.

μn μp : الحركية نسبة للإلكترونات والفجوات على التوالي.

Dn Dp :معامل الانتشار للإلكترونات والفجوات على التوالي

JnJp : كثافة التيار نسبة للإلكترونات والفجوات على التوالي.

ومعادلتي الاستمرارية بالنسبة للإلكترونات والفجوات على التوالي:

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

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

حيث ان:

$Gp(x)$ $Gn(x)$ -تمثل عملية تولد الالكترونات والفجوات على التوالي

$Rp(x)$ $Rn(x)$ تمثل إعادة التركيب للإلكترونات والفجوات

وكذلك معادلة بوايسون التي تربط بين الجهد الكهرو ستاتيكي للإلكترونات (Φ) ومعادلة كثافة الشحنات، والتي تُعتبر البداية لحل للمتغيرات في الكهربائية الساكنة في أشباه الموصلات (Ganvir, 2016).

$$\frac{\mathrm{d\ ln(E(x))}}{\partial \mathrm{x}} \cdot \frac{\mathrm{d\Phi(x)}}{\mathrm{dx}} + \frac{d2\Phi}{dx^2} = \frac{\mathrm{f(x)}}{\mathcal{E}(X)} \quad \ldots\ldots\ldots (5)$$

وفي حالة $(\mathcal{E})$ تكون ثابتة تصبح معادلة بوايسون بالصيغة الآتية:

$$\frac{d2\Phi}{dx^2} = -\frac{f(x)}{\mathcal{E}} \quad \ldots\ldots\ldots (6)$$

والتيار الذي يمر عبر الخلية الشمسية يمكن حسابه من خلال المعادلة:

$$I = I_{\circ}\,(\exp\frac{qv}{KT} - 1) \quad \cdots\cdots\cdots(7)$$

حيث ان:

(I) يمثل تيار دائرة الحمل. (I_o) يمثل تيار التشبع العكسي

(T) تمثل درجة الحرارة. (K) يمثل ثابت بولتزمان

ويمكن أيضا حساب فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) للخلية الشمسية من العلاقة الآتية:

$$Voc = \frac{KT}{q} ln \frac{Isc}{Io} + 1 \qquad \cdots\cdots\cdots (8)$$

عامل المليء يمكن تعريفه بأنه تربيع المنحني (I - V) يرمز له بالرمز FF وهو النسبة بين أقصى قدرة الى أقصى كثافة تيار وفولتية يمكن ان يتولد في الخلية (Ngoupo , 2019)

ويمكن حساب عامل المليء من العلاقة الاتية:

$$FF = \frac{Vm\ \mathrm{Im}}{Voc\ Isc} \qquad \cdots\cdots\cdots (9)$$

حيث ان:

(V_m) يمثل اقصى جهد يتولد من الخلية الشمسية
(I_m) يمثل اقصى تيار يتولد من الخلية الشمسية

كفاءة الخلية الشمسية(**η**) هي النسبة بين أعظم قدرة تتولد في الخلية الشمسية والقدرة الساقطة على الخلية يمكن حسابها من خلال العلاقة:

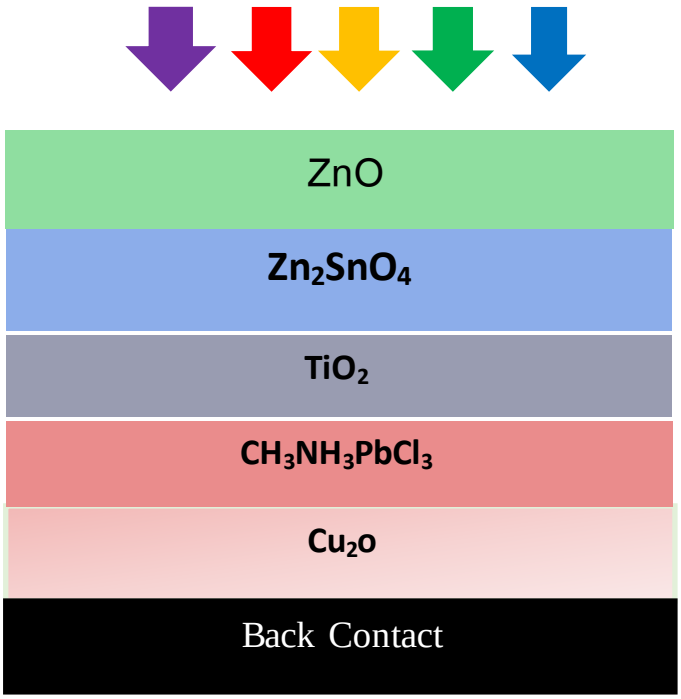
$$\eta = \frac{output\ Power\ (Pout)}{Input\ Power\ (Pin)} \times 100\% \qquad \cdots\cdots\cdots (10)$$

ويمكن كتابة العلاقة بالشكل التالي:

$$\eta = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{P_{\mathrm{in}}} \times 100\% \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 11$$

تركيب الخلية الشمسية:

تتكون الخلية الشمسية المعتمدة في هذا البحث من خمس طبقات هي طبقة الانعكاس الخلفية (Cu_2o) وطبقة الامتصاص البيروفسكايت ($CH_3NH_3PbCl_3$) والطبقة الخازنة (TiO_2) والطبقة النافذة (Zn_2SnO_4) وطبقة اوكسيد التوصيل الشفافة (ZnO) كما في الشكل (2)



