

Studying the effect of changing the thickness of the layers of the perovskite solar cell (ZnTe /CH₃NH₃PbI₃ /TiO₂/ZnO/FTO) using the simulation program (SCAPS 1-D)

Raddad Salem Mahmoud^{1*}, Raad Ahmed Rasoul²

^{1,2} Mosul University/College of Education for Pure Sciences/Department of Physics

E-mail: ^{1*}Raddad.20esp33@student.uomosul.edu.iq ²dr.raadrasool@yahoo.com

(Received August 01, 2022; Accepted September 14, 2022; Available online December 01, 2022)

DOI: [10.33899/edusj.2022.134981.1268](https://doi.org/10.33899/edusj.2022.134981.1268), © 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

This research includes a study of the effect of the thickness of each layer of perovskite solar cell (CH₃NH₃PbI₃) /TiO₂/ZnO/FTO) and selecting the best thickness to obtain the highest efficiency of the cell, and studying the effect of adding a back surface layer on the efficiency of the solar cell using (SCAPS1-D). The perovskite (CH₃NH₃PbI₃) was adopted as absorption layer and its thickness tested from (1-7μm) with an increase of (1μm) to obtain the best thickness for best efficiency of the solar cell, its best thickness was (5μm), the thickness of the buffer layer (TiO₂) was tested from (0.5-1.5 μm) with an increase of (0.25μm) and its best thickness was (0.5 μm), the thickness of the transparent conduction oxide (FTO) layer was tested (0.1-1.1μm) with an increase of (0.2μm) and its best thickness was (0.1 μm) and the thickness of the window layer(ZnO) was tested (0.1-0.5 μm) with an increase of (0.1μm) and its best thickness was (0.1μm).The effect of the window layer on the thickness of the buffer layer was studied and it was found that the best thickness of the buffer layer is (0.05μm). Finally, a back surface field layer was added, which is zinc telluride (ZnTe) with a thickness of (0.1 μm) and its thickness was studied, and its best thickness was (0.05μm). It was found that the best thickness of the absorbent layer after adding the back surface field layer is (1μm). The final outputs of the cell were as follows: V_{oc}=1.288(V), J_{sc}=25mA/cm², FF=89.55%, η=28.82%

Keyword: Perovskite solar cell, SCAPS 1-D program, back surface field layer.

دراسة تأثير تغيير سمك طبقات الخلية الشمسية البيروفسكايت

SCAPS 1-D باستخدام برنامج المحاكاة (ZnTe /CH₃NH₃PbI₃/TiO₂/ZnO/FTO)

¹رئاد سالم محمود , ²رعد أحمد رسول

^{1,2}جامعة الموصل/كلية التربية للعلوم الصرفة/قسم الفيزياء

الخلاصة:

يهتم هذا البحث دراسة تأثير تغيير السمك لكل طبقة من طبقات الخلية الشمسية البيروفسكايت CH₃NH₃PbI₃/TiO₂/ZnO/FTO واختيار السمك الافضل للحصول على أعلى كفاءة للخلية الشمسية البيروفسكايت وكذلك درس تأثير اضافة طبقة الانعكاس الخلفية على عمل الخلية الشمسية. باستخدام برنامج المحاكاة الحاسوبي SCAPS1-D، حيث اعتمدت

مادة البيروفسكايت ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) كطبقة امتصاص في الخلية الشمسية واختير سمك الطبقة الماصة من ($1-7\mu\text{m}$) وبتحسين مقدارها ($1\mu\text{m}$). وذلك من اجل الحصول على أفضل سمك معقول لها بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة للخلية الشمسية وتبين انه أفضل سمك للطبقة الماصة هو ($5\mu\text{m}$) وكذلك تم اختبار سمك طبقة الموائمة اوكسيد التيتانيوم (TiO_2) من ($0.5-1.5\mu\text{m}$) وبتحسين مقدارها ($0.25\mu\text{m}$) وكان أفضل سمك للطبقة الموائمة هو ($0.5\mu\text{m}$) واختير سمك طبقة اوكسيد التوصيل الشفافة (TCO) اوكسيد القصدير المطعم بالفلور (FTO) من ($0.1-1.1\mu\text{m}$) وبتحسين مقدارها ($0.2\mu\text{m}$) وكان أفضل سمك لطبقة (TCO) هو ($0.1\mu\text{m}$) . كذلك تم اختبار سمك الطبقة النافذة اوكسيد الزنك (ZnO) من سمك ($0.1-0.5\mu\text{m}$) وبتحسين مقدارها ($0.1\mu\text{m}$) وكان أفضل سمك لها هو ($0.1\mu\text{m}$) ودرس تأثير الطبقة النافذة على سمك الطبقة الموائمة وتبين أن أفضل سمك للطبقة الموائمة هو ($0.05\mu\text{m}$). اخيرا تم اضافة طبقة الانعكاس الخلفية وهي تيلوريد الزنك (ZnTe) ويسمك ($0.1\mu\text{m}$) ودراسة تأثير تغيير سمكها على مخرجات الخلية وكان أفضل سمك هو ($0.05\mu\text{m}$) وتم دراسة تأثير الطبقة العاكسة على سمك طبقة الامتصاص وتبين ان أفضل سمك للطبقة الماصة بعد اضافة طبقة الانعكاس الخلفية هو ($1\mu\text{m}$) وبعد دراسة سمك كل طبقة من طبقات الخلية واختيار السمك المناسب كانت مخرجات الخلية الشمسية البيروفسكايت النهائية بالشكل الاتي: $V_{oc}=1.288(\text{V})$, $J_{sc}=25\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF=89.55\%$, $\eta=28.82\%$

الكلمات المفتاحية: الخلية الشمسية البيروفسكايت، برنامج SCAPS 1-D طبقة الانعكاس الخلفية

1. المقدمة:

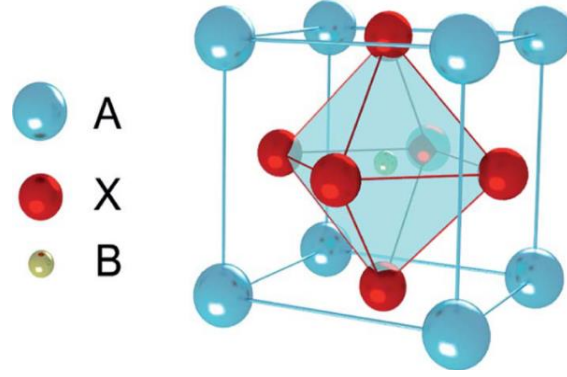
تعد الخلايا الشمسية من الاختراعات المهمة والمفيدة التي ظهرت في عصرنا الحديث إذ مكنت الانسان من توفير جزء من متطلباته واحتياجاته اليومية للطاقة الكهربائية. والخلية الشمسية عبارة عن نبائط ضوئية اساس عملها تحويل الاشعاع الكهرومغناطيسي القادم من الشمس الى طاقة كهربائية يمكن استعمالها والاستفادة منها [1] كما انه بالإضافة الى الاستفادة من الطاقة الكهربائية المتولدة في التطبيقات الارضية يمكن الاستفادة منها في التطبيقات الفضائية كمصدر للطاقة ايضا فهي مصدر الطاقة للتوابع الارضية في الفضاء ولفترة طويلة كما ان الخلايا الشمسية تعد المرشح الاقوى كبديل لمصادر الطاقة التقليدية المستخدمة في التطبيقات الارضية تكاد تكون دائمية وبتكلفه واطئة كما أنها تعد صديقة للبيئة ولا تسبب تلوث للبيئة [2]

وكذلك فان عمل الخلية الشمسية يتميز بكونه آمناً وهدائماً ولا يسبب ضوضاء او مخلفات.

