

نمذجة ومحاكاة خلية شمسية نانوية أساسها السليكون الأسود بالمقارنة مع خلية معيارية

أ.د. حسن عبد الكريم سليمان*

د.محمد كامل إبراهيم**

ايناس ممتاز احمد***

(تاريخ الإيداع 2020/ 1/12. قُبِلَ للنشر في 8 / 3 / 2020)

□ ملخص □

قمنا في هذا البحث بنمذجة خلية شمسية سليكونية مصقولة عادية بلغت فيها كثافة تيار الدارة المقصورة $J_{sc} = 26.62 \text{mA/cm}^2$ ، وجهد الدارة المفتوحة $V_{oc} = 617 \text{mV}$ ، ومساحة سطحها 1cm^2 . ومن ثم نمذجة خلية شمسية نانوية أساسها السليكون الأسود (Black-Si)، ومقارنتها مع الخلية العادية، ودراسة تأثير السليكون الأسود (b-Si) على كفاءة الخلايا الكهروضوئية، وفي قمع عمليات إعادة اتحاد حوامل الشحنة الكهربائية، ونشير النتائج إلى أن النبائط الفوتوفلطائية النانوية ذات السطح السليكوني الأسود، تزيد قيمة الكفاءة لتصل لحوالي 23% باستخدام أغشية كيميائية فعّالة مثل Al_2O_3 بطريقة ترسيب طبقة ذرية (ALD)، وهذا يدل على أهمية b-Si في تطبيقات الخلايا الفوتوفلطائية (PVC) .

الكلمات المفتاحية: السليكون الأسود، نمذجة، نبيطة فوتوفلطائية، كفاءة الخلية، اقتناص الضوء، تجميع حوامل شحنة، عمليات كبح إعادة الاتحاد.

*أستاذ-قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

**مدرس-قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

***طالبة دراسات عليا(ماجستير)-معيدة موفدة داخلياً إلى جامعة طرطوس-قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

Modeling and Simulink Nano Solar black silicon Cell Compering with Standard Cell.

Dr.Hasan Abed Alkarem Sliman*

Dr.Mohamed Ibrahim**

Enass Mmtuz Ahmed***

(Received 12/1 /2020. Accepted 8/ 3/2020)

□ ABSTRACT □

In this research we have modified a normal polished silicon solar cell with a short circuit current density $J_{sc} = 26.62 \text{ mA/cm}^2$, open circuit voltage $V_{oc} = 0.617 \text{ V}$, and it's area $A=1\text{cm}^2$. Then, we simulated a nano (Black –Si) solar cell, and compared it with the normal cell. And studying a black silicon influence on solar cell efficiency, and suppress recombination operations. The results indicate the nano-black-Si photovoltaic devices to increase the efficiency to reach 23%, using effective chemical coating Al_2O_3 by Atomic Layer Deposition (ALD) .

This indicates the importance of Si in PVC application.

Keywords: Black-Silicon; Photovoltaic Device; modeling; Cell Efficiency; Light Trapping; Charge Collection; Suppress Recombination Operations.

مقدمة

تم اكتشاف ظاهرة تحويل طاقة ضوء الشمس مباشرةً إلى طاقة كهربائية باستخدام نبائط كهروضوئية منذ قرابة قرن ونصف [1]. حيث تم استثمار جهود كبيرة لتوليد تقنيات خلايا فوتوفلطائية (PVC) Photovoltaic Cells جديدة لإنتاج طاقة نظيفة، وصديقة للبيئة، ومستدامة من خلال الاستفادة من مصادر الطاقات المتجددة كالطاقة الشمسية بدلاً من الوقود الأحفوري المتوقع نفاذه مع مرور الزمن والطاقة النووية التي تهدد كوكبنا، حيث تعد سوريا من البلدان المهمة التي تتمتع بكثافة إشعاع شمسي عالٍ خلال أيام السنة [2].

تشهد تقنيات النباط الفوتوفلطائية تطوراً سريعاً مع ازدهار صناعة المواد نصف الناقلية، والتي تشكل نقلة نوعية في مجال الطاقات المتجددة [1]، ويجري تطويرها من خلال تحسين المواد المكونة لها بتشكيل تراكيب جديدة بأبعاد صغيرة ومختلفة، مثل التراكيب النانوية والميكروية. تمتلك التراكيب النانوية خصائص ومميزات تسهم في تحسين أداء الخلايا الكهروضوئية، من خلال تحسين عمليات اقتناص الضوء وجميع حوامل الشحنة، وبالتالي كبح عمليات إعادة الاتحاد التي وجودها يقلل من كفاءة النببطة (Device) المدروسة، ويؤثر سلباً على أدائها. وهذا بدوره يسمح بإنتاج خلايا شمسية فعالة وبتكلفة تصنيع منخفضة.

أهمية البحث وأهدافه

يهدف هذا البحث إلى نمذجة خلية كهروضوئية سليكونية مصقولة، ومقارنتها مع خلية شمسية ذات تركيب نانوي، وتبيان تأثير التراكيب النانوية على كفاءة الخلايا الفوتوفلطائية، حيث تكمن أهمية بحثنا في التعرف على إحدى طرائق نمذجة الخلايا الشمسية العادية والنانوية، ودراسة تأثير التركيب النانوي على معاملات الخلية، من خلال تحسين عملية امتصاص الأشعة الضوئية الساقطة عليها، وكبح عمليات إعادة اتحاد حاملات الشحنة الكهربائية، مما يسمح بتحضير خلايا شمسية فعالة بمرودٍ عالٍ وبتكلفة تصنيع منخفضة .

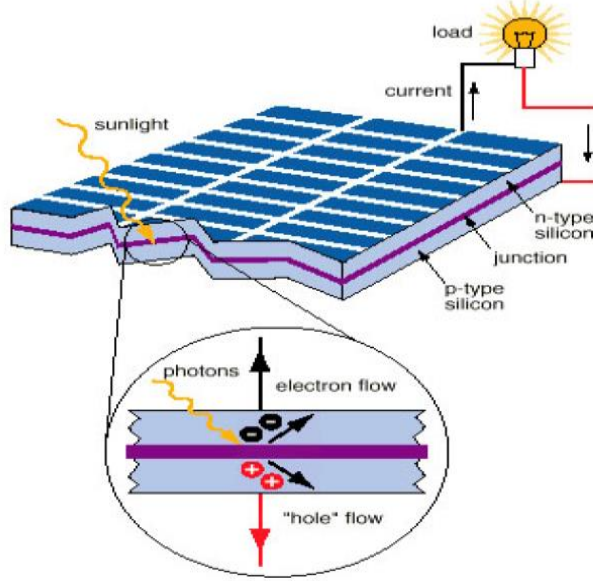
منهجية البحث ومواده

أنجز هذا البحث باستخدام برنامج MATLAB\SIMLINK حيث تم نمذجة خلية شمسية سليكونية مصقولة، ومن ثم نمذجة خلية شمسية نانوية أساسها السليكون الأسود، ومقارنة النتائج لدراسة تأثير السليكون الأسود على كفاءة الخلية.

