

## دراسة تأثير تغيير نوع الطبقات للخلية الشمسية الكالكوپيرايت SCAPS-1D باستخدام برنامج (CIGS/OVC/CdS/i-ZnO)

رعد احمد رسول

عبد المجيد احمد خضر

جامعة الموصل/ كلية التربية للعلوم الصرفة/ قسم الفيزياء

[dr.raadrasool@uomosul.edu.iq](mailto:dr.raadrasool@uomosul.edu.iq)[abdulmajid.23esp15@student.uomosul.edu.iq](mailto:abdulmajid.23esp15@student.uomosul.edu.iq)

q

[mosul.edu.iq](mailto:abdulmajid.23esp15@student.uomosul.edu.iq)

### المستخلص

في هذه الدراسة تم إقتراح الخلية الشمسية الكالكوپيرايت (CIGS/OVC/CdS/i-ZnO) وكانت نتائج المحاكاة للخلية باستخدام برنامج SCAPS-1D بخصائص فولتية - تيار (I-V) هي:  $[V_{oc}=0.5587 \text{ V}, J_{sc}=31.68 \text{ mA/cm}^2, FF=61.40\%, \eta=10.87\%]$  ومن اجل التوصل إلى خلية أكثر وثوقاً وبخصائص فولتية - تيار (I-V) عالية، تم إجراء إختبار انواع مختلفة في كل طبقة من طبقات الخلية المقترحة وكلا على حدى، إذ تم أولاً إجراء إختبار أنواع متعددة من طبقات أكسيد الموصل الشفاف (TCO)، وكانت الطبقة الأمثل لها وذات كفاءة عالية عندما كانت الطبقة من النوع (n-SnO<sub>2</sub>)، وأفضل سُمك كان  $0.1 \mu\text{m}$ . وتم إختبار أنواع متعددة من الطبقات النافذة (Windows Layers) وكانت أفضل طبقة من النوع (n-ZnS)، أفضل سُمك كان  $0.5 \mu\text{m}$ . كذلك تم إختبار أنواع متعددة من الطبقة الخازنة (Buffer Layers)، وكانت افضل طبقة من النوع (n-ZnSe) وبسُمك  $0.5 \mu\text{m}$ . كما تم إختبار أفضل سُمك لطبقة الإمتصاص (Absorber Layer) (CIGS) وكان  $5 \mu\text{m}$ . تم إضافة طبقة السطح الخلفي (BSL)، وإختبارها مع أنواع متعددة وكانت أفضل طبقة من النوع (P-CdTe)، وأفضل سُمك  $0.5 \mu\text{m}$ . أخيراً تم الحصول على الخلية النهائية المعتمدة وهي P-CdTe/CIGS/n-SnO<sub>2</sub>/n-ZnS/n-ZnSe وكانت خصائص (I-V) لها:

$$[V_{oc}=0.8953\text{V}, J_{sc}=37.051 \text{ mA/cm}^2, FF=79.86\%, \eta=26.49\%].$$

الكلمات الدالة: برنامج المحاكاة SCAPS-1D، خلية الكالكوپيرايت CIGS، طبقة الانعكاس الخلفية.

### Abstract

In this study, the chalcopyrite solar cell (CIGS/OVC/CdS/i-ZnO) was proposed, the resulted simulation of the cell using SCAPS-1D program with the characterized Current-Voltage (I-V) are:  $[V_{oc}=0.5587 \text{ V}, J_{sc}=31.68 \text{ mA/cm}^2, FF=61.40\%, \eta=10.87\%]$ . In order to reach to more reliable cell with high characterized Current-Voltage (I-V), by testing with different types in each layers of the proposed cell. Firstly, testing multiple types of Transparent Conductive Oxide

(TCO) layers, the optimal and highly efficient layer at type (n-SnO<sub>2</sub>), the best thickness was (0.1µm). Several types of window layers are tested, the best layer at type (n-ZnS), with best thickness (0.5µm). Several types of buffer layers are also tested, the best layer (n-ZnSe) with a thickness of (0.5 µm). Also the best thickness tested of the absorber layer (CIGS), was (5µm). Finally, Back Surface Layer (BSL) was added, tested with several types, the best layer was (P-CdTe), with a thickness of (0.5µm). Therefore the final approved cell obtained [P-CdTe/CIGS/n-SnO<sub>2</sub>/n-ZnS/n-ZnSe], characterized Current-Voltage (I-V) are:

$$[V_{oc}=0.8953V, J_{sc}=37.051 \text{ mA/cm}^2, FF=79.86\%, \eta=26.49\%].$$

**Key Words:** Programe SCAPS-1D, Chalcopyrite Solar Cell (CIGS), Back Surface Layer (BSL)

### المقدمة: Introduction

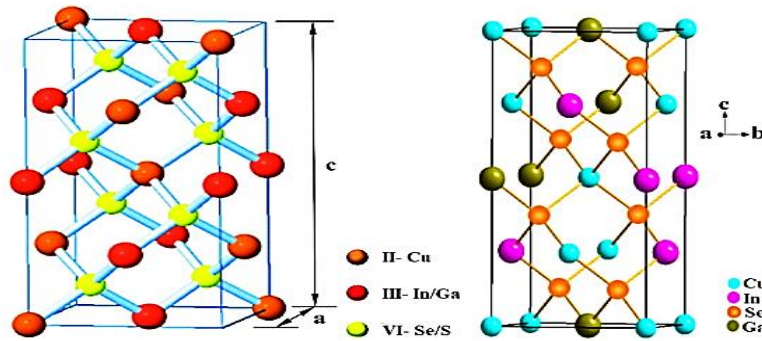
إن إستهلاك الطاقة في العالم يتزايد بشكل مطرد حالياً، وذلك بسبب الزيادة السكانية وثورة التنمية الصناعية. وفي الوقت الحالي، يعتمد إنتاج الطاقة بشكل أساسي على الوقود الأحفوري مثل النفط والفحم والغاز الطبيعي.. وهي مصادر غير متجددة، وهي موارد محدودة، وإستهلاكها هو مصدر العديد من المشاكل البيئية مثل التلوث والاحتباس الحراري [Huang,2008]، لذلك من المهم جداً تطوير مصادر طاقة بديلة جديدة قادرة على تلبية الطلب المتزايد، لضمان التنمية المستدامة والحفاظ على البيئة.

تُعد الطاقة الشمسية احدى أهم المصادر المرشحة لتكون مصدر الطاقة للمستقبل. كونها مصدر طاقة متجددة ولا تنضب [Ramprasad,2012]. في الواقع يمكن تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء عن طريق الخلايا الشمسية. إذ تعتبر الخلايا الشمسية من أهم الإختراعات المفيدة التي وجدت في عصرنا الحديث حيث تمكن الانسان من خلالها توفير جزء لا بأس به من الاحتياجات والمتطلبات اليومية للطاقة الكهربائية.