الشكل (2): طبقات الخلية الشمسية البيروفسكايت

باستخدام معلمات طبقات الخلية الشمسية المثبتة في الجدولين (1)و(2)

الجدول (1): معلمات طبقات الخلية الشمسية البيروفسكايت

Parameters	Cu_2o	$CH_3NH_3PbCl_3$	TiO_2	Zn_2SnO_4	ZnO
Thickness (µm)	0.1	1.5	0.05	0.1	0.1

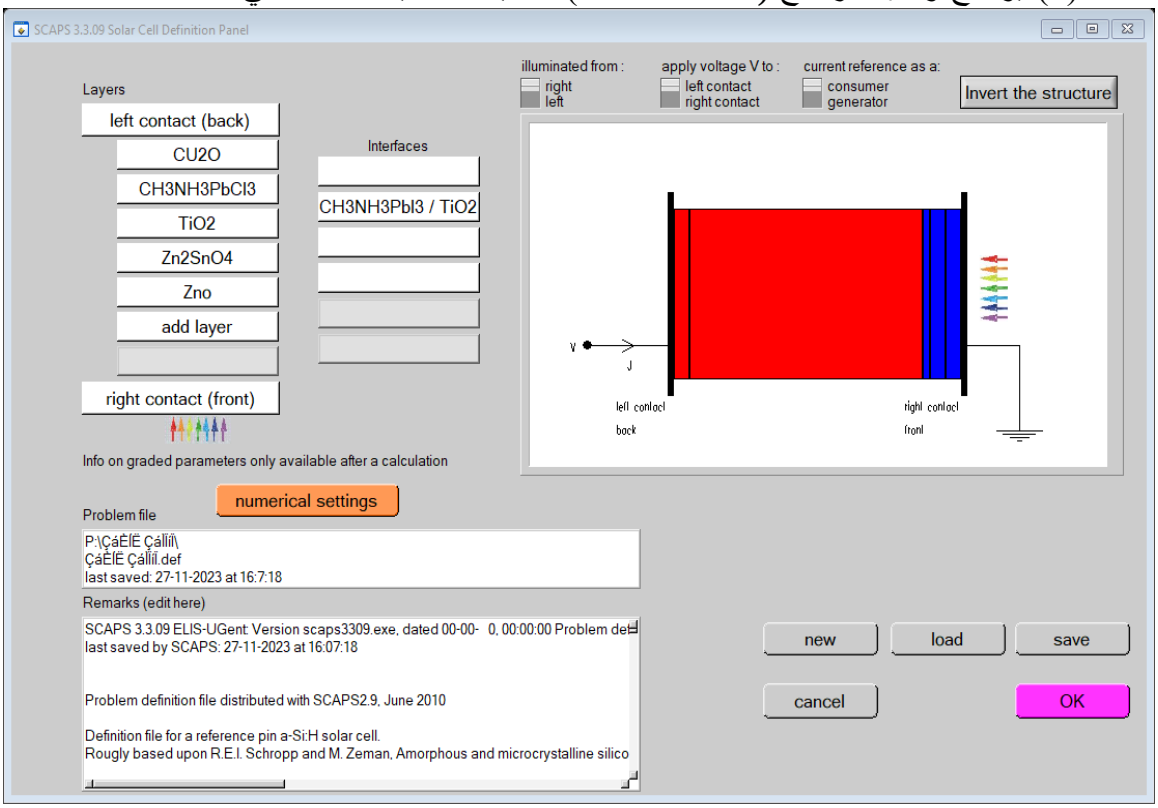
Band gap (ev)	**2.17**	**1.54**	**3.2**	**3.35**	**3.3**
Electron affinity (ev)	**3.2**	**3.9**	**4.9**	**4.5**	**4.4**
Dielectric permittivity (relative)	**6.6**	**6.5**	**9**	**9**	**9**
CB. effective density of states ($1/cm^3$)	**2.5 E + 20**	**2.2E+18**	**1.0E+21**	**2.0E+18**	**2.20E+18**
V.B. effective density of states ($1/cm^3$)	**2.5 E + 20**	**1.8E+19**	**2.0E+20**	**1.5E+19**	**1.80E+19**
Electron thermal velocity (cm/s)	**1.0E+7**	**1.0E+7**	**1.0E+7**	**1.0E+7**	**1.0E+7**
Hole thermal velocity (cm/s)	**1.0E+7**	**1.0E+7**	**1.0E+7**	**1.0E+7**	**1.0E+7**
Electron Mobility (cm^2/Vs)	**80**	**2**	**2.0E+2**	**32**	**100**
Hole Mobility (cm^2/Vs)	**80**	**2**	**1.0E+2**	**3**	**25**
Shallow uniform donor density, N_D ($1/cm^3$)	**0**	**0**	**1.0E+19**	**1.0E+19**	**1.0E+19**
Shallow uniform acceptor density N_A ($1/cm^3$)	**3.0E + 18**	**1.0E+15**	**0**	**0**	**0**
Defect type	**Single Donor**	**Single Donor**	**Single Donor**	**Single Donor**	**Single Donor**
Capture Cross Section Electrons (cm^2)	**1.0E-17**	**1.0E-17**	**1.0E-15**	**1.0E-15**	**1.0E-15**

Capture Cross Section Hole (cm^2)	**1.0E-12**	**1.0E-12**	**1.0E-15**	**1.0E-15**	**1.0E-15**
Nt ($1/cm^2$)	**1.0E+12**	**1.0E+12**	**1.0E+18**	**1.0E+18**	**1.0E+18**