الدراسة الحسابية والنظرية

تتشكل النباط الفوتوفلطائية (Photovoltaic Devices) (PVD) من تماس مادتين نصف ناقلتين إحداهما من النوع N، والأخرى من النوع P، مطعمتان من أجل زيادة عدد حاملات الشحنة الأكثرية في كلا النوعين [3]. لا يمكن للخلية الشمسية أن تحول كامل شدة الإشعاع الشمسي الساقط عليها إلى طاقة كهربائية، إلا إذا كانت طاقات فوتونات هذا الإشعاع الساقط أكبر من الفجوة الطاقية لمادتي نصف الناقل، و عند سقوط الإشعاع الشمسي على سطح الخلية تمتص مادة نصف الناقل الفوتونات ذات الطاقة الأكبر من الفجوة الطاقية لنصف الناقل، وتنتج الإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى عصابة الناقلية مشكلة أزواج (اللكترونية- ثقبية)، وتتكون هذه الأزواج في منطقة الاستفاد كما هو موضح في الشكل (1)، ويتشكل حقل كهربائي داخلي يبعد الإلكترون إلى الطرف n، والثقب إلى

الطرف p مؤدياً إلى نشوء فرق جهد، يمكن استخدامه لجريان التيار، وبهذا الشكل تتحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية [4].



الشكل (1): يوضح عملية تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية والعمليات الفيزيائية المرافقة

تتطلب الخلايا الفوتوفلطائية (Photovoltaic Cells) PVC توليد حوامل شحنة كهربائية بمعدلات عالية، تتعلق بكل من طول موجة الضوء الساقط على الخلايا والمقدرة الامتصاصية لمادة نصف الناقل الداخلة في تركيب الخلايا المرتبطة بكل من الانعكاس عن سطح الخلية، والتركيز الذاتي لحوامل الشحنة الكهربائية لمادة نصف الناقل، ودرجة الحرارة [5]، و التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي، وكثافة شدته الإشعاعية المرتبطة بكل من الموقع الجغرافي، والزمن، والارتفاع، وظروف المناخ لقمع عمليات إعادة الاتحاد التي تحدث فيها [5].

لذلك هناك صعوبة في دراسة تأثير الإشعاع الشمسي على النبائط الفوتوفلطائية بسبب الاختلاف في درجات الحرارة على القرص الشمسي، وتأثير طبقة الأتموسفير على طيف ضوء الشمس [4]، حيث تنخفض كمية الأشعة قبل الوصول إلى سطح الأرض، ويعود ذلك إلى طول مسارها في الغلاف الجوي، المعبر عنه بما يعرف بكتلة الهواء. وبناءً على ما تقدم تم تقييم النبائط الفوتوفلطائية استناداً للجمعية الأمريكية للمختبرات والمواد (ASTM) [4,6]، التي حددت قياسين للتوزيع الطيفي وفق قيمة x للتوزع الطيفي المعياري AMx، حيث يشير الدليل x إلى طول مسار الإشعاع الشمسي عبر طبقة الأتموسفير، وكلما كانت الممرات أطول ازداد انحراف الضوء وامتصاصه، ومما يؤدي إلى تغيير التوزيع الطيفي للضوء الذي تتلقاه النبائط.

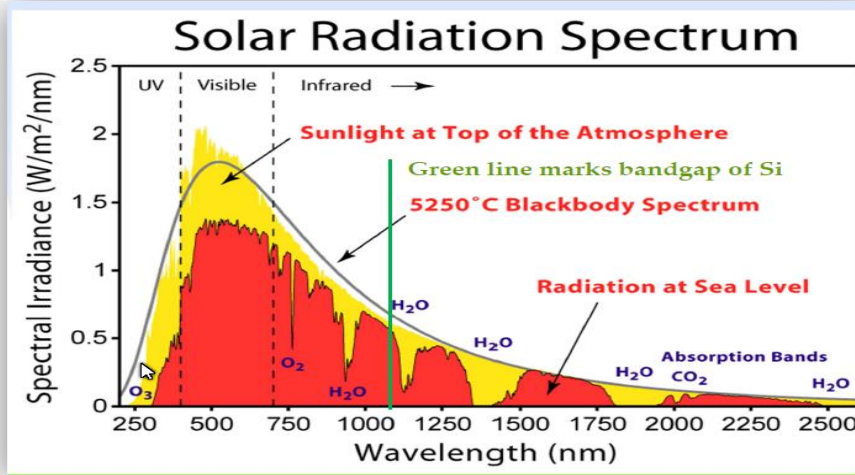
يعين طول مسار الأشعة بالمعامل x المعرف بالعلاقة الآتية:

$$x = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1)$$

حيث θ_z تمثل الزاوية بين أشعة الشمس مع إشارة للذروة والناظم على سطح الأرض. وتجدر الإشارة إلى أنه كلما كان المسار x أطول كانت كتلة الهواء أكبر.

والطيف AM1.5 يمثل الإشعاع المقابل للطيف الشمسي على سطح الأرض: يحدد AM1.5 من أجل النبائط الكهروضوئية PVD التي تملك سطح يميل بزاوية 37° عن مسار الأشعة الشمسية [4].

يمثل الطيف AMO الإشعاع المقابل للطيف الشمسي خارج الغلاف الجوي مع كامل الإشعاع الكلي $1353\text{W}/\text{m}^2$ الذي يمكن أن يقرب بإشعاع الجسم الأسود عند الدرجة 5900K . والشكل (2) يوضح طيف إشعاع الجسم الأسود، وطيف الإشعاع الشمسي AMO للتطبيقات الفضائية، والطيف AM1.5 للتطبيقات على سطح الأرض وفق ASTM.