الخلية الشمسية هي عبارة عن شبه موصل يعمل على تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية يمكن إستعمالها والاستفادة منها [Adam,2012]. فمنذ العقود القليلة السابقة، عمل الباحثون أبحاثاً عديدة عن المواد التي تلي متطلبات تحمل الكلفة والفعالية والعمر الطويل في مجال الطاقة، فقد أظهرت خلايا الكالكوبيرايت (CIGS) استقراراً وموثوقية عالية للخلايا الشمسية (بسبب عدم وجود طور غير متبلور فيها)، إذ أنها تعتبر ميزة الأكثر حسماً من تقنيات الأغشية الرقيقة البلورية Si؛ التي عانت معظم تقنيات الأغشية الرقيقة الأخرى لمشاكل الإستقرارية والموثوقية [Heriche et al.,2017] وتمتاز بأنها ذات فجوة طاقة قابلة التكوين لها

تتراوح بحوالي  $eV$  (1.01-1.69) ومعامل امتصاصية جيدة في الطيف البصري ( $10^5 \text{cm}^{-1}$ )، مما يجعلها ذات رغبة كبيرة وفاعلة في تطبيقات الخلية الشمسية [Contrares et al., 2005].

إن خلايا الكالكوبيرايت (CIGS) هي إختصار لعناصر سيلينيد الكاليوم والنحاس والإنديوم ( $\text{Cu}_1\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ) وهو شبه موصل رباعي في المحلول الصلب حيث يمثل  $x$  تمثل جزء من الكاليوم. إذ يمكن أن يختلف تركيز كاليوم الإنديوم من سيلينيد الإنديوم النحاسي النقي ( $x=0$ , CIS) إلى سيلينيد الكاليوم النحاسي النقي ( $x=1$ , CGS). وبالتالي، فإن فجوتها قد تتغير بشكل مستمر مع  $x$ ، من 1V في CIS إلى حوالي 1.7V في CGS. من الناحية البلورية، CIGS عبارة عن رباعي وجوه ينتمي إلى عائلة I-III-VI<sub>2</sub> مع بنية الكالكوبيرايت [Chopra et al., 2004]. وكما مبينة في الشكل (1-1)



## 2- المواد وطرق البحث Materials and Research Methods

أثبتت المحاكاة الرقمية لأجهزة الخلايا الشمسية عبر سنين عديدة فعاليتها في دراسة وفهم خصائص فيزيائية متعددة للخلايا الشمسية المعقدة. فالمحاكات الحاسوبية هي تقنية تستخدم لتحليل ودراسة سلوك جهاز حقيقي أو نظام وهمي عن طريق محاكاته باستخدام تطبيق حاسوبي. تعتمد المحاكاة على وعلى نموذج رياضي يصف النظام المراد دراسته [Marc Burgelman et al, 2004]

في جامعة جنت في بلجيكا / قسم الالكترونيات وأنظمة المعلومات تم إنشاء برنامج قائم على الكمبيوتر من قبل الدكتور (مارك بولكيلمان) ومساعديه المعروف ببرنامج SCAPS-1D الرقمي ذات البعد الواحد يقوم هذا البرنامج بتحديد مجموعة من العوامل بما فيها عيوب التصنيف والانشاء وإعادة التركيب، يتم التعبير عن العلاقة بين كثافة الشحنة والجهد الكهروستاتيكي عن طريق برنامج SCAPS-1D من خلال استخدام معادلات أشباه الموصلات للاستمرارية Continuity ومعادلة بواسون Poisson's Equation للإلكترونات والفجوات ان برنامج SCAPS -1D يحاكي طبقات الخلية الشمسية ويحسب معلماتها ومخرجاتها الرئيسية بما في ذلك فولتية الدائرة المفتوحة وكثافة تيار دائرة القصر وعامل المليء وكفاءة الخلية الشمسية

ويحسب معالماتها ومخرجاتها الرئيسية بما في ذلك فولتية الدائرة وكثافة تيار دائرة القصر وعامل المليء وكفاءة الخلية، مما يعطي رؤية عن خصائص الأداء لبرنامج SCAPS وبالإمكان تمثيل معدلات حاملات الشحنة وإعادة تركيبه كالتالي:

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = r - g(\text{For electrons}) \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = r - g(\text{For holes}) \dots \dots \dots (2)$$

عند أخذ تيار الانتشار (diffusion) وتيار الانجراف (drift) تصبح كثافة التيارات كالتالي:

$$J_p = e\mu_p \frac{d\phi}{dx} - eD_p \nabla p \dots \dots \dots (3)$$

$$J_n = e\mu_n \frac{d\phi}{dx} - eD_n \nabla n \dots \dots \dots (4)$$

حيث أن  $J_n$  كثافة تيار الإلكترونات،  $J_p$  كثافة تيار الفجوات،  $q$  شحنة الوحدة الأولية وان ( $D_p$  و  $D_n$ ) ثابت الانتشار للإلكترونات والفجوات على التوالي ويمكن التعبير عن الارتباط ما بين كثافة الشحنة ( $\rho$ ) والجهد الكهروستاتيكي ( $\Phi$ ) على النحو الآتي:

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \dots \dots \dots (5)$$

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} (p - n + N_D^+ - N_A^-) \dots \dots \dots (7)$$

تمثل كل من  $n$  و  $p$  تراكيز الإلكترونات والفجوات على التوالي و تمثل كل من  $N_D^+$ ،  $N_A^-$  كثافة المستقبيلات والمانحات المؤينة على التوالي، وتمثل كل من  $\epsilon_0$  و  $\epsilon_r$  السماحية النسبية ونفاذية الفراغ على التوالي [Hosen et al,2024].

## 1-2 معالمات الخلية الشمسية Solar Cell Parameter

### 1- تيار دائرة القصر Circuit Current Short

وهو أقصى تيار يمكن أن تولده الخلية الشمسية عند قصر أطرافها، أي عندما تكون فولتية الخلية الشمسية تساوي صفر ( $V=0$ )، ويرمز له بـ ( $I_{sc}$ ) ويعتمد على عدد الفوتونات التي تمتصها المادة ويتناسب عكسيا مع فجوة الطاقة أي يزداد التيار كلما قلت فجوة الطاقة (زي.أم.اس،1990).