عند تعرض سطح الخلية الشمسية الى الاشعاع الكهرومغناطيسي القادم من الشمس يلاحظ أن الفوتونات التي طاقتها أكبر من فجوة الطاقة تساهم في تهيج المادة بمقدار فجوة الطاقة أما بالنسبة للفوتونات التي لها طاقة اقل من فجوة الطاقة فان هذه الفوتونات لا تساهم في تهيج المادة وانما تنبدد بشكل حرارة [3]

الصيغة العامة للبيروفسكايت هي ABX_3 حيث يمثل كل من A,B ايونان موجبان بحيث يكون الايون (A) أكبر من

(الايون B) والايون (X) هو ايون سالب يربط بين الاكاسيد أو الهاليدات والشكل (1) يبين الهيكل البلوري للبيروفسكايت [4]



الشكل (1) التركيب البلوري للبيروفسكايت

يتميز البيروفسكايت بثابت عزل كبير وعمر طويل لامتصاص الشعاع الضوئي الشمسي تكون الطبقة الماصة في الخلية من البيروفسكايت ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) وتكون من المواد الهجين العضوي وغير العضوي من هاليد القصدير او الرصاص ومن خصائصها أنها تمتلك فجوة الطاقة يمكن التحكم بها بواسطة الهاليد في الجزيئة وقد وجد من خلال الابحاث الحديثة ان شحنات مركبات البيروفسكايت تتواجد على شكل الكترولونات حرة وفجوات لان طاقة ارتباطها منخفضة بما فيه الكفاية لفصل الشحنات عند درجة حرارة الغرفة [5] تقع طبقة البيروفسكايت الماصة بين طبقتين تعملان على توصيل الالكترولونات والفجوات ويتم توصيلها بطبقة شفافة لكي تسمح للضوء ان يمر من خلالها

تعد الخلايا الشمسية القائمة على البيروفسكايت أكبر مرشح ومنافس لباقي الخلايا الشمسية الاعتيادية الأخرى وهي منافس قوي للسيليكون متعدد البلورات والذي ما يزال مهيمناً على سوق الطاقة الكهروضوئية المتواجدة حالياً في الاسواق [6]. في هذا البحث اختبر تأثير تغيير السمك لكل طبقة من طبقات الخلية ودرس تأثير سمك كل طبقة على كفاءة عمل الخلية عن طريق المحاكاة العددية باستخدام البرنامج الحاسوبي (SCAPS 1-D) كذلك تم في هذا البحث دراسة أهمية طبقة الانعكاس الخلفية ودورها في زيادة كفاءة الخلية الشمسية وتأثيرها على سمك طبقة الامتصاص.

2. الجانب النظري

في هذا البحث تم الاعتماد على برنامج SCAPS 1-D في محاكاة الخلية الشمسية المعتمدة وهو برنامج حاسوبي يستخدم لمحاكاة الخلية الشمسية احادي البعد صمم في جامعة Gent قسم الالكترولونيات ونظم المعلومات في بلجيكا. يمكن خلال برنامج SCAPS 1-D الحصول على خصائص الخلية الشمسية التي تتكون من سبع طبقات كأقصى حد ومعرفة السمك والتطعيم والعيوب وتأثيرها على عمل الخلية والحصول على خصائص تيار-فولتية (I-V) وخصائص (C-V) والكفاءة الكمية (QE) وكذلك خصائص (C-F) وكذلك يمكن اختيار نوع الطيف الشمسي (عدة أطيف أو أحادي الطيف) وخصائص (I-V) و (QE) [7]. كذلك يمكن لبرنامج (SCAPS 1-D) حل معادلات بوايسون والاستمرارية في أشباه الموصلات ويستخدم طريقه نيوتن-رافسون ومعادلات نقل الحاملات ومعادلتين كثافة التيار الانجراف والانتشار ويمكن كتابة هذه المعادلات على النحو الآتي:

● معادله بوايسون

التي تربط بين الجهد الكهربائي (Φ) وكثافته الشحنات وتعتبر بداية الحل النوعي في الكهربائية الساكنة للمتغيرات في اشباه الموصلات [8]

$$\dots\dots\dots(1) \quad \frac{d}{dx} \left(-\epsilon(X) \frac{d\Phi}{dx} \right) = q [p(X) - n(X) + N_D^+(X) - N_A^-(X) + p_t(X) - n_t(X)]$$

حيث ϵ : ثابت العزل الكهربائي للوسط. p : كثافة الفجوات الحرة, n : كثافة الإلكترونات الحرة. $n_t(x)$: كثافة الإلكترونات المقيدة, $p_t(x)$: كثافة الفجوات المقيدة, $N_A^-(x)$: كثافة القابلات المتأينة, $N_D^+(x)$: كثافة المانحات المتأينة.

معادلتى الانجراف والانتشار:

الانتشار هو حركة حاملات الشحنة (الالكترونات والفجوات) من المناطق ذات التركيز العالي إلى المناطق ذات التركيز الواطئ , ويمكن التعبير عن كثافة التيار الناتج عن الانتشار بالعلاقة التالية:

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

حيث يمثل كل من J_{ndiff} : كثافة تيار الانتشار للإلكترونات و J_{pdiff} : كثافة تيار الانتشار للفجوات.

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

حيث D : ثابت معامل الانتشار,

الانجراف: هو حركة حاملات الشحنة (الالكترونات والفجوات) في حالة تسليط مجال كهربائي على مادة شبه الموصل. بحيث

تتحرك الإلكترونات باتجاه المجال الكهربائي الخارجي اما الفجوات فتتحرك باتجاه معاكس لها. وكثافة التيار الناتج عن الانجراف تعطى بالعلاقة التالية:

$$J_{dri} = J_{ndri} + J_{pdri} \quad \dots\dots\dots (4)$$

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

كثافة التيار الكلية للإلكترونات يحسب بالعلاقة التالية:

$$J_n = J_{ndri} + J_{ndiff} \quad \dots\dots\dots (6)$$

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

كذلك يمكن حساب كثافة التيار الكلية للفجوات من خلال العلاقة التالية:

$$J_p = qp\mu_p E + qD_p \frac{dp}{dx} \quad \dots\dots\dots (8)$$

يمكن ايضا حساب كثافة التيار الكلية للإلكترونات والفجوات من خلال المعادلة التالية:

$$J_{tot} = J_n + J_p \quad \dots\dots\dots (9)$$

معادلة الاستمرارية:

تنطبق معادلة الاستمرارية على حاملات الشحنة (الالكترونات والفجوات). وهي معادلة تصف الظواهر في أشباه الموصلات ومنها

الانجراف الذي يحدث بسبب المجال الكهربائي الخارجي والانتشار الذي يحصل بسبب الانحدار في تركيز حاملات الشحنة وعملية إعادة الاتحاد. يمكن كتابة معادلة الاستمرارية نسبة للإلكترونات بالعلاقة الآتية:

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + (G_n - R_n) \quad \dots\dots\dots (10)$$

G_n - يمثل عملية تولد الإلكترونات R_n - تمثل إعادة الاتحاد
ومعادلة الاستمرارية للفجوات تعطى بالعلاقة:

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + (G_p - R_p) \dots \dots \dots (11)$$

G_p - يمثل عملية تولد الفجوات R_p - يمثل إعادة الاتحاد
مخرجات الخلية الشمسية:

من خلال مخرجات الخلية الشمسية يمكن التعرف على عمل الخلية وتمييزها عن باقي الخلايا الشمسية وتتمثل بأربع مخرجات هي فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) و تيار دائرة القصر (I_{sc}) وعامل المليء (FF) ومنها يمكن تحديد كفاءة الخلية الشمسية (η). والتيار الذي يمر عبر الخلية يعطى بالعلاقة الآتية:

$$I = I_o \left(\exp \frac{qv}{kT} - 1 \right) \dots \dots \dots (12)$$

حيث يمثل كل من

I - تيار دائرة الحمل I_o - تيار التشبع العكسي T - درجة الحرارة k - تمثل ثابت بولتزمان
اما العلاقة التي من خلالها يمكن حساب فولتية الدائرة المفتوحة فهي:

$$V_{oc} = \frac{K_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_o} + 1 \right) \dots \dots \dots (13)$$

أما عامل المليء فهو النسبة بين أقصى قدرة وأقصى كثافة تيار وفولتية يمكن ان تولدها الخلية [9]
يمكن حساب عامل المليء بالعلاقة:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \dots \dots \dots (14)$$

حيث يمثل كل من V_m I_m أقصى كثافة تيار وجهد يتولد من الخلية الشمسية

اما كفاءة الخلية الشمسية فهي النسبة بين أعظم قدرة متولدة في الخلية الشمسية والقدرة الساقطة عليها. ويمكن حساب كفاءة الخلية الشمسية من العلاقة الآتية:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100 \dots \dots \dots (15)$$

تركيب الخلية الشمسية

تتكون الخلية الشمسية الأساس المعتمدة في هذا البحث من أربع طبقات هي طبقة الامتصاص البيروفسكايت ($CH_3NH_3PbI_3$) والطبقة الموائمة أو أكسيد التيتانيوم (TiO_2) والطبقة النافذة أو أكسيد الزنك (ZnO) وطبقة اوكسيد التوصيل الشفافة (FTO) كما يلي ($CH_3NH_3PbI_3$)/ TiO_2 / ZnO /FTO). من أجل الحصول على خلية أكثر استقراراً أضيفت طبقة الانعكاس الخلفية بعد طبقة الامتصاص التي تعمل على تقليل عملية إعادة الالتحام في منطقه التلامس الخلفي للخلية كذلك تعمل على تقليل سمك طبقة الامتصاص البيروفسكايت وبالتالي التقليل من الكلفة الانتاجية للخلية الشمسية المعتمدة وكذلك زيادة كفاءة الخلية الشمسية إذ اضيفت مادة تيلوريد الزنك ($ZnTe$) كطبقة انعكاس خلفية وبسمك ($0.05\mu m$) (وتقليل سمك طبقة الامتصاص الى ($1\mu m$) وبالتالي اصبحت تركيب الخلية الشمسية المعتمدة في هذا البحث كما يلي: ($ZnTe/CH_3NH_3PbI_3$ / TiO_2 / ZnO /FTO).

باستخدام المعلومات المثبتة في الجدولين (1) و(2) [10]-[12]

الجدول(1): معاملات طبقات الخلية الشمسية البيروفسكايت

Parameters	p-ZnTe	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	TiO ₂	ZnO	FTO
Thickness (μm)	0.05	1.0	0.05	0.1	0.1
Band gap (eV)	2.25	1.55	3.2	3.3	4.2
Electron affinity (eV)	3.65	3.9	4.9	4.4	4.5
Dielectric permittivity (relative)	14	6.5	9	9	10
CB. effective density of states (1/cm ³)	7.50E+17	2.2E+18	1.00E+21	2.20E+18	1.20E+20
V.B. effective density of states (1/cm ³)	1.5E+19	1.8E+19	2.00E+20	1.80E+19	7.80E+20
Electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7	1.00E+7	1.000E+7	1.000E+7	1.00E+7
Hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7	1.00E+7	1.000E+7	1.000E+7	1.00E+7
Electron Mobility (cm ² /Vs)	70	2	2.00E2	100	20
Hole Mobility (cm ² /Vs)	50	2	1.0E2	25	100
Shallow uniform donor density , N _D (1/cm ³)	0	0	1.00E+19	1.00E+19	1.00E+19
Shallow uniform acceptor density N _A (1/cm ³)	1.00E+19	1.00E15	0	0	0
Defect type	Single Acceptor	Single Donor	Single Donor	Single Donor	Single Donor
Capture Cross Section Electrons (cm ²)	1.00E-12	1.00E-17	1.00E-15	1.00E-15	1.00E-15
Capture Cross Section Hole (cm ²)	1.00E-15	1.00E-12	1.00E-15	1.00E-12	1.00E-12
Nt (1/cm ³)	2.00E+14	1.00E+12	1.00E+13	1.00E+15	1.00E+15

الجدول (2) معلمات السطح البيني للخلية الشمسية

Parameters	
Defect type	Neutral
Capture Cross Section Electrons (cm ²)	1×10^{-12}
Capture Cross Section Hole (cm ²)	1×10^{-12}
Nt (1/cm ²)	$1 \times 10^{+13}$

3. النتائج والمناقشة :

اختبار سمك طبقات الخلية الشمسية :

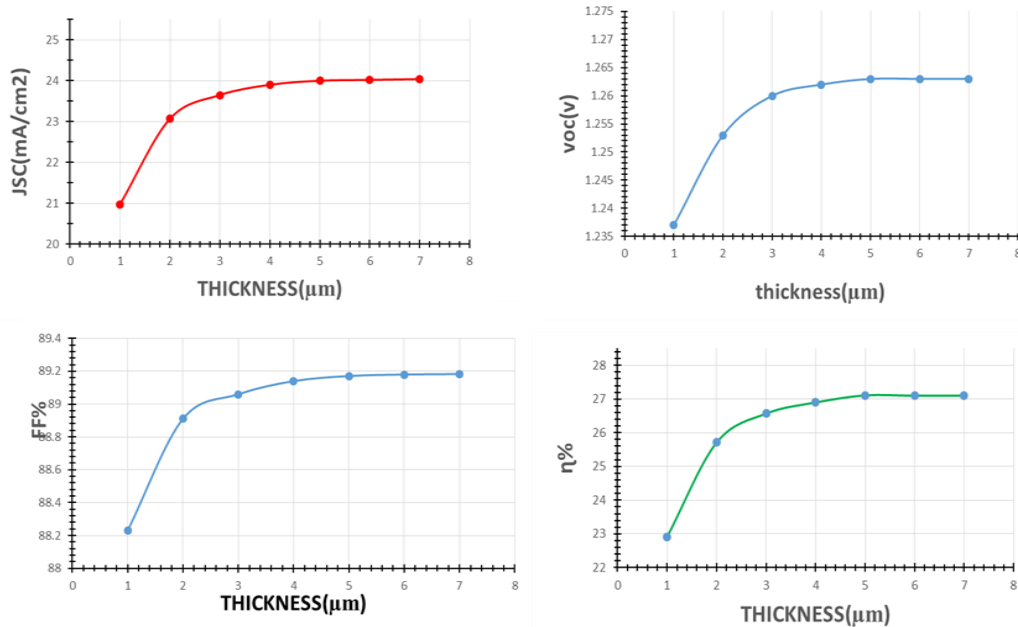
تم اختبار سمك كل طبقة من طبقات الخلية الشمسية $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{FTO}$ واختيار السمك الأفضل لكل طبقة على حدة من أجل الحصول على أقصى كفاءة للخلية الشمسية بالشكل التالي:

أولاً-سمك طبقة الامتصاص $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

بعد تثبيت طبقة اوكسيد التيتانيوم (TiO_2) كطبقة موائمة مع طبقة البيروفسكايت الماصة وبسمك ($0.5\mu\text{m}$) للطبقة الموائمة وقد أختبر سمك الطبقة الماصة من ($1-7\mu\text{m}$) وبزيادة مقدارها ($1\mu\text{m}$) وذلك من أجل الحصول على أفضل سمك معقول لها بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة للخلية الشمسية وتبين انه أفضل سمك للطبقة الماصة هو ($5\mu\text{m}$) وكانت النتائج بالشكل التالي:

$$[V_{oc}=1.263 \text{ (V)}, J_{sc}=24.0 \text{ mA/cm}^2, FF=89.17 \%, \eta=27.05\%]$$

من ملاحظة الشكل (2) في أعلاه يتبين زيادة كثافة تيار دائرة القصر J_{sc} عند زيادة سمك طبقة الامتصاص حتى السمك (



الشكل (2): يبين تأثير تغيير سمك طبقة الامتصاص ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) على مخرجات الخلية الشمسية.

($5\mu\text{m}$) ثم تستقر بعدها، ذلك بسبب الامتصاص غير الكامل للفوتونات عند السمك الأقل من

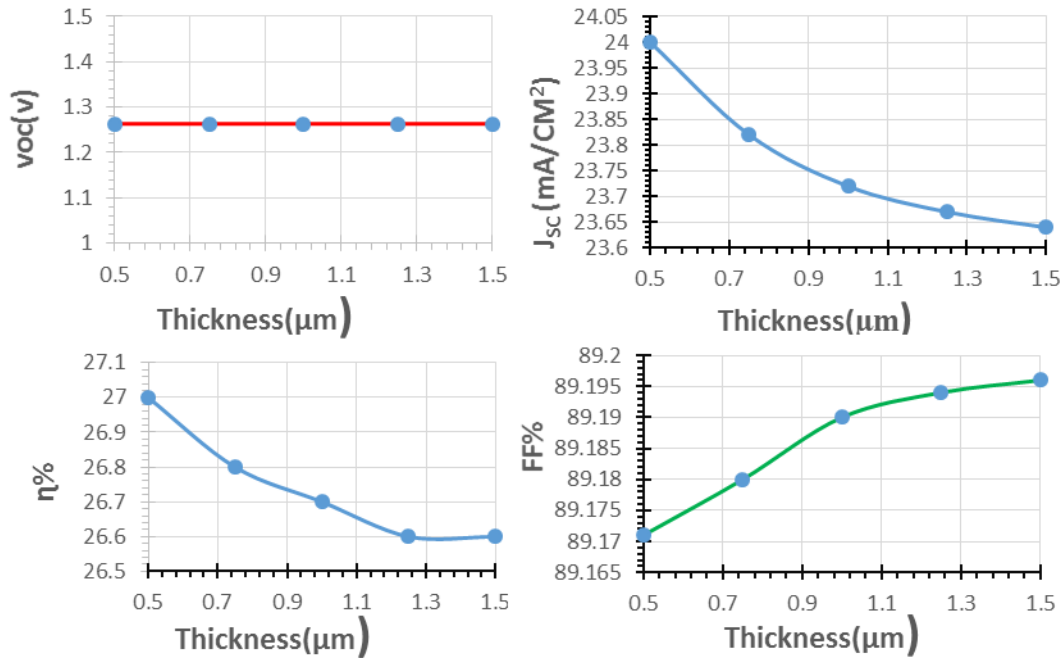
(5 μm)، وأن استقرار قيمتها بعد هذا السمك يدل على أن جميع الفوتونات الساقطة تقريباً قد تم امتصاصها من قبل طبقة الامتصاص وتحويلها إلى الزوج (الكترن - فجوة) وكذلك زيادة السمك اكثر تؤدي الزيادة احتمالية إعادة الالتحام. كما يلاحظ انخفاض عامل المليء عند السمك اقل من (5 μm) نتيجة زيادة عملية الالتحام فينخفض عامل المليء [13] وبعد هذا السمك يلاحظ ثبوت FF تقريباً كذلك من ملاحظة الشكل ازدياد (V_{oc}) مع زيادة سمك طبقة البيروفسكايت الماصة وسبب ذلك هو ان مادة البيروفسكايت تمتلك عامل امتصاص عالي فعند زيادة السمك تزداد عملية امتصاص الفوتونات وتحويلها الى الزوج (الكترن - فجوة) وبالتالي يزداد (J_{sc}, V_{oc}) وحسب العلاقة رقم (13) [14].

كما يلاحظ زيادة كفاءة الخلية الشمسية مع زيادة سمك طبقة الامتصاص الى حد السمك (5 μm) وتبدأ بعدها بالاستقرار وهذا مطابق مع بحوث أخرى ذات صلة [15].

ثانياً-سمك الطبقة الموائمة TiO_2 :

بعد ان اختبر سمك طبقة البيروفسكايت الماصة وتثبيت سمكها بمقدر (5 μm) واختبر سمك الطبقة الموائمة من (0.5-1.5 μm) وبتحسين مقدارها (0.25 μm) وذلك للحصول على أفضل سمك لها بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة الخلية الشمسية وتبين انه أفضل سمك للطبقة الموائمة هو (0.5 μm) وكانت النتائج بالشكل التالي:

$$[V_{oc}=1.263 \text{ (V) , } J_{sc}=24.0 \text{ mA/cm}^2, \text{ FF}=89.17 \%, \eta=27.05\%]$$



