

دراسة تأثير طبقة الإنعكاس الخلفية (BSF) المضافة للخلية الشمسية
(CdTe/CdS:O/Zn₂SnO₄/FTO) وتأثيرها على الخصائص الكهربائية (I-V) باستخدام برنامج
المحاكاة SCAPS-1D

عدنان حسن خضر
رعد أحمد رسول
جامعة الموصل كلية التربية للعلوم الصرفة قسم الفيزياء

(قدم للنشر في ١٨/٤/٢٠٢٠ ، قبل للنشر في ٦/٧/٢٠٢٠)

الملخص :

يتضمن هذا البحث دراسة الخصائص الكهربائية باستخدام برنامج المحاكاة SCAPS-1D الذي يعتمد على التحليل العددي في محاكاته للخلايا الشمسية، إذ تم الإعتماد على الخلية الشمسية المكونة من كادميوم تيلورايد (CdTe) كطبقة إمتصاص بسُمك (0.05-5.0µm) والطبقة النافذة CdS:O بسُمك (0.025µm) والطبقة الخازنة (Zn₂SnO₄) بسُمك (0.05µm) وطبقة أكسيد التوصيل الشفاف (TCO) والتي هي (FTO) بسُمك (0.1µm)، كما تم إضافة طبقة الإنعكاس الخلفية (BSF) ما بين طبقة الإتصال الخلفية المعدنية وطبقة الإمتصاص وذلك لزيادة مقدار Voc والكفاءة للخلية الشمسية لكون طبقة الإنعكاس الخلفية (BSF) تعمل على تقليل إعادة الإتحداد في جهة الإتصال الخلفية كما تُعزز الناقلات من خلال إنعكاسها نحو الوصلة الرئيسية، وتم إختيار طبقة Cu₂Te كطبقة إنعكاس خلفية (BSF) وبسُمك (1.0µm)، وكانت النتائج النهائية التي تم الحصول عليها هي {η=26.33% ، Voc=0.83V, Jsc=36.90mA/cm², FF=85.55%}، كما تمت دراسة تأثير سُمك طبقة الإمتصاص ودرجة الحرارة وطاقة الفجوة على منحنى الخواص الكهربائية.

الكلمات الدالة: طبقة الإنعكاس الخلفية (BSF)، طاقة الفجوة، كفاءة الخلية الشمسية.



Study the Effect Adding Back Reflection Layer (BSF) to the Solar Cell (CdTe/CdS:O/Zn₂SnO₄/FTO) and the Effect on Electrical Properties (I-V) Using Simulation Program SCAPS-1D

Adnan Hasan KHudhur

Raad Ahmed Rasool

University of Mosul / College of Education for Pure Sciences/Department of physics

Abstract:

This research includes study the electrical properties using programming simulation SCAPS-1D, depending upon on numerical analysis from simulation of solar cells, where solar cell consisting of Cadmium Telluride (CdTe) used as absorber layer with thickness (0.05-5.0 μ m) and the window layer CdS:O with thickness (0.025 μ m) and Buffer Layer (Zn₂SnO₄) with thickness (0.05 μ m), (FTO) layer as transparent conductive oxide layer (TCO) with thickness (0.1 μ m), and added background reflection layer (BSF) which placed between metal back contact layer and the absorption layer in order to increase the amount of Voc and the efficiency of the solar cell because the background reflection layer (BSF) works to reduce recombination in the back contact, and the carriers are strengthened by reversing it towards the main link. With a thickness of (1.0 μ m), the results obtained were {Voc=0.83V, Jsc=36.90mA/cm², FF=85.55%, η = 26.33%}. The thickness of the absorption layer has been studied and the effect of temperatures and bandgap energies was studied.

Key Words: Back Reflection Layer (BSF), Gap Energy, Solar Cell Efficiency.

المقدمة

تُعتبر الخلايا الشمسية من أهم الابتكارات التي ظهرت في العصر الحديث والتي تمكن الإنسان بفضلها من تأمين جزءاً لا بأس به من احتياجاته اليومية للطاقة، وهي عبارة عن نبائط ضوئية تعمل على تحويل الإشعاع الكهرومغناطيسي (الضوء) القادم من الشمس إلى طاقة كهربائية قابلة للإستعمال [1]، كما يُستفاد منها في التطبيقات الأرضية والفضائية، فالخلايا الشمسية تقوم بتجهيز القدرة للتوابع الأرضية لفترة طويلة، كما تُعد بديلاً محتملاً قوياً لمصادر الطاقة للإستخدامات الأرضية، لأنها تستطيع أن تحوّل الطاقة الشمسية مباشرة الى طاقة كهربائية بكفاءة تحويل جيدة وكذلك بإستطاعتها تجهيز قدرة تكاد تكون دائمية بتكاليف تشغيل وإطئة كما أنها لا تسبب التلوث [2]. ظهرت تقنية الأغشية الرقيقة متعددة الكريستالات في العقود الأخيرة ودخلت في المنافسة المباشرة مع السليكون متعدد البلورات، الذي لا يزال يهيمن على سوق الطاقة الكهروضوئية، تعتبر الخلايا الشمسية القائمة على CdTe هي أكثر مرشح واعد لتحويل الطاقة الكهروضوئية بسبب الإمكانيات العالية لتحقيق تكلفة منخفضة وبكفاءة عالية واستقرار أكثر من بين الخلايا الشمسية [3]. والكادميوم تيلورايد CdTe وهو مركب من أشباه الموصلات يقع ضمن الجدول الدوري (VI - II) مع فجوة طاقة مباشرة تبلغ (1.5V)، والتي تتوافق تقريباً بشكل مثالي مع الطيف الشمسي لتحويل الطاقة الكهروضوئية، إذ يحتوي على معامل إمتصاص كبير أكبر من $(5 \times 10^5 \text{ cm}^{-1})$ وهذا يعني أن (99%) من الفوتونات ذات الطاقة الأكبر من فجوة النطاق يمكن إمتصاصها ضمن سُمك (2µm) [4]. وحققت خلايا كادميوم تيلورايد عملياً كفاءة بنسبة (16.5%) في المختبرات بينما بلغت كفاءتها في الوحدات التجارية (11%) حيث يتم تصنيع الكادميوم تيلورايد (CdTe) بإستخدام مجموعة متنوعة من التقنيات منخفضة التكلفة مثل تسامي الفضاء القريب ClosedSpaceSublimation(CSS) وترسيب البخار الكيميائي Chemical Vapor deposition(CVD) وترسيب الحمام الكيميائي Chemical bath deposition (CBD) [3]، وأصبحت خلايا كادميوم تيلورايد CdTe أكثر جاذبية للباحثين والإعلانات التجارية بما تمتاز من إنخفاض في تكلفة الإنتاج والكفاءة العالية وفجوة نطاق المباشرة والذي يتوافق جيداً مع أطيايف ضوء الشمس وكفاءة إمتصاص مثالية [8].

ومع كل ما دُكر فإن إستقرار الخلايا الشمسية المُعتمدة على الكادميوم تيلورايد CdTe كطبقة إمتصاص تعاني من مشكلة الإتصال الخلفي غير الأومي، ولتحسين الإستقرار يجب التركيز أولاً على إيجاد جهات إتصال مستقرة دون التضحية بالكفاءة وللتقليل من إعادة الإلتحام عند التلامس الخلفي للخلية تم إضافة طبقة الإنعكاس الخلفي (BSF)

مابين طبقة الإمتصاص والطبقة الإتصال المعدنية الخلفية [5], يتمثل الدور الرئيسي لهذه الطبقة في تقليل احتمالية إعادة الإتحاد في جهة الإتصال الخلفية ويمكن أن تُساهم أيضاً في زيادة Voc وكفاءة الخلية الشمسية كذلك في تعزيز الناقلات من خلال عكسها نحو الوصلة الرئيسية [6]. كما تعمل أيضاً على تحسين الكفاءة مع السُمك الأمثل لطبقة الإمتصاص وبذلك يقل تكلفة إنتاج الخلية الشمسية حيث كلما يقل سُمك الطبقة الماصة CdTe كلما تُقل تكلفة الخلية الشمسية. كما توفر إستخدام طبقة الـ BSF الإستقرار عند درجات الحرارة المرتفعة مقارنة بالخلايا الشمسية التقليدية [7]. تمت محاكاة الخلايا الشمسية في هذا البحث إعتماًداً على برنامج المحاكاة (SCAPS) solar cell capacitance simulator هذا البرنامج أحادي البعد صُمم في قسم الإلكترونيات ونظم المعلومات (ELIS) التابع لجامعة Gent في بلجيكا [13], إذ تم تطوير البرنامج الأصلي لهياكل لعائلة المجموعة CdTe والمجموعة $CuInSe_2$, والتطورات الأخيرة على البرنامج جعلته ينطبق على الخلايا الشمسية البلورية مثل (GaAs,Si) والغير البلورية, البرنامج متاح مجاناً لمجتمع البحوث الكهروضوئية (الجامعات ومعاهد البحوث) [9].