**2- فولتية دائرة الفتح Open Circuit Voltage**

وهو أقصى جهد يمكن توليده في الخلية الشمسية عندما يكون تيار الخلية الشمسية صفراً ( $I = 0$ ) ويرمز له بالرمز ( $V_{oc}$ )، ويمكن حسابها من المعادلة الآتية:

$$V_{oc} = \frac{K_B T}{q} \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) \dots \dots \dots (14)$$

وبالإمكان الحصول على أعظم قيمة لفولتية الدائرة المفتوحة عندما يكون تيار التشبع العكسي أقل ما يمكن [Zeman,2003].

**3 - عامل المليء Fill Factor**

وهو حاصل نسبة القدرة القصوى التي تنتجها الخلية الشمسية والقدرة الناتجة من حاصل ضرب تيار الدائرة القصيرة وفولتية الدائرة المفتوحة ويتم حسابه من خلال المعادلة التالية [Solanki,2015].

$$FF = \frac{V_{mp} \times J_{mp}}{V_{oc} \times J_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} J_{sc}} \dots \dots \dots (15)$$

**4 - كفاءة الخلية الشمسية ( $\eta$ ) Efficiency of Solar Cell**

وهي النسبة بين القدرة القصوى المتولدة من الخلية الشمسية إلى القدرة الساقطة عليها ويعبر عنها بالمعادلة الآتية [Gray.,2011].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (16)$$

تتكون الخلية المقترحة في هذا البحث من أربع طبقات وهي الطبقة الماصة (CIGS) وطبقة أكسيد الموصل الشفاف (i-ZnO) والطبقة النافذة (CdS) والطبقة الخازنة (OVC) كما (CIGS/OVC/CdS/i-ZnO) وكما موضح في الشكل (1.2a). وكانت النتائج التي تم الحصول عليها كالتالي:

$$[V_{oc}=0.5587 \text{ V}, J_{sc}=31.68 \text{ mA/cm}^2, FF=61.40\%, \eta=10.87\%]$$

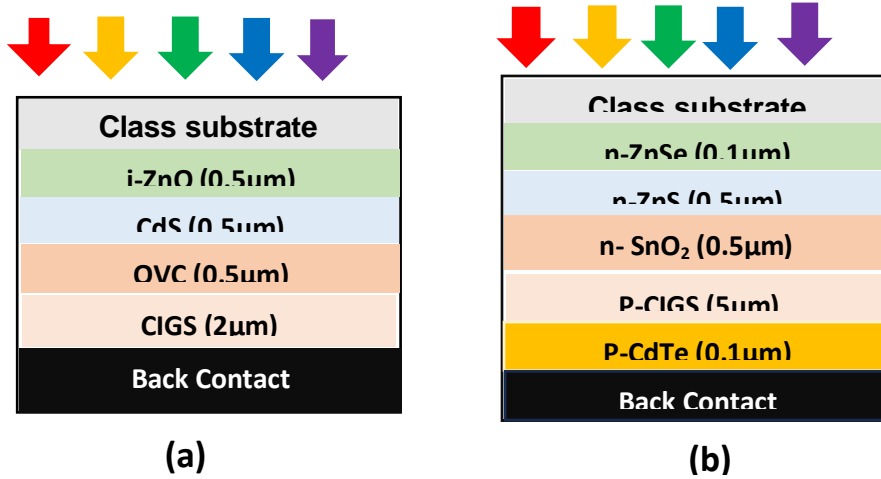
من أجل الحصول على خلية ذات كفاءة عالية تم إجراء اختبار لكل طبقة من طبقات الخلية المقترحة للحصول على أفضل طبقات التي تكون عندها الخلية أعلى ما يمكن حيث تم تثبيت طبقة الإمتصاص CIGS وتم إجراء اختبار طبقة أكسيد الموصل الشفاف TCO مع عدد من الطبقات وكانت أفضل طبقة تم التوصل إليها هي طبقة ( $n\text{-SnO}_2$ ) وتم إجراء اختبار لطبقة وتم إجراء اختبار لطبقة النافذة Windows Layer وكانت أفضل طبقة التي تتميز بكفاءة عالية هي ( $n\text{-ZnSe}$ ) وتم اختبار الطبقة الخازنة Buffer Layer مع مجموعة من الطبقات وكانت أفضل طبقة هي طبقة ( $n\text{-ZnS}$ ) وأخيراً إضافة طبقة السطح الخلفي (BSF) وتم اختبارها مع عدة طبقات فكانت أفضل طبقة هي ( $P\text{-CdTe}$ ) وتعمل هذه الطبقة على

تقليل سمك طبقة الإمتصاص وبالتالي تقليل من التقليل من الكلفة الإنتاجية للخلية الشمسية المعتمدة وزيادة

كفاءة الخلية ، وأصبحت الخلية النهائية المعتمدة في هذا البحث [P-CdTe/P-CIGS/n-SnO<sub>2</sub>/n-

ZnS/n-ZnSe] وكما في شكل (1b) وأصبحت معطيات الخلية النهائية :

[V<sub>oc</sub>=0.8953(V) ، J<sub>sc</sub>= 37.051(mA/cm<sup>2</sup>) ، FF=79.86% ، η=26.49%]



الشكل(1.2): طبقات الخلية الشمسية (a) الخلية المقترحة (b) الخلية النهائية

الجدول (1-1): معلمات الخلية الشمسية قيد الدراسة

Parameter	P-CdTe	P-CIGS	n-ZnSe	n-ZnS	n-SnO <sub>2</sub>
Thickness (µm)	0.1	1.5	0.5	0.1	0.1
Band gap(eV)	1.4	1.2	3.3	3.9	3,6
Electron affinity(eV)	4.28	4.5	4.1	4.5	4.5
Dielectric permittivity	9.4	10	10	10	9
CB effective density of states (cm <sup>-3</sup> )	7.500E <sup>+17</sup>	2.00 E <sup>+18</sup>	1.80E <sup>+18</sup>	1.80 E <sup>+18</sup>	2.20E <sup>+18</sup>
VB effective density of states (cm <sup>-3</sup> )	1.80E <sup>+19</sup>	2.2 E <sup>+19</sup>	1.8 E <sup>+19</sup>	1.8E <sup>+19</sup>	1.80E <sup>+19</sup>
Electron thermal velocity (cms <sup>-1</sup> )	1.00E <sup>+7</sup>	1.00E <sup>+7</sup>	1.00E <sup>+7</sup>	1.00E <sup>+7</sup>	1.00E <sup>+7</sup>
Hole thermal velocity (cm/s)	1.0E <sup>+7</sup>	1.0E <sup>+7</sup>	1.0E <sup>+7</sup>	1.0E <sup>+7</sup>	1.0E <sup>+7</sup>
Electron Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	500	50	100	100	100
Hole Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	60	20	25	25	25
Shallow uniform donor density , N <sub>D</sub> (cm <sup>-3</sup> )	0	0	1.0E <sup>+19</sup>	1.0E <sup>+19</sup>	1.0E <sup>+19</sup>
Shallow uniform acceptor density , N <sub>A</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.0E <sup>+19</sup>	5.500E <sup>+15</sup>	0	0	0
Defect type	Single Acceptor	Neutral	Single Donor	Single Donor	Single Donor
Capture Cross Section Electron (cm <sup>2</sup> )	1.0 E <sup>-12</sup>	1. 0E <sup>-15</sup>	1. 0E <sup>-15</sup>	1.0 E <sup>-15</sup>	1.0 E <sup>-15</sup>
Capture Cross Section Hole (cm <sup>2</sup> )	1. E <sup>-15</sup>	1.0E <sup>-15</sup>	1.0E <sup>-12</sup>	1.0E <sup>-12</sup>	1.0E <sup>-12</sup>
N <sub>t</sub> (1/cm <sup>2</sup> )	1.00 E <sup>+14</sup>	1.00E <sup>+18</sup>	1.00E <sup>+15</sup>	1.0E <sup>+15</sup>	1.0E <sup>+15</sup>

