

تحسين الخصائص الضوئية والكهربائية للخلية الشمسية المصنوعة من المركب $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3)$

د.حسن عبدالكريم سليمان *

د. محمد كامل ابراهيم **

بهاء محمود سليمان ***

(تاريخ الإيداع 21/ ٦ / 2023 – تاريخ النشر 12 / 10 / 2023)

□ ملخص □

تم في هذه البحث نمذجة خلية شمسية أساسها مادة البيروفسكايت $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3)$ النصف ناقلة والتي تمتلك عرض منطقة محظورة قيمته 1.5 eV ، ثم حساب بارامتراتنا المختلفة:

جهد الدارة المفتوحة $V_{oc} = 1.33 \text{ V}$ ، وكثافة تيار الدارة المقصورة $J_{sc} = 14.16 \text{ mA/cm}^2$ ، وعامل الملئ $FF = 90.12$ ، كما درسنا تأثير سماكة الطبقة الماصة $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3)$ على أداء الخلية المدروسة وذلك باستخدام سماكات تتراوح بين $(60\text{nm} - 600\text{nm})$ ، وتوصلنا نتيجة هذه الدراسة الى أن القيمة المثالية لكفاءة تحويل الطاقة بلغت $POV = 17.00\%$ عند السماكة 400nm للطبقة الماصة $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3)$ ، وقمنا بعملية النمذجة باستخدام برنامج المحاكاة (SCAPS 1D) مستخدمين طبقة من أكسيد القصدير المشبع بالفلور (FTO) متوضعة على طبقة من الزجاج، وطبقة من أكسيد التيتانيوم (TiO_2) وهي طبقة لنقل الالكترونات (ETL)، والتي تشكل مصعد الخلية الشمسية، وطبقة البيروفسكايت الماصة للضوء أساسها ميثيل الأمونيوم يوديد الرصاص $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3)$ ، وطبقة (Spiro-OMeTAD) وهي طبقة لنقل الثقوب (HTL)، والتي تشكل مهبط الخلية الشمسية، وفي النهاية توضع طبقة من خطوط الذهب (Au) تعمل كموصلات للمهبط.

الكلمات المفتاحية: المواد العضوية - المواد غير العضوية - الخلايا الكهروضوئية - خلية البيروفسكايت الشمسية - المحاكاة - SCAPS.

*أستاذ- قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

**أستاذ مساعد-قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

***طالب دراسات عليا(ماجستير)-قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

Improving the optical and electrical properties of the solar cell made of the Composite ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)

D.Hassan Abd Al Karim Suleiman*

D.Mohammed Kamel Ibrahim**

Bahaa Mahmoud Suleiman***

(Received 21/6/2023.Accepted 12/10/2023)

□ABSTRACT □

In this research, a solar cell based on semiconductor perovskite material ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), which has a restricted region width of 1.5 eV, was modeled, then its various parameters were calculated: open circuit voltage $V_{oc} = 1.33$ V, short circuit current density $J_{sc} = 14.16$ mA/cm², and fill factor $FF = 90.12$ we also studied the effect of the thickness of the absorbent layer ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) on the performance of the studied cell, using thicknesses ranging from (60 nm – 600 nm), and we concluded as a result of this study that the ideal value for the energy conversion efficiency reached $P_{ov} = 17.00\%$ at the thickness of 400nm for the absorbent layer ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$). We performed the modeling process using the simulation program (SCAPS 1D) using a Layer of perfluorinated tin oxide (FTO) placed on a layer of glass, a Layer of titanium oxide (TiO_2), which is an electron transfer layer (ETL), which forms the anode of the solar cell, and a layer of Light – absorbing perovskite is based on methyl ammonium lead iodide ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), and a (spiro – ometad) layer, which is a hole - transporting layer (HTL), which forms the cathode of the solar cell. Finally, a layer of gold lines (Au) is placed that acts as conductors for the cathode.

Keywords: organic materials, inorganic materials, photovoltaic cells, perovskite solar cell, simulation, SCAPS.

