

## محاكاة ومقارنة أداء $\text{SnO}_2$ و $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ و $\text{SnO}_2:\text{F}$ كغطاء مانع للانعكاس أحادي أو ثنائي الطبقة على كفاءة الخلية الشمسية السيليكونية

د. وائل محمد سامي العبد الله\*

(تاريخ الإيداع 2024/8/21 – تاريخ النشر 2024/11/7 )

### □ ملخص □

بعد الاعتماد اللافت على الطاقة الشمسية في السنوات الأخيرة ، وتطبيقاتها في الكثير من المجالات لها كطاقة بديلة موفرة وصديقة للبيئة ، بات العمل على رفع كفاءتها أمر من المهم الالتفات اليه حيث تعد تقانة الطلي بغطاء مانع للانعكاس (ARC) من أهم العوامل التي ترفع من كفاءة الخلية الشمسية من خلال تقليل فاقد الانعكاس ورفع عامل الامتصاص وتعزيز كفاءة التحويل (PCE)، حيث تختلف كفاءة الخلايا الشمسية اعتمادا على نوع مادة ARC المستخدمة وخصائصها ، قمنا في هذه الدراسة بتحليل محاكاة لخمس اقتراحات لأغطية مختلفة من الطبقات المانعة للانعكاس (ARC) من حيث الأداء لرفع كفاءة الخلية الشمسية باستخدام برنامج المحاكاة PCID، وكشفت النتائج أنه عند الطول الموجي 600 nm أبدت الأغطية المانعة للانعكاس أحادية الطبقة  $\text{SnO}_2$  و ITO و FTO أداء أفضل من الطبقات ثنائية الطبقة المستخدمة ITO/ $\text{SnO}_2$  و FTO /  $\text{SnO}_2$  من حيث الحصول على انعكاسية أقل ومن حيث زيادة كفاءة الخلية الشمسية.

كلمات مفتاحية:

ARC – FTO – ITO – كفاءة الخلية الشمسية – الانعكاسية – PCID.

\*أستاذ مساعد في قسم العلوم الأساسية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة البعث

حمص ، سوريا

Tel.: +968 92675058 E-mail addresses: [wael.abdullah@utas.edu.om](mailto:wael.abdullah@utas.edu.om); [wabdullah75@yahoo.co.uk](mailto:wabdullah75@yahoo.co.uk)

## Simulation and Comparison of performance of SnO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn (ITO) and SnO<sub>2</sub>:F (FTO) as a Mono or Double Layer Antireflection Coating on Si- solar cell efficiency

Wael ABDULLAH\*

(Received 21/8/2024.Accepted 7/11/2024 )

### □ABSTRACT □

In the last recent years with the expansion of the spread of solar energy, and its application in many fields, and the trend of consumers towards it as energy saving and environmentally friendly, working to raise its efficiency is something that has become important to pay attention to, and the Anti-Reflection Coating (ARC) is one of the most important factors that raise the efficiency of the solar cell from by reducing reflection losses, raising the absorption factor, and enhancing the Power Conversion Efficiency (PCE), the efficiency of solar cells varies depending on the type of ARC material used and its properties. Therefore, in this study, simulations of 5 different anti-reflective coating materials (ARC) were analyzed in terms of its performance to increase the cell efficiency. Using the PC1D simulation software, the results revealed that at the wavelength of 600 nm the SnO<sub>2</sub>, ITO, FTO mono layer antireflection coating show a better less reflection and more efficiency for the solar cell than the double layer ITO/SnO<sub>2</sub> and FTO/SnO<sub>2</sub>.

**Keywords:**ARC- FTO- ITO- solar cell efficiency-reflectance - PC1D.

---

\*Department of Basic Science, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, University of Al-Baath, Homs, Syria.

Tel.: +968 92675058 E-mail addresses: [wael.abdullah@utas.edu.om](mailto:wael.abdullah@utas.edu.om);  
[wabdullah75@yahoo.co.uk](mailto:wabdullah75@yahoo.co.uk)

## المقدمة :

مع ازدياد حدة تأثير التغيرات المناخية على العالم وظاهرة الاحتباس الحراري أصبح البحث عن مصادر الطاقة الآمنة حلاً ضرورياً يشغل كل باحث مهتم بحماية كوكب الأرض وتحقيق الاستدامة، تعد الطاقة الكهروضوئية من أكثر الطاقات التي تلعب دوراً مهماً في تحقيق الاستدامة فهي تتمتع بمزايا عديدة منها الانتشار الواسع والصداقة البيئية وبهذا يمكن اعتبارها من أكثر الحلول المجدية لتحقيق الاستدامة البيئية .

هناك تقانات عديدة لتوليد وتخزين الطاقة الكهروضوئية ولعل من أبرزها الخلايا الشمسية وفيها يتم استخدام التأثير الكهروضوئي حيث يتم امتصاص الفوتون الذي طاقته تطابق فجوة الطاقة للمادة نصف الناقل المستخدمة وتحريره إلكترون. في عام 1883 طور تشارلز فرينل أول خلية شمسية عن طريق طلاء السيلينيوم بطبقة رقيقة من الذهب. حققت كفاءة 1-2 %، في وقت لاحق في عام 1954 حققت خلية شمسية بلورية واحدة من السيليكون أظهرتها مختبرات بيل كفاءة بنسبة 6% [1] ، منذ ذلك الحين حققت الخلايا الشمسية التجارية كفاءة تتراوح بين 15 و 20%، وأصبحت الخلايا الشمسية شائعة جداً للاستخدام في الصناعات وحتى في المنازل.