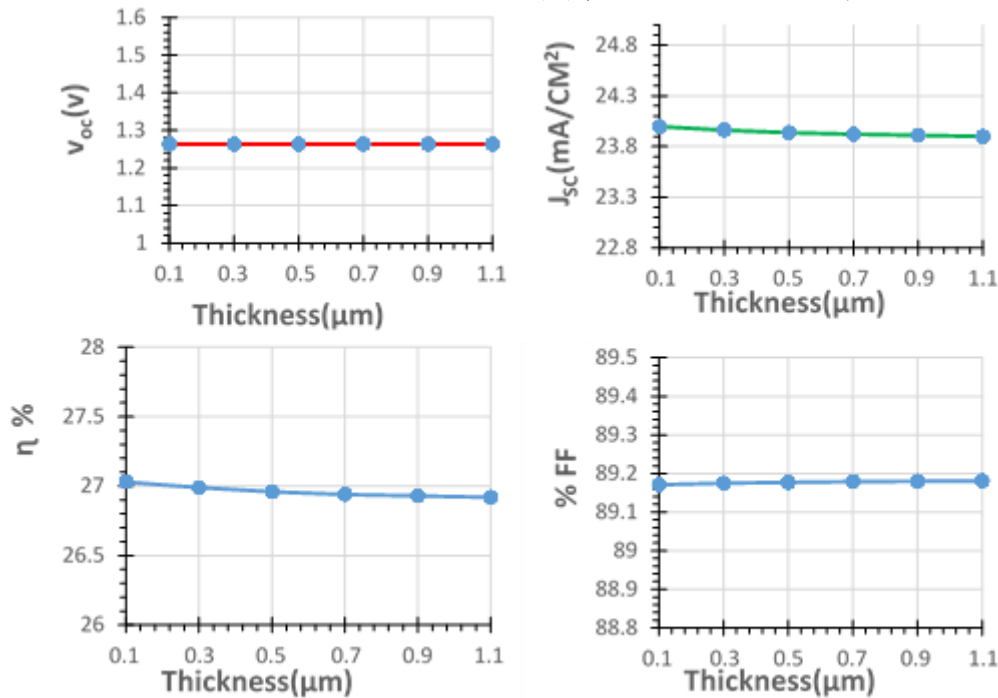
الشكل (3) تأثير تغيير سمك الطبقة الموائمة TiO_2 على مخرجات الخلية الشمسية

يلاحظ من الشكل (3) أعلاه بقاء v_{oc} ثابتة ونقصان J_{sc} بشكل طفيف مع زيادة سمك الطبقة الموائمة نتيجة زيادة عملية الالتحام عند السطح البيني ونتيجة تكون مراكز اقتناص والتي تعمل على استنزاف حاملات الأقلية كما يلاحظ زيادة بشكل طفيف في عامل المليء في حين يلاحظ انخفاض في قيمة الكفاءة عند زيادة سمك الطبقة الموائمة بسبب إعاقة وصول الفوتونات الى الطبقة الماصة وكذلك بسبب صغر عمر الناقلات وهذا يؤدي أيضا الى زيادة عملية الالتحام عند السطح البيني وعندها سوف يقل انتاج الزوج (الكثرون - فجوة) وبالتالي نقصان في تيار دائرة القصير أيضا [16].

ثالثاً- سمك طبقة اوكسيد التوصيل الشفافة FTO

بعد ان تم اختيار سمك الطبقة الموائمة اوكسيد التيتانيوم (TiO_2) والطبقة الماصة البيروفسكايت درس تأثير تغيير سمك طبقة اوكسيد التوصيل الشفافة (FTO) من ($0.1 - 1.1\mu m$) وبزيادة مقدارها ($0.2\mu m$) وذلك للحصول على أفضل سمك لها بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة الخلية الشمسية وتبين انه أفضل سمك لطبقة اوكسيد التوصيل الشفافة هو ($0.1\mu m$) وكانت النتائج بالشكل التالي:

[$V_{oc}=1.263$ (V) , $J_{sc}=24.0$ mA/cm², $FF=89.17$ % , $\eta=27.03$ %]



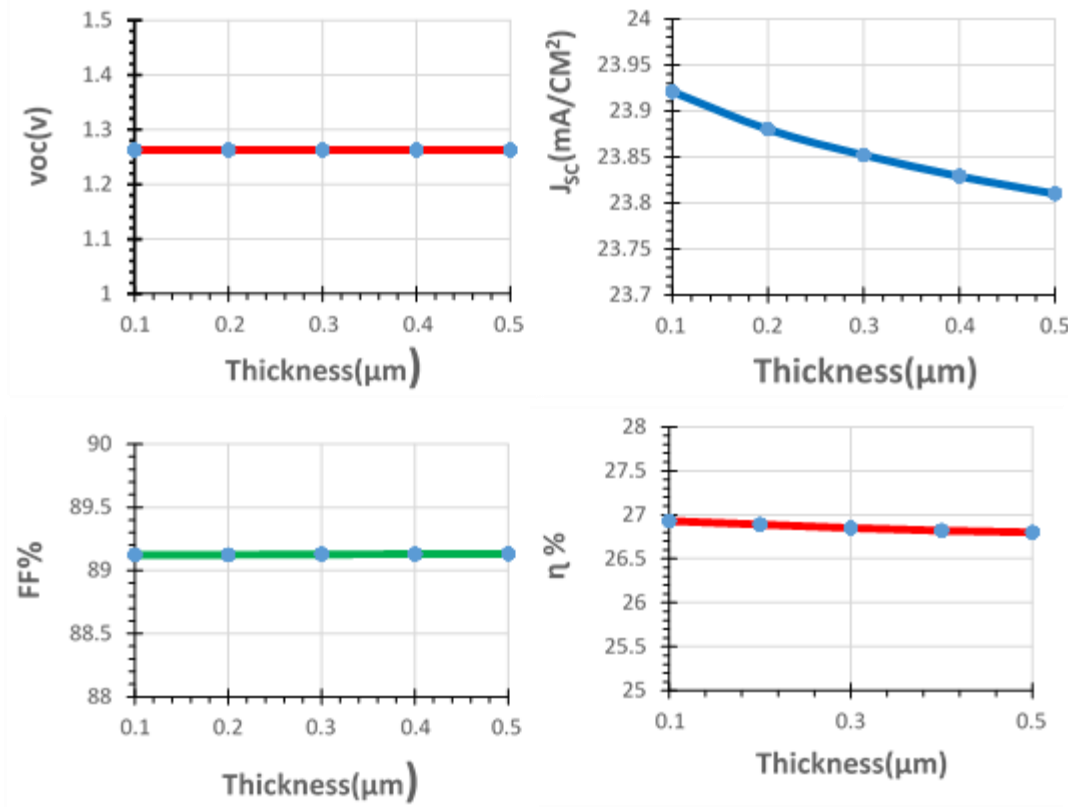
الشكل (4): تأثير تغيير سمك طبقة TCO على مخرجات الخلية الشمسية

يلاحظ من خلال الشكل (4) تأثير طبقة اوكسيد التوصيل الشفافة بشكل طفيف على مخرجات الخلية وذلك بسبب كبر فجوة الطاقة وبالتالي لا يحدث امتصاص للفوتونات خلال طبقة التوصيل الشفافة.