الشكل (2): يوضح إشعاع الجسم الأسود وطيف الإشعاع الشمسي للمعيارين الطيفيين [4]

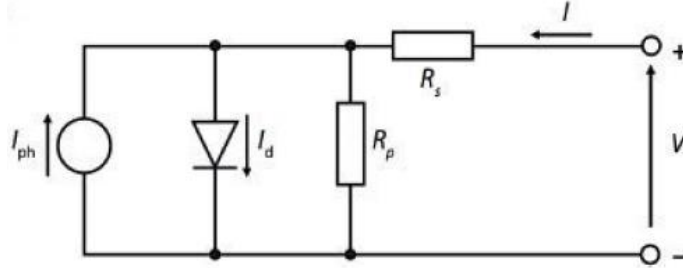
ومن مميزات النبائط الفوتوفلطائية كفاءتها التي تحدد مقدار جودتها. وأحد الأسباب التي تقلل كفاءة هذه النبائط يكمن في عمليات إعادة الاتحاد التي تحدث فيها، إلى جانب كميات الإشعاع الشمسي الممتصة من قبل النبيطة ويهدف معالجة هاتين المسألتين: تم إجراء عدة أبحاث لتصنيع خلايا فوتوفلطائية ذات تراكيب نانوية وميكروية بأبعاد صغيرة، وبأشكال متعددة لتحسين أداء الخلايا، وشملت هذه الأبحاث في هذا المجال الخلايا الشمسية المصنوعة من مواد نصف ناقلة صبغية، حساسة للنقاط الكوانتية المصنوعة من سيلينيد الكادميوم (CdSe)، إحدى أشكال المواد النانوية التي تتميز عند تعرضها لمصدر ضوئي خارجي، بأن ذرات هذه النقاط الكمومية تمتصه وتصدره على هيئة ألوان مختلفة، توافق أطوال موجية معينة. ويعتمد هذا الضوء المنبعث اعتماداً كلياً على مقاييس أقطار هذه الحبيبات إلى جانب اعتماده على نوع العناصر الداخلة في تركيبها ونسبها. وتتميّ الخلية بشكل مباشر على سطح من أكسيد التيتانيوم TiO_2 بواسطة طبقة أيونية امتصاصية وانتقائية من أجل زيادة عملية ترسيب النقاط الكوانتية من سيلينيد الكادميوم (CdSe-QD) ذات الحجوم الكبيرة والصغيرة على طبقة نصف ناقلة، حيث حققت هذه الخلية كفاءة بلغت 3.84% [7]. ثم توالى الأبحاث لتحسين مواصفات النقاط الكوانتية من خلال تقليل عمليات إعادة الاتحاد وزيادة كفاءة الخلايا، وتم التوصل للكفاءة 12.75 % من أجل خلية شمسية صبغية مرسب عليها نقاط كوانتية من النوع Zn-Cu-In-Se-CdSe [8].

ومع تقدم الأبحاث والإنجازات لحل هذه المشكلة تبين مدى أهمية مادة السليكون الأسود (b-Si) في صناعة الخلايا الشمسية، التي تمتلك خصائص ضوئية مهمة، و تساهم في عملية تقليل إعادة الاتحاد ومنها الاتحاد السطحي المرتبط بمورفولوجيا السطح، والتي يمكن التحكم بخصائصها وحجمها باستخدام مادة (b-Si) لزيادة كفاءة

الخلية [9]. كما وتتميز الخلايا الشمسية المصنوعة من السليكون الأسود بانعكاسٍ سطحيٍّ منخفضٍ للغاية، كما وتسلك فترة حياة حوامل الشحنة الأقلية نفس سلوك كثافة Si النانوي. حيث بازدياد كثافة Si النانوي ينخفض كل من الانعكاس السطحي وفترة حياة حوامل الشحنة الأقلية: بسبب الانخفاض في قرائن الانكسار الفعالة وزيادة مساحة السطح الفعال. وهذا يعني أن كثافة Si تؤثر على الخصائص الضوئية والكهربائية لهذه الخلايا بشكلٍ واضحٍ [9]. وتؤدي تغطية سطح السليكون النانوي بأغطية تثبيط دوراً فعالاً في عملية تحسين اقتناص الضوء وزيادة كفاءة الخلية [10]. كما وأن استخدام تراكيب ذات أبعاد من طول موجة الضوء الساقط أو أكبر منها يقلل من تكلفة تصنيع الخلية من خلال زيادة اقتناص الضوء وزيادة طول مسار الإشعاع الشمسي في Si [11]. إذن للحصول على خلايا فوتوفلطائية بكفاءة عالية لا بد من تحضير تراكيب نانوية سليكونية كثيفة جداً وقصيرة تسمح بتحصيل امتصاص ضوئي كبير، وبمتابعة الدراسة والتجريب باستخدام تلك التراكيب تمكن الباحثون من تحقيق كفاءة بلغت 22.1% [10].

نمذجة الخلية الكهروضوئية السليكونية العادية

تتصف الخلايا الشمسية بمتحولين أساسيين مهمين هما: جهد الدارة المفتوحة وتيار الدارة المقصورة . إن تيار الدارة المقصورة في الخلايا الفوتوفلطائية يساوي إلى تيار الفوتونات الساقطة على الخلية و قيمة الجهد تكون معدومة لتقابل أعظم قيمة للتيار. تتألف الدارة الكهربائية المكافئة للوح الشمسي من مصدر تيارٍ موصولٍ على النفرع مع اللوح الشمسي، ومقاومة تفرعية R_p ، بالإضافة لمقاومة تسلسلية R_s ، كما هو موضح في الشكل (3) الذي يمثل الدارة الكهربائية المكافئة للوح الشمسي:



الشكل (3): الدارة الكهربائية المكافئة للوح الشمسي المدروس

يُمثل مصدر التيار المتولد ضوئياً بخلية PV عند سقوط الفوتونات عليها. هذا المصدر يكون ثابتاً عند درجة حرارة وشدة إشعاع ثابتين. يسبب تيار الفوتونات في هذه الدارة نشوء جهد في الدارة حيث تكون الوصلة p-n في حالة انحياز أمامي. تعطى علاقة التيار المارة في الدارة وفق قانون كيرشوف بالشكل [4]:

$$I = I_{pv} - I_d \quad (2)$$

بالأخذ بعين الاعتبار وجود المقاومتين التسلسلية والتفرعية فإن علاقة التيار المار في الديود I_d تعطى بالعلاقة:

$$I_d = I_0 \exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{nkT} - 1\right) - \frac{(V+IR_s)}{R_p} \quad (3)$$

حيث R_p المقاومة التفرعية الموصولة على التوازي مع اللوح الشمسي، و R_s المقاومة التسلسلية، و n عامل المثالية، و k ثابت بولتزمان، و T درجة حرارة الوسط وتقدر بالكلفن.