من أهم التحديات في مجال الخلايا الشمسية والتي تحتاج إلى معالجة هو التعامل مع الضوء الساقط المنعكس جزئياً، والذي يمكن أن يؤثر سلباً على كفاءتها. عندما يسقط الضوء على وسط فاصل بين مادتين، فإن جزءاً من الطاقة سوف ينكسر بينما ينعكس الجزء الآخر، ومع زيادة الاختلاف في معاملات الانكسار بين المواد يزداد الانعكاس إلى قيم مرتفعة، يمكن حساب شدة الانعكاس باستخدام معادلات فرينل، فعلى سبيل المثال في حالة سطح هواء مع سيليكون، يمكن أن ينعكس 35% من الضوء [6] ، يمكن استخدام طرق مختلفة لمعالجة هذه المشكلة لتقليل الانعكاسات منها الطريقة المستخدمة في بحثنا وهي طلاء السطح بطبقة مانعة للانعكاس (ARC). تتكون الطبقة المانعة للانعكاس من طبقة رقيقة واحدة من مادة شفافة تمتلك معامل انكسار يساوي الجذر التربيعي لجداء معامل انكسار الركيزة مع معامل انكسار الوسط المحيط، من خلال تقليل تباين معامل الانكسار بين الوسائط يتم تقليل الانعكاس.

يمكن الحصول على الطبقة المانعة للانعكاس باستخدام مجموعة متنوعة من المواد مثل جسيمات السيليكا النانوية المسامية على ركيزة البوليمر، الزركون وأكاسيده، وفلوريد المغنيسيوم، بعض أكاسيد المعادن كما يمكن أن تكون طبقة الغطاء وحيدة أو من طبقتين بنفس السماكة البصرية أو بأعداد صحيحة منها [9].

وفي هذا البحث سيتم عمل مقارنة بين أفلام رقيقة أحادية وثنائية الطبقة وفق التركيب المقترح الآتي

- 1-  $\text{SnO}_2/\text{Si}$
- 2-  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn} (\text{ITO}) / \text{Si}$
- 3-  $\text{SnO}_2:\text{F} (\text{FTO}) / \text{Si}$
- 4-  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn} (\text{ITO}) / \text{SnO}_2/\text{Si}$
- 5-  $\text{SnO}_2:\text{F} (\text{FTO}) / \text{SnO}_2/\text{Si}$

ولذلك تم اختيار هذه المواد وتحديد مواصفاتها اعتماداً على اختيار طول الموجة 600 nm أساسياً

في كل الحسابات اللاحقة وفق الجدول التالي:

#	المادة المطلوبة	قرينة الانكسار	السماكة البصرية nm	المرجع
1	SnO <sub>2</sub>	2.4	62.5	[12]
2	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Sn ( ITO )	1.858	80.73	Sopra Material Database
3	SnO <sub>2</sub> : F ( FTO )8%	2	75	[10][11][13]

تمت المقارنة من حيث دراسة طيف الإنعكاسية تحديد قيمة مردود الخلية الشمسية من خلال برنامج المحاكاة الافتراضي بواسطة موقع [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org).

يملك السيلكون المستخدم في الخلايا الشمسية انعكاساً سطحياً مرتفعاً يزيد عن 30% ولتقليل الانعكاس تستخدم طريقة ترسيب فيلم رقيق مانع للانعكاس (ARC) ، ولحساب الإنعكاسية عند طبقة واحدة تطبق المعادلة الآتية [1]:

$$R = |r^2| = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2\cos 2\theta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2\cos 2\theta} \quad (1)$$

حيث :

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_s}{n_1 + n_s}$$

$$\theta = \frac{2\pi n_1 t_1}{\lambda}$$

لتحديد الانعكاسية تقوم بتحديد كل من البارامترات التالية  $r_1$  و  $r_2$  و  $\theta$  حيث أن المنطقة المحيطة بالفيلم الرقيق تمتلك معامل انكسار خاص بها ويساوي  $n_0$  والفيلم الرقيق المانع للانعكاس المدروس ARC له معامل انكسار قدره  $n_1$  وسماكة قدرها  $t_1$  بينما يشير  $n_s$  إلى معامل الانكسار الخاص بالسيليكون (الخلية الشمسية المدروسة).

أما بالنسبة للإنعكاسية لطبقتين فتحسب بالمعادلة التالية [1]:

$$R = |r^2| = \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_1^2r_2^2r_3^2 + 2r_1r_2(1 + r_3^2)\cos 2\theta_1 + 2r_2r_3(1 + r_1^2)\cos 2\theta_2 + 2r_1r_3\cos 2(\theta_1 + \theta_2) + 2r_1r_2^2r_3\cos 2(\theta_1 - \theta_2)}{1 + r_1^2r_2^2 + r_1^2r_3^2 + r_2^2r_3^2 + 2r_1r_2(1 + r_3^2)\cos 2\theta_1 + 2r_2r_3(1 + r_1^2)\cos 2\theta_2 + 2r_1r_3\cos 2(\theta_1 + \theta_2) + 2r_1r_2^2r_3\cos 2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2)$$

حيث :

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

$$r_3 = \frac{n_2 - n_s}{n_2 + n_s}$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi n_1 t_1}{\lambda}$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi n_2 t_2}{\lambda}$$

تعتبر المعادلات الخاصة بالطبقات المتعددة المانعة للانعكاس أكثر تعقيداً من تلك الخاصة بالطبقة الواحدة ، أولاً نحدد سلسلة من البارامترات  $r_1$  و  $r_2$  و  $r_3$  و  $\theta_1$  و  $\theta_2$  المنطقة المحيطة بها معامل انكسار  $n_0$  ، والطبقة التالية لها معامل انكسار  $n_1$  وسماكة  $t_1$  ، والطبقة التي تقع مباشرة فوق السيليكون لها معامل انكسار  $n_2$  وسماكتها  $t_2$  والسيليكون لديه معامل انكسار  $n_s$  .