4- إختبار سمك طبقات الخلية الشمسية: تم إختبار السمك لكل طبقات الخلية الشمسية (CIGS/n-) للخلية الشمسية. وإختبار أفضل سمك لكل طبقة على حدا للتوصل إلى أقصى كفاءة

أولاً - تأثير سمك طبقة الإمتصاص على كفاءة الخلية: بعد تثبيت طبقة أكسيد الموصل الشفاف (n-SnO<sub>2</sub>) مع طبقة الإمتصاص CIGS عند سمك 0.5 µm لطبقة الأوكسيد الموصل الشفاف، تم إختبار سمك طبقة الإمتصاص من (1-5)µm وبزيادة مقدارها 1µm للحصول على أفضل سمك للطبقة الماصة كان 5µm وكانت النتائج كالتالي:

$$[V_{oc}= 0.5525(V), J_{sc}= 31.79(mA/cm^2), FF= 63.47\%, \eta= 11.151\%]$$

ثانياً - تأثير سمك طبقة أكسيد الموصل الشفاف على كفاءة الخلية : بعد تثبيت طبقة الإمتصاص عند 5µm تم إختبار سمك طبقة أكسيد الموصل الشفاف من (0.1-1.1)µm وبزيادة مقدارها 0.2µm للحصول على أفضل سمك الذي تكون عندها الكفاءة اعلى مايمكن وكان أفضل سمك عند 0.1µm وكانت النتائج كالتالي:

$$[V_{oc}= 0.552, J_{sc}= 31.75(mA/cm^2), FF= 63.4\%, \eta= 11.13\%].$$

#### ثالثاً - تأثير سمك الطبقة النافذة على كفاءة الخلية

تم إختبار سمك الطبقة النافذة من (0.1-0.5)µm وبزيادة مقدارها 0.2µm للحصول على أفضل سمك الذي يكون عنده كفاءة الخلية أفضل مايمكن عند السمك 0.1µm حيث كانت النتائج كالتالي:

$$[V_{oc}= 0.5537(V), J_{sc}= 33.09(mA/cm^2), FF= 65.1\%, \eta= 11.93]$$

رابعاً - تأثير سمك الطبقة الخازنة على كفاءة الخلية: بعد ان تم تثبيت سمك طبقة الإمتصاص وطبقة أكسيد الموصل وطبقة النافذة عند (0.1-0.1-5)µm على التوالي تم تغيير سمك الطبقة الخازنة من (0.5-1.5)µm وبزيادة مقدارها 0.2µm للحصول على أفضل سمك الذي تكون كفاءة الخلية الشمسية أعلى مايمكن عند السمك 0.5µm وكانت النتائج التالية:

$$[V_{oc}= 0.5517, J_{sc}= 31.41 (mA/cm^2), FF= 64.72\%, \eta= 11.22]$$

#### خامساً - تأثير سمك طبقة السطح الخلفي على طبقة الإمتصاص

بعد إضافة طبقة السطح الخلفي والحصول على الخلية النهائية تم إختبار سمك طبقة CIGS الإمتصاص من (0.5-5)µm للتوصل إلى أفضل سمك لطبقة الإمتصاص التي تكون التي تكون عندها كفاءة الخلية اعلى ما يمكن وكانت أفضل كفاءة عند سمك 1.2µm وكانت النتائج التي تم الحصول عليها.

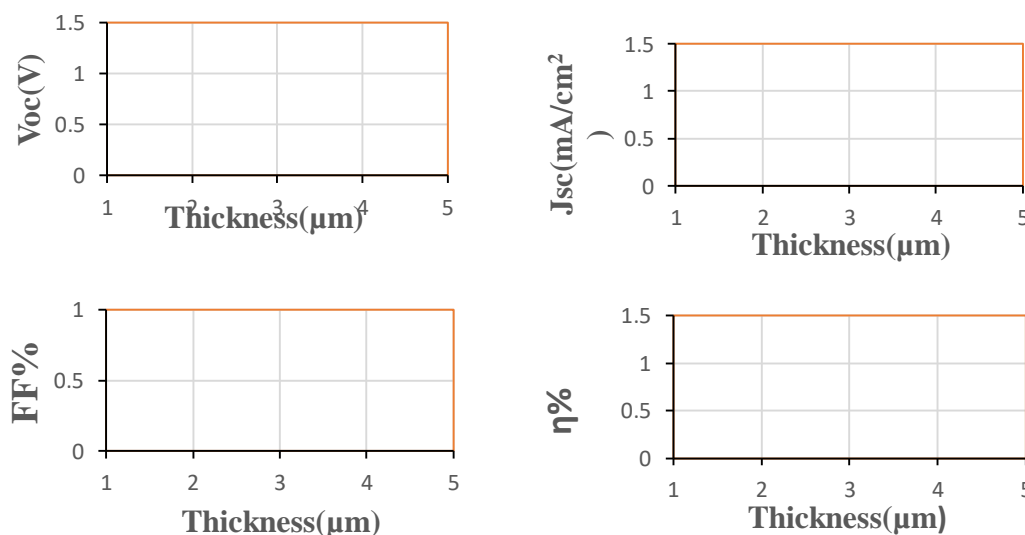
$$[V_{oc}= 1.15 (V), J_{sc}= 36.89(mA/cm^2), FF= 64.07\%, \eta= 27.36\%]$$

سادساً- تأثير سمك طبقة السطح الخلفي على كفاءة الخلية: بعد تثبيت سمك طبقة الإمتصاص عند  $1.5\mu\text{m}$  تم تغيير سمك طبقة السطح الخلفي BSF من  $(0.05-0.5)\mu\text{m}$  وتبين انها لم يؤثر تغيير سمك على كفاءة الخلية وبقية المخرجات ثابتة. وقد تبين أن إضافة طبقة السطح الخلفي زادت من كفاءة الخلية الشمسية حيث كانت الكفاءة قبل إضافة طبقة السطح الخلفي ( $\eta=10.87\%$ ) وبعد الإضافة أصبحت ( $\eta=26.49\%$ ).

