



دراسة أداء الخلية الشمسية (CdTe/Zn₂SnO₄) بوجود الطبقة العازلة CdS:O باستخدام برنامج المحاكاة SCAPS-1D

عوض خضير محمود

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

wwd1876@gmail.com

رداد سالم محمود

وزارة التربية / المديرية العامة للتربية في محافظة نينوى

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

الخلاصة

تم استخدام برنامج المحاكاة SCAPS-1D وهو برنامج لمحاكاة سعة الخلية الشمسية احادي البعد تم تصميمه في قسم الالكترونيات ونظم المعلومات التابع لجامعة Gent في بلجيكا، استعمل لمحاكاة الخلية الشمسية المعتمدة في بحثنا هذا. وكانت نقطة انطلاق البحث بالاعتماد على تصميم الخلية الشمسية {CdTe/CdS:O/Zn₂SnO₄}، وكان سمك طبقة الامتصاص (Absorber layer) المصنوعة من مادة الكاديوم تيلورايد P-CdTe مقدارها (0.5m μ) وسمك الطبقة النافذة (Window layer) المصنوعة من مادة ستانيت الزنك n-Zn₂SnO₄ مقدارها (0.05m μ). وتم ادخال بين هاتين الطبقتين طبقة عازلة (Buffer Layer) من مادة كبريتيد الكاديوم المؤكسد n-CdS:O وسمك مقدارها (0.25.μ 0m) الغرض من اضافة هذه الطبقة بانها تمنع عملية الاتصال الامامي او التسريب الامامي لحاملات الاقلية (الفجوات) وهذا التسريب غير مرغوب فيه بسبب تكون طبقة عازلة ونشطة كيميائياً بجميع درجات حرارة التشغيل التي يتراوح مداها بين (270K-330K) وتم الحصول على اعلى كفاءة تحويل (η = 18.82%)، مع معلومات الخلية الشمسية الاخرى مثل { جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc}=0.863V)، وتيار الدائرة القصيرة (J_{sc}=25.63 mA/cm²)، وعامل الملئ (FF=85.06 %) }

الكلمات الدالة: الخلية الشمسية (CdTe/CdS:O/Zn₂SnO₄)، برنامج المحاكاة SCAPS-1D.

Performance Study of a CdTe/Zn₂SnO₄ Solar Cell with a CdS:O Insulating Layer Using SCAPS-1D Simulation Software

Awad Khudair Mahmoud

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

*Corresponding Author E-mail: wwd1876@gmail.com

Raddad Salem Mahmoud

Ministry of Education / Directorate General of Education in Nineveh Governorate

*Corresponding Author E-mail: Raddad.20esp33@student.uomosul.edu.iq

ABSTRACT

The simulation program SCAPS-1D, which is a one-dimensional solar cell capacity simulation program designed in the Department of Electronics and Information Systems at the University of Gent in Belgium, was used to simulate the solar cell adopted in this research. The starting point for the research was based on the design of the solar cell (CdTe/CdS:O/Zn₂SnO₄). The Thickness of the



absorption layer, made of cadmium telluride (P-CdTe), was (0.5 μm), and the thickness of the window layer, made of zinc stannite n-Zn₂SnO₄, was (0.05 μm). An insulating layer (buffer layer) of oxidized cadmium sulfide (n-CdS:O) with a thickness of (0.25 μm). Was inserted between these two layers. The purpose of adding this layer is that it prevents the process of forward contact or forward leakage of minority carriers (gaps), and this leakage is undesirable. It is due to the formation of an insulating layer that is chemically active at all operating temperatures ranging between (270K-330K). The highest conversion efficiency was obtained ($\eta = 18.82 \%$), with other solar cell information such as open circuit voltage ($V_{oc} = 0.863 \text{ v}$), short circuit current ($J_{sc} = 25.63 \text{ mA/cm}^2$), and fill factor ($FF = 85.06 \%$).