رابعاً-سمك الطبقة النافذة ZnO :

تقع الطبقة النافذة بين طبقة التوصيل الشفافة (FTO) والطبقة الموائمة TiO_2 وهي من نوع n-type بعد ان تم اختبار سمك طبقة البيروفسكايت الماصة وتثبيت سمكها بمقدار ($5\mu m$) واختيار سمك الطبقة الموائمة TiO_2 بسمك ($0.5\mu m$) وطبقة اوكسيد التوصيل الشفافة بسمك ($0.1\mu m$) واختبر تغيير سمك الطبقة النافذة من ($0.1-0.5\mu m$) وذلك للحصول على أفضل سمك لها بحيث يتم الحصول على أفضل كفاءة الخلية الشمسية وتبين انه أفضل سمك للطبقة النافذة هو ($0.1\mu m$) وكانت النتائج بالشكل التالي:

[$V_{oc}=1.263$ (V) , $J_{sc}=23.92$ mA/cm², $FF=89.12$ % , $\eta=26.93$ %]



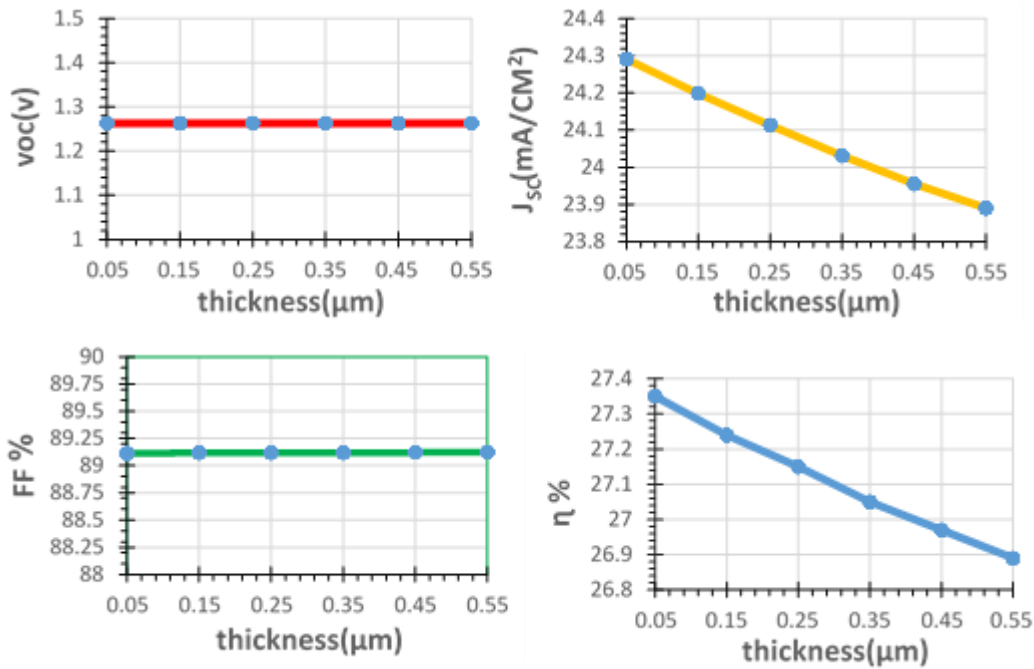
الشكل (5): تأثير تغيير سمك الطبقة النافذة على مخرجات الخلية الشمسية

يلاحظ من الشكل (5) نقصان في J_{sc} مع زيادة سمك الطبقة النافذة نتيجة زيادة عملية الامتصاص وهذا يؤثر على كمية الفوتونات التي تصل الى طبقة الامتصاص وهذا يؤدي الى التناقص في تيار دائرة القصر مع زيادة سمك الطبقة النافذة وكان أفضل سمك للطبقة الخازنة عند سمك ($0.1\mu m$)

خامسا-تأثير الطبقة النافذة على سمك الطبقة الموائمة:

درس تأثير الطبقة النافذة على سمك الطبقة الموائمة حيث تم تغيير سمك الطبقة الموائمة من (0.05-0.55 μm) وبتحسين مقدارها (0.1 μm) بعد إضافة طبقة النافذة الى الخلية الشمسية وبسمك مقداره (0.1 μm) وببقاء باقي الطبقات على نفس السمك وتبين ان أعلى كفاءة للخلية الشمسية كانت عند سمك (0.05 μm) مما ساهم في تقليل سمك طبقة الموائمة في الخلية الشمسية إذ تم الحصول على المعطيات التالية:

$$[V_{oc}=1.363 \text{ (V) , } J_{sc}=24.291 \text{ mA/cm}^2, \text{ FF}=89.11 \%, \eta=27.35 \%$$



الشكل (6): تأثير الطبقة النافذة على سمك الطبقة الموائمة (TiO_2)

يلاحظ من خلال الشكل (6) عدم تأثر فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} ونقصان في J_{sc} نتيجة زيادة الامتصاص للفوتونات مما يؤدي نقصان كبير في عدد الفوتونات الواصلة الى الطبقة الماصة [17] أي انه كان للطبقة النافذة فائدة في تقليل سمك الطبقة الموائمة وزيادة كفاءة الخلية الشمسية حيث كانت كفاءة الخلية قبل إضافة الطبقة النافذة تساوي 27.03% وبعد إضافة الطبقة النافذة وتقليل سمك الطبقة الموائمة من (0.5-0.05 μm) زادت كفاءة الخلية الى 27.35% ويلاحظ زيادة طفيفة في عامل المليء إذ تعمل الطبقة النافذة على تقليل عملية إعادة الالتحام عند الواجهة بين طبقة اوكسيد التوصيل الشفافة والطبقة الموائمة والذي يحسن من أداء الخلية [18]

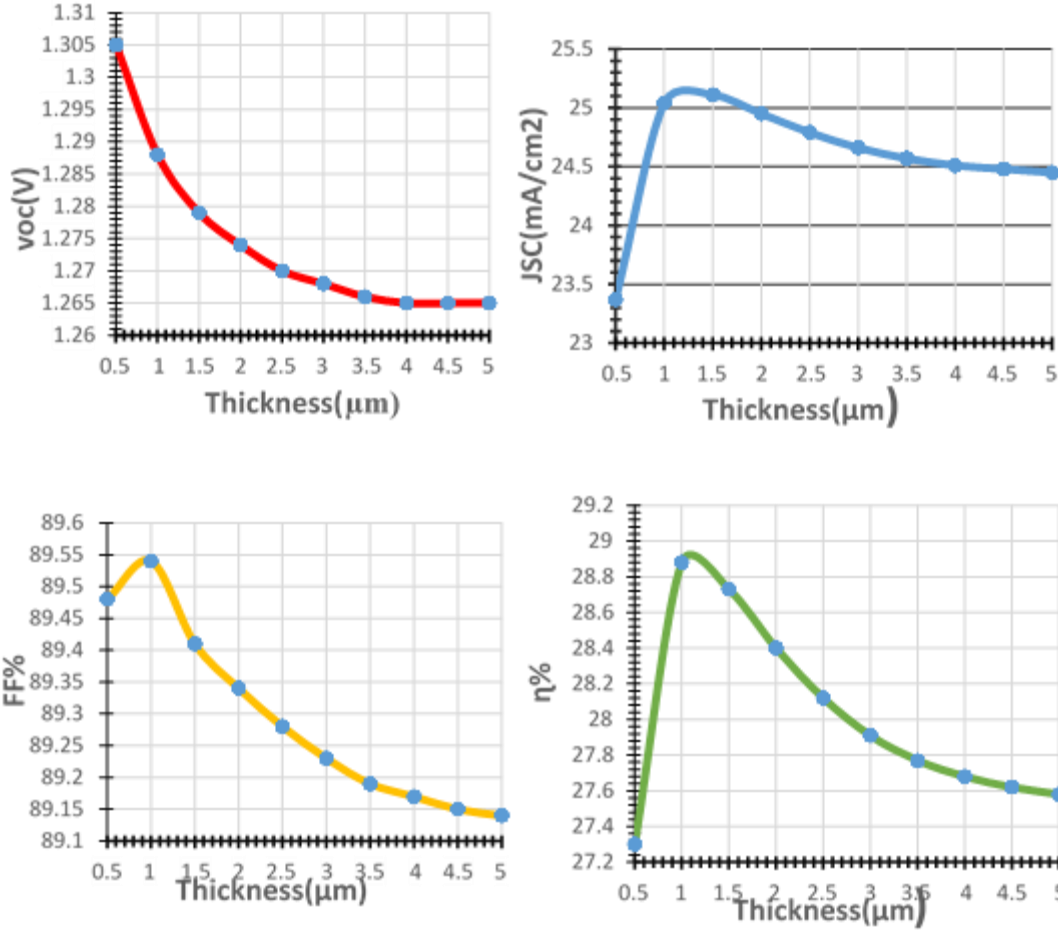
سادسا. طبقة الانعكاس الخلفية :