Parameters	
Defect type	**Neutral**
Capture Cross Section Electrons (cm^2)	1×10^{-19}
Capture Cross Section Hole (cm^2)	1×10^{-19}
Nt ($1/cm^2$)	$1 \times 10^{+10}$

الجدول (2) معلمات السطح البيني للخلية الشمسية

الشكل (3) يوضح واجهة برنامج (SCAPS- 1D) للخلية الشمسية المعتمدة في هذا البحث



الشكل (3) واجهة برنامج SCAPS- 1D

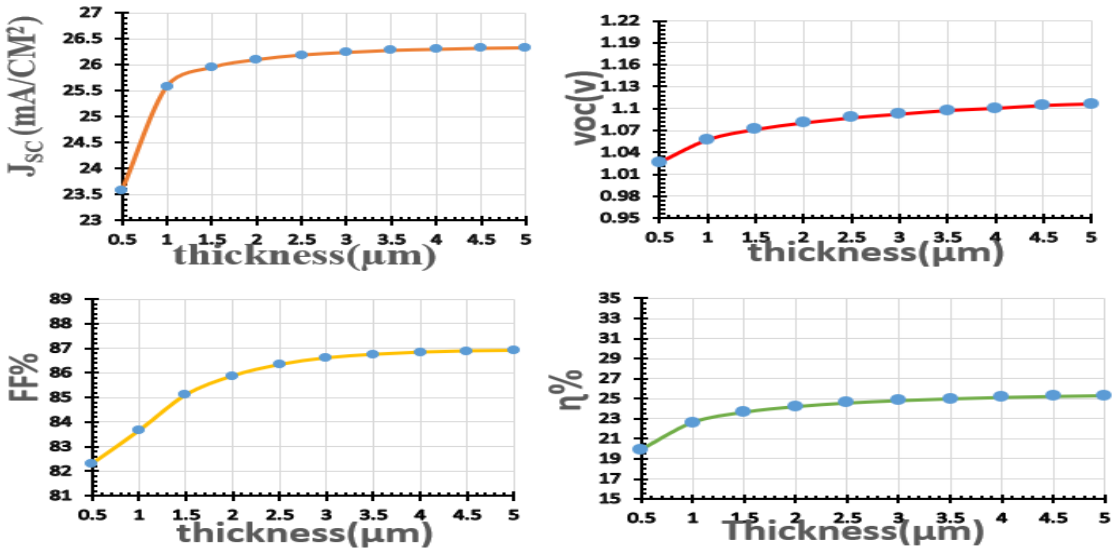
النتائج والمناقشة:Results and Discussion

تم محاكاة الخلية الشمسية البيروفسكايت($CH_3NH_3PbCl_3$) المعتمدة في هذا البحث باستخدام برنامج المحاكاة الحاسوبي (SCAPS -1D) وتم اختبار سمك كل طبقة من طبقات الخلية الشمسية واختيار أفضل سمك لكل طبقة على حدة من اجل الحصول على أقصى كفاءة للخلية الشمسية بالشكل التالي:

أولا- سمك طبقة الامتصاص:

بعد تثبيت سمك طبقة اوكسيد التيتانيوم (TiO_2) (الطبقة الخازنة) بسمك(0.5µm) تم اختبار سمك الطبقة الماصة ($CH_3NH_3PbCl_3$) من(1-5 µm) وبزيادة مقدارها (0.5µm) وذلك من اجل الحصول على أفضل سمك معقول للخلية الشمسية بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة للخلية تبين انه أفضل سمك للطبقة الماصة هو (3µm) وكانت النتائج بالشكل التالي:

(Voc=1.093 (V), Jsc=26.24 mA/cm^2, FF=86.60 %, η=24.84%)



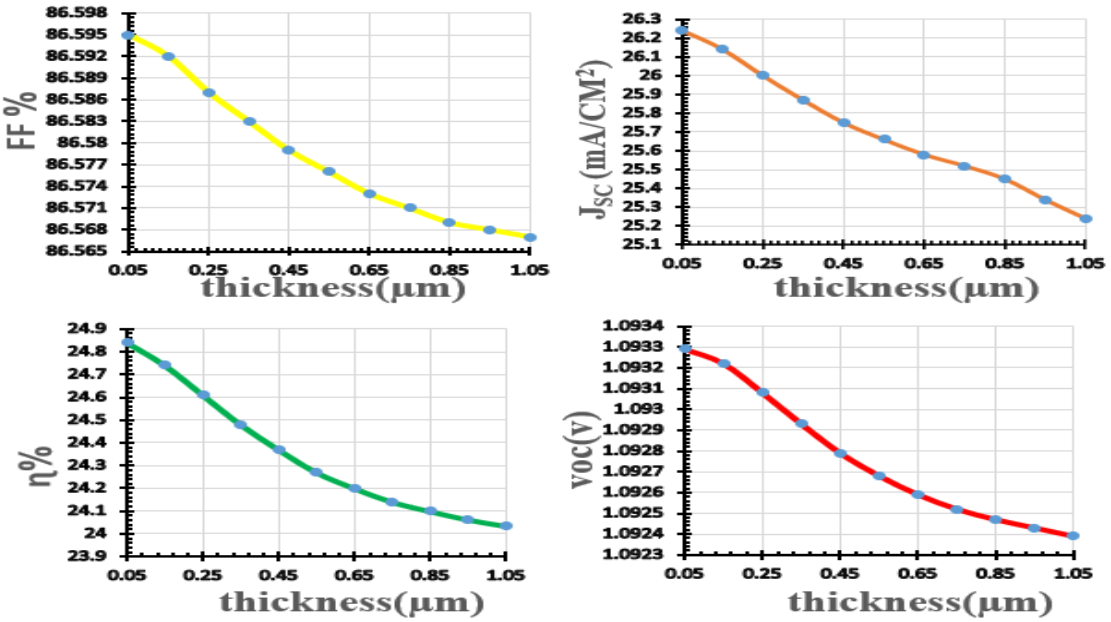
الشكل (4): يبين تأثير تغيير سمك الطبقة الماصة على خواص الخلية الشمسية.