وإذا كانت: $R_p \rightarrow \infty$ و $R_s = 0$ عندها تؤول المعادلة (2) إلى الشكل الآتي:

$$I = I_{pv} - I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (4)$$

حيث يمكن حساب تيار الإشباع العكسي I_0 عندما $I = 0$:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1} \quad (5)$$

حيث I_{sc} يمثل تيار الدارة المقصورة المساوي لتيار توليد الفوتونات. ويمكن حساب I_{sc} عند درجة الحرارة المعطاة من العلاقة التالية [2]:

$$I_{sc} = I_{sc}(T) [1 + \alpha(T - T_{stc})] \frac{E}{E_{stc}} \quad (6)$$

T_{new} درجة حرارة سطح الخلية وتقدر ب K (الكلفن).

T_{stc} درجة الحرارة المرجعية وتقدر ب K .

α عامل التيار الحراري ويقدر بالوحدة $^{\circ}C/A$.

ويعطى تيار توليد الفوتونات عند أي إشعاع

E شدة الإشعاع الشمسي المتغيرة (W/m^2).

E_{stc} شدة الإشعاع الشمسي المعيارية (W/m^2).

المعادلات الرياضية التي تصف عمل اللوح الشمسي [2,15]:

تيار الدارة المقصورة:

وتصبح علاقة تيار الدارة المقصورة من الشكل [2]:

$$I_{sc, new} = I_{sc, stc} \left(\frac{E_{new}}{E_{stc}} \right) [1 + \alpha(T_{new} - T_{stc})] \quad (7)$$

جهد الدارة المفتوحة:

$$V_{oc, new} = V_{oc, stc} [1 + \beta((T_{new} - T_{stc}))] \quad (8)$$

تيار اللوح الشمسي كتابع لجهد اللوح:

$$I_{pv} = I_{sc, new} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv}}{\gamma V_{oc, new}}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

حيث: $I_0 = (I_{sc} - I_{mpp}) \exp\left(\frac{-V_{mpp}}{\gamma V_{oc}}\right)$

$$\gamma = \frac{V_{mpp} - V_{oc}}{V_{oc} \ln\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}}\right)}$$

$$P_{pv} = I_{pv} V_{pv} \quad (10)$$

موصفات اللوح الشمسي المستخدم [10,12]:

سيليكون مصقول	Polished Silicon	موصفات اللوح الشمسي العادي
0.617 V	V_{oc}	جهد الدارة المفتوحة
26.62 m A	I_{sc}	تيار الدارة المقصورة
0.54V	V_{mpp}	جهد الحمل الأعظمي
24.210 mA	I_{mpp}	تيار الحمل الأعظمي
13.0739 mW	P_{max}	الاستطاعة الأعظمية
79.6%	FF	عامل الملء FF
13.1%	η	الكفاءة

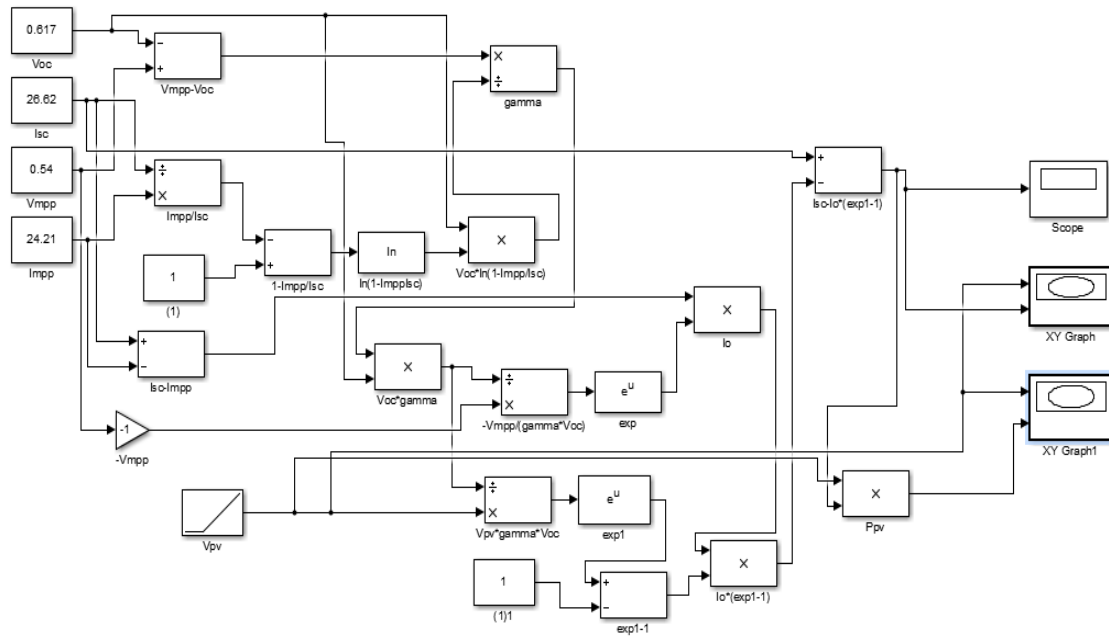
الجدول (1)

النبائط الفوتوفلطائية	Photovoltaic Device	PVD
الخلايا الفوتوفلطائية	Photovoltaic Cells	PVC
للجمعية الأمريكية للمختبرات والمواد	The American Society For Testing and Material	ASTM