Keywords: Solar cell (CdTe/CdS:O/Zn₂SnO₄), simulation program. SCAPS-1D

المقدمة Introduction

الخلايا الشمسية هي بنائاً ضوئية عملها تحويل الأشعة الكهرومغناطيسية مثل (الضوء المرئي_ الأشعة تحت الحمراء_ الأشعة فوق البنفسجية) الصادرة من الشمس الى طاقة كهربائية يمكن الاستفادة منها [1]. ان اشباه الموصلات الثنائية لا تزال موضع الاهتمام للباحثين لامتلاك معظمها فجوات طاقة مباشرة تمتد من المنطقة فوق البنفسجية الى المنطقة تحت الحمراء. ان اغشية الكاديوم تيلورايد CdTe عبارة عن مواد شبه موصلة ثنائية متعددة التبلور وهي تنتمي للجدول الدوري (II-VI) وتركيبها البلوري هو من النوع المكعب Zine blende او يكون من نوع Quartzite [2]. يستفاد من الخلايا الشمسية في التطبيقات الارضية والفضائية فتستخدم هذه الخلايا لتجهيز القدرة الكهربائية للتوابع الارضية لفترات طويلة وهي تُعد الان لتصبح بديلاً محتملاً لمصادر الطاقة الكهربائية الارضية لاستطاعتها تحويل الطاقة الشمسية مباشرة الى طاقة كهربائية بكفاءة تحويل جيدة وتجهيز قدرة بصورة دائمة تقريباً بكلفة تشغيل واطئة كما انها لا تسبب تلوث [3]. تعد الخلايا الشمسية المعتمدة على الكاديوم تيلورايد (CdTe) افضل المرشحات لصناعة الخلايا الكهروضوئية لقلّة التكلفة وجودة الاداء، ولها فجوة طاقة شبه مثالية بحدود 1.45 eV لان اغلب الطيف المرئي يُمتص عند $E=1.5 \text{ eV}$ وكذلك يكون الامتصاص البصري لهذه الاغشية (X) عالٍ جداً بحدود اكثر من 10^4 cm^{-1} لذلك يكون امتصاص الضوء الساقط على هذه الخلية تقريباً 100% عندما يكون سمك الغشاء للمادة بحدود 2 m و 90% عندما يكون سمك الغشاء بحدود 1 m [4]. ومع المخاوف التي تدور حول سمية عنصر الاكاديوم لكن وفقاً لدراسة حديثة اثبتت انه ما دامت كمية الكاديوم المستخدم في الخلايا الشمسية قليلة جداً ويكون مغطى بالزجاج بصورة كاملة فان تأثيره البيئي يكاد لا يذكر [5]. المقصود بالتأثير الكهروضوئي هو عملية توليد فرق جهد كهربائي عند مفرق مادتين مختلفتين نتيجة لسقوط الضوء عليه، لذلك فان الخلية الشمسية عبارة عن نببطة ذات طرفين وفي الظلام تعمل كدايود مقوم وتولد جهداً كهربائياً عند اضائتها بشعاع الشمس ولذا تظهر لنا منحنيات التيار_ جهد (I-V) عندما تكون طاقة الفوتون الساقط من الشمس الى طبقة الامتصاص في الخلية كافية لفصل الالكترونات عن الفجوات ومن الممكن ان تكون طاقة الفوتون بقدر يمكنها من نقل الالكترونات من منطقة التكافؤ الى منطقة التوصيل في الشريحة السالبة n-Type، وتنقل الفجوات الى منطقة التوصيل بالشريحة الموجبة p-Type، لينتج عن ذلك فرق جهد بين p-n. ويمكننا بعد ربط السطحين بواسطة موصل كهربائي الحصول على تيار كهربائي حيث تنتقل الالكترونات من n-Type الى p-Type خلال الدائرة الكهربائية وبذلك تتحول الطاقة الضوئية الى طاقة كهربائية [6]. لذا يعتمد عمل خلايا التأثير الكهروضوئي على عدد من الخطوات الرئيسية من اهمها.



- 1- نفاذ الفوتونات الساقطة الى القسم النشط من الخلية الشمسية.
- 2- امتصاص الفوتونات وتوليد الأزواج (الالكترونون فجوة).
- 3- الخروج الانتقائي للأزواج الى جهات الاتصال (2 على الأقل).
- 4- توجيه الأزواج المتولدة الى الحمل الخارجي.

المواد وطرق البحث

يعتبر برنامج SCAPS-1D (Solarcell Capacitans Simulator) واحد من برامج محاكاة الخلايا الشمسية احادية البعد الذي صمم في جامعة كينت (Gent) في بلجيكا، حيث يحتوي على نماذج عددية التي تساهم بشكل فعال في تصميم انواع الخلايا الشمسية، ويتم الحصول على الحلول والنمذجة العددية عن طريق تقديم فرضيات علمية تستخدم في التحليل العددي، وتستخدم هذه الحلول للحصول على التفاصيل العملية لاداء الخلايا الشمسية وبشكل نظري، ويمكن من خلال هذا المحاكى دراسة عمل واداء الخلايا الشمسية المكونة من سبع طبقات كحد اقصى تحت ظروف يتم تحديدها من قبل الباحث [7].

برنامج سكايس يعمل على حل معادلات اشباه الموصلات احادية البعد مثل معادلة الاستمرارية Continuity Equation ومعادلة بويسون Boisson's Equation وكثافة حاملات الشحنة (الالكترونونات والفجوات) اذ تحوي هذه المعادلة على معادلة الانجراف الذي يسببها المجال الكهربائي ومعادلة الانتشار التي يسببها الاختلاف في تراكيز حاملات الشحنة واعادة التركيب، وتكون هذه المعادلات على هذا النحو:

a- معادلة بويسون: Boisson's Equation تربط هذه المعادلة بين معادلة كثافة الشحنات Charge Dencity Equation مع جهد الالكترونونات Electrical Potential (الجهد الكهروستاتيكي) وهذه المعادلة تعتبر بداية الحصول على حل نوعي للمتغيرات في الكهربائية الساكنة في اشباه الموصلات.

$$\frac{d}{dx} \left(-\epsilon(X) \frac{d\theta}{dX} \right) = q [p(X) - n(X) + N_D^+(X) - N_D^-(X) + p_1(X) - n_1(X)] \dots \dots (1)$$

حيث أن n: كثافة الالكترونونات الحرة، p: كثافة الفجوات الحرة.

ϵ : ثابت العزل الكهربائي للوسط، $N_D^+(X)$: كثافة المانحات المتأينة.

$N_D^-(X)$: كثافة القابلات المتأينة، $n_t(X)$: كثافة الالكترونونات المقيدة.

$p_t(X)$: كثافة الفجوات المقيدة.

حيث يستطيع هذا البرنامج ان يحدد المتغيرات غير المعروفة عن محاكاة الخلية الشمسية مثل تركيز حاملات الشحنة n,p وكذلك الجهد الكهربائي Φ [8].

b- معادلات نقل الحاملات: Carrier Transport Equations تتحرك ناقلات الشحنة (الالكترونونات والفجوات) في شبه الموصل بسبب تأثير قوى المجالات الكهربائية والمغناطيسية فيحدث الانتشار Diffusion بسبب الفرق في تركيز حاملات الشحنة اما عند تسليط مجال كهربائي على شبه موصل فان الشحنات سوف تتحرك بسبب هذا المجال وتسمى هذه الحركة الانجراف Drift حيث ان الشحنات الموجبة تتحرك باتجاه معين والشحنات السالبة تتحرك باتجاه معاكس وعليه فان كثافة التيار الناتج من عملية الانتشار سيتمثل بالمعادلات الاتية [9].