*Professor. Department of Physics. College of Science. University of Tartous.Tartous. Sy

**Assistant Professor. Department of Physics. College of Science. University of Tartous. Tartous. Syria.

***Graduate Student(Master). Department of Physics. College of Science. University of Tartous. Tartous.

تتمتع الخلايا الشمسية السليكونية إلى يومنا هذا بكفاءة تحويل تتراوح من % 12 حتى % 20 مما قاد العلماء والباحثين إلى البحث عن مادة جديدة تحقق كفاءة تحويل أفضل، ومن هنا بدأ الباحثون بالتطلع إلى المواد العضوية من أجل التطبيقات الكهروضوئية نظراً لما تتمتع به من خصائص ضوئية وكهربائية ممتازة [14 , 13].

منذ عام 1950 استخدمت المواد السليكونية كمادة أساسية في صناعة الخلايا الشمسية، لكن في عام 2009 ومع زيادة كفاءة تحويل الطاقة من % 3.8 إلى % 23.3 اكتسبت الخلايا الشمسية الهجينة العضوية وغير العضوية أهمية كبيرة جداً من قبل الباحثين والعلماء [2 , 1].

تتميز خلايا البيروفسكايت الشمسية بكلفتها المنخفضة وسهولة تصنيعها كما تتصف بخاصية ضوئية وكهربائية حيث تمتص طيف الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء في حين أن خلايا السليكون الشمسية لا يمكنها امتصاص سوى طيف الضوء المرئي مما يجعلها بديلاً أكثر كفاءة من خلايا السليكون الشمسية [14 , 13].

سوف نستخدم في هذه الدراسة برنامج محاكاة يدعى (SCAPS 1D) وهو برنامج محاكاة لنمذجة خلية البيروفسكايت الشمسية [1].

تتميز الخلية الشمسية بالقيم الأساسية التالية:

- تيار الدارة المقصورة: I_{sc} .

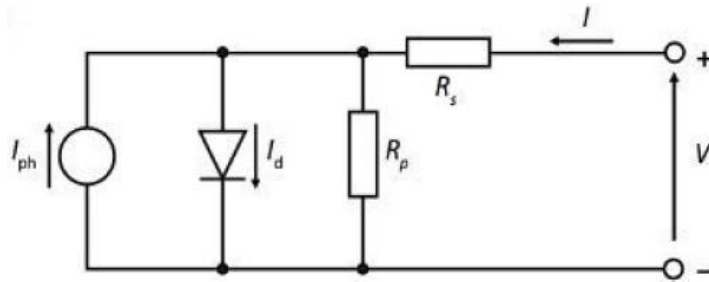
- جهد الدارة المفتوحة: V_{oc} .

- عامل الملء: FF .

- الكفاءة (η): مردود تحويل الطاقة.

أهم مميزات الخلية الشمسية هي: جهد الدارة المفتوحة وتيار الدارة المقصورة [12].

إن تيار الدارة المقصورة في الخلايا الفوتوفلطائية يساوي إلى تيار الفوتونات الساقطة على الخلية وقيمة الجهد تكون معدومة لتقابل أعظم قيمة للتيار. تتألف الدارة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية من مصدر تيار موصول على التفرع معها ، ومقاومة تفرعية R_p ، بالإضافة لمقاومة تسلسلية R_s ، كما هو موضح في الشكل (1) والذي يمثل الدارة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية المدروسة في هذا البحث.



الشكل (1): الدارة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية المدروسة

تمثل الدارة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية بمصدر للتيار المتولد ضوئياً بخلية PV عند سقوط الفوتونات عليها. هذا المصدر يكون ثابتاً عند درجة حرارة وشدة إشعاع ثابتين. يسبب تيار الفوتونات في هذه الدارة نشوء جهد في الدارة حيث تكون الوصلة p-n في حالة انحياز أمامي باختصار سبب نشوء هذا التيار تحرير بعض الإلكترونات والثغوب نتيجة لامتناس الفوتونات. تعطى علاقة التيار المار في الدارة وفق قانون كيرشوف النهائي [4]:

$$I = I_L - I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} - 1\right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{SH}} \quad (1)$$

تتمتع البيروفسكايت بمكانة مميزة في كيمياء البلورات، فهي تعتبر ذات أهمية كبيرة بسبب خصائصها الكهربائية والمغناطيسية والضوئية، هذه الخصائص حساسة لدرجة الحرارة والضغط.