من ملاحظة الشكل (4) أعلاه يتبين زيادة كثافة تيار دائرة القصر J_{sc} مع زيادة سُمك طبقة الامتصاص حتى السمك (3µm) ثم يستقر بعدها، ذلك بسبب الامتصاص غير الكامل للفوتونات الساقطة على الخلية عند السمك أقل من (3µm)، واستقرار قيمتها بعد هذا السمك يدل على أن معظم الفوتونات الساقطة تم امتصاصها من قبل الطبقة الماصة وتحويلها إلى الزوج (الكترون- فجوة) وكذلك فان زيادة السمك أكثر تؤدي الزيادة احتمالية إعادة الالتحام. وبعد هذا السمك يلاحظ ثبوت عامل المليء تقريبا .كذلك من ملاحظة الشكل ازدياد فولتية الدائرة المفتوحة (V_{OC}) مع زيادة سمك الطبقة الماصة وسبب ذلك هو ان لمادة البيروفسكايت عامل امتصاص عالٍ فعند زيادة السمك للطبقة الماصة تزداد عملية امتصاص الفوتونات الساقطة وتحويلها الى الزوج (الكترون -فجوة) وبالتالي تزداد فولتية الدائرة المفتوحة وتيار دائرة القصر وحسب العلاقة رقم (8) (Lin et al., 2014). كما يلاحظ في كفاءة الخلية الشمسية مع زيادة سمك الطبقة الماصة الى حد السمك (3µm) وتبدأ بعدها بالاستقرار وهذا متوافق مع بحوث أخرى ذات الصلة (Dey et al., 2015).

ثانيا-سمك الطبقة الخازنة:

بعد ان اختبر تأثير سمك طبقة البيروفسكايت الماصة تم تثبيت سمكها بمقدر(3µm) تم اختبار تأثير تغيير سمك الطبقة الخازنة من (0.05-1.05µm) وبزيادة مقدارها(0.1µm) من اجل الحصول على أفضل سمك معقول لها بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة الخلية وتبين انه أفضل سمك للطبقة الخازنة هو(0.05µm) وكانت نتائج مخرجات الخلية الشمسية بالشكل التالي:

(V_{oc}=1.0932V, J_{sc}=26.46 mA/cm^2, FF=86.595 %, η=24.84%)



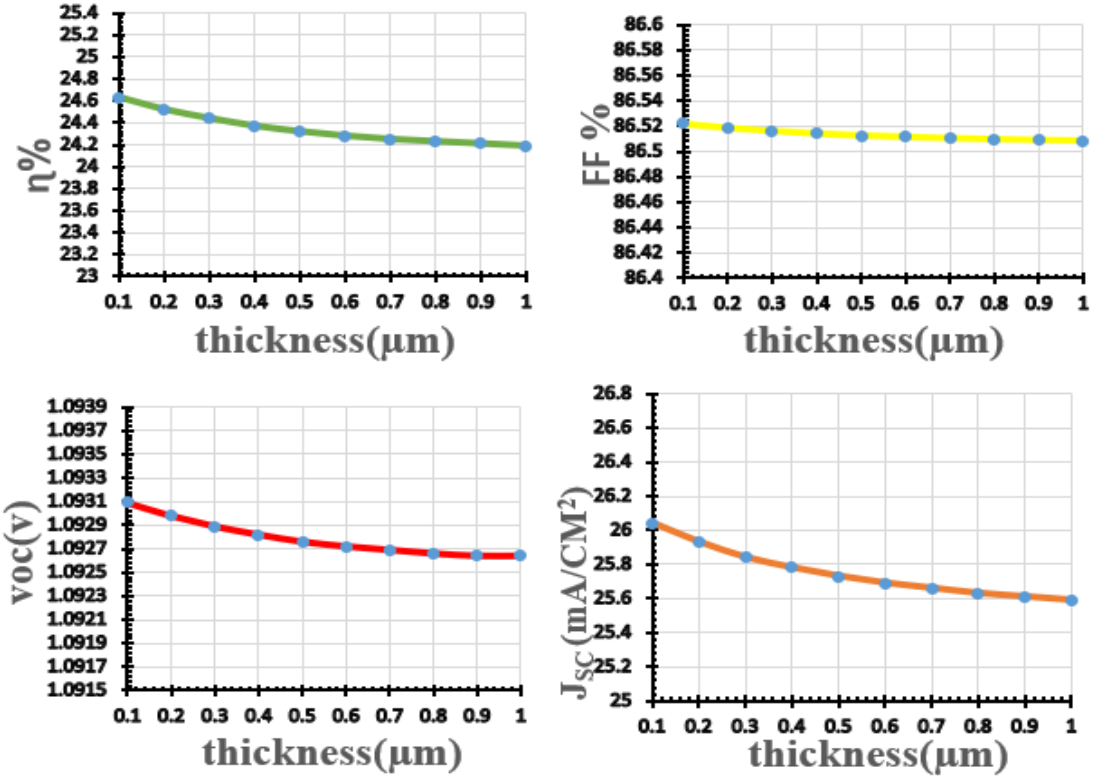
الشكل (5) تأثير تغيير سمك الطبقة الخازنةTiO_2 على مخرجات الخلية الشمسية