بعد ان تم اختبار سمك الطبقات الاربعة للخلاية الشمسية ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3 / \text{TiO}_2/\text{ZnO}/\text{FTO}$) وتثبيتها بسمك ($5,0.05,0.1,0.1\mu\text{m}$) على التوالي أضيفت طبقة الانعكاس الخلفية (BSF) لزيادة كفاءة الخلية الشمسية، هذه الطبقة تكون من نوع P-type وتقع بين طبقة الاتصال الخلفية المعدنية وطبقة الامتصاص ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) وكانت مخرجات الخلية بعد اضافة الطبقة العاكسة بالشكل التالي $V_{oc}=1.265(\text{V})$, $J_{sc}=24.40 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $\text{FF}=89.15 \%$, $\eta=27.52 \%$

a-تأثير طبقة الانعكاس الخلفية على سمك طبقة الامتصاص

بعد إضافة طبقة الانعكاس الخلفي والحصول على الخلية النهائية أختبر تأثير سمك طبقة الامتصاص من ($0.5-5\mu\text{m}$) وبزيادة مقدارها ($0.5\mu\text{m}$) من اجل الحصول على أفضل سمك بحيث تعمل الخلية الشمسية بأقصى كفاءة وكانت افضل كفاءة للخلية عندما كان سمك الطبقة الماصة بمقدار ($1\mu\text{m}$) مما ساهم في تقليل سمك طبقة الامتصاص في الخلية الشمسية كما هو مبين في الشكل (7) وبالتالي تقليل كلفتها الانتاجية ويعود ذلك لكون طبقة الانعكاس الخلفية (BSF) تعمل على تقليل إعادة الاتحاد في جهة الاتصال الخلفية كما تعزز الناقلات من خلال عكسها نحو الوصلة الرئيسية وبالتالي يساهم في زيادة الكفاءة بشكل كبير [18] وكانت معطيات الخلية الشمسية كما يلي:

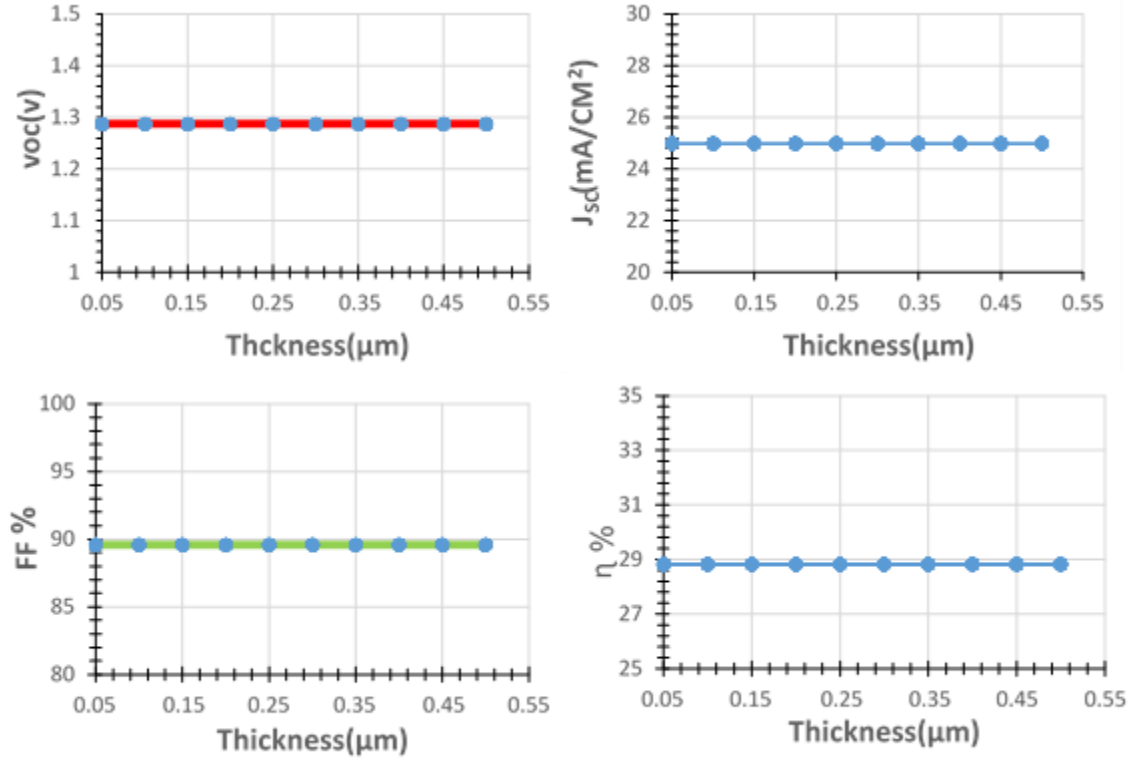
$$[V_{oc}=1.288(\text{V}) , J_{sc}=25.0\text{mA}/\text{cm}^2, \text{FF}=89.55\%, \eta=28.82 \%$$



الشكل (7): تأثير تغيير سمك الطبقة الماصة على مخرجات الخلية الشمسية بعد إضافة (BSF).

b- تأثير تغيير سمك الطبقة العاكسة على مخرجات الخلية:

غير سمك طبقة الانعكاس الخلفي من (0.05-0.5 μm) وزيادة مقدارها (0.05μm) وتثبيت سمك طبقة الامتصاص عند (1μm) تبين انه لم يؤثر تغيير سمك طبقة الانعكاس الخلفية على كفاءة الخلية وبقيت مخرجات الخلية الشمسية ثابتة كما هو مبين في الشكل (8) تم اختبار اقل سمك وهو (0.05μm) وكان لها فائدة في تقليل سمك طبقة الامتصاص وزيادة كفاءة الخلية الشمسية إذ كانت كفاءة الخلية الشمسية قبل اضافة طبقة الانعكاس تساوي (η=27.35%) وبعد إضافة طبقة الانعكاس أصبحت تساوي (η=28.82 %).



الشكل (8): تأثير تغيير سمك الطبقة العاكسة على مخرجات الخلية الشمسية.