الجدول(2): يمثل الرموز المختصرة

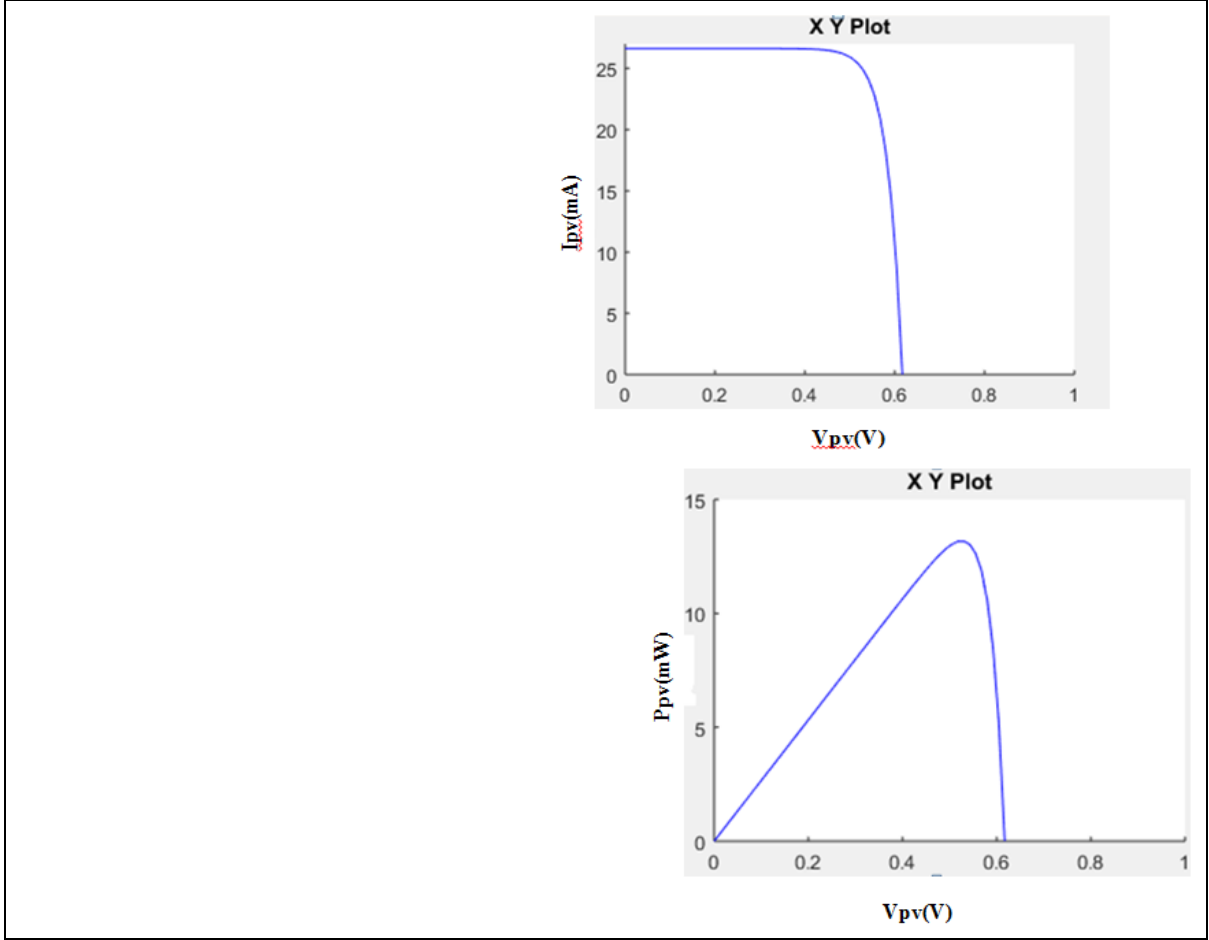
الدراسة العملية للوح الشمسي المستخدم:

أولاً : نمذجة اللوح الشمسي وفق المواصفات المذكورة في الجدول (1) عند شدة إشعاع شمسي ثابتة $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ، ودرجة حرارة ثابتة $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ والطيف AM1. باستخدام برنامج MATLAB\SIMULINK ، وباستخدام الصناديق من مكتبة SIMULINK نحصل على نموذج اللوح الشمسي الموضح في الشكل (4) تأسيساً على العلاقتين (9) و (10):



الشكل (4): مخطط النمذجة والمحاكاة لنموذج اللوح الشمسي

عند تشغيل النموذج الموضح في الشكل (4) نحصل على الشكلين البيانيين اللذين يوضحهما الشكل (5)، اللذان يمثلان علاقة تيار اللوح الشمسي واستطاعته بدلالة جهد اللوح الشمسي من خلال بلوك Scope الذي يظهر الخطوط البيانية للوح المدروس.

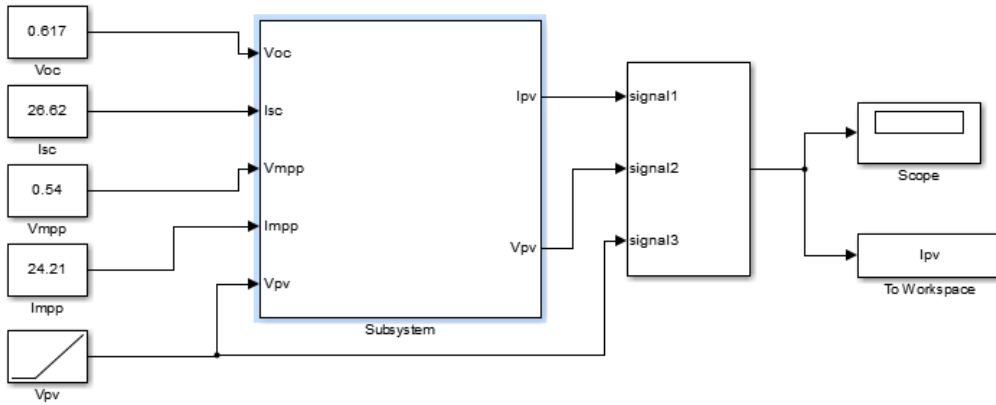


الشكل(5):يمثل مميزات الاستطاعة جهد $P_{pV} = f(V_{pV})$ ، مميزات التيار جهد $I_{pV} = f(V_{pV})$

نلاحظ من الشكل أن الخاصية المميزة (تيار - جهد) (دراسة تغيرات التيار كتابع لجهد اللوح) تسلك سلوك منحنى، وذلك لأن العلاقة المعبرة عنها هي ناتج طرح علاقة تيار الفوتونات والمميزة الأمامية للديود (علاقة غير خطية).

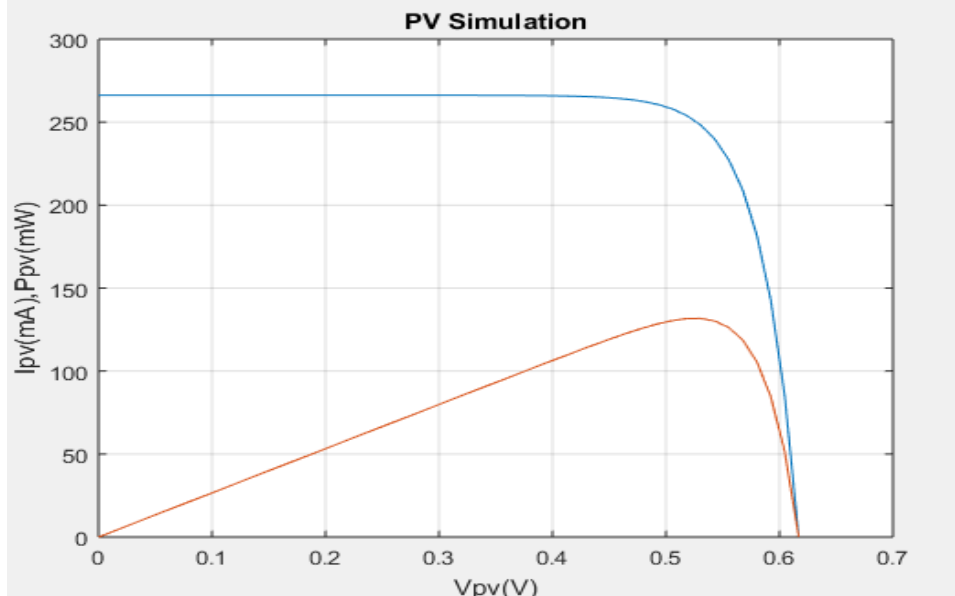
نلاحظ من المنحنى أن نقطة الاستطاعة الأعظمية تقابل قيمة التيار الأعظمي وهي 24.21mA ، وقيمة الجهد الأعظمي 0.54V، وهي نفسها على منحنى (الاستطاعة-جهد).