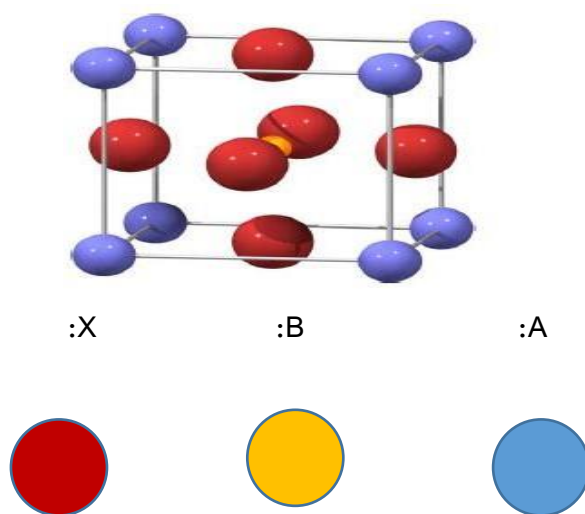
تشكل البيروفسكايت عائلة كبيرة من المواد البلورية حيث اشتق اسمها من معدن طبيعي تيتانات الكالسيوم $(CaTiO_3)$ [3]، الذي اكتشف لأول مرة في عام 1839 من قبل الجيولوجي غوستاف روز، وأطلق عليها اسم بيروفسكايت تكريماً لعالم المعادن الروسي ليف بيروفسكي.

تم انتاج أول بيروفسكايت صناعي سنة 1926 مما أدى لاستخدام مصطلح بيروفسكايت لوصف جميع البنى المماثلة للمركب $(CaTiO_3)$ والممثلة بالصيغة الكيميائية (ABX_3) [15, 16].

أي مادة لها بنية بلورية مماثلة ل $(CaTiO_3)$ تسمى البيروفسكايت.

تمثل الصيغة (ABX_3) البنية البلورية للبيروفسكايت حيث A كاتيون أحادي التكافؤ ويكون من المعادن القلوية أو الترابية، B كاتيون ثنائي التكافؤ ويكون من المعادن الانتقالية (sn_2^+, pb_2^+) ، و X_3 أنيون ويكون عموماً من الأوكسجين أو الفلور أو من الهالوجينات (Br^-, Cl^-) .

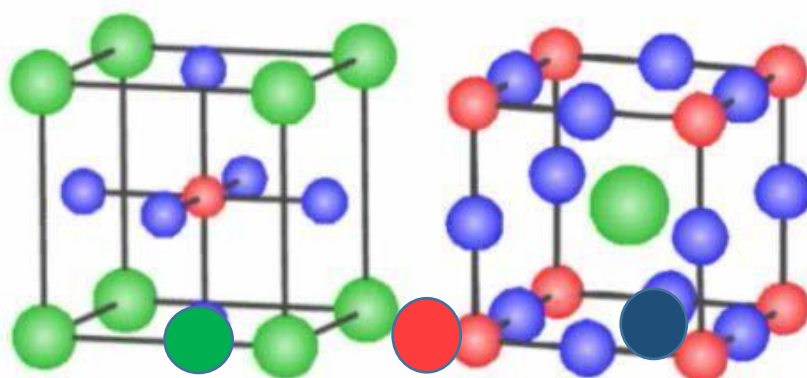
ويتميز ببنية بلورية مكعبة أو شبه مكعبة وزمرة فضائية $pm3m$ كما تحتوي البنية البلورية على 5 ذرات في الحالة المثالية ومن أجل تشكيل بنية البيروفسكايت يجب أن يكون مجموع تكافؤ $A^{+m} B^{+n}$ مساوي ل $(m + n = k)$ من أجل أن تكون الشحنة الكلية معدومة حيث k هو شحنة الأنيون X [17] كما في الشكل (2):



الشكل (2): البنية البلورية لمادة البيروفسكايت

واستناداً إلى مواقع A و B فإن البنية البلورية للبيروفسكايت تقسم إلى فئتين:

الأولى حيث تحتل الذرات A الرؤوس $(0, 0, 0)$ ، أما ذرات المواقع B تحتل مركز المكعب بالإحداثيات $(1/2, 1/2, 1/2)$ ونجد ذرات الموقع X في مركز الأوجه بالإحداثيات $(0, 1/2, 1/2)$ ، أما بالنسبة للفئة الثانية نجد A في مركز المكعب، B في الرؤوس، أما X فتكون في منتصف الأضلاع كما في الشكل (3):