قام الباحثون بإضافة طبقة الإنعكاس الخلفية (BSF) للخلايا الشمسية المتكونة من ثلاث طبقات (الإمتصاص والنافذة وطبقة أكسيد التوصيل الشفاف) ودراسة تأثير إضافة هذه الطبقة على منحنى الخواص الكهربائية ($I-V$), إذ قام الباحث (Teyou et al., 2015) وبإستعمال البرنامج الحاسوبي SCAPS-1D في التحقق من الخلايا الشمسية المستندة الى CdTe للحصول على كفاءة عالية, حيث قام الباحث بتعديل بنية الخلية CdTe/CdS/SnO₂ وذلك بإضافة طبقة ستانات الخارصين ZTO بين الطبقة النافذة وطبقة التوصيل الأمامي, وإستبدال طبقة CdS ذات فجوة الطاقة (2.42eV) بمادة أكسيد كبريتيد الكاديوم SdS:O ذات فجوة الطاقة (3.17eV) ودرس الكفاءة الكمية (QE) وخصائص المنحنى ($I-V$) للخلية وتأثير سُمك الطبقة النافذة على أداء الخلية وحصل على الكفاءة للخلية المُعتمدة Glass/SnO₂/ZTO/CdS:O/CdTe_{1-x}S_x/CdTe/Ni كانت النتائج المستحصلة منها هي كما يلي:
{Voc=0.883V, Jsc=24.21mA/cm², FF=80.41%, η=17.30%}

أضاف Teyou طبقة عاكس السطح الخلفي (BSR) ودرس تأثيرها على أداء الخلية الشمسية وذلك بإستعمال ZnTe كطبقة (BSR), إذ لاحظ زيادة في معاملات الإخراج للخلية الشمسية وكما يأتي:
{Voc=1.07V, Jsc=25.86mA/cm², FF=77%, η=21.59%}

كما قام الباحث (Dey et al., 2015) بدراسة أداء خلية CdTe فائقة الرقة بإستخدام محاكي AMPS ودراسة منحنى الخصائص الكهربائية ($I-V$), ووجد أن سُمك (1μm) لطبقة الإمتصاص CdTe يمكن أن تعطي كفاءة

مقبولة، بإضافة طبقة الإنعكاس الخلفي (BSF) التي تعمل على التقليل من الخسائر في إعادة التركيب عند التلامس الخلفي، إذ كانت النتائج التي حصل عليها الباحث بإستخدام الخلية (CdTe/CdS/SnO₂) هي الآتي:

{Voc=1.02V, Jsc=21.47mA/cm², FF=85%, η=18.68%} قبل إضافة طبقة (BSF), لكن بعد إدخال من طبقة (ZnTe) وبسُمك (100nm) للخلية الشمسية التقليدية كطبقة (BSF) مع تقليل سُمك (CdTe) طبقة الإمتصاص إلى (0.8μm) أصبحت النتائج التي حصل عليها الباحث هي الآتي:

{Voc=1.06V, Jsc=24.28mA/cm², FF=87%, η=22.58%}, كما وجد الباحث أنه عند التحليل الحراري للخلية الشمسية المقترحة أن وجود طبقة الإنعكاس الخلفي (BSF) تكون الخلية أكثر ثباتاً.

أما في بحثنا هذا فقد تم الإعتماد على الخلية الأساس (CdTe/CdS:O/Zn₂SnO₄/FTO) مع إضافة طبقة Cu₂Te كطبقة (BSF) إلى الخلية الأساس ما بين طبقة الإتصال الخلفي المعدنية وطبقة الإمتصاص, فقد عملت هذه الطبقة على تقليل إعادة الإتحاد في جهة الإتصال الخلفي.

من أشهر طبقات الإتصال الخلفي (BSF) هي كلا من (Cu₂Te) و (CdTe) و P⁺ (ZnTe) والتي لها فجوة واسعة نسبياً, بعد إضافة (1μm) من طبقة (Cu₂Te) الى الخلية تم دراسة تغير سُمك طبقة (CdTe) وقد وجد أن أفضل كفاءة يتم الحصول عليها عند السُمك (0.25μm), وكانت النتائج التي تم الحصول عليها كالتالي:

{Voc=0.83V, Jsc=36.90mA/cm², FF=85.55%, η=26.33%}.

المواد وطرق البحث

يعتبر SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator) هو أحد برامج محاكاة الخلايا الشمسية أحادية البعد الذي صُمم في بلجيكا في جامعة (Gent), إذ ساهمت النماذج العددية بشكل فعال في تصميم أنواع الخلايا الشمسية, تم الحصول على الحلول والنمذجة العددية عن طريق تقديم فرضيات عملية والذي يُستخدم في التحليل العددي, ويستخدم هذه الحلول للحصول على التفاصيل العملية لخلايا الطاقة الشمسية وبشكل نظري, ويمكن من خلال المحاكى دراسة الخلايا الشمسية تحت ظروف يتم تحديدها من قبل الباحث [13], يسمح هذا البرنامج للمستخدم من وصف خلية شمسية مكونة من سبع طبقات كحد أقصى, وبإمكانه حل معادلات أشباه الموصلات مثل

معادلة الإستمرارية Continuity Equation ومعادلة بوايسون Poisson's equation ويستخدم طريقة نيوتن-رافسون وكثافة الموجة الحاملة (الإلكترونات والفجوات) ومن ضمنها معادلتى الإنجراف والانتشار , وهذه المعادلات هي على النحو التالي:

$$J_n = q\mu_n nE + qDn \frac{dn}{dx} = q\mu_n \left(nE + \frac{KT}{q} \frac{dn}{dx} \right) = nn \frac{dEFn}{dx} \dots \dots \dots (1)$$

$$J_p = q\mu_p PE + qDp \frac{dp}{dx} = q\mu_p \left(PE + \frac{KT}{q} \frac{dp}{dx} \right) = \mu_p P \frac{dEFp}{dx} \dots \dots \dots (2)$$

حيث E - تمثل المجال الكهربائي Electric Field.

μ_n, μ_p - التحركية نسبة للإلكترونات والفجوات على التوالي The Ability of Electron's and Hole's

J_n, J_p - تمثل كثافة التيار نسبة للإلكترونات والفجوات على التوالي The Electron's and Hole's current density

D_n, D_p - تمثل معامل الانتشار للإلكترونات والفجوات على التوالي Diffusion Coefficient for Electron's and Hole's

ومعادلة الإستمرارية نسبة للإلكترونات هي:

$$\frac{\partial n(x)}{\partial t} = G_n(x) - R_n(x) \dots \dots \dots (3)$$

حيث $G_n(x)$ - تمثل عملية التولد للإلكترونات Generation Process of Electron's

$-R_n(x)$ - تمثل معدل إعادة التركيب ومعادلة الإستمرارية نسبة للفجوات:

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = G_p(x) - R_p(x) \dots \dots \dots (4)$$

حيث $G_p(x)$ - تمثل عملية تولد الفجوات Generation Process of Hole's

$-R_p(x)$ - تمثل معدل إعادة التركيب Mean Recombination

أما معادلة بوايسون poisson's equation فهي تربط بين معادلة كثافة الشحنات والجهد الكهروستاتيكي

للإلكترونات (Φ), وهي تُعتبر البداية لحل النوعي للمتغيرات في الكهربائية الساكنة في أشباه الموصلات [20].

$$\frac{d \ln(E(x))}{dx} \cdot \frac{d\Phi(x)}{dx} + \frac{d^2\Phi}{dx^2} = \frac{f(x)}{\epsilon(x)} \dots \dots \dots (5)$$

