



(٧١٣) (٧٢٧)

العدد الثامن
والثلاثون

دراسة خصائص الخلية الشمسية ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3/\text{TiO}_2/\text{Zn}_2\text{SnO}_4/\text{ZnO}$) باستخدام البرنامج (SCAPS-1D) ودراسة تأثير درجة الحرارة على مخرجات الخلية

م.م. رداد سالم محمود سليم

وزارة التربية / المديرية العامة للتربية في محافظة نينوى

Raddad.20esp33@student.uomosul.edu.iq

م.م. عوض خضير محمود

وزارة التربية / المديرية العامة للتربية في محافظة نينوى/قسم الاشراف الاختصاصي

wwd1876@gmail.com

المستخلص:

الهدف من هذا البحث تحليل وتقييم تأثير زيادة درجة الحرارة على أداء الخلية الشمسية البيروفسكايت من خلال الجمع بين المحاكاة الحاسوبية والتحليلات النظرية والدراسات التجريبية السابقة، توضح النتائج أن التغيرات في درجة الحرارة تؤثر بشكل واضح على الخصائص الكهروضوئية لهذه الخلية الشمسية. استخدم برنامج المحاكاة الحاسوبية SCAPS-1D لمحاكاة الخلية الشمسية البيروفسكايت المعتمدة في هذا البحث. وكانت الخلية الشمسية ذات الخمس طبقات ($\text{Cu}_2\text{O}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3/\text{TiO}_2/\text{Zn}_2\text{SnO}_4/\text{ZnO}$) هي الخلية المعتمدة في الدراسة في هذا البحث تم دراسة تأثير زيادة درجة الحرارة ($270\text{K}-400\text{K}$) على مخرجات الخلية الشمسية وتشمل فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) ووجد ان زيادة درجة الحرارة يؤدي الى نقصان فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) وتيار دائرة القصر (J_{sc}) ووجد زيادة طفيفة في التيار مع زيادة درجة الحرارة و تم دراسة تأثير زيادة درجة الحرارة على عامل المليء (FF) وتبين نقصان قيمة عامل المليء مع زيادة درجة الحرارة ومن خلال الدراسة تبين ان لزيادة درجة الحرارة تأثير سلبي كفاءة الخلية الشمسية (η) كذلك تم دراسة تأثير زيادة درجة الحرارة ($270\text{K}-320\text{K}$) على المنحني ($I-V$) .

الكلمات المفتاحية: الخلية البيروفسكايت، مخرجات الخلية. برنامج (SCAPS-1D) .



**Studying the properties of the solar cell
(Cu₂O/CH₃NH₃PbCl₃/TiO₂/Zn₂SnO₄/ZnO) using the (SCAPS-1D)
software and studying the effect of temperature on the cell's output.**

Raddad Salem Mahmoud Salim

Ministry of Education / Directorate General of Education in Nineveh
Governorate

Raddad.20esp33@student.uomosul.edu.iq

Awad Khudair Mahmoud

Ministry of Education / Directorate General of Education in Nineveh
Governorate / Specialized Supervision Department

wwd1876@gmail.com

Abstract:

The aim of this research is to analyze and evaluate the effect of increasing temperature on the performance of perovskite solar cells by combining computer simulations, theoretical analyses, and previous experimental studies. The results demonstrate that changes in temperature clearly affect the photovoltaic properties of this solar cell. The computer simulation program (SCAPS -1D) was used to simulate the perovskite solar cells adopted in this research. The solar cell used in the study was the (Cu₂O/CH₃NH₃PbCl₃/TiO₂/ZnSO₄/ZnO) five-layer solar cell. In this research, the effect of increasing the temperature (270K-400K) on the solar cell outputs, including the open circuit voltage (Voc), was studied. It was found that increasing the temperature leads to a decrease in the open circuit voltage (Voc) and the short circuit current (Jsc). A slight increase in the current was found with increasing temperature. The effect of increasing the temperature on the fill factor (FF) was studied, and it was found that the fill factor value decreases with increasing temperature. Through the study, increasing the temperature has a negative effect on the solar cell efficiency



(η). The effect of increasing the temperature (270K-320K) on the (I-V) curve was also studied.