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



حيث ان J_{ndiff} و J_{pdiff} : كثافة تيار الإنتشار للإلكترونات والفجوات على التوالي

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

حيث أن D : ثابت معامل الإنتشار. q : الشحنة الكهربائية. μ_p, μ_n : تحركية الإلكترونات والفجوات على التوالي. E : المجال الكهربائي المسلط.

ويمكن التعبير عن كثافة التيار الناتج من عملية الانجراف بالعلاقة التالية :

$$J_{drif} = J_{ndrif} + J_{pdrif} \dots \dots \dots (4)$$

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

فتكون كثافة التيار الكلي J_n (لالإلكترونات) ناتج من مركبتين الإنتشار والانجراف:

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

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

ومعادلة إنيشتاين للعلاقة بين التحركية والإنتشار :

$$D_e = \left[\frac{kT}{q} \right] \mu_e \dots \dots \dots (8)$$

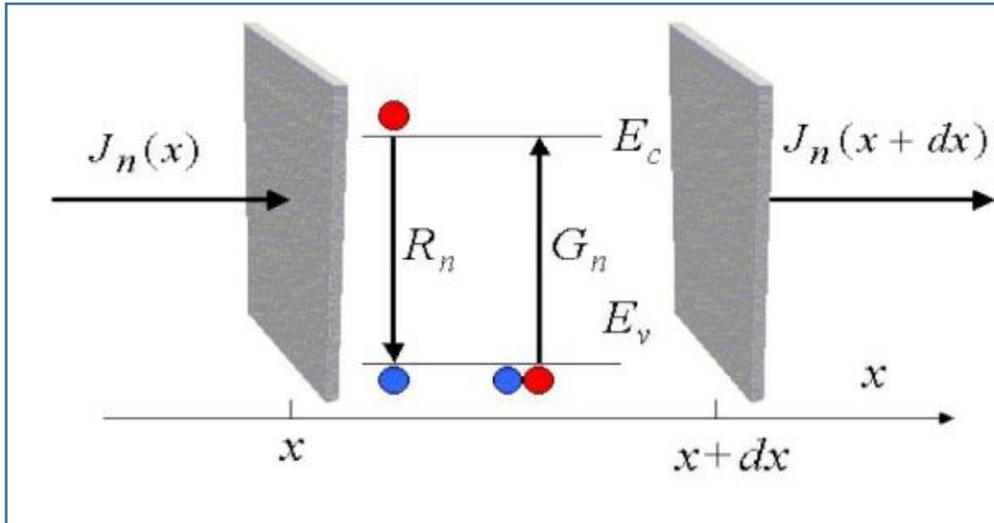
وبالمثل تكون كثافة التيار الكلي (للفجوات) J_p

$$J_p = qp\mu_p E + qD_p \frac{dp}{dx} \dots \dots \dots (9)$$

وتكون كثافة التيار الكلي ناتج من جميع المعادلتين (2-13) و (2-15)

$$J_{tot} = J_n + J_p \dots \dots \dots (10)$$

c- معادلة الاستمرارية Continuity Equation: هذه المعادلة تصف كل من الانجرافية والانتشارية واعداد الالتحام خلال مراكز الالتحام ذات المستويات الوسطية في وقت واحد [10].
ان معادلة الاستمرارية تنطبق على كل من الإلكترونات والفجوات على حد سواء ويمكن ان نكتب معادلة الاستمرارية في تدفق التيار في بعد احادي باتجاه X-direction لمقطع عرضي لشبه موصل مساحته A وطوله dx ، اذ ان $J_n(dx)$ تمثل كثافة الإلكترونات الداخلة الى المقطع وان $J_n(x+dx)$ تمثل كثافة الإلكترونات الخارجة من المقطع العرضي لشبه الموصل، وتمثل (U_n, G_n) معدل عمليتي التوليد واعداد الاتحاد على التوالي كما موضح في الشكل (1).



الشكل (1): سريان التيار وعمليات التوليد والإتحاد في شريحة رقيقة من شبه الموصل [7].

حيث يتم اعطاء عدد الإلكترونات الحرة في الحجم كدالة للوقت اي ان معدل (تدفق_ هروب) الشحنات زائد معدل التوليد مع اعادة الاتحاد للشحنات عند ذلك الحجم: فإن المعدل الكلي لتغيير عدد الإلكترونات في الشريحة هو

$$\frac{dn}{dt} Adx = \left[\frac{J_n(x)A}{-q} - \frac{J_n(x+dx)A}{-q} \right] + (G_n + R_n)Adx \dots \dots \dots (11)$$

حيث أن A: تمثل مساحة المقطع العرضي للشريحة. Adx: حجم الشريحة. وبفك معادلة التيار عند الشريحة على شكل متوالية تايلور، ستكون معادلة الاستمرارية للإلكترونات بالشكل الآتي:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \frac{dn}{dx} + (G_n + R_n) \dots \dots \dots (12)$$

وبنفس الطريقة يمكن اشتقاق معادلة الاستمرارية للفجوات وتكون بالشكل التالي [7].

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \frac{dp}{dx} + (G_p - R_p) \dots \dots \dots (13)$$

معلومات الخلايا الشمسية Solar Cell parameters

يمكن التمييز بين الخلايا الشمسية و مقارنتها أدائها مع بعضها البعض من خلال دراسة معالمات الخلية الشمسية والمتمثلة بأربعة معالمات هي.