وفي حالة ثبات (E) تكون معادلة poisson's equation بالصيغة الآتية:

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = -\frac{f(x)}{\epsilon} \quad \dots \dots \dots (6)$$

والتيار المار عبر الخلية الشمسية يعطى بالمعادلة:

$$I = I_o \left(ex \frac{qv}{kT} - 1 \right) \quad \dots \dots \dots (7)$$

حيث I - يمثل تيار دائرة الحمل Load Circuit Current

I_o - يمثل تيار التشبع العكسي Diode Saturation Current

T - تمثل درجة الحرارة Temperature

k - تمثل ثابت بولتزمان Boltzmann Constant

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

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \quad \dots \dots \dots (8)$$

أما عامل الملئ Fill Factor يمثل النسبة بين القدرة القصوى وأقصى فولتية وكثافة تيار يمكن أن تولده الخلية الشمسية [13] ويمكن حسابه من العلاقة الآتية:

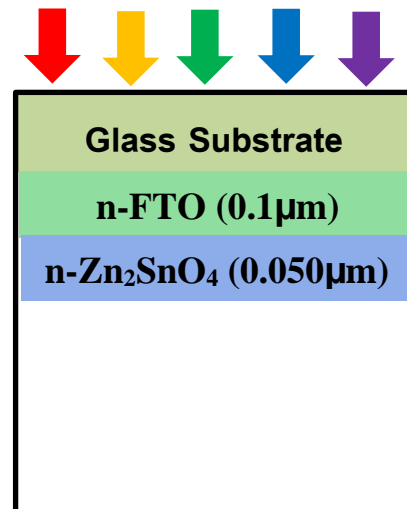
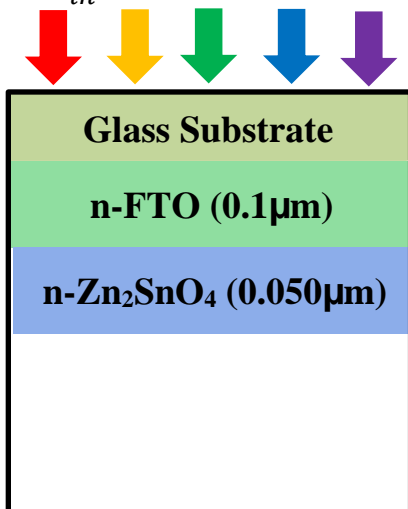
$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad \dots \dots \dots (9)$$

وكفاءة الخلية الشمسية Efficiency تمثل النسبة بين القدرة القصوى المتولدة من الخلية الشمسية الى القدرة الساقطة عليها ويمكن حسابها من العلاقة التالية:

$$\eta = \frac{OutPut Power(P_{out})}{InPut Power(P_{in})} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (10)$$

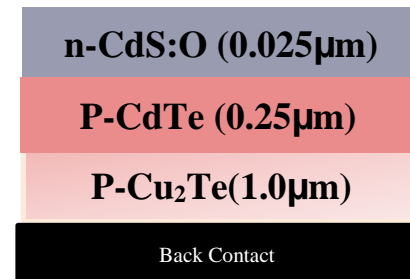
كما يمكن كتابة معادلة كفاءة الخلية بالشكل التالي:

$$\eta = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (11)$$





الشكل (1-a)



الشكل (1-b)

الشكل (1) :- (a) هيكل لخلية التقليدية (P-CdTe/n-CdS/n-Zn₂SnO₄/n-SnO₄)

(b) هيكل الخلية المعدلة (P-Cu₂Te/P-CdTe/n-CdS:O/n-Zn₂SnO₄/n-FTO)

الخلية الشمسية المتكونة من أربع طبقات الإمتصاص (CdTe) والنافذة (CdS:O) والخازنة (BL) (Zn₂SnO₄) وطبقة أكسيد التوصيل الشفاف (FTO) الموضحة في الشكل (1-a), أعتمدت كخلية أساسية في هذا البحث, كانت نتائج منحنى الخصائص الكهريائية (I-V) التي تم الحصول عليها كالآتي: {Voc=0.84V, Jsc=28.55mA/cm², FF=78.82%, η=19.11%}. لتحسين أداء الخلية الشمسية المعتمدة كخلية أساس في هذا البحث تم إضافة طبقة (Cu₂Te) كطبقة إنعكاس خلفي (BSF) مابين طبقة الإتصال الخلفية المعدنية وطبقة الإمتصاص, والتي تعمل على تقليل إعادة الإلتحام عند التلامس الخلفي للخلية [6], كما تعمل على زيادة كفاءة الخلية الشمسية (η) Efficiency, مع نقصان في سُمك طبقة الإمتصاص CdTe مما تقلل من كلفة إنتاج الخلية الشمسية, إذ تم إضافة طبقة (Cu₂Te) وبسُمك (1µm) للخلية الأساس ليصبح تركيب الخلية مكونة من خمس طبقات (P-Cu₂Te/P-CdTe/n-CdS:O/n-Zn₂SnO₄/n-FTO), وكما في الشكل (1-b) بإستخدام

Parameters	n-Cu ₂ Te (µm)[14]	p-CdTe (µm) [13]	n-CdS:O (µm)[8]	n-Zn ₂ SnO ₄ (µm) [15]	n-FTO (µm)[15]
Thickness (µm)	1	0.25-5	0.025	0.05	0.05-0.25
Band gap (ev)	1.18	1.45	2.8	3.35	4.2
Electron affinity (ev)	4.2	4.28	4.5	4.5	4.5

Dielectric permittivity (relative)	10	9.4	10	9	10
CB. effective density of states (1/cm ³)	7.800E+17	7.500E+17	2.200E+18	2.000E+18	1.200E+20
V.B. effective density of states (1/cm ³)	1.600E+19	1.800E+19	1.800E+19	1.500E+19	7.000E+20
Electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
Hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
Electron Mobility (cm ² /Vs)	500	500	100	32	20
Hole Mobility (cm ² /Vs)	100	60	25	3	100
Shallow uniform donor density , N _D (1/cm ³)	0	0	1.000E+17	1.000E+19	1.000E+19
Shallow uniform acceptor density N _A (1/cm ³)	1.000E+19	1.00E+15	0	0	0
Defect type	Single Acceptor	Single Acceptor	Single Donor	Single Donor	Single Donor
Capture Cross Section Electrons (cm ²)	1.00E-12	1.00E-12	1.00E-17	1.00E-15	1.00E-15
Capture Cross Section Hole (cm ²)	1.00E-15	1.00E-15	1.00E-15	1.00E-12	1.00E-12
Nt (1/cm ²)	1.00E+14	2.00E+14	1.00E+18	1.00E+15	1.00E+15

المعلومات المذكورة في الجدول (1) و (٢).

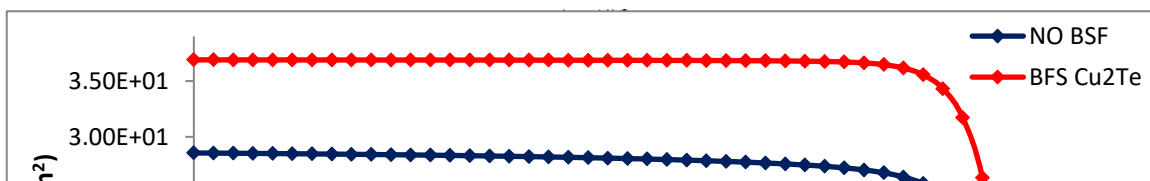
الجدول (١) :- المعلومات الأساسية لمحاكاة الخلية الشمسية CdTe/CdS:O

Parameters	n-CdS/p-CdTe	n-CdZnS/p-CdTe	n-ZnTe/p-CdTe	n-CdS:O/p-CdTe
Defect type	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
Capture Cross Section Electrons (cm ²)	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}
Capture Cross Section Hole (cm ²)	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}
Nt (1/cm ²)	$1 \times 10^{+10}$	$1 \times 10^{+10}$	$1 \times 10^{+10}$	$1 \times 10^{+10}$

الجدول (٢) - معلمات Interface Defect States لمحاكاة الخلية الشمسية

وجد أن أفضل النتائج تم الحصول عليها عندما كان سُمك طبقة الإمتصاص ($0.25\mu\text{m}$) وكانت النتائج كما يلي: $\{J_{sc}=36.90\text{mA/cm}^2, V_{oc}=0.83\text{V}, FF=85.55\%, \eta=26.33\%\}$.