الشكل (3): البنية البلورية لمادة البيروفسكايت اعتماداً على مواقع الذرات (A ، B ، C)

اعتماداً على الذرات / الجزيئات المستخدمة في البنية، يمكن أن تحتوي البيروفسكايت على مجموعة رائعة من الخصائص المثيرة للاهتمام.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمُن أهمية البحث في استخدام مادة البيروفسكايت كطبقة ماصة للضوء لتحسين مردود وكفاءة الخلية الشمسية من خلال تشكل أزواج (الكترن- ثقب) بمعدلات عالية نسبياً، كما أن مواد البيروفسكايت تتمتع بسلوك الكتروني ضوئي ممتاز بفضل معامل امتصاصها العالي جداً مما يجعلها بديلاً أكثر كفاءة للسليكون، ويهدف البحث إلى دراسة تأثير سماكة الطبقة الماصة على بارامترات الخلية الشمسية.

طرائق البحث ومواده:

استخدمنا برنامج المحاكاة (SCAPS 1D) لنمذجة خلية البيروفسكايت الشمسية [4 ، 5]، وهو أداة برمجية تتصف بواجهة إدخال واضحة وبسيطة لإدخال البارامترات الكهروضوئية وتم تطويره من قبل مجموعة من الباحثين في جامعة جينت (Gent) [9 ، 11].

النمذجة ومحاكاة الخلية الشمسية:

سنستخدم في هذا البحث برنامج الـ SCAPS-1D لمحاكاة الخلية الشمسية التي قوامها البيروفسكايت حيث تم تصميم وتطوير هذا البرنامج من قبل مجموعة من الباحثين في جامعة جينت (Gent). يعتمد هذا البرنامج بشكل أساسي على:

1- معادلة بواسون:

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = \frac{e}{\epsilon_0\epsilon_r} (p(x) - n(x) + N_d + N_a + \rho_p \cdot \rho_n) \quad (2)$$

حيث: φ الكمون الكهروساكن، ϵ_r السماحية النسبية، و ϵ_0 سماحية الخلاء، e شحنة الالكترن، n تركيز الالكترونات الحرة، و p تركيز الثقوب الحرة، ρ_n توزيع حاملات الشحنة للالكترونات، و ρ_p توزيع حاملات الشحنة للثقوب، N_d, N_a تركيز الشوائب للمانحات والآخذات [10].

2- معادلتى تيار الانسياب من أجل الالكترونات والثقوب على الترتيب:

$$J_n = D_n \frac{dn}{dx} + \mu_n n \frac{d\varphi}{dx} \quad (3)$$

$$J_p = D_p \frac{dp}{dx} + \mu_p p \frac{d\phi}{dx} \quad (4)$$

حيث: J_n كثافة تيار الإلكترونات، J_p كثافة تيار الثقوب، D_n معامل انتشار الإلكترونات، D_p معامل انتشار الثقوب، μ_n حركية الإلكترونات، μ_p حركية الثقوب.

3- معادلتى الاستمرارية من أجل الإلكترونات والثقوب على الترتيب:

$$\frac{dJ_n}{dx} = G - R \quad (5)$$

$$\frac{dJ_p}{dx} = G - R \quad (6)$$

G معدل توليد الأزواج (الإلكترونية - الثقبية)، R معدل إعادة اتحادها.

الخلية الشمسية المستخدمة في هذا البحث من النوع n-i-p حيث تم ترسيب الطبقة الماصة للضوء بين طبقة من ثنائي أكسيد التيتانيوم (TiO_2) كطبقة ناقلة للإلكترونات (ETL) وطبقة من المادة Spiro-OMeTAD كطبقة ناقلة للثقوب (HTL).