- فولتية الدائرة المفتوحة V_{oc} .Open Circuit Voltage
- Short Circuit Current J_{sc} .
- وكفاءة الخلية الشمسية (η) .Efficiency

وتيار دائرة القصر وعامل الملي (FF) Fill Factor

ويمكن حساب التيار المار عبر الخلية الشمسية من المعادلة:



$$I = I_o \left(\exp \frac{qv}{kT} - 1 \right) \dots \dots \dots (14)$$

حيث I تمثل تيار الحمل.
 I_o يمثل تيار التشبع العكسي.
 T تمثل درجة الحرارة.
 k يمثل ثابت بولتزمان.

ويمكننا حساب فولتية الدائرة المفتوحة من المعادلة:

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_o} + 1 \right) \dots \dots \dots (15)$$

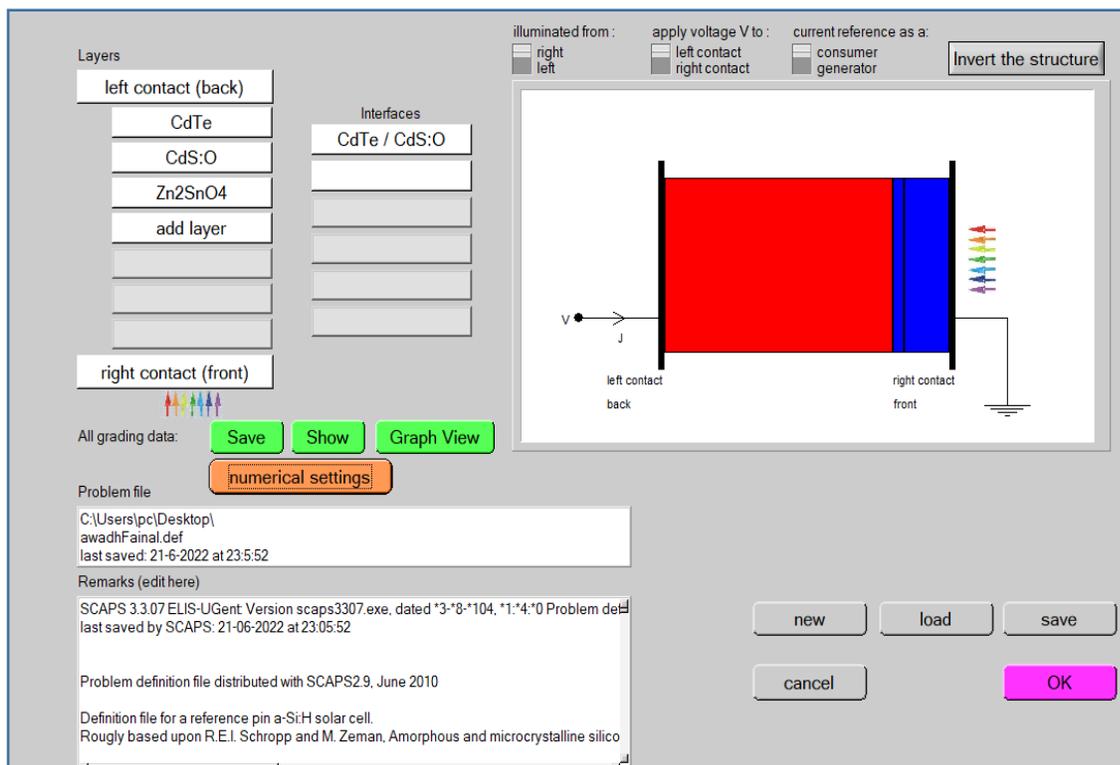
يمكن تعريف عامل الملئ بأنه تربيع المنحني (I-V) ومقداره مرتبط بشكل رئيسي في خسارة المقاومة للخلية الشمسية [10]. ويمكن حسابه من المعادلة الآتية:

$$FF = \frac{V_{mp} \times J_{mp}}{V_{oc} J_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} J_{sc}} \dots \dots \dots (16)$$

أما كفاءة الخلية الشمسية تحسب أيضا من العلاقة:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (17)$$

في هذه الدراسة تم العمل على خلية الكاديوميوم تولورايد الموضحة بالشكل (2)



الشكل (2): واجهة برنامج SCAPS (1D) للخلية المستخدمة في البحث.



باستخدام المعلمات المذكورة في الجدولين (1) و (2) معلمات الطبقة الشمسية [14-15-16].
الجدول (1) المعلمات الأساسية لطبقات الخلية الشمسية

Properties	p-CdTe	n-CdS:O	n-Zn ₂ SNO ₄
Thickness (μm)	0.5	0.025	5 x 10 ⁻²
Band gap (eV)	1.45	2.8	3.35
electron affinity (eV)	4.28	4.5	4.5
Dielectric permittivity(relative)	9.8	1	9
CB effective density of states (1/cm ³)	7.5x10 ¹⁷	2.2x10 ¹⁸	2.2 x 10 ¹⁸
VB effective density of states (1/cm ³)	1.8x10 ¹⁹	1.8x10 ¹⁹	1.8 x 10 ¹⁹
electron thermal velocity (cm/s)	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷
hole thermal velocity (cm/s)	1x10 ⁷	1x10 ⁷	1x10 ⁷
electron mobility (cm ² /Vs)	500	100	32
hole mobility (cm ² /Vs)	60	25	3
shallow uniform donor density ND (1/cm ³)	0	1x10 ¹⁷	1x10 ¹⁹
shallow uniform acceptor density NA (1/cm ³)	1x10 ¹⁵	0	0
Defect type	Acceptor	Donor	Donor