**5- النتائج والمناقشة:** الخلية التي تم التوصل اليها والتي تتميز بكفاءتها وفعاليتها العالية تتكون من خمس طبقات وهي طبقة الإمتصاص (CIGS) وطبقة اوكسيد الموصل الشفاف ( $\text{SnO}_2$ ) وطبقة النافذة ( $\text{ZnS}$ ) والطبقة الخازنة ( $\text{ZnSe}$ ) وطبقة السطح الخلفي ( $\text{CdTe}$ ) وبعدا دراسة تأثير و سمك كل طبقات الخلية الشمسية تم التوصل إلى النتائج التالية :

$$[V_{oc}= 1.15 \text{ (V)}, J_{sc}= 36.89(\text{mA}/\text{cm}^2), FF= 64.07\%, \eta= 27.36\%]$$

اولاً. دراسة تأثير تغيير سمك طبقة الإمتصاص على خصائص ( $I-V$ ): بعد تثبيت طبقة اوكسيد التوصيل الشفاف مع طبقة الإمتصاص التي تتكون من طبقتين  $\text{P-CIGS}/\text{n-SnO}_2$  عند سمك  $(5-0.5)\mu\text{m}$  على التوالي، تم دراسة تأثير سمك الطبقة CIGS على خصائص ( $I-V$ ) مع تثبيت سمك الطبقة النافذة عند  $0.5\mu\text{m}$  لكي نحصل على أفضل سمك بحيث تكون كفاءة الخلية اعلى ما يمكن وعند النتائج تبين ان أفضل سمك عند  $5\mu\text{m}$ .



الشكل (1-3) تأثير سمك طبقة الإمتصاص على خصائص ( $I-V$ )

من خلال الشكل (1-3)، يلاحظ أن زيادة سمك طبقة الإمتصاص يؤدي إلى زيادة تيار دائرة القصر وتكون اعلى قيمة له عند سمك ( $5\mu\text{m}$ ) ويثبت وذلك بسبب كون أن الإمتصاص لم يكتمل عند



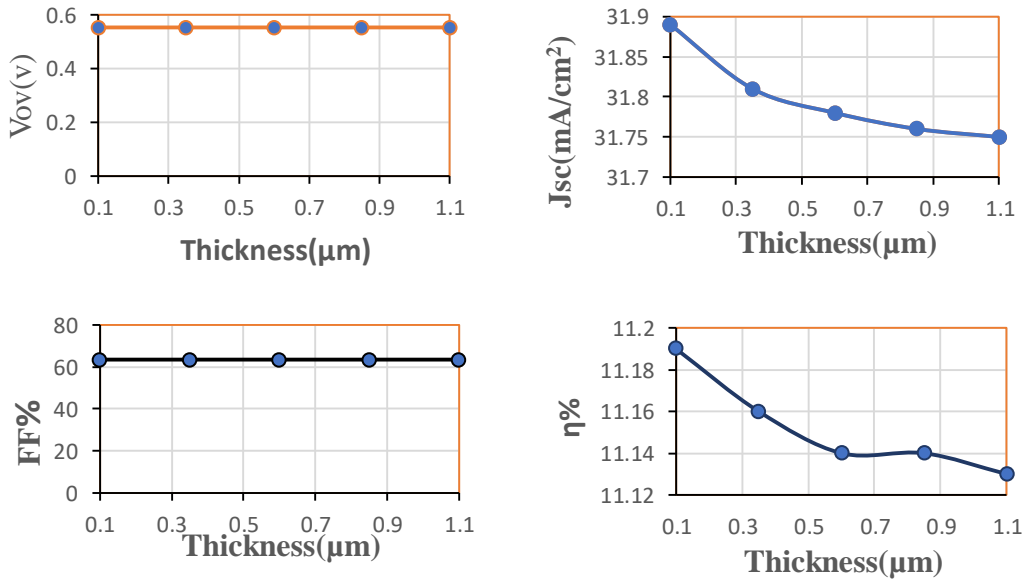
السك الأقل من  $5\mu\text{m}$  وان ثبات التيار عند هذه القيمة يدل على ان جميع الفوتونات تم إمتصاصها من قبل طبقة الإمتصاص وتحويلها إلى زوج الكترون- فجوة. كذلك يحدث هبوط طفيف في عامل الملئ نتيجة تزايد كثافة تيار دائرة القصر  $J_{sc}$ .

ويلاحظ من الشكل (1-3) أن فولتية الدائرة المفتوحة  $V_{oc}$  مع زيادة سمك طبقة الإمتصاص وذلك بسبب ان طبقة الإمتصاص لها القدرة العالية على إمتصاص الفوتونات وتحويلها إلى زوج الكترون- فجوة.

أما كفاءة الخلية الشمسية فيلاحظ أنها قد إزدادت تدريجياً مع زيادة سمك طبقة الإمتصاص وذلك بسبب زيادة معدا توليد زوج (الكترون- فجوة) وتصل إلى قمة لها عند سمك  $5\mu\text{m}$  كونها امتصت كافة الفوتونات الساقطة (عدنان، 2021).

ثانياً. دراسة تأثير تغير سمك طبقة أكسيد الموصل الشفاف (TCO) على خصائص (I-V)

بعد تثبيت الخلية المكونة من طبقتين (P-CIGS/n-SnO<sub>2</sub>) عند سمك  $(5-0.5)\mu\text{m}$  تم تغيير سمك طبقة (SnO<sub>2</sub>) من  $0.1\mu\text{m}$  إلى  $1.1\mu\text{m}$  من أجل الحصول على أفضل سمك الذي تكون عنده كفاءة الخلية أفضل ما يمكن وتبينت النتائج ان أفضل سمك عند  $0.1\mu\text{m}$ .