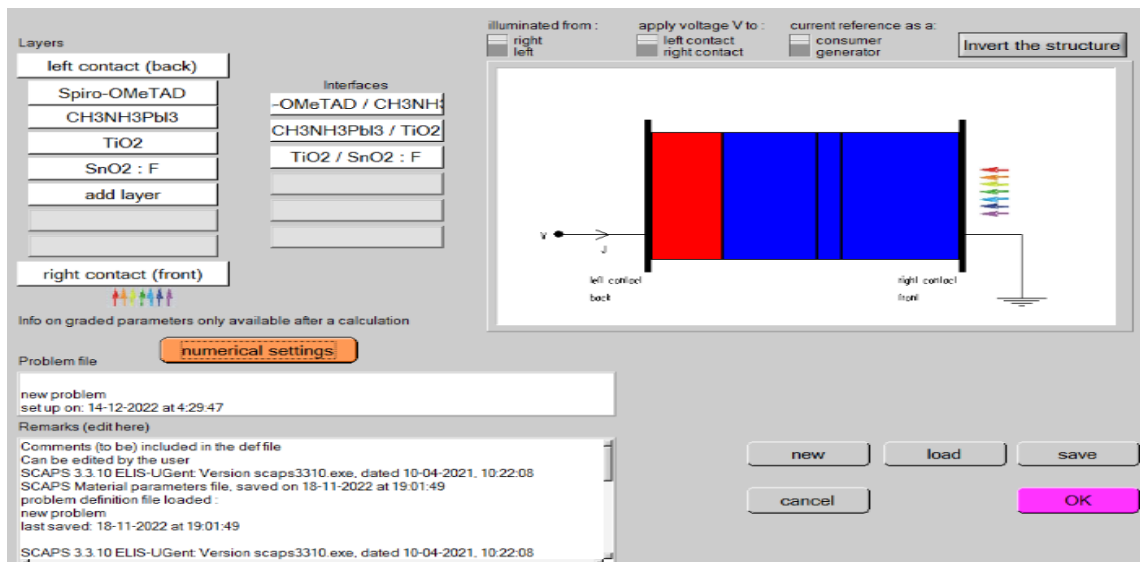
خصائص المواد المستخدمة في المحاكاة:

تم نمذجة الخلية الشمسية وفق المواصفات المذكورة في الجدول (1) عند شدة إشعاع شمسي ثابتة $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ودرجة حرارة ثابتة $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ، باستخدام برنامج SCAPS-1D. يوضح الشكل (4) الطبقات المستخدمة في عملية المحاكاة باستخدام برنامج الـ SCAPS-1D تأسيساً على العلاقات من (2) إلى (6):

الجدول (1) خصائص الطبقات المستخدمة في الخلية الشمسية:

Characteristics	SnO ₂ :F	TiO ₂	CH ₃ NH ₃ PbI ₃	Spero-OMeTAD
Thickness (nm)	500	100	60-600	300
Bandgap (eV) Eg	3.5	3.2	1.55	2.9
Electron affinity (eV)	4	4.26	3.9	2.2
Dielectric permittivity ϵ_r	9	38-108	30	3
CB effective density of states (cm ⁻³)	2.20×10^{17}	2.00×10^{18}	2.20×10^{18}	2.50×10^{18}
VB effective density of states (cm ⁻³)	2.20×10^{16}	1.80×10^{19}	1.00×10^{18}	1.80×10^{19}
Electron thermal velocity (cm/s)	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
Hole thermal velocity (cm/s)	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
Electron mobility (cm ² /V.s)	20	2×10^4	2.20	2.00×10
Hole mobility (cm ² /V.s)	10	1×10^3	2.2	2.00×10
Donor density Nd (cm ⁻³)	1×10^{15}	6×10^{19}	9×10^{20}	0
Acceptor density Na (cm ⁻³)	0	0	0	1×10^{22}
Contacts (Au)				
Work function (5.1 eV)				

يوضح الشكل (4) واجهة برنامج SCAPS المستخدم في هذه الدراسة لنمذجة الخلية المدروسة التي قوامها مادة البيروفسكايت ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) والطبقات المستخدمة في عملية المحاكاة تأسيساً على المعادلات (1) و (5):



الشكل(4): واجهة برنامج الـ SCAPS-1D وأسماء الطبقات المستخدمة.

النموذج الذي تم إدخاله هو: $\text{Glass/SnO}_2:\text{F}/\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{Spiro} - \text{OMeTAD}/\text{Au}$ طبقة التماس المعدني من الذهب (Au) ذي تابع العمل eV (5.1) (Spiro-ometad) وهي طبقة نقل الثقوب (HTL) و من النوع (n) ، الطبقة الماصة للضوء ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) وهي من النوع (P)، و (TiO_2) وهي طبقة نقل الالكترون (ETL) و من النوع (n)، و ($\text{SnO}_2:\text{F}$) وهي طبقة ماصة للضوء وشفافة للتماس المعدني [6, 7].