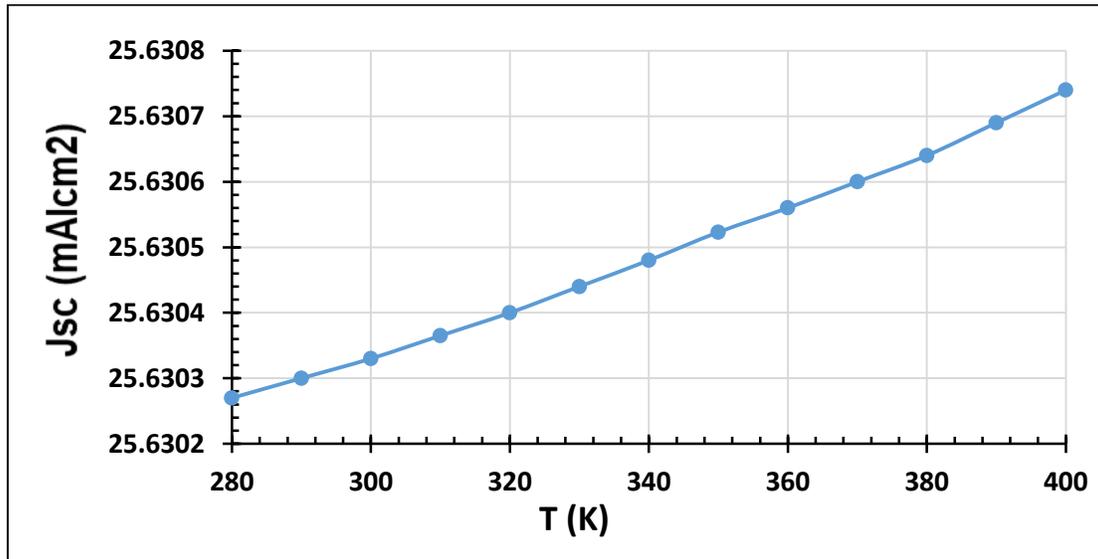
الجدول (2) معلمات السطح البيئي لمحاكاة الخلية الشمسية

Parameters	n-CdS/p-CdTe
Defect type	Neutral
Capture Cross Section Electrons (cm ²)	1 × 10 ⁻¹⁵
Capture Cross Section Hole (cm ²)	1 × 10 ⁻¹⁵
Nt (1/cm ²)	1 × 10 ⁺⁸

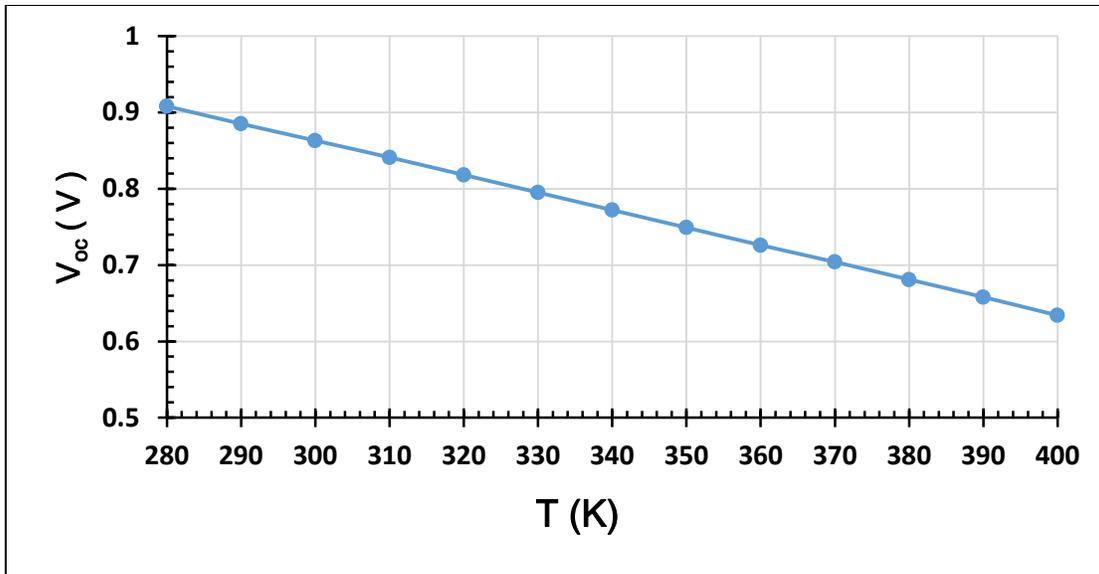
تأثير درجة الحرارة على خواص المنحني (I-V) .
لغرض دراسة تأثير ارتفاع درجة الحرارة على الخواص الكهربائية للخلية الشمسية قمنا بتغيير درجة الحرارة من (280-400)K وبزيادة مقدارها 10K عند كل قياس مع تثبيت بقية معلمات الخلية الشمسية الموجودة في الجدولين (1) و (2) وتبين أن ارتفاع درجات الحرارة تؤثر سلباً على خواص الخلية الشمسية