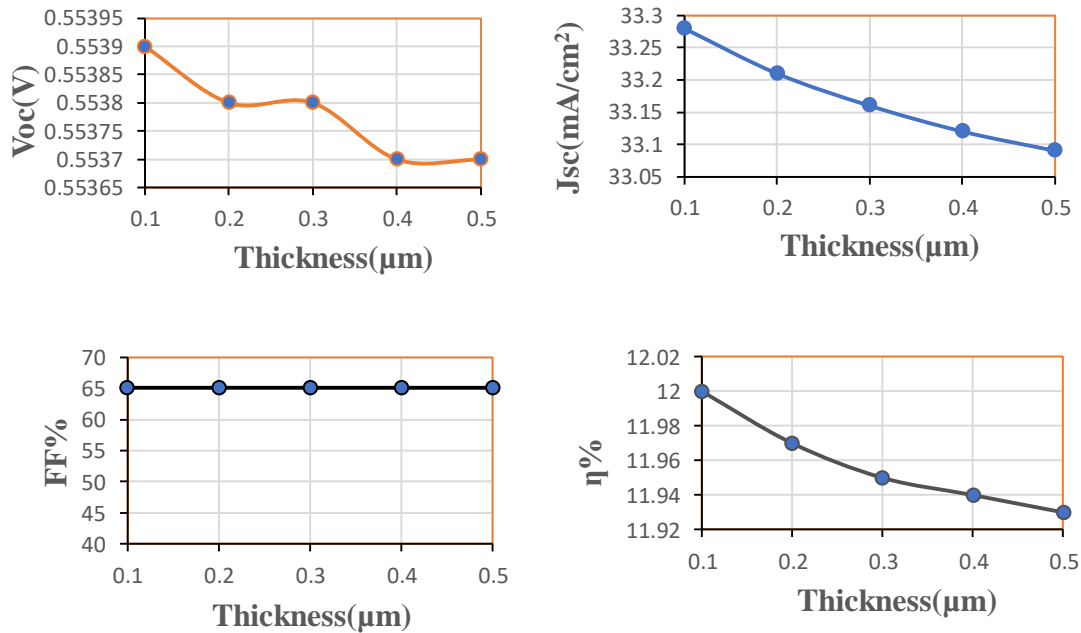


الشكل (1-4) تأثير سمك طبقة TCO على خصائص (I-V).

من ملاحظة الشكل (1-4) أعلاه، يتبين بان  $V_{oc}$  و FF أنها لم تتأثر بزيادة سمك طبقة TCO وأن  $J_{sc}$  و  $\eta$  قد إنخفضت بشكل طفيف وسبب ذلك يعود كون فجوة هذه الطبقة كبيراً مما يسمح بنفوذ الفوتونات من خلالها، وبالتالي لا يحدث أي إمتصاص للفوتونات.

## ثالثاً. تأثير سمك الطبقة النافذة على خصائص (I-V)

بعد تثبيت الخلية المكونة من (P-CIGS/n-SnO<sub>2</sub>/n-ZnS) عند الأسماك (5-0.1- $\mu$ m) على التوالي، تم تغيير سمك الطبقة النافذة (ZnS) من 0.1 $\mu$ m إلى 0.5 $\mu$ m للحصول على أفضل سمك تكون عنده الكفاءة أفضل ما يمكن، وتم الحصول على أفضل سمك عنده 0.1 $\mu$ m.

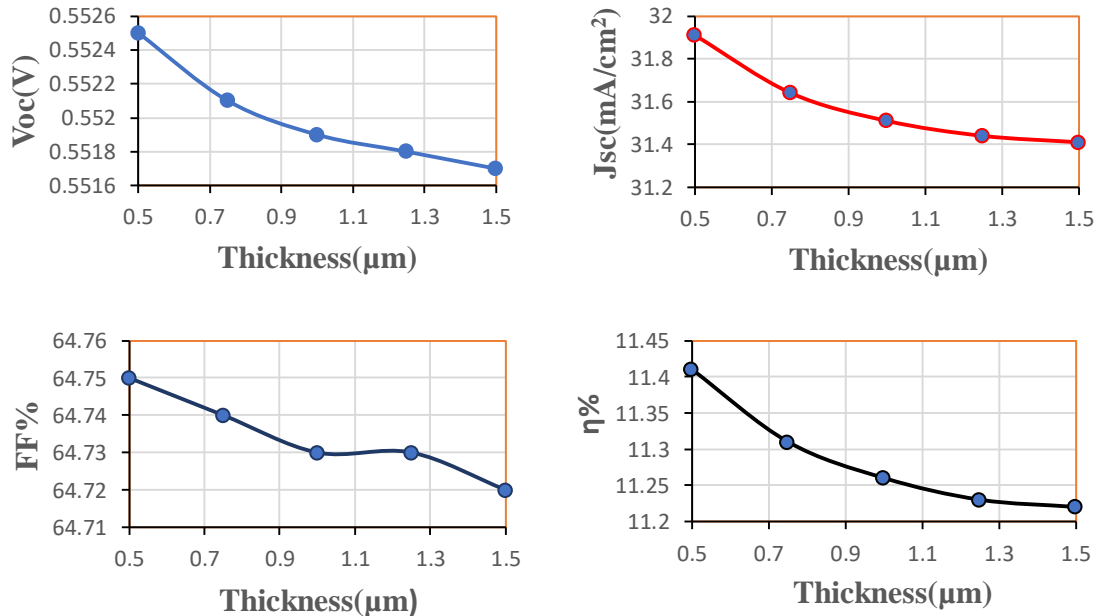


## الشكل (1-5) تأثير سمك الطبقة النافذة على خصائص (I-V)

من خلال الشكل (1-5) أعلاه، يتبين بان زيادة سمك الطبقة النافذة يتسبب بانخفاض فولتية الدائرة المفتوحة وذلك لان الطبقة النافذة قد امتصت عدد من الفوتونات وبالتالي قل مقدار التيار الذي يتولد ضوئياً في طبقة الإمتصاص ولهذا قل  $V_{oc}$ . أما تيار دائرة القصر أيضاً إنخفض مع زيادة سمك الطبقة النافذة (ZnS) وذلك بسبب النقصان الحاصل في عدد الفوتونات التي وصلت لطبقة الإمتصاص نتيجة لإمتصاصها من قبل الطبقة النافذة (ZnS). أما عامل المليء لم يتأثر بزيادة سمك الطبقة النافذة، وان كفاءة الخلية تكون قد إنخفضت بسبب عدم توليد زوج (الكترن-فجوة) نتيجة النقصان الحاصل في عدد الفوتونات الواصلة إلى الطبقة الماصة [Scheer et al.,2011].