النتائج والمناقشة:

تم نمذجة خلية البيروفسكايت الشمسية حيث تم دراسة تأثير تغير سماكة الطبقة الماصة ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) بين (60 nm – 600 nm) على أداء وكفاءة الخلية الشمسية حيث يوضح الشكل (5) النتائج التي تم الحصول عليها عند سماكة 400 nm.

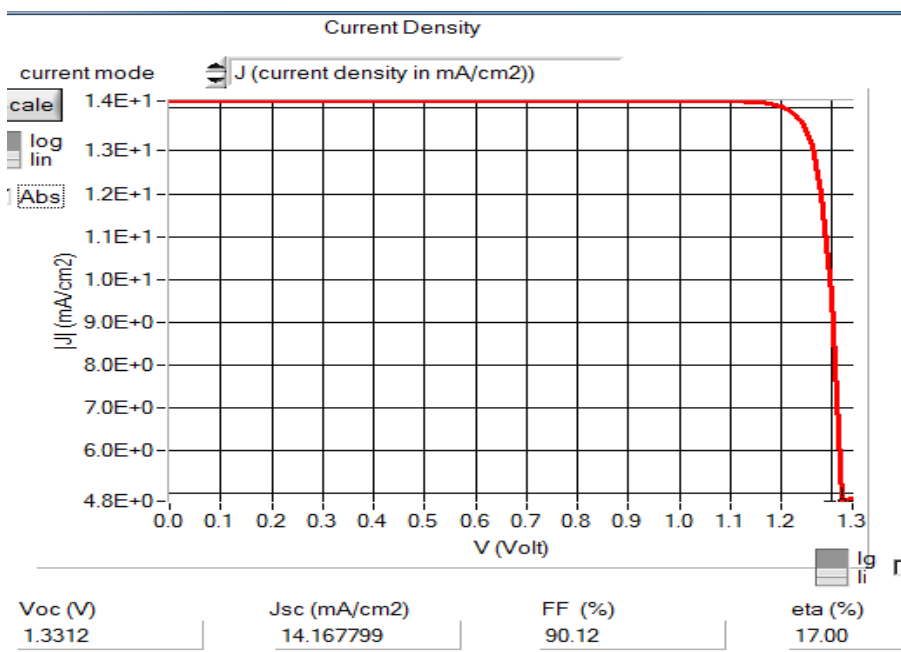
يوضح الجدول (2) بارامترات الخلية الشمسية (V_{oc} , J_{sc} , $FF\%$, Eta) عند تغير سماكة الطبقة الماصة ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) في المجال (60 nm – 600 nm) كالتالي:

الجدول (2): بارامترات الخلية الشمسية المستخدمة:

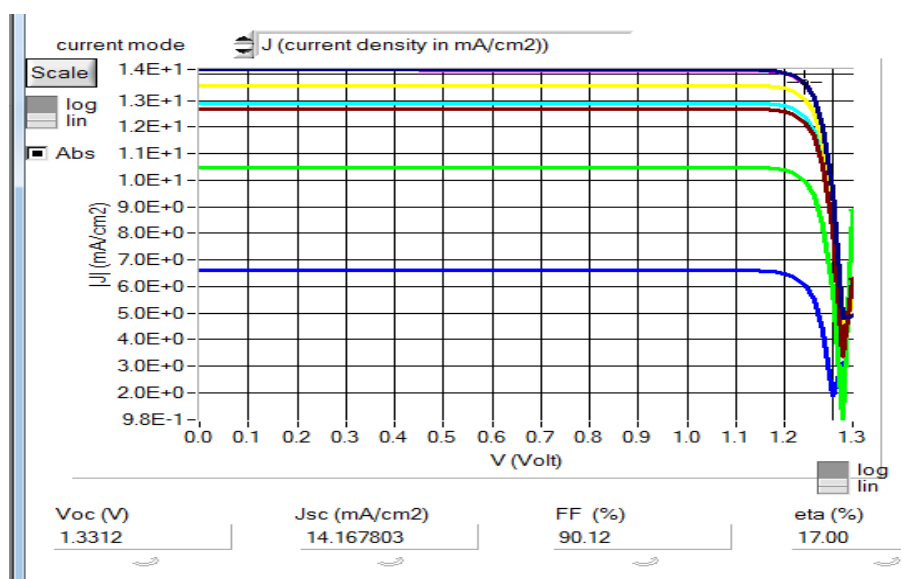
السماكة	جهد الدارة المفتوحة	كثافة تيار الدارة المقصورة	عامل الملئ	كفاءة تحويل الطاقة
Thickness(nm)	$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF%	Eta%
60	1.30	6.60	89.94	7.78
125	1.32	10.49	90.09	12.50
200	1.32	12.90	90.11	15.45
300	1.33	14.14	90.12	16.97
400	1.33	14.16	90.12	17.00
500	1.32	13.15	90.13	15.76
600	1.32	12.68	90.14	15.19