Keywords: Perovskite cell, cell output, program (SCAPS-1D)

المقدمة:

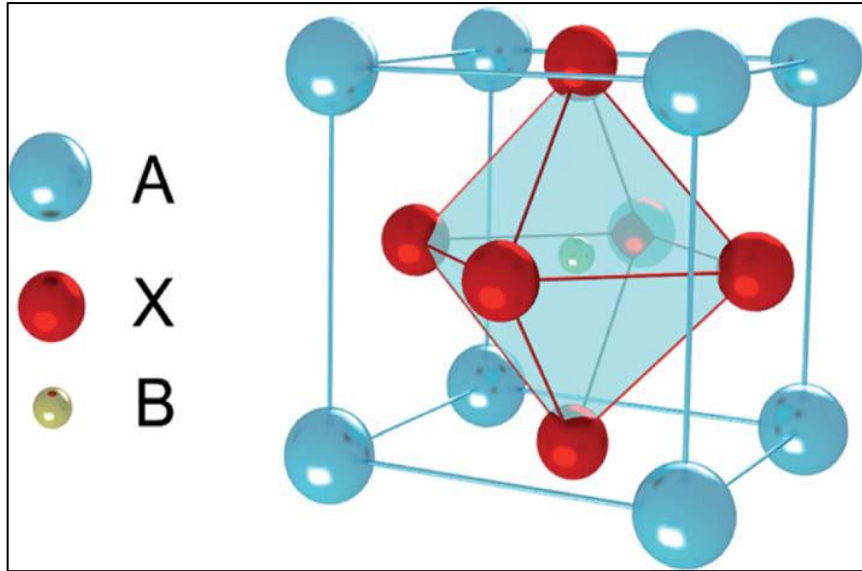
شهدت الخلايا الشمسية البيروفسكايت تطوراً كبيراً حيث قفزت كفاءتها منذ بداية تجريبها في المختبرات من ٣,٨% إلى أكثر من ٢٥,٧% في عام ٢٠٢٣ (Green et al., 2023). وهذا التقدم الكبير جعل منها منافساً قوياً للخلايا السيليكونية التقليدية. ويمكن اعتبار الخلايا الشمسية البيروفسكايت من أكثر التقنيات الواعدة في مجال الطاقة النظيفة المتجددة بسبب تكلفتها المنخفضة وكفاءتها العالية. ومع ذلك تجدر الإشارة إلى أن تعرض الخلية الشمسية البيروفسكايت إلى درجات حرارة مرتفعة يؤثر على خواصها الكهروضوئية وبنيتها البلورية ما يؤدي إلى انخفاض في أدائها. حيث تتعرض الخلايا الشمسية عملياً لتغيرات حرارية كبيرة تتراوح بين -٢٠°C إلى +٨٥°C حسب فصول السنة والموقع الجغرافي. وهناك بعض الدراسات تشير إلى أن التغيرات في درجة الحرارة يمكن أن تسبب فقداناً يصل إلى أكثر من ٤٠% من الكفاءة الأصلية للخلية الشمسية البيروفسكايت (Leijtens et al., 2023). هذا البحث يهتم بدراسة تأثير تغيير درجات الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية البيروفسكايت ومخرجاتها. تمتلك مواد البيروفسكايت بشكل عام الصيغة العامة ABX_3 حيث أن:

A- يمثل أيون عضوي مثل $CH_3NH_3^+$

B- يمثل أيون فلزي مثل $(Pb^{2+}$ أو $Sn^{2+})$

X- يمثل هاليد مثل (I^-, Br^-, Cl^-)

يظهر التركيب البلوري للبيروفسكايت بلورة مكعبة عند درجة حرارة الغرفة، ولكنه يتحول إلى رباعية أو معينية عند تغير درجات الحرارة (Vorpahl et al., 2021). في هذا البحث اعتمدنا على البيروفسكايت $(CH_3NH_3PbCl_3)$ (ميثيل أمونيوم رصاص ثلاثي كلوريد) كطبقة امتصاص في الخلية الشمسية. الشكل (١) يمثل التركيب البلوري للبيروفسكايت (Chen et al., 2018)..



الشكل (1) التركيب البلوري للبيروفسكايت

تقع طبقة البيروفسكايت كطبقة ماصة بين طبقتين تعملان على نقل الإلكترونات والفجوات. تمتاز خلايا البيروفسكايت بكفاءتها العالية نسبة الى باقي الخلايا الشمسية الأخرى (Xiao et al., 2014). عند درجة حرارة الغرفة، يتبلور $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3)$ في نظام مكعب حيث يشغل أيون $(^+\text{CH}_3\text{NH}_3)$ زوايا المكعب، ويقع $(^+\text{Pb}^{2+})$ في المركز، بينما يتموضع (Cl^-) في منتصف الحواف (Kojima et al., 2009). وعند تغيير درجة الحرارة، يتحول إلى النظام الرباعي أو المعيني (Niu et al., 2022). تم إجراء عدة دراسات وبحوث حول خلايا بيروفسكايت $(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3)$ للعلوم التربوية والنفسية وطرائق التدريس للعلوم الأساسية الشمسية ومنها:

درس. Yang (٢٠١٧) وآخرون تأثير استبدال I^- بـ Cl^- على استقرار الخلية الشمسية حيث وجد أن $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ أكثر استقراراً حرارياً.