يمكن دمج صناديق نموذج اللوح الشمسي في الشكل (4) في صندوق واحد، باستخدام خاصية إنشاء النظم الفرعية Subsystem للحصول على النموذج الفرعي للوح المستخدم، ومن ثم نرسم تسمية المداخل والمخارج للنموذج كما هو موضح في الشكل (6).



الشكل (6):النموذج الفرعي للوح الشمسي بعد تسمية المحاور

وعند تشغيل النموذج الفرعي وكتابة كود برمجي خاص بعلاقة التيار والاستطاعة بدلالة الجهد نحصل على الشكل (7) الذي يوضح علاقة الاستطاعة، والتيار بدلالة الجهد على نفس المنحني البياني من خلال بلوك Scope.

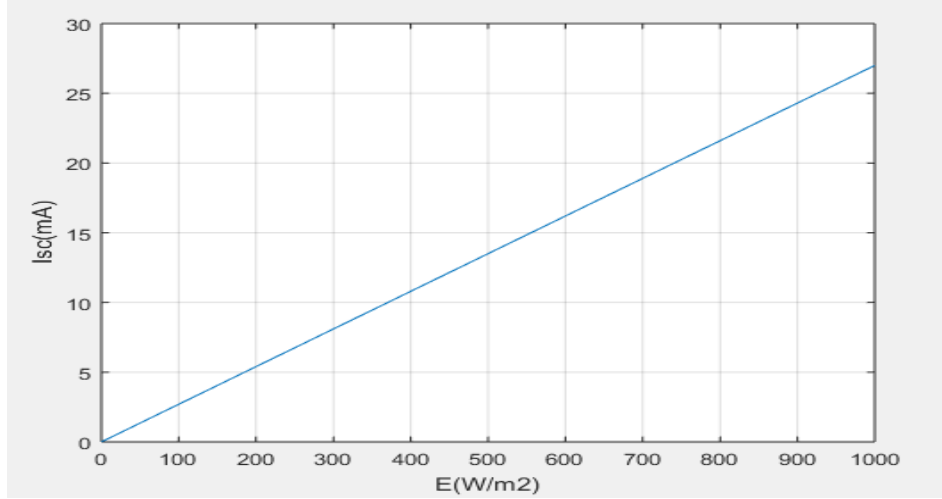


الشكل (7): منحني الاستطاعة (أحمر) والتيار (أزرق) كتابع لجهد اللوح

نلاحظ تطابق النتائج بين النموذج وبين الكود البرمجي، وهذا يدل على الدقة في العمل كما نلاحظ من منحني الاستطاعة ومنحني التيار، وعلاقتهما بالجهد تطابق نقطة الاستطاعة الأعظمية في كلا المنحنيين.

ملاحظة: تم ضرب منحني الاستطاعة والتيار بالمقدار 10 لتوضيح الشكل.

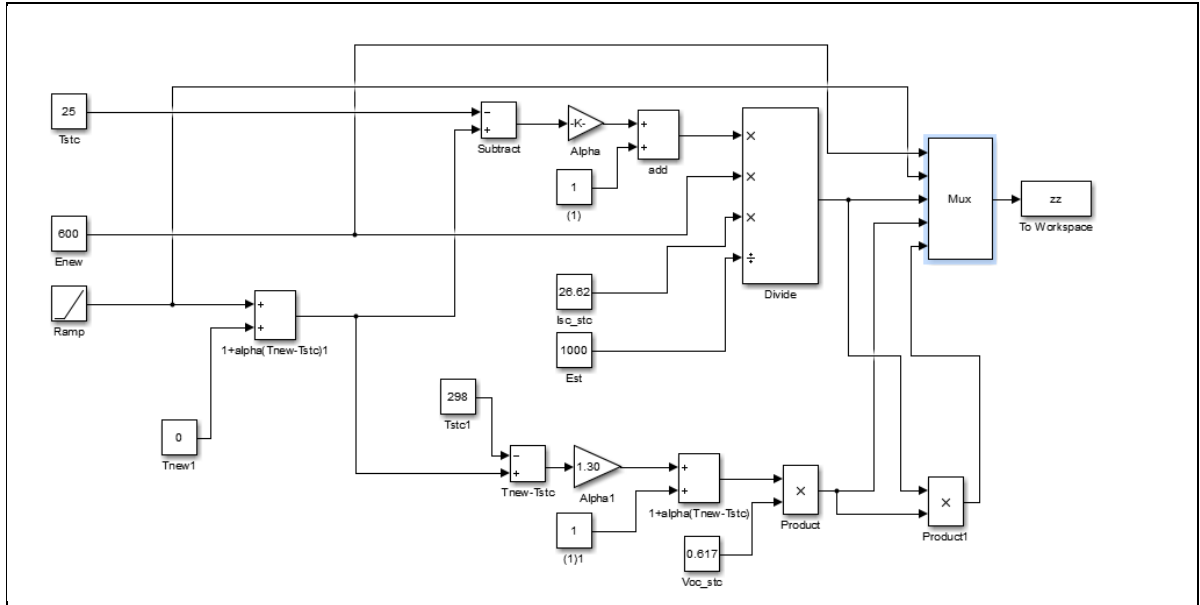
نرسم تيار الدارة المقصورة كتابع لشدة الإشعاع الشمسي: $I_{sc}=f(E)$ الممثلة بالعلاقة (7) نحصل على الشكل (8) ، ونستنتج منه زيادة تيار الدارة المقصورة بازدياد شدة الإشعاع الشمسي الساقط على الخلية الفوتوفلطائية المدروسة.