نلاحظ في هذه الدراسة أن سماكة طبقة البيروفسكايت الماصة هو بارامتر بالغ الأهمية يؤثر على أداء الخلية (perovskite solar cell)، كما نلاحظ أن أداء الخلية الأمثل يكون عند السماكة (400 nm) للطبقة النشطة ($CH_3NH_3PbI_3$) ثم تنخفض قليلاً، بينما يزيد الجهد إلى القيمة المثلى عند السماكة (300 nm) ثم ينخفض أيضاً، وبالتالي نستنتج أن سلوك جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) مشابه لسلوك الكفاءة حيث يزداد عند القيمة المثلى بين (300 nm – 400 nm) ومن ثم يتناقص مع ازدياد سماكة الطبقة الماصة وذلك نتيجة لعدم وجود الكثير من مراكز إعادة اتحاد حوامل الشحنة [8 , 9]، حيث يمكن للالكترونات والثقوب أن تصل إلى القطب المقابل لها قبل إعادة التوليد مما يعزز كفاءة الخلية الشمسية وذلك عند السماكة 400.

تم مقارنة النتائج مع الدراسة التي قام بها Mandapu وزملاؤه [10] حيث تم استخدام نفس الطبقة الماصة للضوء ولكن بطبقة نقل ثقوب والكترونات مغايرة مما يدل على وجود تأثير لطبقات نقل الثقوب والالكترونات على أداء الخلية حيث بلغت الكفاءة 31% ولكن السبب الرئيسي في الاختلاف الكبير في الكفاءة هو كثافة العيوب حيث استخدم الباحث كثافة عيوب 10^{14} أي بنية تقترب من البنية المثالية بينما في دراستنا تم استخدام كثافة عيوب 10^{15} (حيث استخدمنا كثافة عيوب 10^{15} لمحاكاة الواقع حيث لا يوجد في الحقيقة بنية مثالية بشكل كامل و إنما فقط يمكن اعتبار بنية مثالية نظرياً فقط) وهذا له تأثير سلبي على أداء الخلية الشمسية نتيجة إعادة اتحاد حاملات الشحنة المتولدة ضوئياً.



الشكل (5): يوضح منحنى (جهد-تيار) للخلية $(CH_3NH_3PbI_3)$



الشكل (6): تغير منحنى (جهد-تيار) بتغير سماكة الطبقة الماصة $CH_3NH_3PbI_3$

جدول (3) يوضح شرح للشكل (6):

السماكة	اللون
اللون الأزرق	60
اللون الأخضر	125
اللون الأخضر الفاتح	200
اللون البنفسجي	300
اللون الأحمر	400
اللون الأصفر	500
اللون الأحمر الغامق	600

نلاحظ من الشكل (6) أنه بازياد سماكة الطبقة الماصة للضوء ($CH_3NH_3PbI_3$) عن 60 nm تزداد الكفاءة وذلك بسبب ازدياد عدد حاملات الشحنة المتولدة ضوئياً، وعند سماكة 400 nm للطبقة الماصة ($CH_3NH_3PbI_3$) نحصل على قيمة مثالية لكفاءة الخلية الشمسية $POV = 17.00\%$ ، في حين عند زيادة سماكة الطبقة الماصة ($CH_3NH_3PbI_3$) فوق 400 nm تبدأ الاضاءة في الانخفاض مما يدل على نقصان كفاءة الخلية الشمسية نتيجة إعادة اتحاد جزء من حاملات الشحنة.