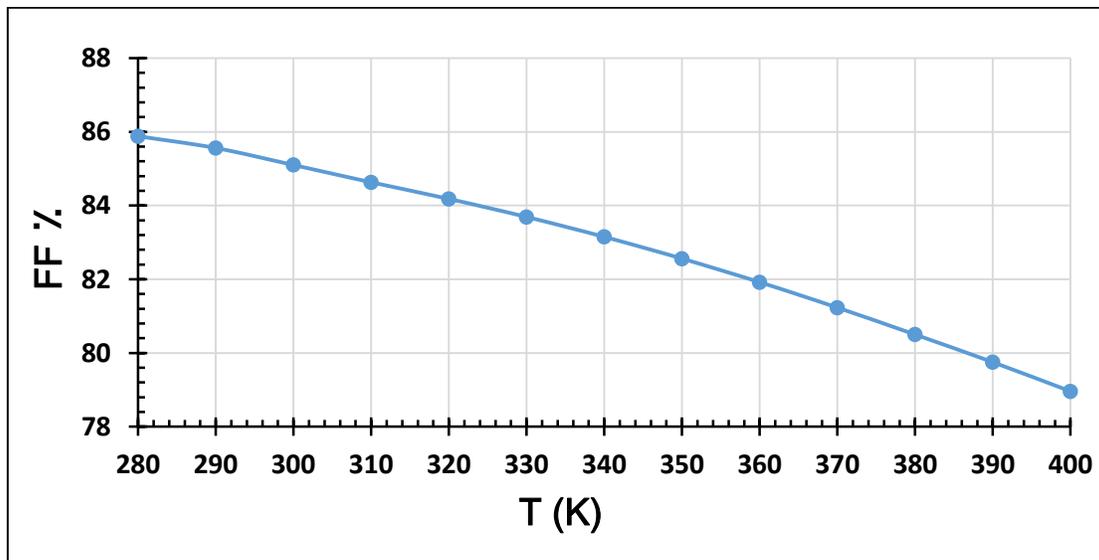
الكهربائية وذلك بسبب ازدياد حاملات الشحنة الاقلية بسبب تكون ازواج (الكترن- فجوة) الناتجة من انتقال الكترن من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل مخلفاً فجوة في مكانه بسبب امتلاكه طاقة من ارتفاع درجة الحرارة [17]. وكذلك هناك نتائج سلبية لارتفاع درجة الحرارة وهو زيادة تيار التسرب او تيار التشبع (Is) والناتج من حركة حاملات الاقلية ويقلل من جهد الحاجز بسبب ارتفاع تيار التسرب ونقصان قيمة الفجوة المحظورة [18]. وكلما قلت قيمة الفجوة المحظورة ازدادت قيمة كثافة التيار وكما موضح في الشكل (3). بسبب ان كثير من الفوتونات سوف تمتلك طاقة كافية لتوليد (الكترن - فجوة) عندما تكون طاقة الفجوة اقل من طاقة الفوتونات مما يسبب ازدياد في حاملات الشحنة الاقلية مما يؤثر سلبياً على الخصائص الكهربائية للخلية [19]. كذلك عند ارتفاع درجة الحرارة نلاحظ انخفاض قيمة فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) بسبب ان ارتفاع درجة الحرارة يخفض فجوة الطاقة المحظورة فيزداد تيار التشبع الحراري [17]. كما موضح في الشكل (4). وكذلك عند ارتفاع درجة الحرارة ينخفض عامل المليء (FF) كما موضح في الشكل (5). والسبب في ذلك الى ارتفاع تيار الانتشار على حساب كثافة حاملات ونقصان فولتية الدائرة المفتوحة فتزداد عملية اتحاد السطح البيئي فيقل خرج الخلية الشمسية [20]. وينخفض بذلك عامل المليء (FF). وسبب ذلك هو زيادة امتصاص الضوء الساقط نتيجة النقص الحاصل في فجوة الطاقة المحظورة والناتجة عن الزيادة في درجة الحرارة [19]. بعد دراسة جميع الخواص اعلاه لا بد لنا من قياس كفاءة الخلية الشمسية (η) وتعد كفاءة الخلية اهم الخواص التي يسعى الباحثون لتحسينها لزيادة انتاج الخلية الشمسية وبكفاءة اقل، ولاحظنا ارتفاع درجة الحرارة ذو تأثير عكسي على كفاءة الخلية الشمسية عكس ما هو متوقع [22]. بسبب ارتفاع درجة الحرارة يعمل على زيادة تيار التسرب الحراري (J_{sc}) الذي بدوره يؤدي الى خفض (V_{oc}) وبالتالي تنخفض كفاءة الخلية كما موضح في الشكل (6).



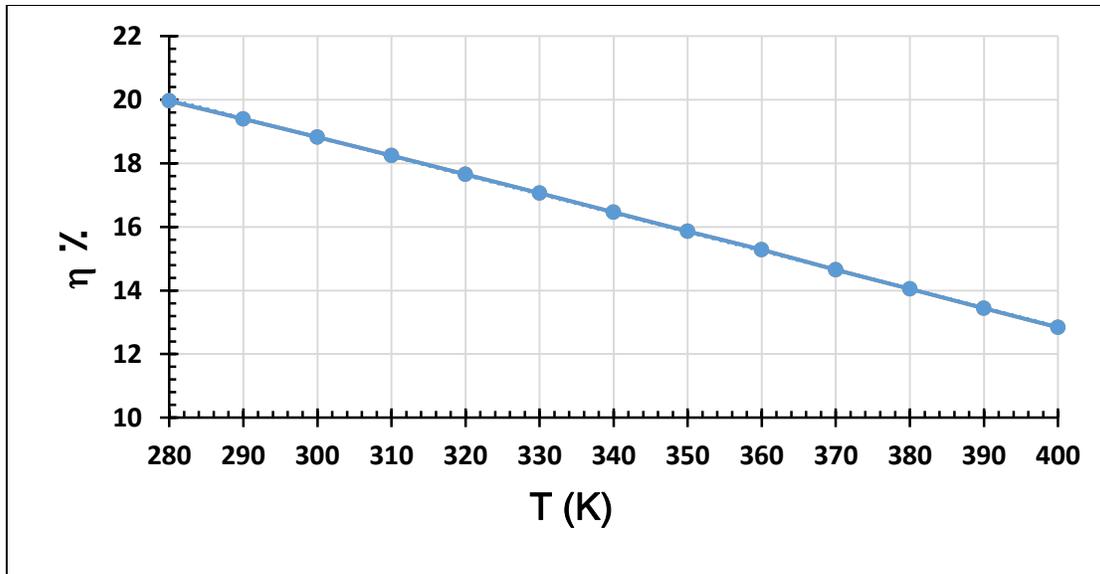
الشكل(3): تأثير تغير درجة الحرارة على تيار دائرة القصر.