ومن خلال مقارنة خصائص المنحني ($I-V$) بالنسبة للخلية الشمسية قبل وبعد إضافة طبقة BSF وجد أن هناك ارتفاعاً واضحاً في قيمة المنحني ($I-V$) بعد إضافة طبقة BSF وكما موضح بالشكل (٢)، إذ أنها تعمل



كمصد لإرجاع الإلكترونات المتولدة إلى الوصلة p-n وتقلل من احتمالية إعادة الاتحاد في منطقة التلامس الخلفية[6].

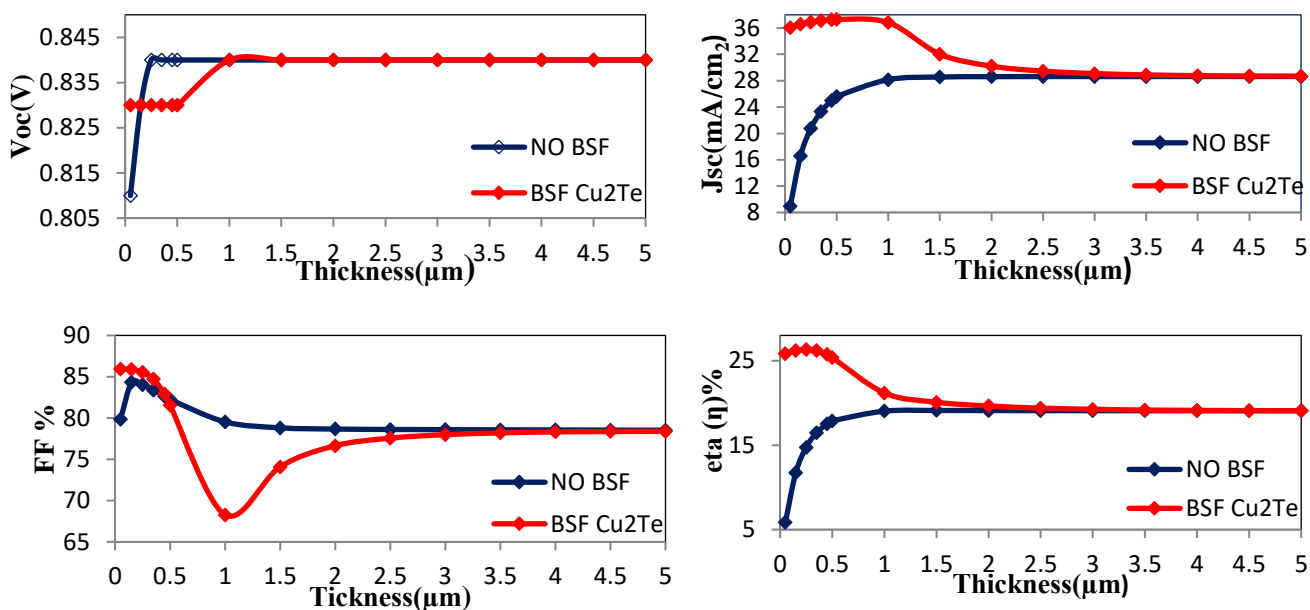
النتائج والمناقشة:

تم الاعتماد في هذا البحث على الخلية الأساس التي تتكون من أربع طبقات وهي كالتالي طبقة الإمتصاص CdTe والطبقة النافذة CdS:O والطبقة الخازنة (Zn_2SnO_4) وطبقة أكسيد التوصيل الشفاف (FTO) وكانت النتائج كالتالي: $\{V_{oc}=0.96V, J_{sc}=26.66mA/cm^2, FF=71.66\%, \eta=18.58\%\}$, وقد تم تعديل هذه الخلية وذلك بإضافة طبقة Cu_2Te كطبقة الإنعكاس الخلفية (BSF) والتي تعمل على تقليل إعادة الاتحاد في جهة الإتصال الخلفية, كما تُساهم إضافة طبقة (BSF) الى الخلية الشمسية على تقليل سُمك طبقة الإمتصاص مع زيادة كفاءة الخلية الشمسية (η) Efficiency , فتم إضافة ($1\mu m$) طبقة Cu_2Te الى الخلية مع تقليل سُمك CdTe من ($1.5\mu m$) الى ($0.25\mu m$) وإبقاء سُمك الطبقة النافذة (CdS:O) عند ($0.025\mu m$) وسُمك طبقة (Zn_2SnO_4) عند ($0.050\mu m$) وسُمك طبقة FTO عند ($0.1\mu m$), فكانت نتائج منحنى الخواص الكهربائية التي تم الحصول عليها كالتالي: $\{V_{oc}=0.83V, J_{sc}=36.90mA/cm^2, FF=85.55\%, \eta=26.33\%\}$. وبعد تثبيت طبقات الخلية الشمسية تم دراسة تأثير تغير سُمك طبقة الإمتصاص ودرجة الحرارة وفجوة الطاقة على منحنى الخواص الكهربائية وكما يلي:

a- دراسة تأثير سُمك طبقة (CdTe) على منحنى الخواص الكهربائية (I-V) بعد إضافة طبقة (BSF)

في الخلية الشمسية الأساس (p-CdTe/n-CdS:O/n-Zn₂SnO₄/n-FTO) كانت أفضل كفاءة تم الحصول عليها عندما كان سُمك طبقة الإمتصاص يساوي (1.5μm)، بينما أفضل كفاءة تم الحصول عليها بعد إضافة طبقة BSF الى الخلية الأساس عند سُمك (0.25μm) لطبقة الإمتصاص، ويعود ذلك لكون طبقة الإنعكاس الخلفية (BSF) تعمل على تقليل إعادة الإتحاد في جهة الإلتصال الخلفية كما تعزز الناقلات من خلال عكسها نحو الوصلة الرئيسية وبالتالي يساهم في زيادة الكفاءة بشكل كبير [6].

كما يوضح الشكل (3) أن فولتية الدائرة المفتوحة تكون قيمته ثابتة حتى السُمك (1μm) ومن ثم يزداد بمقدار (0.01V) وتبقى ثابتة، أما تيار دائرة القصر JSC تكون أعلى قيمة له عند سُمك (0.5μm)، بينما عامل الملئ FF يكون أقل ما يمكن عند سُمك (1μm) لطبقة الإمتصاص ويزداد مقداره كلما قل سُمك طبقة الإمتصاص أو زاد سُمكه عن (1μm).



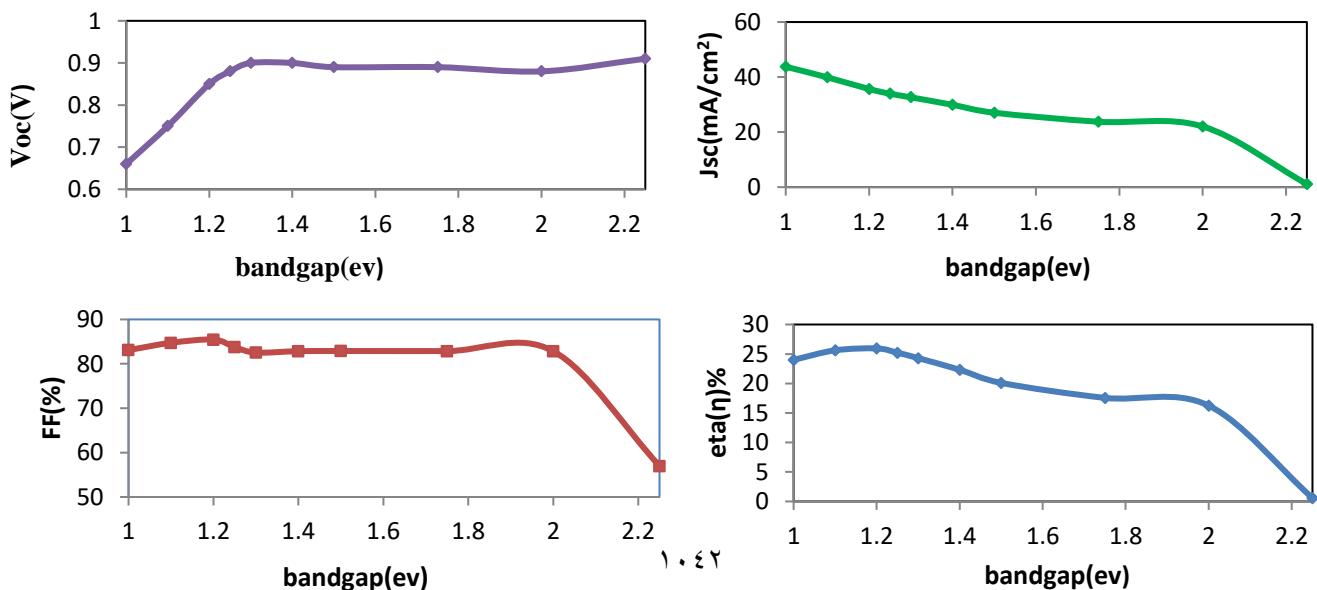
الشكل (٣):- تأثير تغير سُمك طبقة CdTe على منحنى الخواص الكهربائية (I-V) قبل وبعد إضافة طبقة BSF