الاستنتاجات والتوصيات:

يتمتع المركب ($CH_3NH_3PbI_3$) بعرض منطقة محظورة صغيرة مما يعطي أهمية كبيرة في تطبيقات الخلايا الفوتوفلطائية، كما وتحقق كفاءة أعلى بالنسبة للخلايا الأخرى. كما يوصى بدراسة تأثير بعض البارامترات الأخرى كدرجة الحرارة لما لها من تأثير على أداء الخلية.

المراجع:

- [1] Frost JM, Butler KT, Brivio F, Hendon CH, Schilfgaarde MV, and Walsh A. *Atomistic origin of high performance in. Hybrid halide perovskite solar cells.* Nano Lett. 2014; 14: 2484-2590.
- [2] Baikie T, Fang YN, Kadro JM, Schreyer M, Wei FX, Mhaisalkar SG, Gratzel M, and White TJ "Synthesis And Crystal Chemistry Of The Hybrid Perovskite". <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/ta/c3ta10518k> sensitized solar cell applications. J. Mater. Chem. A. 2013; 1: 5628-5641.
- [3] Yin WJ, Yang JH, Kang J, Yan Y, and Wei SH. *Halide perovskite materials for Solar cells: a theoretical review.* J. Mater. Chem. A. 2014.
- [4] ARAR Rabie, "Etude des propriétés structurales, électroniques et mécaniques des composés fluoro-pérovskites à base de sodium $NaXF_3$ ($X=Mg, Zn$) par la méthode FP-LAPW". thèse de Doctorat, Université DJillali Liabes, Sidi bel Abbes (2018).
- [5] H. M. Rietveld, J. Appl. Cryst. 2, 65-71 (1969).
- [6] Walsh A, Payne DJ, Egdel RG, and Watson GW. *stereochemistry of Post-Transition metal oxides : revision of the classical lone pair model.* Chem. Soc. Rev. 2011; 40: 4455-4466.
- [7] Keith T. Butler, Jarvis M. Frost, and Aron Walsh, *Band alignment of the hybrid Halide perovskite $CH_3NH_3PbCl_3$, $CH_3NH_3PbBr_3$, and $CH_3NH_3PbI_3$.* Materials Horizons. 2014; 2: 228-231.
- [8] Gray, D. E. *American Institute of Physics Handbook*, 3rd ed ; McGraw-Hill: New York, 1982.
- [9] Lide, D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 73rd ed; CRC Press: Boca Ration, FL, 1994.
- [10] Mandadapu, Usha. Vedanayakam, Victor, S., & Thyagarajan, K. *Simulation and Analysis of Lead based Perovskite solar cell Using SCAPS-1D.* Indian Journal of Science and Technology, 2017

- [11] سليمان، حسن، إبراهيم، محمد، رستم، مياس. (٢٠٢٢). دراسة تأثير بعض البارامترات على خصائص الخلايا الشمسية الهجينة قوامها بيروفسكايت. مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية. ماجستير. فيزياء. العلوم. طرطوس. طرطوس: سوريا. ص: ١٢.
- [12] سليمان، حسن، إبراهيم، محمد، أحمد، ايناس. (٢٠٢٠). نمذجة ومحاكاة خلية شمسية نانوية أساسها السليكون الأسود بالمقارنة مع خلية معيارية. مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية. ماجستير. فيزياء. العلوم. طرطوس. طرطوس: سوريا. ص: ١٢.
- [13] Kojima A, Kenjiro T, Shirai Y, Miyasaka T. *Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells*. Journal of American Chemical Society. 2009; 131(17):6050–51. Crossref
- [14] NREL [Internet]. [cited 2017 Jan 05]. Available from: Crossref
- [15] D. Chenine, *Etude Ab-initio des Propriétés structurales, optoélectroniques, thermodynamiques et magnétiques des pérovskites*, thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibnbadis. Mostaganem, 2019
- [16] L. Djoudi, *Synthèse et propriétés d'oxydes mixtes à base de Lanthane, Aluminium et Nickel*, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider. Biskra, 2016
- [17] A. Meziani, *Etude des propriétés structurales, électroniques, élastiques et optiques des composés fluoro-pérovskites CsCdF3 et KZnF3*, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar. Annaba, 2012