الشكل (8): تيار القصر كتابع لشدة الإشعاع الشمسي

ولدراسة علاقة التيار والجهد والاستطاعة بدلالة تغير درجة الحرارة ننفذ نموذج حساب يوضح تلك العلاقة كما

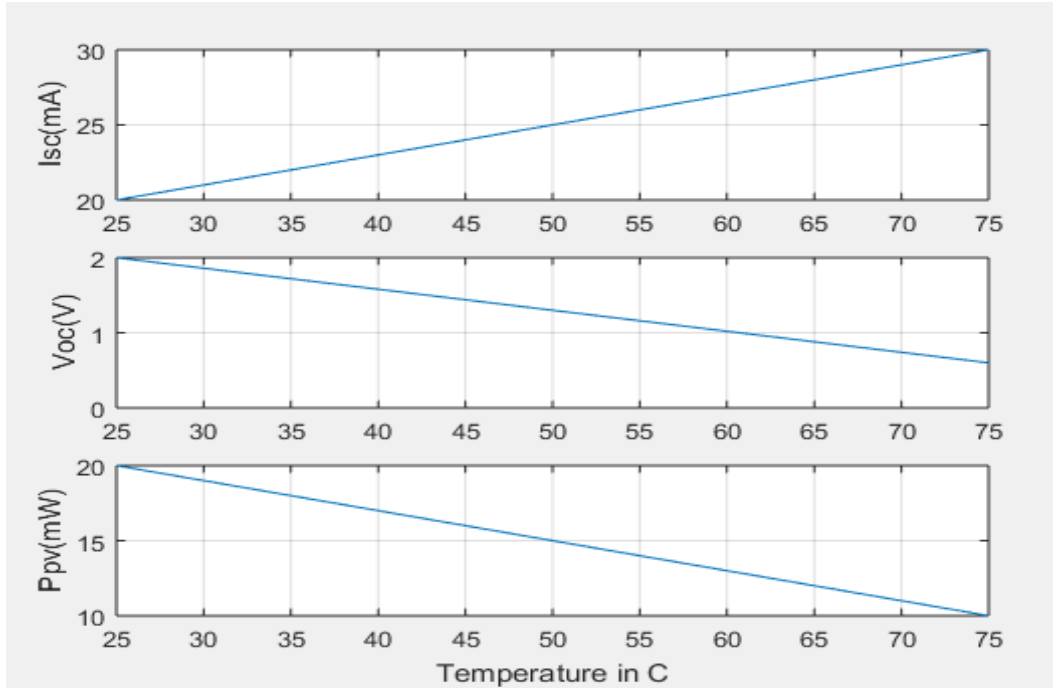
هو موضح في الشكل (9):



الشكل (9): نموذج حساب أثر درجة الحرارة على التيار والجهد

وعند تشغيل النموذج نحصل على المنحنيات التي يوضحها الشكل (10)، والتي تبين علاقة كل من شدة تيار

الدارة المقصورة، وجهد الدارة المفتوحة، والاستطاعة بتغير درجة الحرارة وذلك من خلال Code Subplot.



الشكل (10): منحنيات التيار والجهد والاستطاعة كتابع لدرجة الحرارة

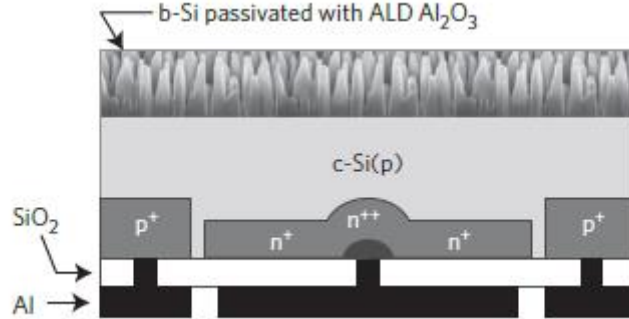
نلاحظ من المنحنيات في الشكل (10) تزايد تيار الدارة المقصورة مع ارتفاع درجة الحرارة وتناقص جهد الدارة المفتوحة والاستطاعة بارتفاع درجة الحرارة، وذلك بسبب تناقص الفجوة الطاقية لمادة نصف الناقل المصنعة منها الخلية.

نمذجة اللوح الشمسي ذو التركيب النانوي

للتراكيب النانوية دور كبير في تخفيض تكلفة المواد المكونة للنبیطة الكهروضوئية وزيادة كفاءة تحويل الطاقة فيها، ولكن مازالت تلك التراكيب تبدي كفاءة تحويل طاقية أخفض من تلك التي تبديها الخلايا السليكونية التقليدية بسبب ازدياد عمليات إعادة اتحاد حوامل الشحنة المتولدة ضوئياً، والمرتبطة بالتراكيب النانوية [11]. تُعد مادة السليكون الأسود (b-Si) النانوية من أهمّ المواد المستخدمة في تصنيع النبائط الكهروضوئية النانوية، لا سيّما عند استخدامه كسطح أمامي مركب ذي امتصاصية ضوئية عالية، لما يملكه من خصائص ضوئية مهمة. فمادة الخلايا الشمسية b-Si النانوية تتميز بأنها ذات انعكاسية منخفضة جداً، تصل في بعض التراكيب إلى أقل من 5%، وهذا ما يجعل (b-Si) حلاً واعداً لأغشية ضد الانعكاس للخلايا الشمسية السليكونية، حيث تمتلك طبقة سطحية نانوية تقلل من انعكاس الضوء بفعالية، وتحسن بأن معاً عملية تشتت وامتصاص الضوء. كما تتميز مادة (b-Si) بمساحة سطح كبيرة وفعالة كيميائياً، بالإضافة لكفاءة تألق ضوئي كبيرة عند تقليل أبعاد السطح إلى بضعة نانومترات [12].

إذاً يعد (b-Si) المادة المرشحة لمكونات الخلية الشمسية التي تستخدم كطبقات ضد الانعكاس، يمكن استغلالها لإتمام عملية تصنيع الخلية، وتحقق امتصاصية ضوئية عالية، وتزيد من طول المسار الضوئي الفعال في Si، بالإضافة للقوة الميكانيكية المنخفضة، والمستخدم لفصل رقائق رقيقة جداً من سبيكة Si [12].

ندرس في هذا البحث خلية شمسية مصنوعة من طبقة b-Si النانوية، ومغطاة بطبقة من Al_2O_3 بطريقة الترسيب الكيميائي على ركيزة من السليكون البلوري، تماسات معدنية خلفية من الألمنيوم ويوضح الشكل (11) مقطعاً عرضياً للخلية الشمسية المستخدمة في هذه الدراسة.