b- دراسة تأثير فجوة الطاقة على منحنى الخواص الكهربائية (I-V) لطبقات الخلية الشمسية

فجوة الطاقة تمثل فرق الطاقة بين أعلى نطاق التكافؤ وأسفل نطاق التوصيل، حيث لا يمكن للألكترونات التواجد فيها، ولدراستها أهمية كبيرة في أشباه الموصلات لأن قيمتها تحدد الكثير من الخصائص البصرية والكهربائية [١٩]. ولكي يحدث عملية إمتصاص الفوتون لا بد أن تكون طاقة الفوتون أكبر من فجوة الطاقة لطبقة الإمتصاص، وعندها تنتقل الألكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل، مما يرفع طاقته الكامنة بمقدار يساوي $(E_g=qV)$ ، وبذلك يمكن الحصول على أقصى جهد ممكن للخلية الشمسية من العلاقة $V=E_g/q$ ومنها نستنتج أن مقدار فولتية الدائرة المفتوحة (VOC) يتناسب طردياً مع مقدار طاقة الفجوة [١٩]، أما بالنسبة لتيار دائرة القصر JSC فكلما يزداد مقدار فجوة الطاقة كلما يقل مقدار تيار دائرة القصر JSC ويعود سبب ذلك الى أن عملية إمتصاص الفوتون لا تحدث إلا إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من فجوة الطاقة لطبقات الخلية الشمسية [٢٠].

١- دراسة تأثير تغير فجوة الطاقة لطبقة الإنعكاس الخلفية (Cu_2Te) على منحنى الخواص الكهربائية (I-V)

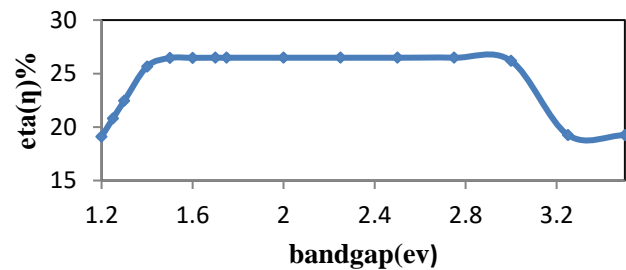
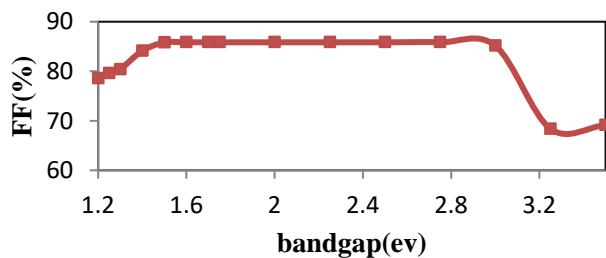
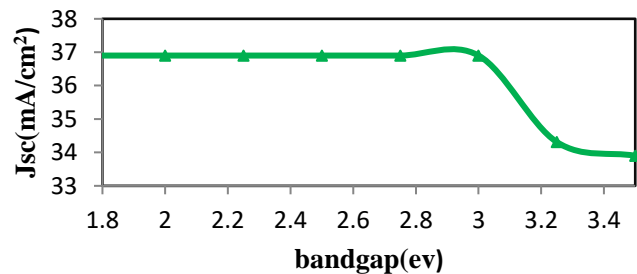
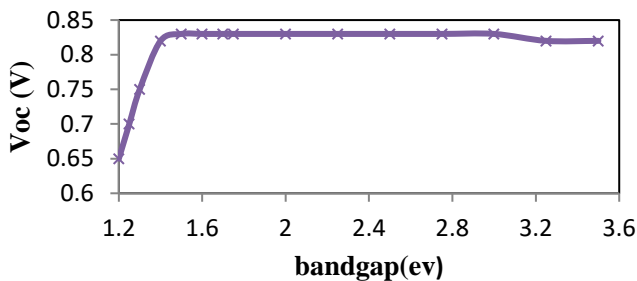
تم تغير قيم فجوة الطاقة لطبقة الإنعكاس الخلفية من (1ev) الى (2.25ev)، حيث كانت منحنى الخواص الكهربائية (I-V) كما موضح بالشكل (٤)، حيث أن فولتية الدائرة المفتوحة VOC يتناسب طردياً مع فجوة الطاقة، بينما تيار دائرة القصر JSC يتناسب عكسياً مع قيمة فجوة الطاقة، وعامل الملئ FF يبلغ قيمته العظمى عند المقدار $(E_g=1.2ev)$ ، وتبلغ كفاءة الخلية η اعلى قيمة لها عندما تكون قيمة $(E_g=1.2ev)$ وهي تمثل فجوة الطاقة لطبقة Cu_2Te والذي تم إختياره كطبقة (BSF) في هذا البحث.



الشكل (٤):- تأثير تغير فجوة الطاقة (E_g) لطبقة لإنعكاس الخلفية Cu_2Te على منحنى الخواص الكهربائية (I-V)

٢- دراسة تأثير تغير فجوة الطاقة لطبقة الإمتصاص (CdTe) على منحنى الخواص الكهربائية (I-V)

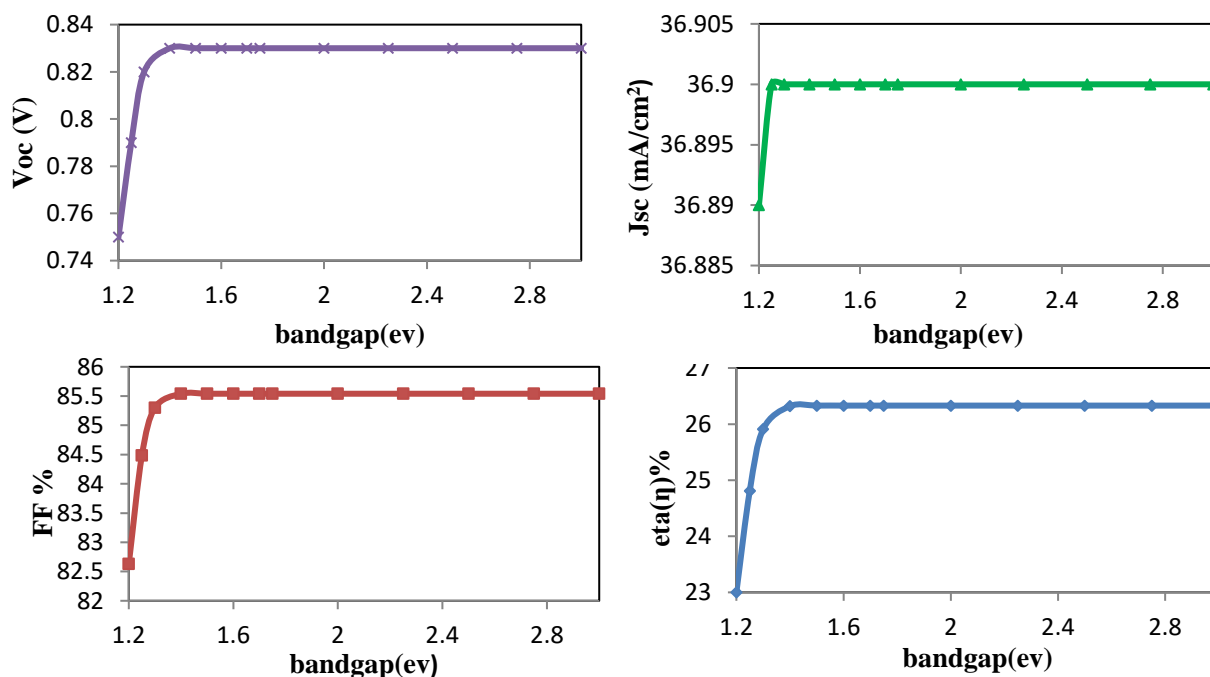
تم تغير قيم فجوة الطاقة لطبقة الإمتصاص من (1.2ev) الى (3.5ev), ويتبين من ملاحظة الشكل (٥) أن فولتية الدائرة المفتوحة Voc يتناسب طردياً مع فجوة الطاقة حتى ($E_g=1.5ev$) ومن ثم تستقر عند قيمة ثابتة, و تيار دائرة القصر Jsc يبقى ثابتاً تقريباً الى قيمة ($E_g=3.25ev$) وبعدها ينخفض قيمته, كما يبلغ قيمة عامل الملئ FF أعظم مقدار له عند المدى (2.75-1.6ev), ومقدار كفاءة الخلية η تبلغ اعلى قيمة لها ضمن مدى فجوة الطاقة (2.75-1.7ev) لطبقة الإمتصاص, بينما فجوة الطاقة لطبقة الإمتصاص CdTe المستخدمة في هذه الخلية ($E_g=1.45ev$).