تشبه الطلاءات المستخدمة في الخلايا الشمسية تلك المطبقة في المعدات البصرية المختلفة مثل عدسات الكاميرا ، وتتم هذه التغطية بسماكة معينة يعتمد على المعادلة (3) بحيث تؤدي هذه السماكة إلى تأثيرات على التداخل في الطلاء إلى الحصول على موجة منعكسة من السطح العلوي للغطاء المانع للإنعكاس على تعاكس في الطور مع الموجة المنعكسة من أسطح أنصاف النواقل المكونة للخلايا الشمسية حيث تتداخل هاتان الموجتان تداخلاً هداماً مما يؤدي إلى طاقة كلية منعكسة صفرية [5].

يتم تحديد السماكة البصرية للفيلم الرقيق والتي ستعطي أدنى انعكاس للطبقة المانعة للانعكاس وفق

العلاقة (3)

$$d = \frac{\lambda_0}{4 n_1} \quad (3)$$

$$n_s = \sqrt{n_0 n_1} \quad (4)$$

أما المعادلة (4) فيتم فيها تحديد معامل الانكسار لطبقة مانعة للإنعكاس والذي يحدث عنده أقل حد من الانعكاس أما من أجل غطاء ثنائي الطبقة فإن المعادلة (5) هي التي يجب أن تكون محققة:

$$n_1 \cdot n_2 = n_0 \cdot n_s \quad (5)$$

ويكون معامل الانكسار المتوسط الهندسي للمواد الموجودة على كلا جانبي الطبقة المانعة للإنعكاس أي الزجاج أو الهواء أو أنصاف النواقل (الخلية الشمسية) .

تتكون الألواح الشمسية من عدد من المكونات المعروفة باسم الخلايا الشمسية التي تم تصنيعها بشكل منفصل وبالاعتماد على الطاقة المطلوبة يتم بناء الألواح الشمسية في كل من التوازي والتسلسل.

تقوم المنطقة المنضبة الفاصلة بين pn في الخلية الشمسية بالفصل بين حاملات الشحنة الإلكترونية والتقوب وذلك لتوليد جهد لتحريك تلك الشحنات، حيث أنه ولتحريك الكتروليت يتطلب فوتون بطاقة أكبر من فجوة المجال المحظور لمادة أنصاف النواقل التي يتم تصنيع الخلية الشمسية منها، حيث تلتقط الإلكترونات الموجودة في شريط التكافؤ هذا الفوتون ثم تنتقل إلى سوية الناقلية حيث يمكنها توليد تيار كهربائي، حيث يجب أن لا تقل طاقة الفوتونات عن 1.12 إلكترون فولت للسيليكون الذي يمتلك مجال محظور فعال يبلغ 1.12 إلكترون فولت ويمكن إيجاد الطول الموجي من خلال الطاقة بالمعادلة التالية [2]:

$$\lambda(nm) = \frac{1.240}{E(eV)} \quad (6)$$

حيث E هي الطاقة بالإلكترون فولت ، بالنسبة للسيليكون تم تعيين الطول الموجي ليكون حوالي

1107nm والموجات ذات الطول الموجي نفسه أو أقل منه قادرة على أن تولد زوج ثقب الإلكترون [1]

يمكن تقييم أداء الخلية الشمسية باستخدام كفاءة تحويل الخلايا الشمسية ، حيث يتم التعبير عن الكفاءة كنسبة بين الطاقة الداخلة للخلية والطاقة الخارجة منها وذلك ما توضحه المعادلة (7):

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{J_{SC} * A} \times 100\% \quad (7)$$

وتمثل  $\eta$  كفاءة الخلية الشمسية ، والقدرة الداخلة يمكن حسابها من المعادلة الآتية :

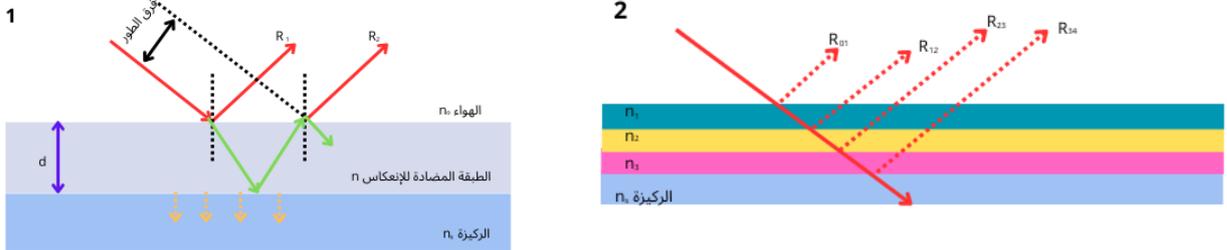
$$p_{in} = J_{SC} \times A \quad (8)$$

حيث يشير  $p_{max}$  إلى الحد الأقصى من الطاقة الخارجة (W) و  $A$  هو مساحة السطح المدروس للخلية ( $m^2$ ) و  $J_{SC}$  هي مقدار كثافة شدة إشعاع الضوء الساقط ، وهو ما يعادل  $0.1 \text{ w. cm}^{-2}$  لإشعاع  $1.5 \text{ AM}$ ، و  $A$  هي مساحة سطح الخلية الشمسية [1] ، ويتم حساب عامل التعبئة (FF) للخلية الشمسية السيليكونية باستخدام الصيغة التالية :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (9)$$

حيث يمثل FF عامل التعبئة للخلية الشمسية ويمثل  $V_{oc}$  جهد الدارة المفتوحة و  $I_{sc}$  هو تيار تلك الدارة [8].