درس. Zhang (٢٠١٨) وآخرون آليات التدهور الحراري للخلية الشمسية $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ ، حيث وجد أن زيادة درجة الحرارة من 25°C إلى 85°C أدى إلى انخفاض كفاءة الخلية الشمسية من ١١,٥% إلى ٦,٨%. ولاحظ أيضاً حدوث تحول التركيب البلوري من النظام المكعب إلى الرباعي عند درجة حرارة 70°C .



قام Lee and Kim (٢٠٢٠) بإجراء محاكاة للخلايا الشمسية باستخدام برنامج SCAPS-1D لتحليل تأثير تغيير درجات الحرارة على أداء الخلايا الشمسية. وأظهرت النتائج انخفاضاً في كفاءة من ١٢,١% عند $C^{\circ}25$ إلى ٨,٣% عند $C^{\circ}85$.

قام Kumar (٢٠٢١) وآخرون بدراسة مقارنة بين $CH_3NH_3PbCl_3$ و $CH_3NH_3PbI_3$ باستخدام المحاكاة الحاسوبية. وجد أن $CH_3NH_3PbCl_3$ تحافظ على ٨٢% من كفاءتها الأصلية بعد ٢٠٠ ساعة عند درجة الحرارة $C^{\circ}85$ ، بينما فقدت ($CH_3NH_3PbI_3$) ٦٥% من كفاءتها تحت نفس الظروف.

وفي دراسة حديثة قام بها فريق NREL (٢٠٢٣) على فحص تراكيب البيروفسكايت واسعة الفجوة. وجدوا أن $CH_3NH_3Pb(Cl_{0.8}Br_{0.2})_3$ لها فجوة طاقة ٢,٧ eV مع استقرار حراري يتجاوز ١٠٠٠ ساعة عند درجة حرارة $C^{\circ}85$ ، وكفاءة ١٣,٨%.

المواد وطرق العمل: Experimental methods and materials

في هذا البحث تم استخدام برنامج SCAPS-1D لدراسة تأثير تغيير درجات الحرارة على أداء الخلايا الكهروضوئية. ودراسة خواص المنحني (I-V) وكذلك مخرجات الخلايا الشمسية وكفاءة التحويل (η) للخلايا الشمسية ($Cu_2O/CH_3NH_3PbCl_3/TiO_2/Zn_2SnO_4/ZnO$). ثبت ان تقنية المحاكاة الحاسوبية الرقمية للخلايا الشمسية على انها اداة مفيدة وفعالة لدراسة وفهم الكثير من الخصائص الفيزيائية الكهروضوئية لأجهزة الخلايا الشمسية المعقدة فالمحاكاة الرقمية الحاسوبية هي تقنية لدراسة وتحليل عمل جهاز حقيقي عن طريق محاكاة عمله باستعمال تطبيق حاسوبي وتعتمد المحاكاة الحاسوبية على نموذج رياضي يصف النظام (Burgelman, et al., 2017).

. حيث ان طريقة المحاكاة الحاسوبية تساعد على تقليل تكلفة المعالجة والوقت المستهلك في تركيب الخلايا الشمسية وتوفير معلومات مفيدة حول كيفية تغيير معاملات طبقات الخلايا الشمسية لتحسين ادائها.

برنامج (SCAPS-1D) أحد البرامج المستخدمة لمحاكاة الخلايا الشمسية المكونة من سبع طبقات كحد أقصى. إن برنامج المحاكاة SCAPS-1D يعمل على حل المعادلات لأشباه الموصلات الأساسية مثل معادلة الاستمرارية ومعادلة بوايزون وكثافة الحاملات (الإلكترونات والفجوات) وتضم هذه المعادلات معادلة الانجراف ومعادلة الانتشار، وهذه المعادلات هي:



$$j_n = q \mu_n n \varepsilon + q D_n \frac{dn}{dx} = q \mu_n (n \varepsilon + \frac{KT}{q} \frac{dn}{dx}) = n n \frac{dEF_n}{dx} \dots\dots\dots (1)$$

$$j_p = q \mu_p P \varepsilon + q D_p \frac{dp}{dx} = q \mu_p (p \varepsilon + \frac{KT}{q} \frac{dp}{dx}) = \mu_p P \frac{dEF_p}{dx} \dots\dots\dots (2)$$

حيث: -

ε : تمثل المجال الكهربائي (Electric Field)
μ_n μ_p : التحركية نسبة الى الإلكترونات والفجوات (The Ability of Electron's and Hole's)

J_nJ_p : كثافة التيار نسبة الى الإلكترونات والفجوات (The Electron's and Hole's current density)