الشكل (5):- تأثير تغير فجوة الطاقة (E_g) لطبقة الإمتصاص CdTe على منحنى الخواص الكهربائية (I-V)

٣- دراسة تأثير تغير فجوة الطاقة للطبقة النافذة (CdS:O) على منحنى الخواص الكهربائية (I-V)

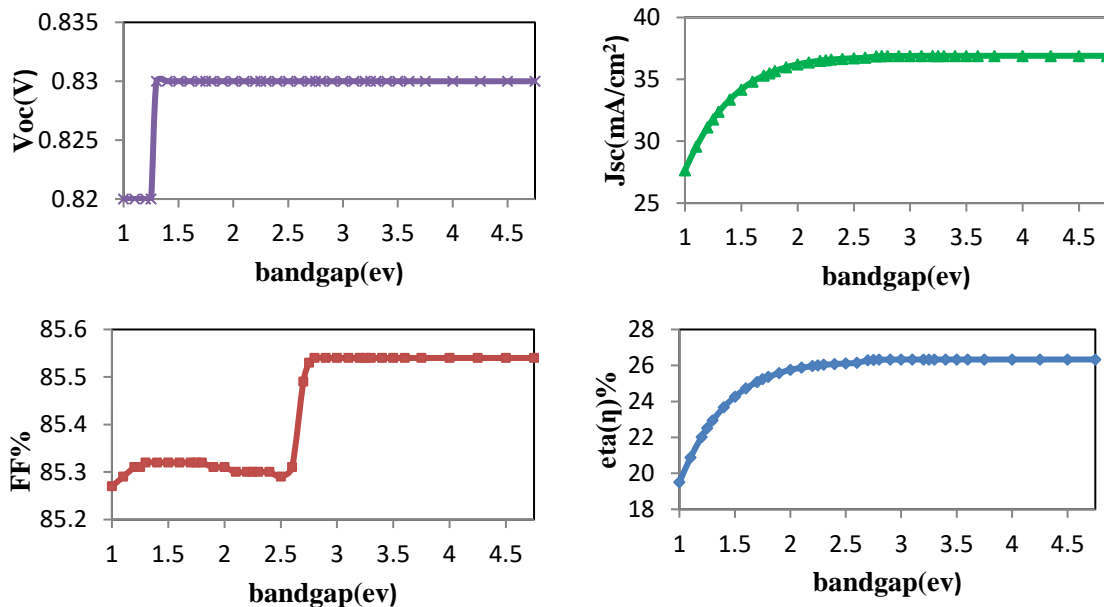
تم تغيير فجوة الطاقة للطبقة النافذة من (١.٢eV) الى (3eV)، ومن ملاحظة الشكل (٦) يتبين أن فولتية الدائرة المفتوحة Voc يتناسب طردياً مع فجوة الطاقة حتى ($E_g=1.4\text{eV}$) ومن ثم تستقر عند قيمة ثابتة، أما تيار دائرة القصر Jsc يتأثر بمقدار طفيف عند تغيير مقدار فجوة الطاقة، أما عامل الملئ FF يزداد بزيادة فجوة الطاقة الى المقدار ($E_g=1.4\text{eV}$) ويستقر بعد هذه القيمة، كما أن كفاءة الخلية η تزداد مع زيادة فجوة الطاقة الى المقدار ($E_g=1.5\text{eV}$) ومن بعدها تستقر قيمة الكفاءة عند ($\eta=26.33\%$)، ويعود ذلك لأن قيمة فجوة الطاقة لطبقة الإمتصاص تبلغ (1.45eV) ولذلك لا بد أن تكون قيمة فجوة الطاقة للطبقة النافذة أعلى منها، حيث أنه كلما ازدادت فجوة الطاقة للطبقة النافذة قل احتمالية إمتصاص الفوتونات من قبلها وبذلك تزداد كفاءة الخلية لأن الفوتونات سيتم إمتصاصها في هذه الحالة من قبل طبقة الإمتصاص، ويبلغ فجوة الطاقة للطبقة النافذة CdS:O المستخدمة في هذه الخلية ($E_g=2.80\text{eV}$).



الشكل (٦) :- تأثير تغيير فجوة الطاقة (E_g) للطبقة النافذة CdS:O على منحنى الخواص الكهربائية (I-V)

٤- دراسة تأثير تغيير فجوة الطاقة للطبقة الخازنة (Zn_2SnO_4) على منحنى الخواص الكهربائية (I-V)

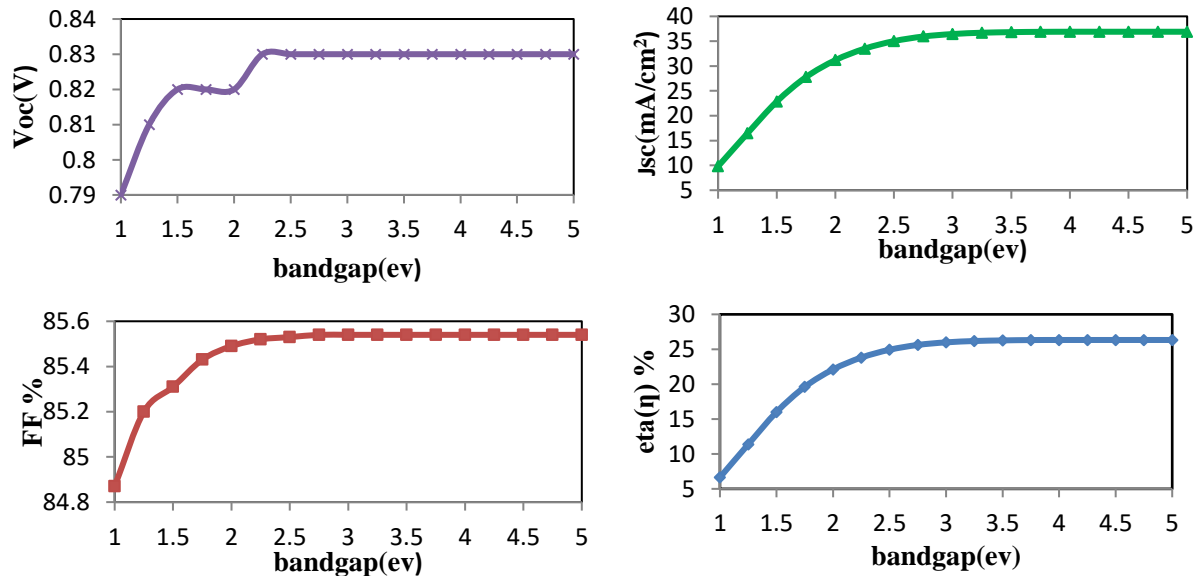
تم تغيير فجوة الطاقة للطبقة الخازنة من (١ev) الى (٤.٧٥ev)، ومن ملاحظة الشكل (٧) يتبين أن فولتية الدائرة المفتوحة Voc تزداد مع زيادة فجوة الطاقة حتى ($E_g=1.4\text{ev}$) ومن ثم تستقر عند قيمة ثابتة، أما تيار دائرة القصر Jsc يتناسب طردياً مع فجوة الطاقة الى المقدار ($E_g=3.1\text{ev}$) حيث يستقر من بعده، ويعود ذلك الى العلاقة العكسية بين تيار دائرة القصر وفجوة الطاقة، حيث كلما قلت إمتصاصية الفوتونات في الطبقة الخازنة كلما زادت عدد الفوتونات الواصلة الى طبقة الإمتصاص، أما عامل الملئ FF يزداد بزيادة فجوة الطاقة الى المقدار ($E_g=2.8\text{ev}$) ويستقر بعد هذه القيمة، كما أن كفاءة الخلية η تزداد مع زيادة فجوة الطاقة الى المقدار ($E_g=2.8\text{ev}$) ومن بعدها تستقر قيمة الكفاءة عند ($\eta=26.33\%$)، ويعود ذلك لأن قيمة فجوة الطاقة للطبقة النافذة تبلغ (2.8ev)، وبما أن الطبقة الخازنة تقع أمام الطبقة النافذة فهذا يعني أنه عندما تكون طاقة الفجوة للطبقة الخازنة أقل من طاقة الفجوة للطبقة النافذة فإن بعض الفوتونات سيتم إمتصاصها من قبل الطبقة الخازنة وبذلك تقل كفاءة الخلية.