وقد ثبت أن جميع الأنواع المختلفة من الأغشية المانعة للانعكاس تختلف عن بعضها البعض، ومع ذلك فإن لكل منها غاية واحدة وهي تقليل الانعكاس بهدف زيادة تعزيز كفاءة الخلية الشمسية، ولهذا سيتم في هذا البحث التوضيح بدقة أهمية الأغشية المانعة للانعكاس في الخلايا الشمسية السيليكونية.



شكل (1) رسم تخطيطي لانتشار الضوء في (1) طلاء أحادي الطبقة ( $n_s > n$ ) و (2) طلاء متعدد الطبقات.

سوف نركز في بحثنا هذا على التغطية بمواد مانعة للانعكاس بالتحديد أفلاماً رقيقة من أكسيد القصدير النقي أو أكسيد القصدير المشوب بالفلور أو أكسيد الإنديوم المشوب بالقصدير لدراسة الحد من فقدان بالانعكاس فعلى سبيل المثال يتطلب الطبقة المانعة للانعكاس على سطح شفاف مثل الزجاج والذي يبلغ معامل الانكسار فيه نحو 1.52 إلى مادة طلاء ذات معامل انكسار قدره 1.22 مع سماكة طول موجة ربعية ، ومن أشهر المواد التي تملك معامل انكسار قريب من المعامل المطلوب هو فلوريد المغنسيوم  $\text{MgF}_2$  حيث يبلغ معامل انكساره 1.38 [5]، يؤدي استخدام مثل تلك الطلاءات إلى خفض الانعكاسية من 4% إلى مايقارب 1.3% في نطاق الطول الموجي المرئي  $(0.4 - 0.7) \mu\text{m}$  وهي نسبة مقبولة نوعاً ما حيث أن تحقيق إنعكاسية صفر بطبقة واحدة أمر غير عملي وتكديس الطبقات قد تكون طريقة مجدية إلا أنه ينتج عن التكديس مشاكل الالتصاق بين الركيزة والطلاء أو تداخل الطبقات نفسها بسبب اختلاف المعامل الحراري مما يؤدي إلى مشاكل في فك الترابط والذي بدروه سيسبب عدم إستقرار.

### تطبيق المحاكاة PC1D :

إن تطبيق المحاكاة PC1D والذي يؤمن منظومة الأغشية الرقيقة المانعة للإنعكاس المطبقة على الخلية الشمسية متوفر من موقع pveducation وهو موقع مختص بالطاقة الكهروضوئية ويعتبر كتاباً إلكترونياً يوضح مفهوم وخصائص الطاقة الكهروضوئية وما يتعلق بها من تطبيقات منها الأغشية المانعة للإنعكاس ، يوفر الموقع العديد من البارامترات من أنصاف النواقل البلورية التي يمكن استخدامها في تكنولوجيا الطاقة الشمسية مثل زرنيخيد الغاليوم (GaAs) والسيليكون (Si) وفوسفات الإنديوم (InP) والجرمانيوم (Ga) و AlGaAs و InGaAs . كما أن الموقع يتمتع بسهولة الاستخدام ويوفر العديد من المخرجات للباحثين مثل كثافة التيار والتيار الأساسي والطاقة وطول الانتشار وكثافة التنشيط والكفاءة الكمية وغير ذلك الكثير .