D_n D_p : معامل الانتشار للإلكترونات والفجوات على التوالي (Diffusion Coefficient for Electron's and Hole's)

كفاءة الخلية الشمسية النسبة بين الطاقة الكهربائية الخارجة والطاقة الضوئية الداخلة تحسب أيضاً من العلاقة:

$$\eta = \frac{outputPower(P_{out})}{InputPower(P_{in})} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

ايضاً يمكن كتابة معادلة الكفاءة بالشكل

$$\eta = \frac{FF \times J_{sc} \times V_{os}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

ومعادلة الاستمرارية نسبة للإلكترون وهي وطراق التدريس للعلوم الأساسية

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = G_n(x) - R_n(x) \dots\dots\dots (5)$$

G_n(x): تمثل عملية التوليد للإلكترونات

R_n(x): تمثل عملية معدل إعادة التركيب.

ومعادلة الاستمرارية نسبة للفجوات.

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = G_p(x) - R_p(x) \dots\dots\dots (6)$$

$Gp(x)$: تمثل عملية توليد للفجوات

$Rn(x)$: تمثل معدل إعادة التركيب

ومعادلة بوايزون التي تربط بين معادلة كثافة الشحنات وجهد الإلكترونات (الجهد الكهرو ستاتيكي (Φ)), (Burgelman et al., 2004).

$$\frac{d \ln(E(x))}{dx} \cdot \frac{d\phi(x)}{dx} + \frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{f(x)}{\varepsilon(x)} \dots\dots\dots (7)$$

وفي حالة (ε) ثابتة تصبح معادلة بوايزون بالصيغة الآتية:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{f(x)}{\varepsilon} \dots\dots\dots (8)$$

يمكن حساب فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) من العلاقة الرياضية الآتية:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \dots\dots\dots (9)$$

ومن خلال المعادلة يمكن حساب التيار الذي يمر عبر الخلية الشمسية:

$$I = I_0 (\exp \frac{qv}{KT} - 1) \dots\dots\dots (10)$$

حيث يمثل (I) تيار دائرة الحمل، (I_0) يمثل تيار التشبع العكسي، و (T) تمثل درجة الحرارة و (K)

يمثل ثابت بولتزمان

عامل المليء ($Fill\ Factor$) يشير إلى جودة نقل الشحنات يمكن تعريفه بأنه تربيع المنحني ($I - V$)

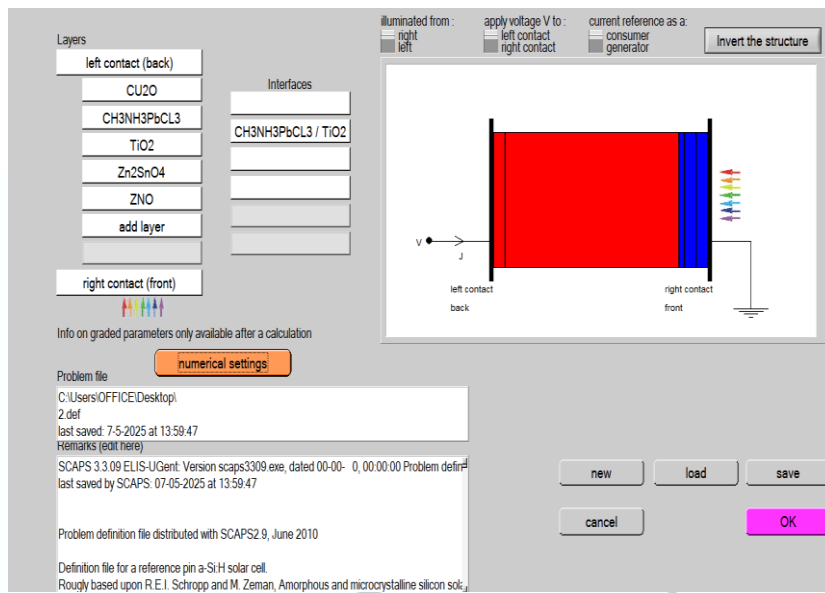
(Tress et al., 2015) ويمكن حسابه من العلاقة الآتية:

$$FF = \frac{V_{m} I_{m}}{V_{oc} I_{sc}} \dots\dots\dots (11)$$

حيث يمثل كل من V_m I_m أعظم تيار وجهد يتولدان من الخلية الشمسية

الشكل (٢) يوضح واجهة برنامج المحاكاة (SCAPS -1D) للخلية الشمسية البيروفسكايت في هذا

البحث



الشكل (2) واجهة برنامج (SCAPS- 1D)

Results and :