الشكل (٧) :- تأثير تغيير فجوة الطاقة (E_g) للطبقة الخازنة Zn_2SnO_4 على منحنى الخواص الكهروإتائية (I-V)

٥- دراسة تأثير تغير فجوة الطاقة لطبقة أكسيد التوصيل الشفاف (FTO) على منحنى الخواص الكهربائية (I-V)

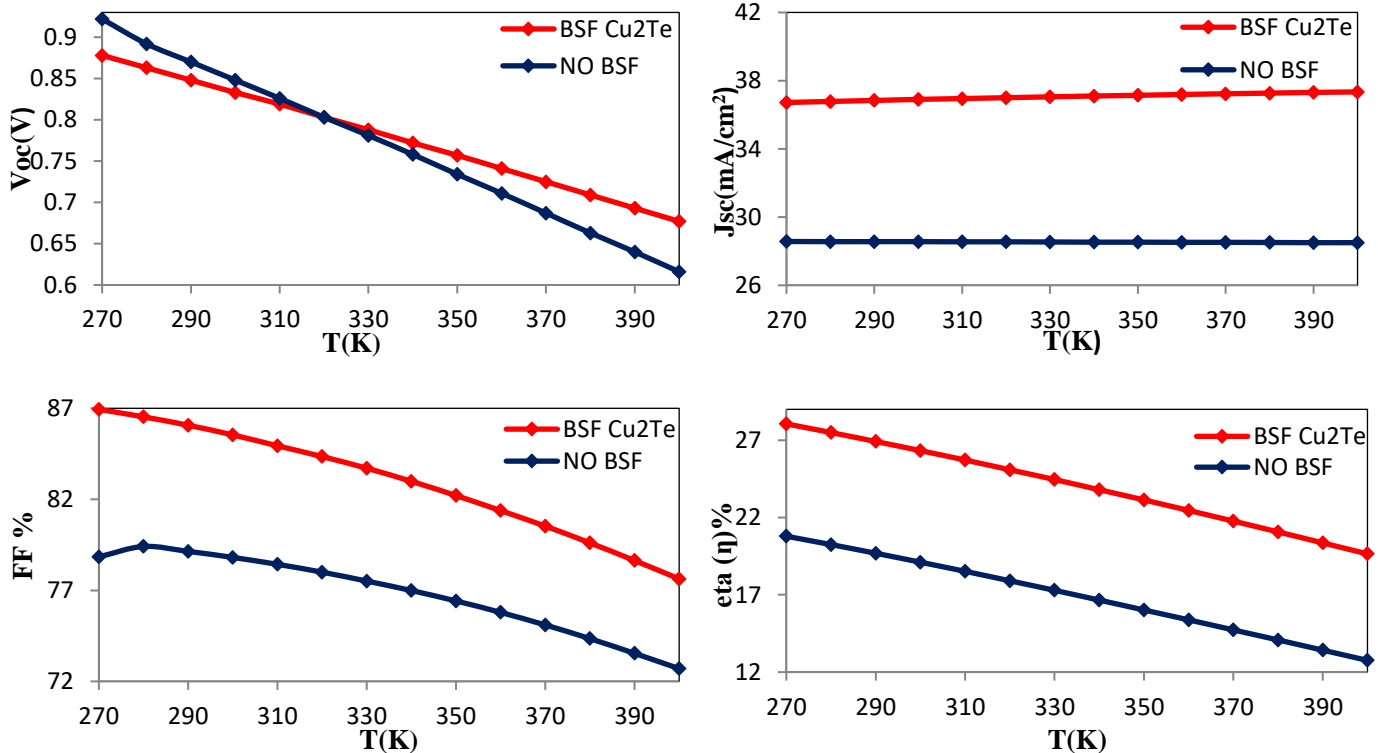
تم تغير فجوة الطاقة للطبقة الخازنة من (١ev) الى (٥ev)، من ملاحظة الشكل (٨) يتبين أن فولتية الدائرة المفتوحة Voc تزداد مع زيادة فجوة الطاقة حتى ($E_g=2.25\text{ev}$) ومن ثم تستقر عند قيمة ثابتة، أما تيار دائرة القصر Jsc يتناسب طردياً مع فجوة الطاقة الى المقدار ($E_g=4\text{ev}$) حيث يستقر من بعده، وسبب ذلك هو أن جميع الفوتونات الساقطة تقريباً تنفذ من خلال طبقة FTO بعد ($E_g=4\text{ev}$)، أما عامل الملئ FF يزداد بزيادة فجوة الطاقة الى المقدار ($E_g=2.75\text{ev}$) ويستقر بعد هذه القيمة، كما أن كفاءة الخلية η تزداد مع زيادة فجوة الطاقة الى المقدار ($E_g=4\text{ev}$) ومن بعدها تستقر قيمة الكفاءة عند ($\eta=26.33\%$)، وذلك لأن جميع الفوتونات الساقطة سوف تنفذ من طبقة (FTO) وتصل الى طبقة الإمتصاص.



الشكل (٨):-- تأثير تغير فجوة الطاقة (E_g) لطبقة أكسيد التوصيل الشفاف FTO على منحنى الخواص

c- دراسة تأثير تغير درجة الحرارة على منحنى الخواص الكهربائية (I-V) للخلية الشمسية

بعد إضافة طبقة Cu_2Te الى الخلية الشمسية الأساس وتثبيت سماك طبقات الخلية المعتمدة كالتالي: $\{ (Cu_2Te=1\mu m) \text{ و } (CdTe=0.25\mu m) \text{ و } (CdS:O=0.025\mu m) \}$ و $(Zn_2SnO_4=0.050\mu m) \text{ و } (FTO=0.1\mu m)$, تم دراسة تأثير تغير درجة الحرارة على منحنى الخواص الكهربائية (I-V) المتمثلة بفولتية دائرة المفتوحة V_{oc} , و تيار دائرة القصر J_{sc} , وعامل الملئ FF , وكفاءة الخلية الشمسية η , وتم تغير درجة الحرارة من (270K) الى (400K) وبواقع تغير درجة 10K عند كل قراءة, تحت الأشعة الشمسية AM1.5G.