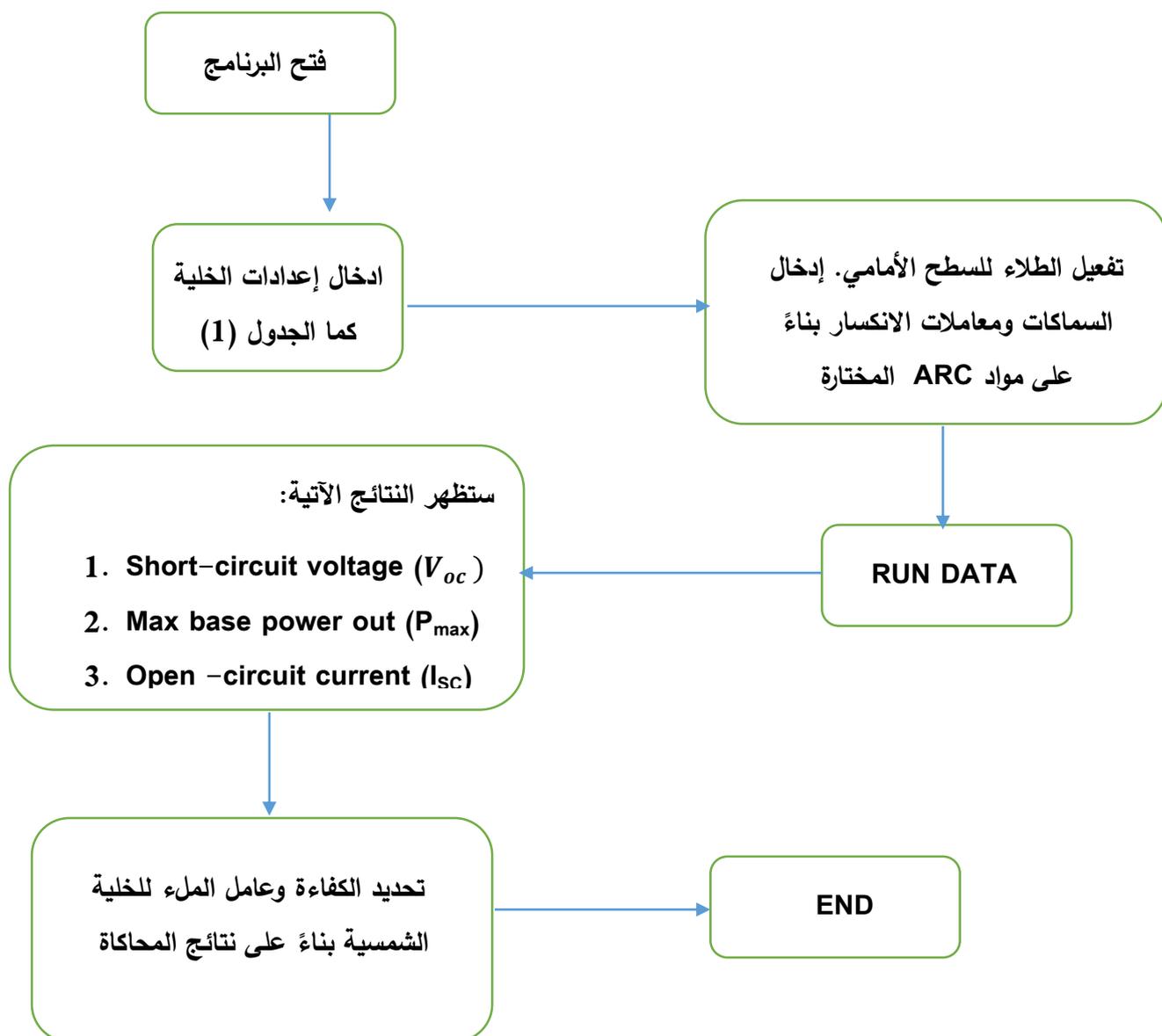
تم في هذه الدراسة اختيار البارامترات الأساسية حيث تم ضبط مساحة الجهاز على  $110 \text{ cm}^2$  وتم ضبط الإنعكاس الأمامي الخارجي على 30% ، وكان سماكة المنطقة الأولى للخلية الشمسية ثابتة وكذلك الثانية وكلا المنطقتين من مادة السيلكون، تم ضبط عناصر الإثارة وفق النوعين الإلكتروني وتقويبي. وفي منطقة الإثارة كانت البارامترات المختارة من وضع الإثارة عابرة ، تم ضبط كلا من الكثافة والطيف الشمسي، تم تطبيق مواد ARC في الإنعكاس الأمامي الخارجي الموجود تحت الجهاز كما هو موضح في الجدول (1)

الجدول (1) : يوضح معاملات الخلية الشمسية باستخدام برنامج المحاكاة

المرجع	القيمة	العنصر
[2][3][4][8]	$110 \text{ cm}^2$ غير مفعّل غير مفعّل 30 % غير مفعّل غير مفعّل	الجهاز المساحة تركيب سطح شحنة السطح الانعكاس الأمامي الخارجي الانعكاس الخلفي الخارجي انعكاس داخلي
[2][3][4][8]	$6 \mu\text{m}$ سيلكون 11.9 1.124eV $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ثابت مفعّل مفعّل $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	المنطقة 1 السماكة المادة ثابت العزل فجوة النطاق التركيز الجوهري معامل الانكسار معامل الامتصاص امتصاص الناقل الحر المنشطات الخلفية من النوع N التوصية المجمعة

	1,000 $\mu\text{s}$	
[2][3][4][8]	<p>100<math>\mu\text{m}</math> سيلكون</p> <p>11.9</p> <p>1.124 e.V</p> <p><math>1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}</math> ثابت مفعل مفعل <math>1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}</math></p> <p>1,000<math>\mu\text{s}</math></p>	<p>المنطقة 2 السماكة المادة ثابت العزل فجوة النطاق التركيز الجوهري معامل الانكسار معامل الامتصاص امتصاص الناقل الحر المنشطات الخلفية من النوع P التوصية المجمع</p>
[2][3][4][8]	<p>Transient,16 timesteps</p> <p>25 °C</p> <p>-0.8 to 0.8 v</p> <p>0</p> <p>مفعل 0.1Wcm<sup>-2</sup></p> <p>AM 1.5 g غير مفعل</p>	<p>الإثارة وضع الإثارة درجة الحرارة الدارة الأساسية الدارة المجمع مصدر الضوء الأساسي ثابت الكثافة الطيف مصدر ضوء ثانوي</p>

يتم توضيح خطوات محاكاة ARC ثنائي الطبقة على خلية من السيليكون كما هو موضح في المخطط أدناه.