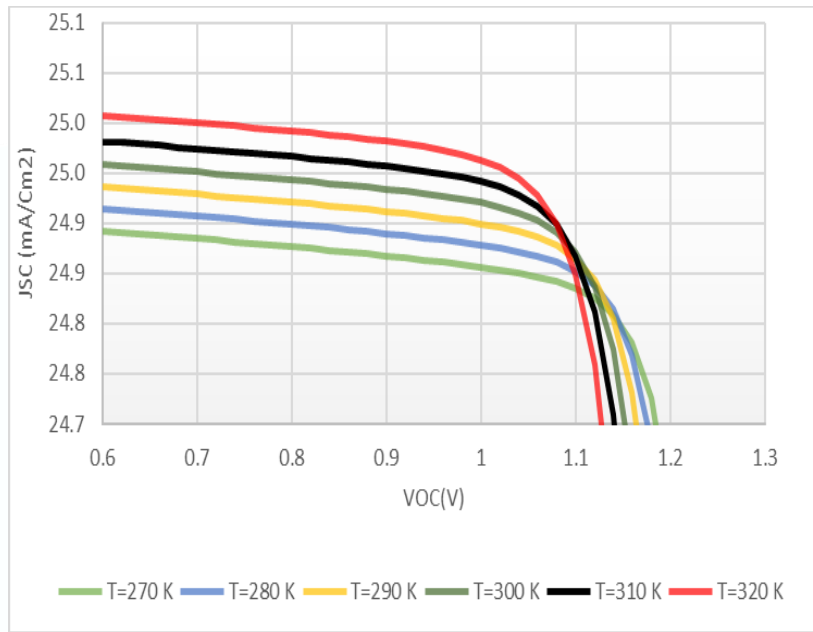
النتائج والمناقشة:

Discussion

من ملاحظة الشكل (3) يتبين تأثير تغير درجة الحرارة على منحنى الخواص الجهد-تيار (-) V للخلية الشمسية البيروفسكايت حيث يلاحظ انخفاض في فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) مع زيادة درجة الحرارة ويرجع ذلك إلى الزيادة في إعادة التركيب للإلكترونات والفجوات (Solanki, 2013). كذلك التقصص في فجوة النطاق بسبب التمدد الحاصل في للشبكة البلورية (Wright et al.,)

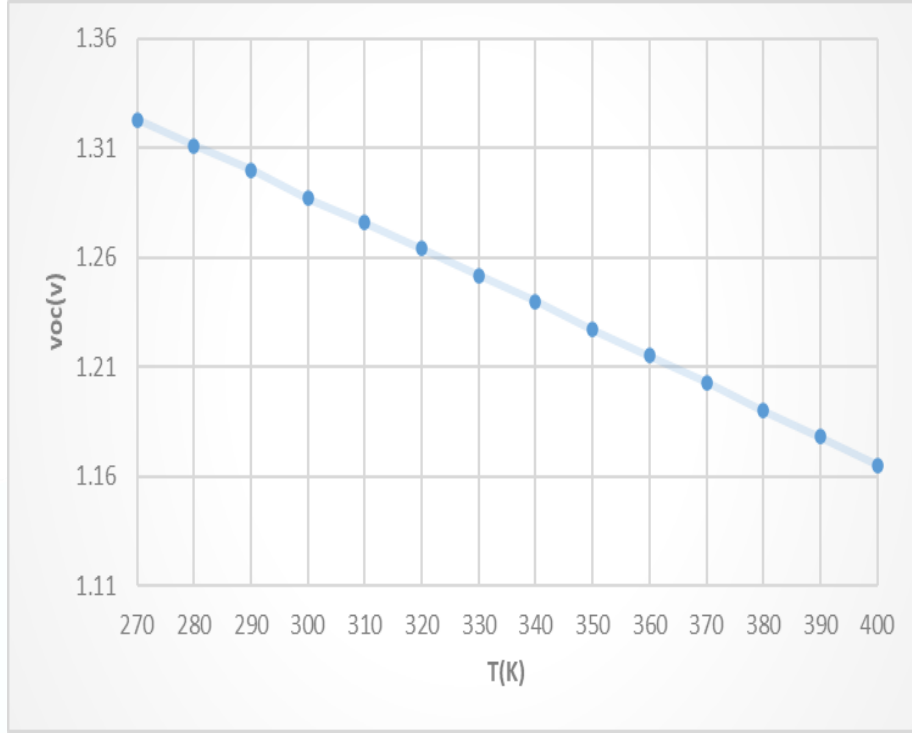


(2018). يلاحظ أيضاً زيادة بسيطة في تيار القطع (J_0) وذلك بسبب زيادة امتصاص الفوتونات نتيجة تقلص فجوة الطاقة (Yang et al., 2019). وتحسن نقل الشحنات بسبب زيادة التوصيلية الإلكترونية والأيونية (Juarez–Perez et al., 2019).