الشكل (٩) :- مقارنة بين تأثير درجة الحرارة على منحنى الخواص الكهربائية (I-V) للخلية الشمسية قبل وبعد إضافة طبقة BSF

من ملاحظة الشكل (٩) يتبين أن فولتية دائرة المفتوحة Voc يتناسب عكسياً مع درجة الحرارة في الحالتين قبل وبعد إضافة طبقة (BSF), لأن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى زيادة حاملات الأقلية مما يؤدي إزدياد قيمة تيار التشبع ونقصان قيمة فجوة الطاقة المحظورة [17], إلا أن النقصان في الفولتية تكون أقل بعد الإضافة حيث يبلغ مقدار $Voc=0.87V$ عند درجة حرارة $T=270K$ وعند درجة حرارة $T=400K$ يبلغ $Voc=0.67V$, أما قبل اضافة طبقة BSF كانت تبلغ ($0.92V$) عند ($T=270K$) و (0.67) عندما تكون ($T=400K$).

أما تيار دائرة القصر Jsc يزداد مع درجة الحرارة ولكن زيادة طفيفة بعد إضافة طبقة BSF, ويعود ذلك الى سبب النقصان الحاصل في فجوة الطاقة نتيجة ارتفاع درجة الحرارة مما يؤدي الى زيادة إمتصاص الضوء الساقط [17]. وتبلغ $Jsc=36.7mA/cm^2$ عند درجة حرارة $T=270K$, كما تبلغ مقدار $Jsc=37.3mA/cm^2$ عند درجة الحرارة $T=400K$, في حين تبقى قيمة Jsc تقريباً ثابتاً عند ($Jsc=28.5mA/cm^2$) مع تغير درجة الحرارة من ($270K$) إلى ($400K$).

أما عامل الملئ FF يتناسب تناسباً عكسياً مع درجة الحرارة في الحالتين قبل وبعد إضافة طبقة BSF, لأن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي الى ارتفاع تيار التشبع وإنخفاض في مقدار فولتية الدائرة المفتوحة Voc مما يؤدي إلى زيادة الإتحاد عند السطح البيني [18]. حيث تبلغ قيمة عامل الملئ بعد الإضافة $FF=86.9\%$ عند درجة حرارة $T=270K$ و ($FF=77.6\%$) عند درجة حرارة ($T=400K$), بينما تبلغ قيمة عامل الملئ قبل الإضافة ($FF=79.41\%$) عند ($T=270K$) في حين يبلغ ($FF=72.7\%$) عند ($T=400K$).

كفاءة الخلية الشمسية η يتناسب أيضاً تناسباً عكسياً مع درجة الحرارة قبل وبعد إضافة طبقة BSF حيث أن ($\eta=28\%$) عند درجة حرارة ($T=270K$), بينما ($\eta=19.6\%$) عند درجة حرارة ($T=400K$) وذلك بسبب الزيادة الحاصلة في تيار التشبع العكسي والذي يؤدي إلى نقصان في فولتية الدائرة المفتوحة Voc وبالتالي تنخفض كفاءة الخلية [16], في حين تبلغ الكفاءة قبل إضافة طبقة BSF (20.79%) عند ($T=270K$) وتبلغ (12.76%) عندما ($T=400K$).

الإستنتاجات

تم الحصول على خلية شمسية رقيقة وذات كفاءة عالية، وذلك بإضافة طبقة Cu_2Te كطبقة (BSF) الى الخلية الأساس المتكونة من أربع طبقات ($p-CdTe/n-CdS:O/n-Zn_2SnO_4/n-FTO$)، حيث تم تقليل سُمك طبقة الإمتصاص، وأصبحت الخلية النهائية متكونة من خمس طبقات كما يلي ($n-Cu_2Te/p-CdTe/n-$) $CdS:O/n-Zn_2SnO_4/n-FTO$ ، وكانت سماك الطبقات بعد إضافة ($1\mu m$) من Cu_2Te الى الخلية الأساس، حيث تم تقليل سُمك $CdTe$ من ($1\mu m$) الى ($0.25\mu m$) الى مع إبقاء سُمك $CdS:O$ ($0.025\mu m$) وسُمك Zn_2SnO_4 ($0.050\mu m$) وسُمك FTO ($1\mu m$)، وكانت النتائج التي تم الحصول عليها كالتالي: $\{J_{sc}=36.90mA/cm^2, V_{oc}=0.83V, FF=85.55\%, \eta=26.33\%$. كما وجد أن فجوة الطاقة للطبقات التي تقع فوق طبقة الإمتصاص تتناسب طردياً مع كفاءة الخلية الشمسية، بينما درجة الحرارة تتناسب عكسياً مع الكفاءة.

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.
- ٢- إس .إم . زي، ترجمة الدكتور فهد غالب حياتي والدكتور حسين علي احمد ، " نبائط اشباه الموصلات فيزياء وتقنية"، دار الحكمة للطباعة والنشر، جامعة الموصل، (١٩٩٠).
- 3- Hossain, Sharafat, Nowshad Amin, M. A. Martin, M. Mannir Aliyu, Takhir Razykov, and Kamaruzzaman Sopian. "A NUMERICAL STUDY ON THE PROSPECTS OF HIGH EFFICIENCY ULTRA THIN $Zn_x Cd_{1-x} S/CdTe$ Solar Cell." *Chalcogenide Letters* 8, no. 4 (2011).
- 4- Wu, Xuanzhi. "High-efficiency polycrystalline $CdTe$ thin-film solar cells." *Solar energy* 77, no. 6 (2004): 803-814.
- 5- T. Carlsson and A. Brinkman, "Identification of degradation mechanisms in field-tested $CdTe$ modules," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 14, no. 3, pp. 213–224, 2006.
- 6- 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.
- 7- Teyou Ngoupo, A., S. Ouédraogo, F. Zougmore, and J. M. B. Ndjaka. "New architecture towards ultrathin $CdTe$ solar cells for high conversion efficiency." *International Journal of Photoenergy* 2015 (2015).
- 8- 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 (2016):1-10.
- ٩- عدنان علوان محمد، "محاكاة تأثير طبقة Ga_2O_3 على أداء الخلايا الشمسية $CdTe$ الرقيقة"، رسالة ماجستير مقدمة الى كلية التربية للعلوم الصرفة/جامعة تكريت، (٢٠١٨).
- 10- Teyou Ngoupo, A., S. Ouédraogo, F. Zougmore, and J. M. B. Ndjaka. "New architecture towards

- ultrathin CdTe solar cells for high conversion efficiency." *International Journal of Photoenergy* 2015 (2015).
- 11- Dey, Mrinmoy, Maitry Dey, M. A. Matin, and Nowshad Amin. "Design of high efficient and stable ultra-thin CdTe solar cells with ZnTe as a potential BSF." In *2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET)*, pp. 1-4. IEEE, 2015.
- 12- Rafee Mahbub, Md, et al. "Simulation of CZTS thin film solar cell for different buffer layers for high efficiency performance." *ENGINEERING AND TECHNOLOGY* 2.52 (2016): 1-10.
- ١٣- رشا فيصل حسن، "محاكاة تأثير الطبقة العازلة Zn_2SnO_4 على أداء الخلية الشمسية $CdTe/CdS/SnO_2$ باستخدام البرنامج SCAPS-1D"، رسالة ماجستير مقدمة الى جامعة الموصل/ كلية التربية للعلوم الصرفة، (٢٠٢٠).
- 14- Matin, M. A., and Mrinmoy Dey. "High performance ultra-thin CdTe solar cell with Lead Telluride BSF." *2014 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*. IEEE, 2014.
- 15- 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 (2019): 869-881.
- 16- Abdel-baset, H. Mekky., 2019, "Simulation and modeling of the influence of temperature on CdS/CdTe thin film solar cell." (2019), *The European Physical Journal Applied Physics*, Vol. 87, No. 3, P: 30101.
- ١٧- كرين مارتين، ١٩٨٩، "الخلايا الشمسية"، ترجمة د. يوسف مولود حسن، جامعة الموصل.
- 18- Adnan Alwan Mouhammed, Ayed N. Saleh, 2019, "Simulation Effect of Ga_2O_3 Layer Thickness on CdTe Solar Cell by SCAPS-1D", *Tikrit Journal of Pure Science*, Vol. 24, No. 6.
- ١٩- حمد احمد حمد، "إيجاد فجوة الطاقة لبعض أنواع أشباه الموصلات"، رسالة ماجستير مقدمة الى جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا/كلية الدراسات العليا، (٢٠١٥).
- 20- Chetan Singh Solanki, 2013, "Solar Photovoltaic Fundamentals, Technologies and Applications", Second Edition, PHI Learning Private Limited, Delhi-110092.