### النتائج والمناقشة :

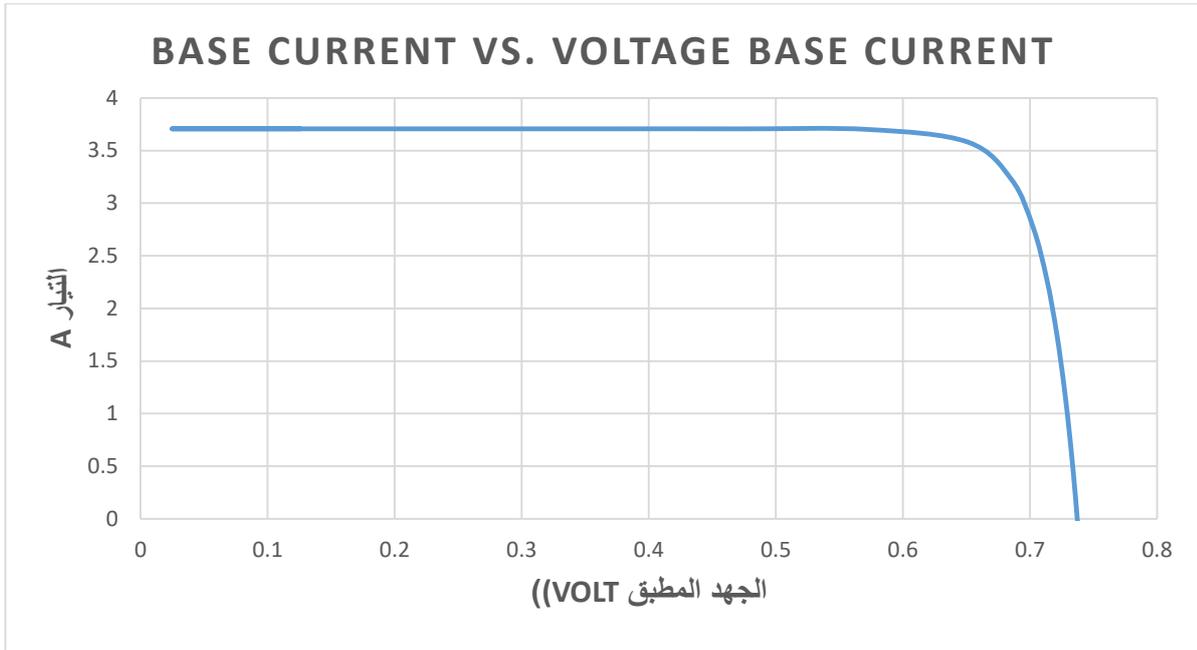
تم استخدام برنامج PC1D لتحفيز خلية شمسية سيليكونية بدون طلاء مضاد للانعكاس، وتم

عرض النتائج في الجدول (2) :

$P_{in}$	$P_{max}$ (W)	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	FF	$\eta$
$0.1 \text{ Wcm}^{-2} * 110 \text{ cm}^2$	1.756	0.7379	2.802	0.849	18.7

يوضح الجدول (2) نتائج محاكاة PC1D عندما يتم تطبيق الطاقة الشمسية دون أي غطاء مانع للانعكاس حيث كانت النتائج الاستطاعة العظمى  $1.756\text{W}$  وكمون  $0.7379\text{V}$  والتيار  $2.802\text{A}$  على التوالي. ومن ثم و بناءً على تلك البيانات ، كانت كفاءة المحاكاة دون غطاء مانع للانعكاس  $18.7\%$  فقط مع عامل تعبئة  $0.849$

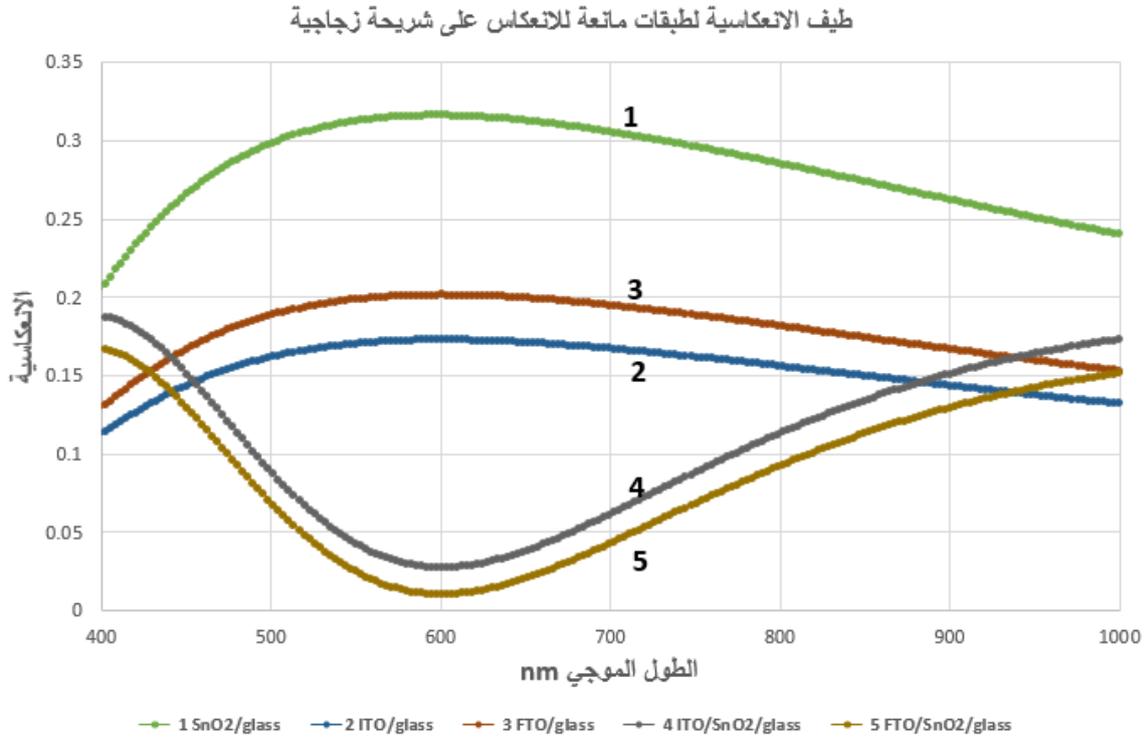
يوضح الشكل (2) منحنى  $I-V$  للخلية الشمسية السيليكونية دون وجود غطاء مانع للانعكاس.