يلاحظ من خلال الشكل (5) أعلاه نقصان كل من تيار دائرة القطع وفولتية الدائرة المفتوحة مع زيادة سمك الطبقة الخازنة نتيجة زيادة عملية الالتحام عند السطح البيني ونتيجة تكون مراكز قنص والتي تعمل على استنزاف حاملات الأقلية كما يلاحظ أيضا نقصان بشكل طفيف في عامل المليء كذلك انخفاض في قيمة الكفاءة عند زيادة سمك الطبقة الخازنة وذلك بسبب إعاقة وصول الفوتونات الى الطبقة الماصة التي تمر من خلال الطبقة الخازنة كذلك بسبب صغر عمر الناقلات وزيادة عملية الالتحام عند السطح البيني وعندها سوف يقل انتاج الازواج (الكترون –فجوة) وبالتالي نقصان في تيار دائرة القصير أيضا(Scheer & Schock, 2011).

ثالثاً- سمك طبقة اوكسيد التوصيل الشفافة:

بعد دراسة تأثير تغيير سمك الطبقة الماصة والطبقة الخازنة دُرس تأثير تغيير سمك طبقة اوكسيد التوصيل الشفافة من (0.1 -1.0µm) وبزيادة مقدارها (0.1µm) من اجل الحصول على أفضل سمك لها للحصول على أفضل كفاءة الخلية الشمسية وتبين انه أفضل سمك لطبقة اوكسيد التوصيل الشفافة لهذه الخلية هو (0.1µm) وكانت النتائج بالشكل التالي:

(V_{oc}=1.93 (V), J_{sc}=26.042 mA/cm^2, FF=86.52 %, η=24.63%



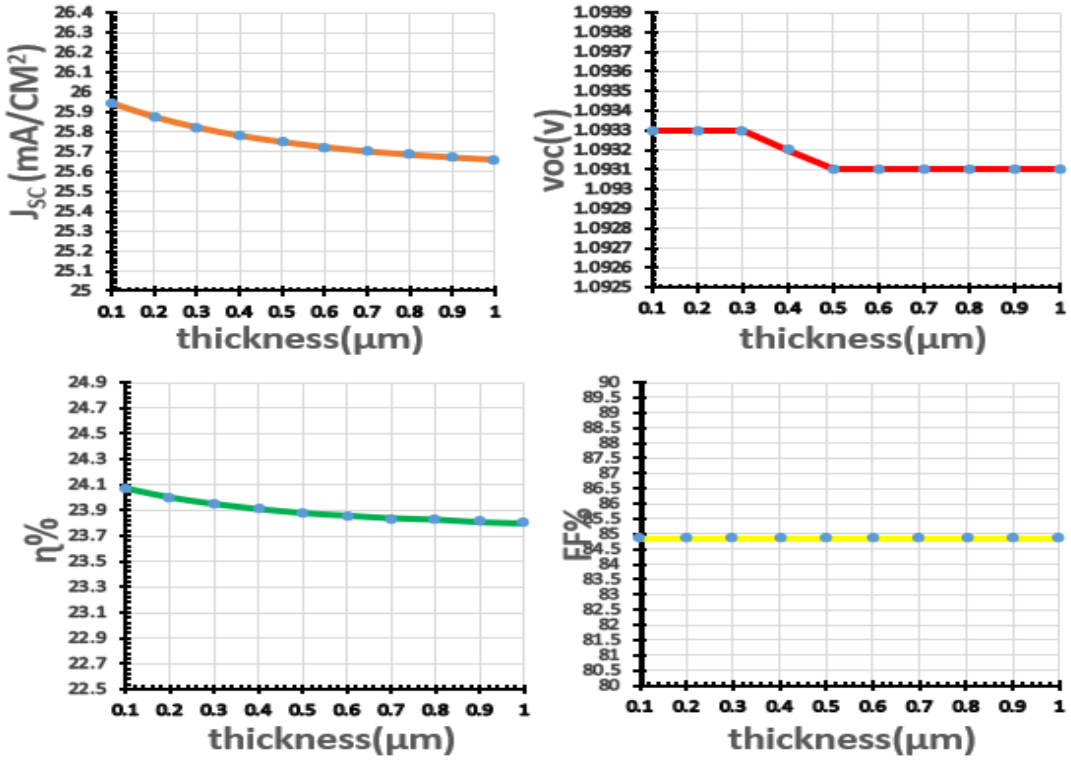
الشكل (6) تأثير تغيير سمك طبقة أوكسيد التوصيل الشفافة على مخرجات الخلية

يلاحظ من خلال الشكل (6) أعلاه تأثير تغيير سمك طبقة أوكسيد التوصيل الشفافة بشكل طفيف على مخرجات الخلية وذلك بسبب كبر فجوة الطاقة لهذه الطبقة وبالتالي لا يحدث امتصاص للفوتونات الساقطة على الخلية خلال طبقة التوصيل الشفافة

رابعاً-سمك الطبقة النافذة:

بعد ان تم اختبار تأثير تغيير سمك الطبقة الماصة وتثبيت سمكها بمقدار(3µm) واختيار تأثير سمك الطبقة الخازنة بسمك (0.05µm) وطبقة اوكسيد التوصيل الشفافة بسمك(0.1µm) تم اختبار تغيير سمك الطبقة النافذة من (0.1-1µm) وذلك للحصول على أفضل سمك لها للحصول على أفضل كفاءة الخلية الشمسية وتبين ان أفضل سمك للطبقة النافذة هو (0.1µm) وكانت النتائج بالشكل التالي:

[V_{oc}=1.093 V, J_{sc}=25.94 mA/cm^2, FF=84.86 %, η=24.07%]



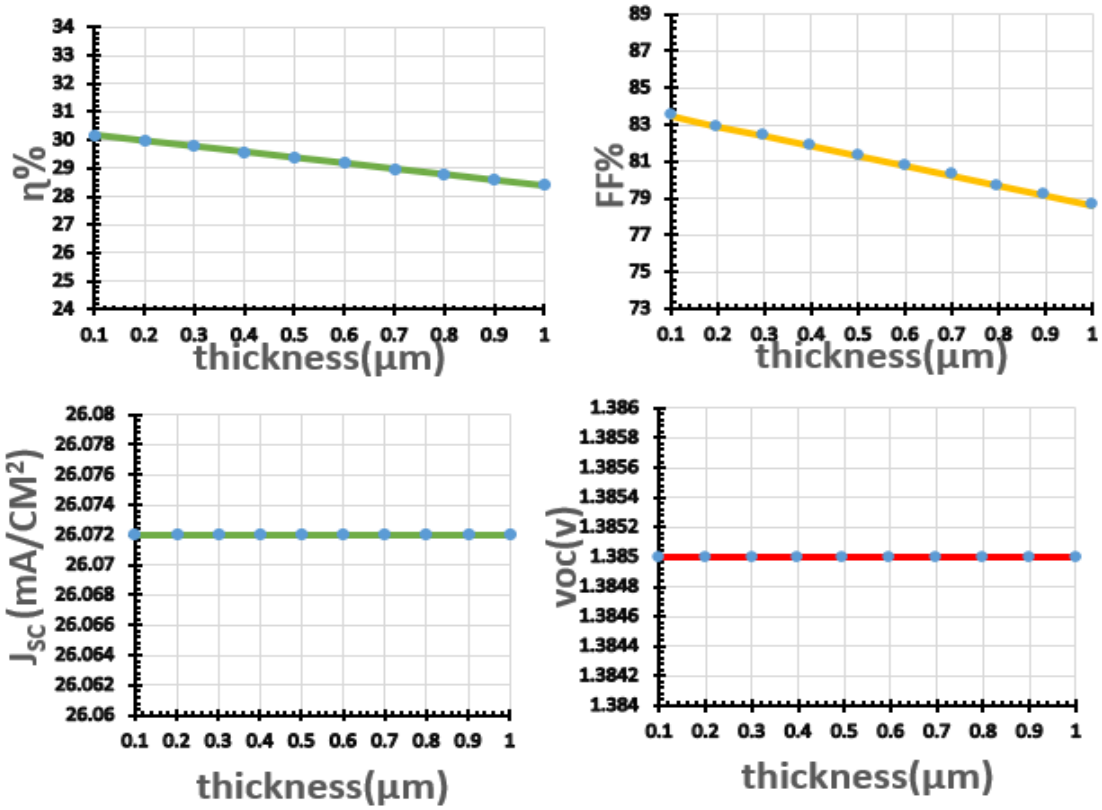
الشكل (7): تأثير تغييرتغيير سمك الطبقة النافذة على مخرجات الخلية الشمسية

يلاحظ من الشكل (7) نقصان في تيار دائرة القصر كذلك نقصان كفاءة الخلية مع زيادة سمك الطبقة النافذة وذلك نتيجة لزيادة عملية الامتصاص للفوتونات الساقطة على الخلية الشمسية وهذا يؤثر على كمية الفوتونات التي تصل الى طبقة الامتصاص وهذا يؤدي الى التناقص في تيار دائرة القصر وكفاءة الخلية مع زيادة سمك الطبقة النافذة[16]. ويلاحظ بقاء عامل المليء ثابتاً مع تغيير سمك الطبقة النافذة ذلك لان الطبقة النافذة تعمل على تقليل عملية إعادة الاتحاد (Teyou et al., 2015). وكان أفضل سمك للطبقة النافذة هو (0.1µm)

خامسا -تأثير تغيير سمك الطبقة الخلفية العاكسة على مخرجات الخلية الشمسية:

غُير سمك طبقة الانعكاس الخلفي من (01-1 µm) وبزيادة مقدارها(0.1µm) بعد تثبيت سمك طبقة الامتصاص عند (3µm) من اجل الحصول على أفضل سمك لها للحصول على أفضل كفاءة الخلية الشمسية وتبين انه أفضل سمك هو (0.1µm) تبين انه الدور الرئيسي للطبقة العاكسة هو التغلب على مشكلة التوصيل الخلفي غير الأموي التي تعاني منها الطبقة الماصة وتساعد أيضا على ايجاد جهات الاتصال مستقرة (Carlsson & Brinkman, 2006). وكانت نتائج الخلية الشمسية بالشكل التالي:

(V_{oc}=1.380V, J_{sc}=26.072 mA/cm^2, FF=83.48 %, η=30.16%)

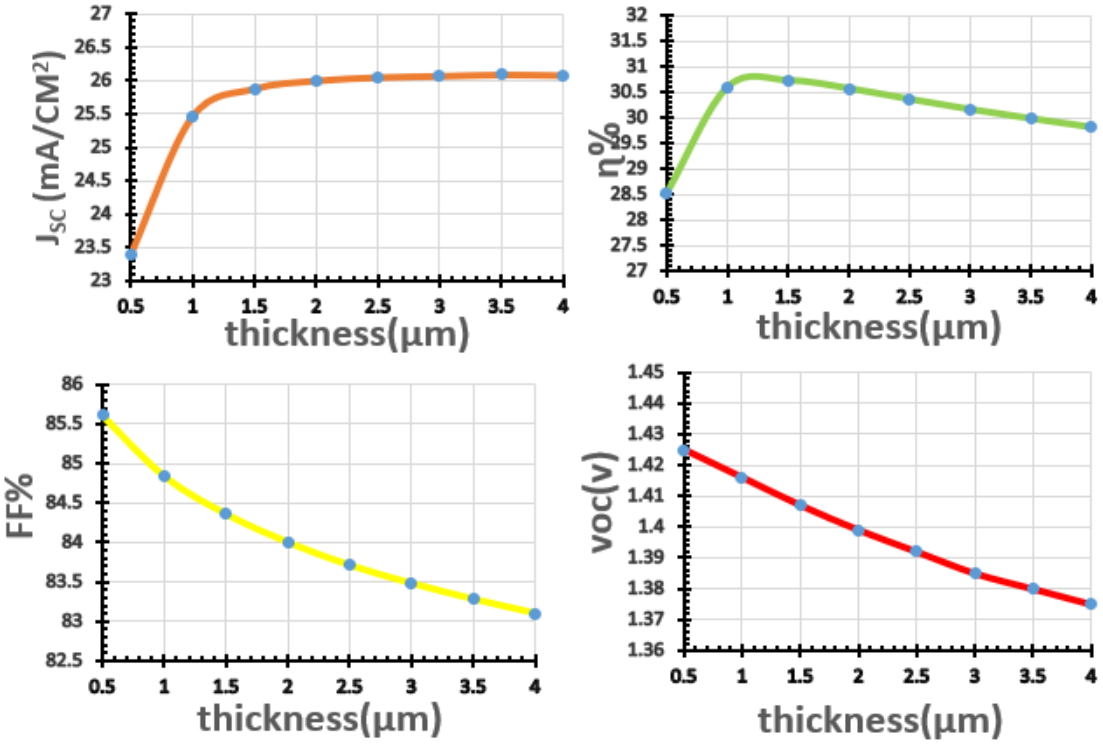


الشكل (8): تأثيرتغيير سمك الطبقة الخلفية العاكسة على مخرجات الخلية الشمسية.

سادسا ـتأثير اضافة طبقة الانعكاس الخلفية على سمك طبقة الامتصاص:

بعد إضافة طبقة الانعكاس الخلفي الى الخلية الشمسية أختبر تأثير تغيير سمك طبقة الامتصاص من (0.5-4µm) وبزيادة مقدارها (0.5µm) من اجل الحصول على أفضل سمك للطبقة الماصة بحيث تعمل الخلية الشمسية بأقصى كفاءة لها وكانت افضل كفاءة للخلية الشمسية عندما كان سمك طبقة الامتصاص بمقدار (1.5µm) مما ساهم إضافة الطبقة العاكسة في تقليل سمك طبقة الامتصاص في الخلية الشمسية كما هو مبين في الشكل(9) وبالتالي تقلل كلفتها الإنتاجية كما جاء في بحوث منشورة (Dey et al., 2015; Amin et al., 2007).

وسبب ذلك هو ان طبقة الانعكاس الخلفية تعمل على التقليل من عملية إعادة الاتحاد في جهة الاتصال الخلفية كما تعمل على تعزيز الناقلات من خلال عكسها نحو الوصلة الرئيسة وبالتالي تساعد على زيادة الكفاءة للخلية الشمسية(Scheer , 2011).وكانت معطيات الخلية الشمسية كما يلي:



(V_{oc}=1.407(V), J_{sc}=25.88mA/cm^2, FF=84.36%, η=30.73 %)

الشكل (9): تأثيرسمك الطبقة ألماصة على مخرجات الخلية بعد إضافة طبقة الانعكاس

الاستنتاجات:Conclusions

من خلال اجراء هذ البحث تم استنتاج ما يلي:

بعد اجراء الدراسة على الخلية الشمسية المكونة من طبقة الامتصاص والطبقة الخازنة (P- $CH_3NH_3PbCl_3$ /n- TiO_2) تبين أن افضل سمك للطبقة الخازنة هو (0.05µm) والطبقة الماصة هو (3µm) وتم الحصول على أعلى كفاءة للخلية وتساوي (24.84%) وبعد إضافة طبقة أوكسيد التوصيل الشفافة (ZnO) الى الخلية الشمسية تم دراسة تأثير تغيير سمك هذه الطبقة على مخرجات الخلية الشمسية وتبين من خلال الدراسة ان افضل سمك لها هو(0.1µm) إذ أصبحت كفاءة الخلية تساوي(24.63%) وبعد ذلك تم دراسة تأثير تغيير سُمك الطبقة النافذة (Zn_2SnO_4) على مخرجات الخلية الشمسية وتبين أن افضل سمك لها هو (0.1µm) وكانت اعلى كفاءة للخلية الشمسية هو(24.07%) وبعد ان تم إضافة طبقة الانعكاس الخلفية Cu_2O الى الخلية الشمسية تم دراسة تغيير سمك طبقة الانعكاس الخلفي وتبين أن افضل سمك لها هو (0.1µm) وكانت اعلى كفاءة للخلية الشمسية هو(30.16%) وتم دراسة تأثير تغيير سمك الطبقة الماصة بعد إضافة طبقة الانعكاس الخلفية تبين أن أفضل سمك للطبقة الماصة هو (1.5µm) وكانت