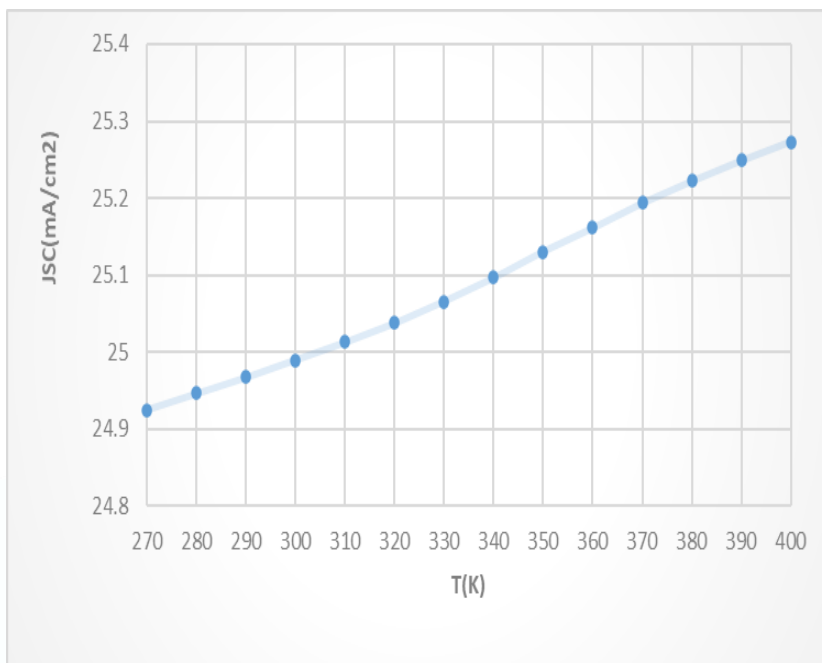
الشكل (3): تأثير درجة الحرارة على خواص منحنى ($I-V$)

من خلال الشكل (4) يمكن الملاحظة ان انخفاض قيمة V_{OC} مع ارتفاع درجة الحرارة وذلك بسبب زيادة تيار التشبع العكسي (I_0) وحسب العلاقة رقم (9). وكذلك انخفاض قيمة فجوة الطاقة مع ارتفاع درجة الحرارة يؤدي الى انخفاض فولتية الدائرة المفتوحة. (Wright et al., 2017).



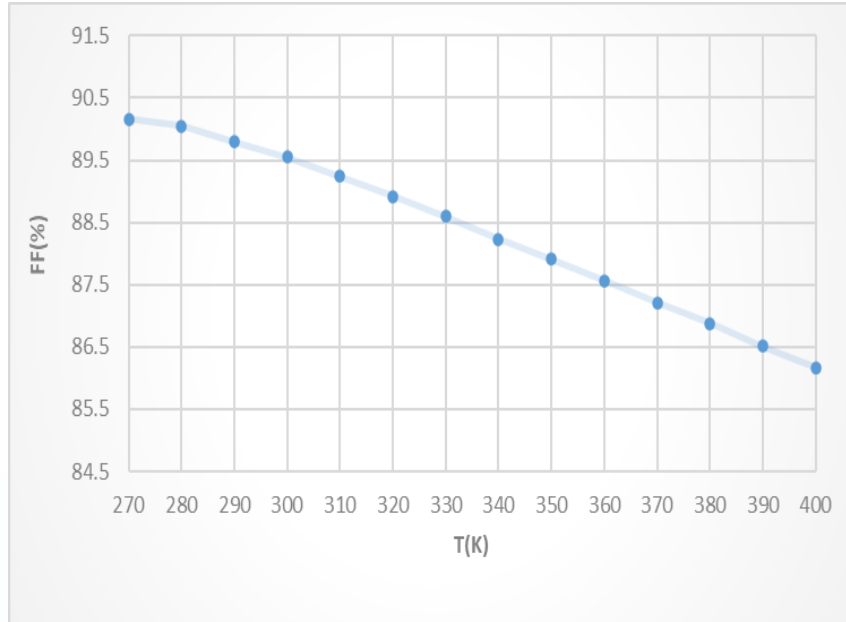
الشكل (4): تأثير تغيير درجة الحرارة على V_{oc}

من ملاحظة الشكل (5) فان زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة طفيفة في تيار دائرة القصر ويعود ذلك الى تقليل الفجوة الطاقة بسبب زيادة امتصاص الفوتونات ذات الطول الموجي الطويل وبالتالي زيادة تيار دائرة القصر القصر (Wright et al., 2017) ايضاً زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة نقل الشحنات بسبب نقص المقاومة الأيونية والإلكترونية (Juarez-Perez et al., 2016).