الشكل (2) منحنى الجهد والتيار للخلية الشمسية السيليكونية

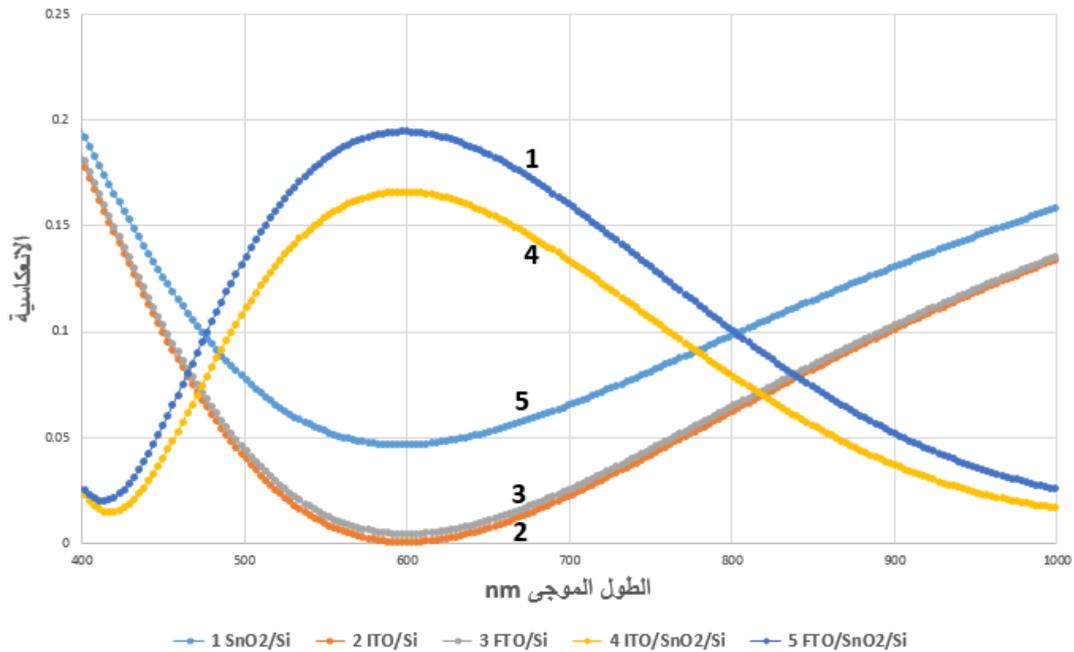
تشكيل الأغشية المانعة للانعكاس:

تم اختيار طبقات مانعة للانعكاس كما ذكرنا سابقاً وتم رسم طيف الانعكاسية الخاص بكل منها في المجال الطيفي 400–1000 nm على كل من ركيزة زجاجية وشريحة سيليكونية كما في الشكل:



الشكل (3) : يوضح منحنى الانعكاسية لطبقات مانعة للانعكاس على شريحة زجاجية.

طيف الانعكاسية لطبقات مانعة للانعكاس على خلية شمسية سيليكونية



الشكل (4) : يوضح منحنى الانعكاسية لطبقات مانعة للانعكاس على شريحة سيليكونية.

يوضح الشكلين (3) و (4) أن الطبقات المانعة للانعكاس قد أظهرت سلوكاً مختلفاً عندما طبقت على السيليكون يعاكس السلوك الذي أظهرته عندما طبقت على الزجاج حيث وجد أن غطاء مانع للانعكاس ثنائي الطبقة  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO)/ $\text{SnO}_2/\text{Si}$  قد أظهر انعكاسية أقل ما يمكن عندما طبق على الزجاج بينما كانت انعكاسيته أعلى ما يمكن عندما طبق على السيليكون وكذلك وجدنا أن الغطاء  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO)/ $\text{SnO}_2/\text{Si}$  قد أظهر انعكاسية أقل منه بقليل عندما طبق على الزجاج بينما كانت انعكاسيته عالية عندما طبق على السيليكون أما الطبقات الأحادية فكان سلوكها على السيليكون أفضل من سلوكها على الزجاج حيث كانت أقل انعكاسية للأفلام  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO)/Si و  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO)/Si على الترتيب ثم  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  بينما ظهرت انعكاسية مرتفعة عندما طبقت على الزجاج كطبقة وحيدة.

عند تطبيق هذه الأغشية على خلية شمسية في تطبيق المحاكاة تم الحصول على النتائج التالية:

الجدول (3) : بيانات الأغشية المدروسة على خلية شمسية في تطبيق المحاكاة

ARC	التيار	خرج القدرة	الجهد	عامل التعبئة	الكفاءة
	$I_{sc}$ (A)	$P_{max}$ (W)	$V_{os}$ (V)	FF	% $\eta$
Si Uncoated	2.802	1.756	0.7379	0.849	18.79
$\text{SnO}_2/\text{Si}$	3.616	2.185	0.7457	0.810	24.51
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO) /Si	3.721	2.254	0.7465	0.811	25.32
$\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO) /Si	3.731	2.260	0.7465	0.811	25.31
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO) / $\text{SnO}_2/\text{Si}$	3.661	2.215	0.7461	0.810	24.83
$\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO) / $\text{SnO}_2/\text{Si}$	3.516	2.115	0.7450	0.807	23.81

بناء على نتائج الجدول (3) تبين أن الأنواع المختلفة من الأغشية المانعة للانعكاس قد أظهرت نتائج مختلفة على كفاءة الخلية الشمسية، حيث يمكن ملاحظة أن  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO) /Si الغطاء المشكل كطبقة وحيدة من أكسيد الانديوم المشوب بالقصدير هو الأعلى كفاءة 25.32 % وذلك عند طول

الموجي 600 نانومتر وسماكة بصرية تقدر بربع طول موجة، في حين كان  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO) //Si المركز الثاني بكفاءة 25.31 % وحقق الغطاء  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  (ITO) //  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  المركز الثالث حيث بلغت كفاءته 24.83 % ثم يأتي الغطاء  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  بكفاءة أقل 24.51 % وأخيراً حقق الغطاء  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO) //  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  أقل كفاءة 23.81 % وكل ذلك كانت نتائجه أفضل من الخلية السيليكونية غير المغطاة حيث بلغت كفاءة الخلية 18.79 % في برنامج المحاكاة للخلية الشمسية