الدور الرئيس للطبقة العاكسة هو تحسين كفاءه الخلية الشمسية مع تقليل سمك طبقة الامتصاص حيث تعمل على ارجاع الالكترونات المتولدة في الوصلة (p-n) وتقلل من عملية الاتحاد في جهة التلامس الخلفي [18] كذلك للتغلب على مشكلة التوصيل الخلفي غير الأموي التي تعاني منها طبقه الامتصاص وتساعد على ايجاد جهات الاتصال مستقرة بدون التقليل من كفاءة الخلية [19]

4.4 الاستنتاجات

من هذا البحث تم استنتاج ما يلي:

بعد اجراء الدراسة على الخلية المتكونة من (P- CH₃NH₃PbI₃) /n- TiO₂) تبين أن افضل سمك للطبقة الموائمة هو (0.1μm) والطبقة الماصة هو (5μm) وتم الحصول على أعلى كفاءة للخلية وتساوي 27.0% وبعد إضافة طبقة أكسيد التوصيل الشفافة الى الخلية الشمسية تم دراسة تأثير تغيير سمكها على مخرجات الخلية الشمسية وتبين ان افضل سمك لها هو (0.1μm) إذ أصبحت كفاءة الخلية تساوي (27.05%) وبعدها تم دراسة تأثير تغيير سمك الطبقة النافذة وتبين أن افضل سمك لها هو (0.1μm). بعد ان درس تأثير الطبقة النافذة على سمك الطبقة الموائمة تبين ان أفضل سمك للطبقة الموائمة هو (0.05μm) وكانت اعلى كفاءة للخلية الشمسية هو 27.35% وبعد ان تم إضافة طبقة الانعكاس الخلفية ZnTe الى الخلية الشمسية ودراسة تأثيرها على سمك الطبقة الماصة تبين أن أفضل سمك للطبقة الماصة بعد إضافة الطبقة العاكسة هو (1μm) وبعد أن تم دراسة تغيير سمك طبقة الانعكاس الخلفي من (0.05- 0.5μm) وبزيادة مقدارها (0.05μm) وتثبيت سمك طبقة الامتصاص عند (1μm) تبين انه لم يكن هنالك تأثير في تغيير سمك طبقة

الانعكاس الخلفية وبقية مخرجات الخلية الشمسية ثابتة وكانت النتائج النهائية التي تم الحصول عليها في هذا البحث هي:

$$[V_{oc}=1.287 \text{ (V) , } J_{sc}=25.0 \text{ mA/cm}^2, \text{ FF}=89.55 \%, \eta=28.82 \%]$$

5. المصادر

1. Ramprasad Chandrasekharan ,“ NUMERICAL MODELING OF TIN-BASED ABSORBER DEVICES FOR COST-EFFECTIVE SOLAR PHOTOVOLTAICS .” A Dissertation in Energy and Geo-Environmental Engineering, 2012.
2. Green, Martin & Ho-Baillie, Anita & Snaith, Henry. "The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*". 8(7). Doi: 10.1038/NPHOTON.2014.134.
3. Ciesielski, P. N., Hijazi, F. M., Scott, A. M., Faulkner, C. J., Beard, L., Emmett, K., Rosenthal, S. J., Cliffel, D., & Kane Jennings, G. **Photosystem I - based biohybrid photoelectrochemical cells.** *Bioresource technology*, 101(9), 3047–3053. 2010.
4. Chen, Y., Zhang, L., Zhang, Y., Gao, H., & Yan, H. **Large-area perovskite solar cells - a review of recent progress and issues.** *RSC advances*, 8(19), 10489–10508. 2018. DOI:10.1039/C8RA00384J
5. D'Innocenzo, V., Grancini, G., Alcocer, M. J., Kandada, A. R., Stranks, S. D., Lee, M. M., Lanzani, G., Snaith, H. J., & Petrozza, A. **Excitons versus free charges in organo-lead tri-halide perovskites.** *Nature communications*, 5, 3586. 2014.
6. Xiao, Zhengguo & Bi, Cheng & Shao, Yuchuan & Dong, Qingfeng & Wang, Qi & Yuan, Yongbo & Wang, Chenggong & Gao, Yongli & Huang, Jinsong. **Efficient, high yield perovskite photovoltaic devices grown by interdiffusion of solution-processed precursor stacking layers.** *Energy Environ. Sci.* 7. 10.1039/C4EE01138D. 2014.
7. Koen Decock, Samira Khelifi, Marc Burgelman. **Modelling multivalent defects in thin film solar cells, Thin Solid Films**, Volume 519, Issue 21, 2011, Pages 7481-7484,.
8. Chetan Singh Solanki. **“Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications”**(2nd Edition) , PHI learning private limited, Delhi-110092. 2013.
9. Burgelman et al, **SCAPS manual**, no May. 2014.
10. Shoewu, O., G. Anuforonini, and O. Duduyemi. **"Simulation of the performance of CdTe/CdS/ZnO multi-junction thin film solar cell."** *Review of information engineering and applications* 3.1:1-10. 2016.
11. Ngoupo, A. Teyou, S. Ouédraogo, and J. M. Ndjaka. **"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. 2019.
12. Mohammad I. Hossain, Fahhad H. Alharbi, Nouar Tabet, Copper oxide as inorganic hole transport material for lead halide perovskite based solar cells, *Solar Energy*, Volume 120, 2015, Pages 370-380, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.040>.
13. Aziz Khan, Naveed & Rahman, Kazi Sajedur & Haque, Faiazul & Dhar, Nupur & Islam, Mohammad & Akhtaruzzaman, Md & Sopian, Kamaruzzaman & Amin, Nowshad. **Design Optimization of CdTe Thin Film Solar Cells from Numerical Analysis."** 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering, 2014, pp. 2014. 508-511, doi: 10.1109/ICECE.2014.7026862.
14. Peijie Lin, Lingyan Lin, Jinling Yu, Shuying Cheng, Peimin Lu and Qiao Zheng. **Numerical Simulation of Cu₂ZnSnS₄ Based Solar Cells with In₂S₃ Buffer Layers by SCAPS-1D.** *Journal*

- of Applied Science and Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 383390. 2014. DOI: 10.6180/jase.2014.17.4.05.
15. Mrinmoy Dey, Maitry Dey, MA Matin, Nowshad Amin. **Design of high performance and ultra-thin CdTe solar cells with SnTe BSF from numerical analysis.** 2015 18th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIIT),573-576. 2015.
 16. Scheer, Roland and Hans-Werner Schock. **Chalcogenide Photovoltaics: Physics, Technologies, and Thin Film Devices.**John Wiley & Sons.(2011).
 17. Archer, M.D., and Green, M.A. (2nd Eds). **Clean Electricity From Photovoltaics(vol. 4).**World scientific. 2014.
 18. N . Amin , K . Sopian , and M . Konagai ,“ **Numerical modeling of CdS / CdTe and CdS / CdTe /ZnTe solar cells as a function of CdTe thickness ,**” Solar Energy Materials and Solar Cells , vol .91 ,no .13 , pp. 1202 – 1208, 2007.
 19. Carlsson, T. and Brinkman, A. W. '**Identification of degradation mechanisms in field-tested CdTe modules.**', **Progress in photovoltaics** : research and applications, 14 (3). pp. 213-224. 2006. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.663>.