اعلى كفاءة للخلية الشمسية هو(30.73%) وكانت النتائج النهائية للخلية الشمسية التي تم الحصول عليها خلال هذا البحث هي:

[V_{oc}=1.407 (V), J_{sc}=25.88 mA/cm^2, FF=84.36 %, η=30.73 %]

المصادر:

- Amin, N., Sopian, K., & Konagai, M. (2007). Numerical modeling of CdS/CdTe and CdS/CdTe/ZnTe solar cells as a function of CdTe thickness. Solar Energy Materials and Solar Cells, 91(13), 1202–1208.
- Carlsson, T., & Brinkman, A. W. (2006). Identification of degradation mechanisms in field-tested CdTe modules. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 14(3), 213–224.
- Casas, G. A., Cappelletti, M. A., Cedola, A. P., Soucase, B. M., & Blanca, E. L. P. Y. (2017). Analysis of the power conversion efficiency of perovskite solar cells with different materials as hole-transport layer by numerical simulations. Superlattices and Microstructures, 107, 136–143.
- Chouhan, A. S., Jasti, N. P., & Avasthi, S. (2018). Effect of interface defect density on performance of perovskite solar cell: Correlation of simulation and experiment. Materials Letters, 221, 150–153. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.03.095
- Ciesielski, P. N., Hijazi, F. M., Scott, A. M., Faulkner, C. J., Beard, L., Emmett, K., Rosenthal, S. J., Cliffel, D., & Jennings, G. K. (2010). Photosystem I–based biohybrid photoelectrochemical cells. Bioresource Technology, 101(9), 3047–3053.
- Decock, K., Khelifi, S., & Burgelman, M. (2011). Modelling multivalent defects in thin film solar cells. Thin Solid Films, 519(21), 7481–7484. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.12.039
- Dey, M., Matin, M. A., & Amin, N. (2015, September). Design of high efficient and stable ultra-thin CdTe solar cells with ZnTe as a potential BSF. In 2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET) (pp. 1–4).
- Dey, M., Dey, M., Matin, M. A., & Amin, N. (2015). Design of high performance and ultra-thin CdTe solar cells with SnTe BSF from numerical analysis. In 18th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT) (pp. 573–576).
- Ganvir, R. (2016). Modelling of the nanowire CdS–CdTe device design for enhanced quantum efficiency in window-absorber type solar cells.

- Hossain, S., Chowdhury, F., Rahman, M., & Islam, A. (2011). A numerical study on the prospects of high efficiency ultra-thin $Zn_xCd_{1-x}S$/CdTe solar cell. Chalcogenide Letters, 8(4), 110–116.
- Lin, P., Lin, L., Yu, J., Cheng, S., Lu, P., & Zheng, Q. (2014). Numerical simulation of Cu_2ZnSnS_4-based solar cells with In_2S_3 buffer layers by SCAPS-1D. Journal of Applied Science and Engineering, 17(4), 383–390. https://doi.org/10.6180/jase.2014.17.4.05
- Mouhammed, A. A., & Saleh, A. N. (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.
- Ngoupo, A. T., Teyou, S., Ouédraogo, J. M., & Ndjaka, J. M. (2019). Numerical analysis of interface properties effects in CdTe/CdS:O thin film solar cell by SCAPS-1D. Indian Journal of Physics, 93(7), 869–881.
- Rassol, R. A., Hasan, R. F., & Ahmed, S. M. (2021). Numerical analysis of SnO_2/Zn_2SnO_4/n-CdS/p-CdTe solar cell using the SCAPS-1D simulation software. Iraqi Journal of Science, 62(2), 505–516. https://doi.org/10.24996/IJS.2021.62.2.17
- Ramprasad, C. (2012). Numerical modeling of tin-based absorber devices for cost-effective solar photovoltaics (Doctoral dissertation, The Pennsylvania State University).
- Scheer, R., & Schock, H. W. (2011). Chalcogenide photovoltaics: Physics, technologies, and thin film devices. John Wiley & Sons.
- Solanki, C. S. (2013). Solar photovoltaic fundamentals, technologies and applications (2nd ed.). PHI Learning Private Limited.
- Teyou Ngoupo, A., Teyou, S., Ouédraogo, J. M., & Ndjaka, J. M. (2015). New architecture towards ultrathin CdTe solar cells for high conversion efficiency. International Journal of Photoenergy, 2015, Article ID 1–8.
- Xiao, Z., Bi, C., Shao, Y., Dong, Q., Wang, Q., Yuan, Y., Wang, C., Gao, Y., & Huang, J. (2014). Efficient, high-yield perovskite photovoltaic devices grown by interdiffusion of solution-processed precursor stacking layers. Energy & Environmental Science, 7. https://doi.org/10.1039/C4EE01138D