### الاستنتاجات :

نستنتج من هذا البحث أن هناك تأثير مهم للطبقات المانعة للانعكاس ( ARC ) على الانعكاسية وبالتالي على كفاءة الخلية الشمسية السيليكونية ، حيث وباستخدام برنامج PCID تمت دراسة الخصائص البصرية للأغشية المذكورة على شريحة زجاجية و على خلية شمسية افتراضية ضمن المجال الموجي 400-1000nm وعند الطول الموجي 600 nm في حالة الانعكاس المثلي، وبناءً على نتائج تطبيق المحاكاة وجدنا أن التغطية بطبقات مانعة للانعكاس قد أظهرت سلوكاً مختلفاً عندما طبقت على السيليكون غير السلوك الذي أظهرته عندما طبقت على الزجاج حيث وجدنا أن الغطاء المانع للانعكاس ثنائي الطبقة  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO) //  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  قد أظهر انعكاسية أقل ما يمكن عندما طبق على الزجاج بينما كانت انعكاسيته أعلى مايمكن عندما طبق على السيليكون وكذلك وجدنا أن الغطاء  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO) //  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  قد أظهر انعكاسية أقل منه بقليل عندما طبق على الزجاج بينما كانت انعكاسيته عالية عندما طبق على السيليكون أما الطبقات الأحادية فكان سلوكها على السيليكون أفضل من سلوكها على الزجاج حيث كانت أقل انعكاسية للأفلام  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO) //Si و  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO) //Si على الترتيب ثم  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  بينما ظهرت انعكاسية مرتفعة عندما طبقت على الزجاج كطبقة وحيدة. كما تبين أن الأنواع المختلفة من الأغشية المانعة للانعكاس قد أظهرت نتائج مختلفة على كفاءة الخلية الشمسية، حيث يمكن ملاحظة أن  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  (ITO) //Si الغطاء المشكل كطبقة وحيدة من أكسيد الانديوم المشوب بالقصدير هو الأعلى كفاءة 25.32 % وذلك عند طول الموجي 600 نانومتر وسماكة بصرية تقدر بربع طول موجة، في حين كان  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO) //Si في المركز الثاني بكفاءة 25.31 % وحقق الغطاء  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  (ITO) //  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$  المركز الثالث حيث بلغت كفاءته 24.83 % ثم يأتي الغطاء  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  بكفاءة أقل 24.51 % وأخيراً حقق الغطاء  $\text{SnO}_2:\text{F}$  (FTO) //  $\text{SnO}_2/\text{Si}$  أقل كفاءة 23.81 % وكل ذلك كانت نتائجه أفضل من الخلية السيليكونية غير المغطاة حيث بلغت كفاءة الخلية 18.79 % في برنامج المحاكاة للخلية الشمسية

### المراجع :

- [1] Edward Gaddy - *Analysis of record photovoltaic efficiencies from 1954 to 2009 -research gate* -2016.
- [2] C Jiang, T Li, X Zhang and L Hou. “*Simulation of silicon solar cell using PCID*” . Adv. Mater. Res.2012; 383-390, 7032-6.
- [3] M Belarbi, A Benyoucef and B Benyoucef. “*Simulation of the solar cells with PCID, application to cells based on silicon*” . Adv. Energy Mater. 2014; 1, 1-10.
- [4] G Hashmi, MJ Rashid, ZH Mahmood, M Hoq and MH Rahman. “*Investigation of the impact of different ARC layers using PCID simulation:*

*application to crystalline silicon solar cells*". Theor. Appl. Phys. 2018; 12, 327-34.

[5] Jamaludin ,Yusoff and Malek "Numerical Modelling of High Silicon Solar Cell Using Various Anti Reflective Coatings (ARC)" trends in sciences-2024.

[6] Mounir ALHAMED\*, Wael ABDULLAH\*\* " Structural and optical properties of ZnO: Al films prepared by the sol-gel method" Journal of Electron Devices, Vol. 7, 2010, pp. 246-252 France.

[7] Wael ABDULLAH "Fabrication of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Double Layers Anti-Reflection Coating by Sol- Gel Method and Study of its Optical Properties" International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy Vol. 56 (2015) pp 175-183 Switzerland.

[8] Rafah Ibraheem. *Modeling and Analysis of Different Antireflection Polymer Coating on Silicon Solar Cell Using PciD Software.* in Journal of Mechanical Engineering Research and Developments · November 2020

[9] Natarajan Shanmugam, Rishi Pugazhendhi 1, Rajvikram Madurai Elavarasan Pitchandi Kasiviswanathan 1 and Narottam Das 3, Anti-Reflective Coating Materials: A Holistic Review from PV Perspective-2020.

[10] Maha Prasad Koirala et al "Structural and Optical Properties of Fluorine Doped Tin Oxide Thin Film Deposited by Home Built Spray Pyrolysis Unit" The Himalayan Physics Vol. 6 & 7, April 2017 (58-60) Nipal.

[11] Ziad Y. Banyamin et al "Electrical and Optical Properties of Fluorine Doped Tin Oxide Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering" Coatings 2014, 4, 732-746; doi: 10.3390/coatings4040732, UK

[12] Resit Ozmetles "Synthesis and Characterization of Stannic Oxide SnO<sub>2</sub> thin film" Yuzuncu Yil University- Journal of the Institute of Natural & Applied Sciences Vol.29 2024.

[13] F. Atay et al "Optical characterization of SnO<sub>2</sub>: F films by spectroscopic ellipsometry" Journal of Non-Crystalline Solids – 356 (2010) 2192-2197.