رابعاً. تأثير سمك الطبقة الخازنة على خصائص (I-V): بعد ان تم تثبيت الخلية التي تتكون من (P-) CIGS/n-SnO<sub>2</sub>/n-ZnS/n-ZnSe عند الأسماك (5-0.1-0.1-0.5) $\mu$ m تم تغيير سمك الطبقة الخازنة

من  $0.5\mu\text{m}$  إلى  $1.5\mu\text{m}$  للحصول على أفضل سمك الذي تكون عنده كفاءة الخلية الشمسية أعلى ما يمكن، وبينت النتائج أن أفضل سمك كان  $0.5\mu\text{m}$ .



#### الشكل (1-6) تأثير سمك الطبقة الخازنة على خصائص (I-V)

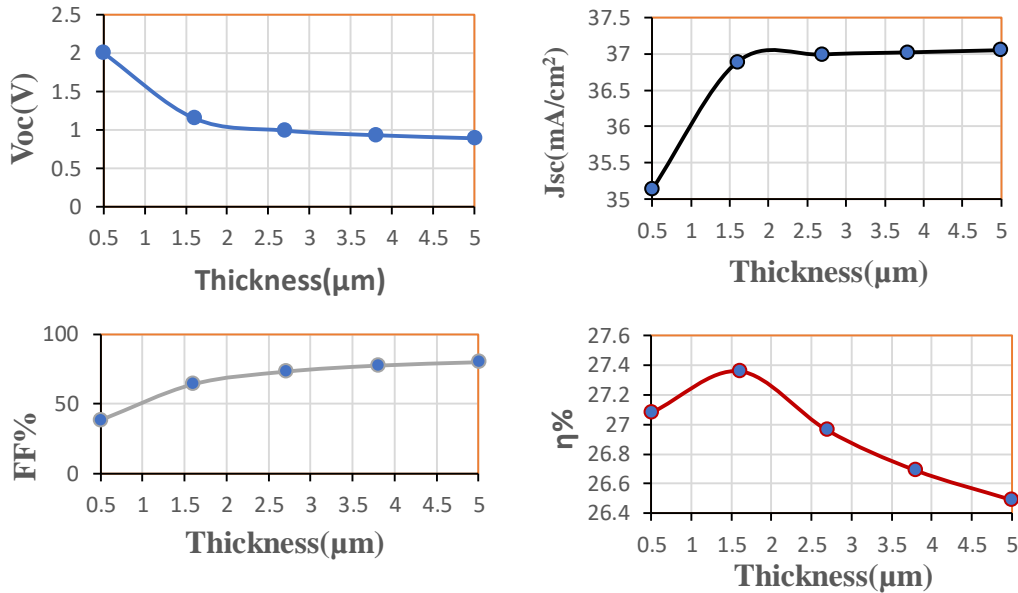
لوحظ من خلال الشكل أعلاه (1-6) حصول نقصان طفيف في كثافة تيار دائرة القصر وكفاءة الخلية الشمسية والسبب ذلك عدم وصول الفوتونات إلى الطبقة الماصة CIGS نتيجة امتصاصها من قبل الطبقة الخازنة، كذلك زيادة السمك تسبب بنقصان فولتية الدائرة المفتوحة وعامل المليء لأنه مع زيادة الطبقات الخازنة يصبح معدل إعادة التركيب عالي ومنها نستنتج أن زوج (الالكترون - فجوة) كان أقل مما تسبب بذلك الإنخفاض [Dadu et al.,2002].

#### خامساً. دراسة تأثير طبقة السطح الخلفي (BSF) على سمك طبقة الإمتصاص

بعد تثبيت الخلية الشمسية المكونة من ( $\text{P-CdTe/P-CIGS/n-ZnSe/n-ZnS/n-SnO}_2$ ) عند السماك ( $0.5-5-0.5-0.1-0.1$ ) $\mu\text{m}$  تم تغيير سمك طبقة الإمتصاص بعد إضافة طبقة السطح الخلفي (BSF) من  $0.5\mu\text{m}$  إلى  $5\mu\text{m}$  حيث تم التوصل إلى أفضل سمك كان عند كفاءة أعلى ما يمكن عند  $1.5\mu\text{m}$ ، وبذلك أسهمت طبقة السطح الخلفي على تقليل سمك الطبقة الماصة ومن ثم كلفتها الإنتاجية وكانت النتائج:

$$[V_{oc}=1.26 \text{ (v)}, J_{sc}=36.79(\text{mA/cm}^2), FF=59.29\%, \eta=27.5\%]$$

من خلال الشكل (7-1) لوحظ ان إضافة طبقة (BSF) على سمك الطبقة الماصة أدت إلى إرتفاع كفاءة الخلية حيث كانت كفاءة الخلية قبل إضافة طبقة السطح الخلفي 11.15% عند سمك 5µm وبعد الإضافة أصبحت 27.5% عند سمك 1.5µm.

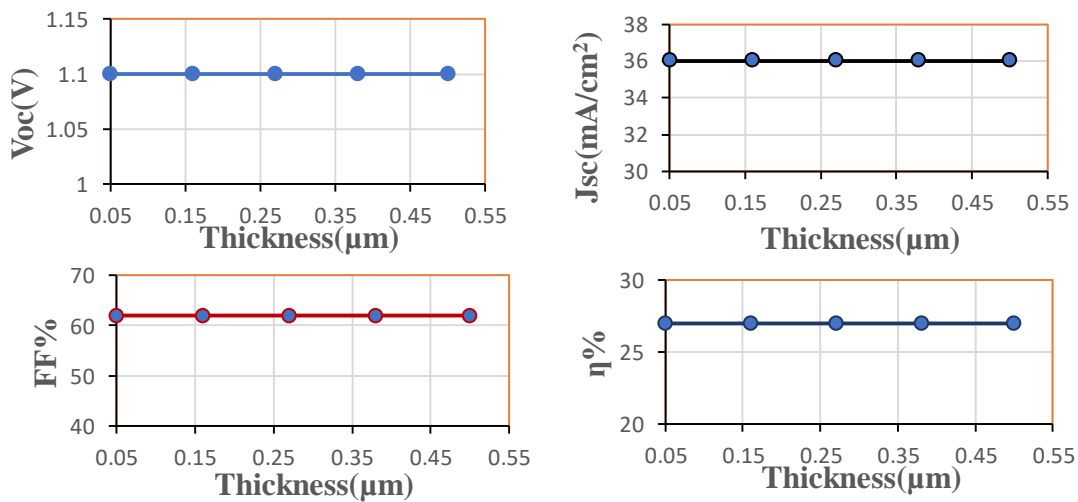


الشكل (7-1) تأثير سمك طبقة الإمتصاص (CIGS) بعد إضافة طبقة السطح الخلفي (BSF)