الشكل(4): تأثير تغير درجة الحرارة على فولتية الدائرة المفتوحة.

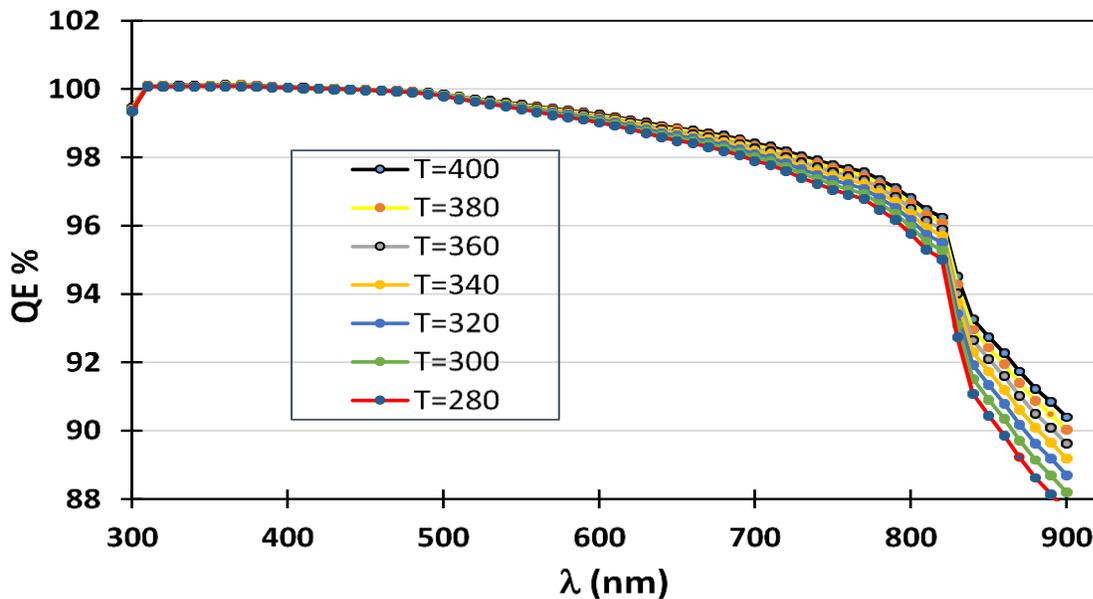


الشكل(5): تأثير تغير درجة الحرارة على عامل المليء.



الشكل (6): تأثير تغير درجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية.

لدراسة تأثير درجة الحرارة على الكفاءة الكمية تم تغيير درجة الحرارة من (280-400)K وبواقع تغيير 20K لكل قراءة ودراسة مدى تأثيرها على الكفاءة الكمية للخلية الشمسية وجد أن تأثير التغيير في درجات الحرارة يكون قليلاً على الكفاءة الكمية وكما مبين في الشكل (7).



الشكل (4-16): تأثير تغيير درجات الحرارة على الكفاءة الكمية للخلية الشمسية.

لان تيار دائرة القصر (J_{sc}) يتاثر بزيادة بشكل طفيف مع ارتفاع درجة الحرارة بينما تنخفض فولتية الدائرة المفتوحة (V_{oc}) مع ارتفاع درجات الحرارة وبذلك سيكون تأثير درجة الحرارة على الكفاءة الكمية (Q.E)



ضعيف جدا ويمكن كتابة العلاقة التي تصف ارتباط الكفاءة الكمية مع التيار الضوئي (β_i) للفوتون الساقط ذي الطول الموجي λ [23].

$$I_{\lambda} = q\beta N\lambda = \frac{q\beta_{\lambda}}{hc} F_{\lambda} \dots\dots\dots(0)$$

$$N\lambda = \frac{n\lambda}{\beta_{\lambda}} \dots\dots\dots(0)$$

حيث:

$n\lambda$: تمثل معدل توليد الأزواج (إلكترون- فجوة) لوحدة المساحة.

$N\lambda$: تمثل عدد الفوتونات الساقطة لوحدة المساحة ولوحدة الأطوال الموجية.

F_{λ} : تمثل الفيض الشمسي ذو الطول الموجي.

الاستنتاج

تم الحصول على أعلى كفاءة للخلية الشمسية باختيار سمك للطبقة الماصة (CdTe) هو ($0.5\mu\text{m}$) وسمك الطبقة النافذة (Zn_2SnO_4) هو ($0.05\mu\text{m}$) وسمك الطبقة العازلة (CdS:O) هو ($0.025\mu\text{m}$) وعند الاعتماد على هذه السمكات بالنسبة لطبقات الخلية تم الحصول على النتائج التالية {أعلى كفاءة تحويل ($\eta=18.82\%$)، جهد الدائرة المفتوحة ($V_{oc}=0.863\text{v}$)، وتيار الدائرة القصيرة (mA/cm^2) ($J_{sc}=25.63$)، وعامل الملئ ($FF=85.06\%$)} عند درجة حرارة 300 K. وكلما ارتفعت درجة الحرارة أنخفضت كفاءة الخلية الشمسية بسبب زيادة عملية إعادة الاتحاد للأزواج الكترون- فجوة المتولدة.