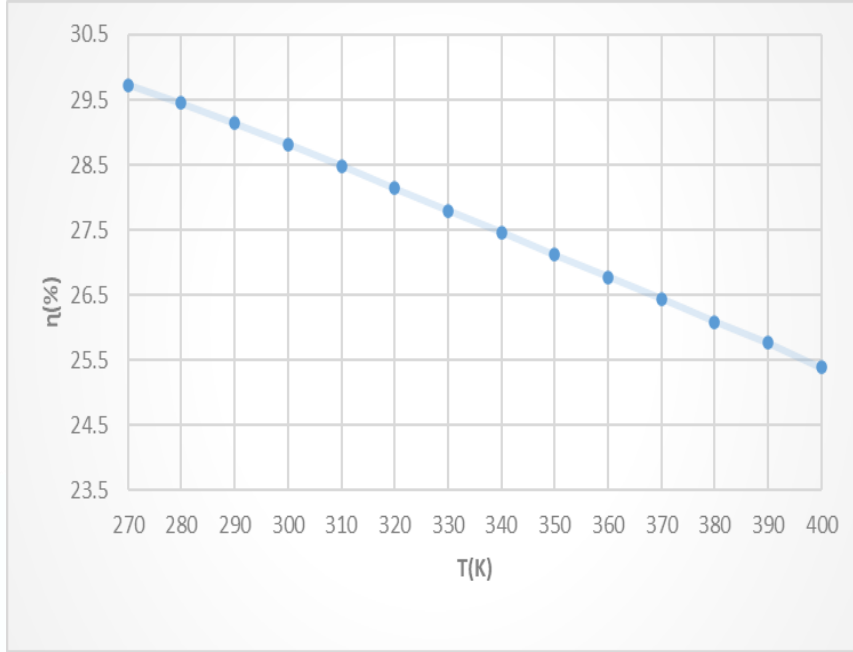
الشكل (5): تأثير تغيير درجة الحرارة على J_{sc}

من خلال ملاحظة الشكل (6) يمكن ملاحظة انخفاض عامل المليء مع زيادة درجة الحرارة وذلك بسبب زيادة مقاومة التوالي (R_s) الناتجة عن تدهور طبقات نقل الإلكترونات والفجوات (HTL/ETL) والتلامسات المعدنية (مثل الفضة أو الذهب) (Leijtens et al., 2019). وانخفاض مقاومة التوالي (R_{ss}) بسبب هجرة الأيونات (Stranks et al., 2019).



الشكل (6): تأثير تغيير درجة الحرارة على عامل المليء

بعد دراسة تأثير زيادة درجة الحرارة على مخرجات الخلية الشمسية البيروفسكايت لابد من دراسة تأثير زيادة درجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية والتي تعد من اهم خواص الخلية الشمسية ,من ملاحظة الشكل(7) يتبين أن ارتفاع درجة الحرارة له تأثير سلبي على كفاءة الخلية ، ويعود السبب الى أن ارتفاع درجة الحرارة يعمل على تقلص فجوة الطاقة والذي يؤدي الى خفض فولتية الدائرة المفتوحة (VOC) وبالتالي انخفاض كفاءة الخلية (Wright et al., 2018). كذلك زيادة درجة الحرارة تعمل على نقصان عامل المليء كما مر سابقاً وحسب العلاقة(4) فان نقصان فولتية الدائرة المفتوحة (VOC) ونقصان عامل المليء(FF) يؤدي الى نقصان كفاءة الخلية الشمسية. بالإضافة الى التغير الحاصل التركيب البلوري للبيروفسكايت وتغير الطور مع تغير درجة الحرارة واكسدة طبقات نقل الالكترونات والفجوات أدى الى انخفاض كفاءة الخلية مع زيادة درجة الحرارة (Aristidou et al., 2017).



الشكل (7): تأثير تغيير درجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية

الاستنتاج:

Conclusions:

بعد دراسة تأثير زيادة درجة الحرارة على الخلية الشمسية البيروفسكايت ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$) نلاحظ انخفاض فولتية الدائرة المفتوحة (VOC) مع زيادة درجة الحرارة وذلك لأن ارتفاع درجة الحرارة يعمل على خفض فجوة الطاقة كذلك وزيادة تيار الاشباع العكسي (I_0) الناتج من حاملات الأقلية. ايضاً عند زيادة درجة الحرارة تبين انه ينخفض عامل المليء (FF) بسبب زيادة مقاومة التوالي وتبين من خلال هذا البحث أن ارتفاع درجة الحرارة يعمل على نقصان كفاءة الخلية الشمسية.