سادساً. تأثير تغير سمك طبقة السطح الخلفي (BSF) على خصائص (I-V)

بعد ان تم تثبيت طبقة الإمتصاص (CIGS) عند سمك 1.5 µm تم تغير سمك طبقة السطح الخلفي (CdTe) من 0.05µm إلى 0.5µm وتبين من خلال النتائج ان هذا التغير لم يؤثر على كل من (η، FF، Voc، Jsc) كما في شكل (7-1) وبقيت ثابتة كما في النتائج التالية.

$$[V_{oc}=1.1 \text{ (v)}, J_{sc}=36 \text{ (mA/cm}^2\text{)}, FF=62\%, \eta=27\%]$$



الشكل (8-1) تأثير سمك طبقة السطح الخلفي (BSF) على خصائص (I-V)

الأمر الإيجابي لطبقة السطح الخلفي (BSF) هو تحسين كفاءة الخلية الشمسية وبالتالي تقلل من تكلفة إنتاج الخلية، وتعمل على تعزيز الحاملات الأقلية من خلال انعكاسها نحو الوصلة ونقل من عملية إعادة التركيب في جهة الاتصال الخلفية [Amin et al.,2007].

#### 6- الاستنتاجات:

- 1- بعد تثبيت طبقة الإمتصاص CIGS وإختبار عدة أنواع من طبقة أكسيد الموصل الشفاف TCO تم التوصل الى أفضل نوع ( $n\text{-SnO}_2$ ) فأصبحت الخلية مكونة من P-CIGS/ $n\text{-SnO}_2$ .
- 2- تم تغيير سمك كل من طبقة الإمتصاص وطبقة أكسيد الموصل الشفاف وكان أفضل سمك لكل منهما  $5\mu\text{m}$  و  $0.1\mu\text{m}$  على التوالي.
- 3- بعد إختبار أنواع متعددة من الطبقة النافذة تم التوصل الى أفضل نوع ( $n\text{-ZnS}$ ) فأصبحت الخلية مكونة من P-CIGS/ $n\text{-SnO}_2$ / $n\text{-ZnS}$  وتم تغيير سمكها وكان أفضل سمك  $0.1\mu\text{m}$  حيث كانت أعلى كفاءة (11.93%)
- 4- بعد أختبار أنواع من الطبقات الخازنة تم التوصل الى أفضل نوع ( $n\text{-ZnSe}$ ) وتم تغيير سمكها فكان أفضل سمك  $0.5\mu\text{m}$  فأصبحت الخلية P-CIGS/ $n\text{-SnO}_2$ / $n\text{-ZnS}$ / $n\text{-ZnSe}$
- 5- تم إضافة طبقة السطح الخلفي (BSF) وأختبارها مع عدة أنواع فكانت أفضل طبقة (P-CdTe) فأصبحت الخلية P-CdTe/ $p\text{-CIGS}/n\text{-ZnSe}/n\text{-ZnS}/n\text{-SnO}_2$  وكانت أعلى كفاءة (26.49%)
- 6- إن إضافة طبقة السطح الخلفي عملت على تقليل سمك طبقة الإمتصاص حيث تم التوصل الى افضل سمك لطبقة الإمتصاص  $1.5\mu\text{m}$ ، وأصبحت كفاءة الخلية الشمسية (27.5%) وتم تغيير سمك طبقة السطح الخلفي بعد تثبيت سمك طبقة الإمتصاص عند  $1.5\mu\text{m}$  وتبين إنه لم يكن هناك تغيير في سمك طبقة السطح الخلفي، وكانت نتائج الخلية النهائية  
 $[V_{oc}=1.1 \text{ (v)}, J_{sc}=36 \text{ (mA/cm}^2\text{)}, FF=62\%, \eta=27\%]$

#### 7- المصادر

- زي.إم.إس، (1990) "نبائط أشباه الموصلات فيزياء وتقنية" ترجمة: الدكتور فهد غالب حياتي والدكتور حسين علي احمد، دار الحكمة للطباعة والنشر، جامعة الموصل.
- عدنان، (2021) "دراسة تأثير تغيير طبقات مختلفة على أداء الخلية الشمسية CdTe باستخدام برنامج المحاكاة SCAPS-1D " رسالة ماجستير، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل.

## Reference

- 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- 120
- CH. Huang, Effects of Ga content on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells studied by numerical modeling studied by numerical modeling. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 2008;69 330–334.
- Contreras, M.et al (2005). "Diode Characteristics of State-of-the art ZnO/CdS/Cu(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)Se<sub>2</sub> Solar Cells". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*.209 :13 .. [DOI:/10.1002/pip.626](https://doi.org/10.1002/pip.626).
- Dadu, M., Kapoor, A., Tripathi, K.N. (2002). : Effect of operating current dependent series resistance on the fill factor of a solar cell. *Sol. Energy Mater. Sol. Cell*. 71(2), 213–218.
- G, Adam. R,( 2012) Modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software, Thesis Naval postgraduate school Monterey California.
- Gray, J. L. (2011). The physics of the solar cell. Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley and Sons.
- Heriche, H., Rouabah, Z., & Bouarissa, N. (2017). New ultra thin CIGS structure solar cells using SCAPS simulation program. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 9524-9532.
- K. L. CHOPRA, P. D. PAULSON AND V. DUTTA, Thin-Film Solar Cells: An Overview, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2004; 12:69–92, P 80. (DOI: 10.1002/pip.541).
- Marc Burgelman et al ., (2004),” Modeling Thin - film PV Devices“, *Prog. Photovoltaic*, Vol . 12 , PP.143-153.
- Ramprasad Chandrasekharan,( 2012) “ NUMERICAL MODELING OF TIN-BASED ABSORBER DEVICES FOR COST-EFFECTIVE SOLAR PHOTOVOLTAICS .” A Dissertation in Energy and Geo-Environmental Engineering,
- Solanki, C. S. (2015). Solar photovoltaics: fundamentals, technologies and applications. Phi learning pvt. Ltd..
- Scheer, R., & Schock, H. W. (2011). Chalcogenide photovoltaics: physics, technologies, and thin film devices. John Wiley & Sons.
- Uddin, M. S., Hosen, R., Sikder, S., Mamur, H., & Bhuiyan, M. R. A. (2024). Photovoltaic performance enhancement of Al/ZnO: Al/i-ZnO/CdS/CIGS/Pt solar cell using SCAPS-1D software. *Next Energy*, 2, 100080.
- Zeman, M. (2003). Introduction to photovoltaic solar energy. Delft University of Technology, 2(6).