المصادر:

- [1] Chandrasekharan, R. (2012). *Numerical modeling of tin-based absorber devices for cost-effective solar photovoltaics* (Doctoral dissertation, The Pennsylvania State University).
- [2] Hosseini, S. M. (2008). Optical properties of cadmium telluride in zinc-blende and wurzite structure. *Physica B: Condensed Matter*, 403(10-11), 1907-1915.
- [3] Hossain, S., Amin, N., Martin, M. A., Aliyu, M. M., Razykov, T., & Sopian, K. (2011). A NUMERICAL STUDY ON THE PROSPECTS OF HIGH EFFICIENCY ULTRA THIN $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}/\text{CdTe}$ Solar Cell. *Chalcogenide letters*, 8(4).
- [4] Gupta, A., Parikh, V., & Compaan, A. D. (2006). High efficiency ultra- thin sputtered CdTe solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(15), 2263-2271.



[5] Chen, J. translated by Mustafa Mohamed Fouad" Solar Physics. *Hendawy Foundation*.

[6] Al-Jubouri, W. F. (1985). dF Ghalib Hayati," The Electrical and Magnetic Properties of Materials.

[7] رشا فيصل حسن، ""محاكاة تأثير الطبقة العازلة Zn_2SnO_4 على أداء الخلية الشمسية (CdTe/CdS/SnO₂) باستخدام البرنامج SCAPS-1D""، رسالة ماجستير مقدمة الى جامعة الموصل/ كلية التربية للعلوم الصرفة، (2020).

[8] Al-Luhaiby, A. K. (2022). Studying the effect of temperature and resistances of series (Rs) and parallel (Rsh) on the performance of the solar cell (FTO/Zn₂SnO₄/CdS: O/CdTe/Cu₂Te) using the SCAPS-1D program. *Journal of Education and Science*, 31(4), 49-6.

[9] Solanki, C. S. (2015). *Solar photovoltaics: fundamentals, technologies and applications*. Phi learning pvt. Ltd..

[10] Chetan Singh Solanki, (2013), "Solar Photovoltaic Fundamentals, Technologies and Applications", Second Edition, PHI Learning Private Limited, Delhi-110092.

[11] Hossain, S., Amin, N., Martin, M. A., Aliyu, M. M., Razykov, T., & Sopian, K. (2011). A NUMERICAL STUDY ON THE PROSPECTS OF HIGH EFFICIENCY ULTRA THIN Zn x Cd 1-x S/CdTe Solar Cell. *Chalcogenide letters*, 8(4).

[12] Ali, W. B. (2018). Preparation and study of cadmium sulfite (CdS) thin films deposited by the chemical bath method (CBD). *Faculty of Exact Sciences/Department of Physics, University of Martyr Hama Lakhdar, El Oued, People's Democratic Republic of Algeria*.

[13] Rafee Mahbub, M., Islam, S., Anwar, F., Satter, S. S., & Ullah, S. M. (2016). Simulation of CZTS thin film solar cell for different buffer layers for high efficiency performance. *South Asian Journal of Engineering and Technology*, 2(52), 1-10.

[14] Matin, M. A., Tomal, M. U., & Robin, A. M. (2013, May). Copper telluride as a nobel BSF material for high performance ultra-thin CdTe PV cell. In 2013



International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV) (pp. 1-5).
IEEE.

[15] Islam, A., Matin, M. A., Aliyu, M. M., Sulaiman, Y., & Amin, N. (2009, December). A numerical analysis on CdS: O window layer for higher efficiency cdte solar cells. In *2009 1st International Conference on the Developements in Renewable Energy Technology (ICDRET)* (pp. 1-4). IEEE.

[16] Matin, M. A., Tomal, M. U., & Robin, A. M. (2013, May). Copper telluride as a nobel BSF material for high performance ultra-thin CdTe PV cell. In *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)* (pp. 1-5). IEEE.

[17] د. صبحي الراوي، د. شاکر جابر شاکر، د. يوسف مولود حسن، (1990)، "فيزياء الحالة الصلبة"،
جامعة الموصل.

[18] فلاح حسون عريبي، فيصل على البصام، (2010) "تأثير بعض العوامل على القيمة العملية والنظرية
القصى لكفاءة الخلية الشمسية السيلكونية". مجلة جامعة كربلاء، المجلد 8، العدد 2.

[19] Raddad, S. M., & Rassol, R. A. (2022). Studying the Effect of Variable
Temperatures on the Output of a Perovskite Solar Cell
(ZnTe/CH₃NH₃PbI₃/TiO₂/ZnO/FTO) Using SCAPS-1D Software. *International
Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 6(11), 124

[20] Raddad, S. M., & Rassol, R. A. (2022). Studying the Effect of Variable
Temperatures on the Output of a Perovskite Solar Cell
(ZnTe/CH₃NH₃PbI₃/TiO₂/ZnO/FTO) Using SCAPS-1D Software. *International
Research Journal of Innovations in Engineering and Technology*, 6(11), 124.

[21] كرين مارتن، (1999)، "الخلايا الشمسية"، ترجمة د. يوسف مولود حسن، جامعة الموصل.

[22] ACRE Australine, (2000), "CRC for Renewable Energy", Lid, solar cell
principle and application", Vol.06 No.12 (2015), Article ID: 62181, 11 pages

[23] Adnan Alwan Mouhammed, Ayed N. Saleh, (2019), "Simulation Effect of
Ga₂O₃ Layer Thickness on CdTe Solar Cell by SCAPS-1D", Tikrit Journal
of
Pure Science, Vol. 24, No. 6.