References: المصادر

1. Aristidou, N., Eames, C., Sanchez-Molina, I., Bu, X., Kosco, J., Islam, M. S., & Haque, S. A. (2017). Thermal decomposition of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ perovskites. *Angewandte Chemie*, 56, 7757–7761.
2. Burgelman, M., Nollet, P., & Degraeve, S. (2004). Modeling thin-film PV devices. *Progress in Photovoltaics*, 12, 143–153.
3. Chen, Y., Zhang, L., Zhang, Y., Gao, H., Yan, H., & Yang, S. (2018). Large-area perovskite solar cells: A review of recent progress and issues. *RSC Advances*, 8(19), 10489–10508. <https://doi.org/10.1039/C8RA00384J>
4. Ganvir, R. (2016). Modelling of the nanowire CdS-CdTe device design for enhanced quantum efficiency in window-absorber type solar cells.
5. Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. Y. (2023). Solar cell efficiency tables (version 61). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(1), 3–16.
6. Juarez-Perez, E. J., Sanchez, R. S., Badia, L., Garcia-Belmonte, G., Kang, Y. S., Mora-Sero, I., & Bisquert, J. (2016). Thermally activated ion transport in perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 9, 3406–3413.
7. Juarez-Perez, E. J., Wußler, M., Fabregat-Santiago, F., & Bisquert, J. (2019). Ion migration effects on charge transport in perovskites. *Joule*, 3, 1965–1982.
8. Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., & Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17), 6050–6051.
9. Kumar, R., Singh, M., & Bhatnagar, P. (2021). Comparative analysis of thermal stability in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($X = \text{Cl}, \text{I}$) perovskites: A SCAPS-1D simulation study. *Renewable Energy*, 167, 713–722.
10. Lee, S., & Kim, K. (2020). Numerical investigation of temperature effects on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ perovskite solar cells using SCAPS-1D. *Solar Energy*, 211, 345–356.
11. Leijtens, T., Eperon, G. E., Noel, N. K., Habisreutinger, S. N., Petrozza, A., & Snaith, H. J. (2019). Thermal degradation of charge transport layers in perovskites. *Joule*, 3, 2673–2687.
12. Leijtens, T., Saliba, M., Bush, K. A., Prasanna, R., Beal, R. E., Bowring, A. R., ... & McGehee, M. D. (2023). Overcoming temperature-induced degradation in perovskite solar cells. *Science*, 380(6640), 44–49.



13. Niu, G., Guo, X., & Wang, L. (2022). Review of thermal stability of metal halide perovskites. *Journal of Physics: Energy*, 4(2), 022001.
14. NREL Team. (2023). High-throughput screening of thermally stable perovskite compositions. *Advanced Energy Materials*, 13(8), 2203456.
15. Solanki, C. S. (2013). *Solar photovoltaic fundamentals, technologies and applications* (2nd ed.). PHI Learning Private Limited.
16. Stranks, S. D., Wood, S. M., Atourki, L., Ritchie, J. F., Wang, Z., & Haque, S. A. (2019). Shunt pathways in thermally stressed perovskite solar cells. *Nature Energy*, 4, 201–210.
17. Tress, W., Marinova, N., Moehl, T., Zakeeruddin, S. M., Nazeeruddin, M. K., & Grätzel, M. (2015). Understanding the rate-dependent J–V hysteresis in perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 8, 995–1004.
18. Vorpahl, S. M., Nie, W., Reese, M. O., Berry, J. J., & Luther, J. M. (2021). Phase transitions in perovskite solar cells. *Nature Materials*, 20(8), 1077–1084.
19. Wright, A. D., Milot, R. L., Eperon, G. E., Plochocka, P., & Snaith, H. J. (2017). Temperature-dependent bandgap in perovskite semiconductors. *Nature Communications*, 8, 15152.
20. Wright, A. D., Johnston, M. B., Herz, L. M., & Snaith, H. J. (2018). Bandgap narrowing in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ under thermal stress. *Physical Review Letters*, 120(15), 156401.
21. Yang, M., Zhou, Y., & Zhu, K. (2019). Temperature-dependent J_{sc} in perovskite solar cells. *Nano Energy*, 58, 536–543.
22. Yang, W. S., Park, B. W., Jung, E. H., Jeon, N. J., Kim, Y. C., Lee, D. U., ... & Seok, S. I. (2017). High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange. *Science*, 356(6345), 1376–1379.
23. Zhang, Y., Wang, H., & Wei, L. (2018). Thermal degradation mechanisms in $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ perovskite solar cells: A comprehensive analysis. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(23), 10842–10851.
24. Xiao, A., et al. (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>

JOBS



مجلة العلوم الأساسية
Journal of Basic Science



Print -ISSN 2306-5249

Online-ISSN 2791-3279

العدد الثامن والثلاثون

٢٠٢٦ م / ١٤٤٧ هـ



مجلة العلوم الأساسية
للعلوم التربوية والنفسية وطرائق التدريس للعلوم الأساسية