الشكل (11):مقطع عرضي للخلية المستخدمة في الدراسة

تقلل طبقة b-Si من الانعكاسية الضوئية بفضل التفاعلات الضوئية العديدة مع البنية السطحية، حيث يكون لشكل وحجم بنية السطح دوراً في تخفيضها [12]. عندما يكون حجم السطح صغيراً جداً فإنه يعمل بشكل أساسي كوسط انكسارٍ فعّالٍ، وفي هذه الحالة انتقال قرائن الانكسار من وسط الهواء إلى السليكون عبر البنية النانوية ينتج أغشية ضد الانعكاس متدرجة قرائن الانكسار بشكلٍ فعّالٍ، تخفض الانعكاسية الضوئية، وتزيد الامتصاصية الضوئية بشكلٍ كبيرٍ.

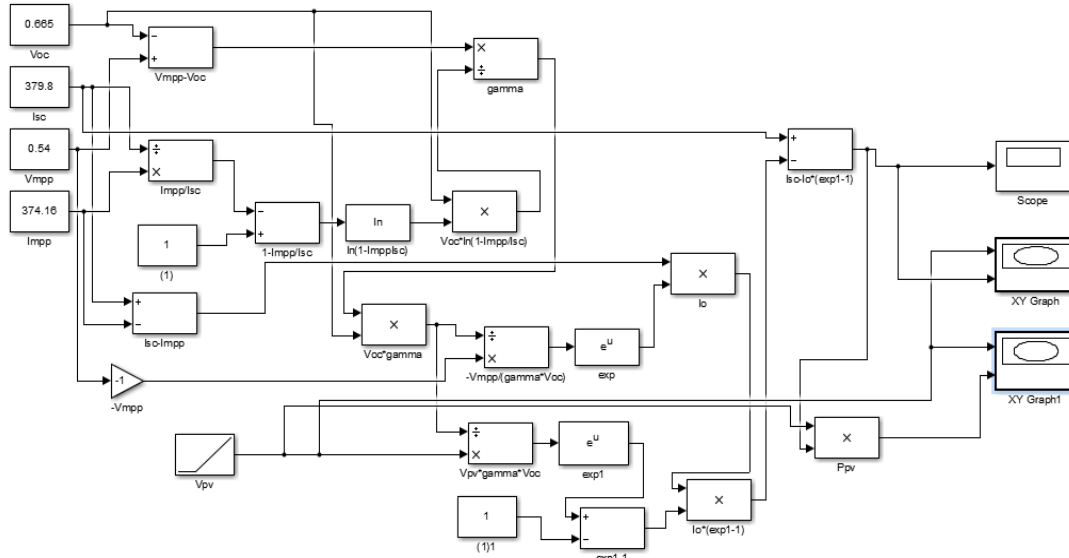
لكن على الرغم من الاقتناص الضوئي القريب من المثالية التي تحققه التراكيب النانوية من خلال مورفولوجيا الجسيمات النانوية التي تؤمن هذا التفوق الضوئي، إلا أنها تسبب أيضاً وجود قنوات إعادة الاتحاد التي تخرب بشكلٍ جدي المواصفات الكهربائية للخلية من خلال المساحة الكبيرة لسطح الباعث، والعيوب الموجودة على سطحه، ودرجة تطعيمه الشديدة [9].

سندرس في هذه البحث تأثير عمليات إعادة الاتحاد على خصائص الخلية، و معالجتها بهدف تحسين كفاءتها على اعتبار أن إعادة الاتحاد السطحي ترتبط بالمورفولوجيا السطحية. ولتحقيق كفاءة خلايا كهروضوئية عالية يستخدم عادةً تركيب نانويًا سميكاً وقصيراً [9]، في هذا السياق استخدمنا في دراستنا خلية شمسية نانوية التركيب قوامها السليكون الأسود (b-Si) مغطاة بطبقة من (Al_2O_3) بسماكة (20nm) على ركيزة من بلورة السليكون C-Si. وجود هذه الطبقة يخفض الانعكاسية إلى أقل من (1%)، بسبب الفعالية الكيميائية العالية لها على Si البلوري، وكثافة العيوب المنخفضة [13]، وقدرتها على تثبيت التأثير الحفلي القوي: بسبب الشحنات السالبة الثابتة عند السطح الفاصل (Si/Al_2O_3) [9]، كما ويتميز بكثافة شحنة عالية تساعد على مضاعفة حوامل الشحنة [14]، ووصلة خلفية معدنية من الألمنيوم (Al) بسماكة $(3\mu m)$ وطبقة الكوارتز العازلة (SiO_2) بسماكة (110 nm) وتمتلك الخلية المواصفات التالية [10]:

$V_{oc} = 665mV$, $J_{sc} = 42.2 mA/cm^2$, $FF = 80\%$ ، ومساحة سطح الخلية $9 cm^2$. وبلغت كفاءة

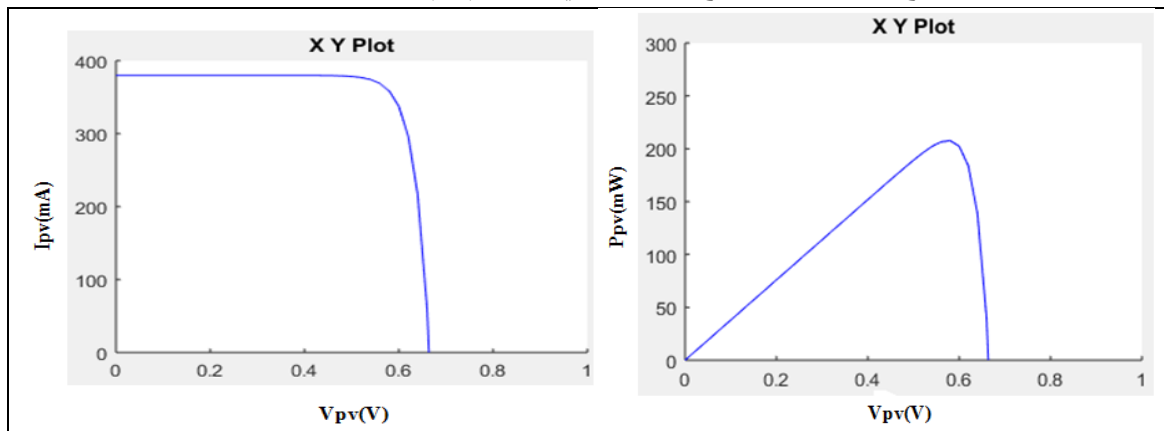
الخلية المدروسة 22.1% .

لدراسة منحنيات اللوح الشمسي باستخدام مادة (b-Si) نضع نموذج اللوح في الشكل (12) عند شدة إشعاع شمسي ثابتة $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ، ودرجة حرارة ثابتة $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ، والإشعاع الطيفي AM1.5 ، وبتنفيذه نحصل على المنحنيين البيانيين الموضحين في الشكل (13).



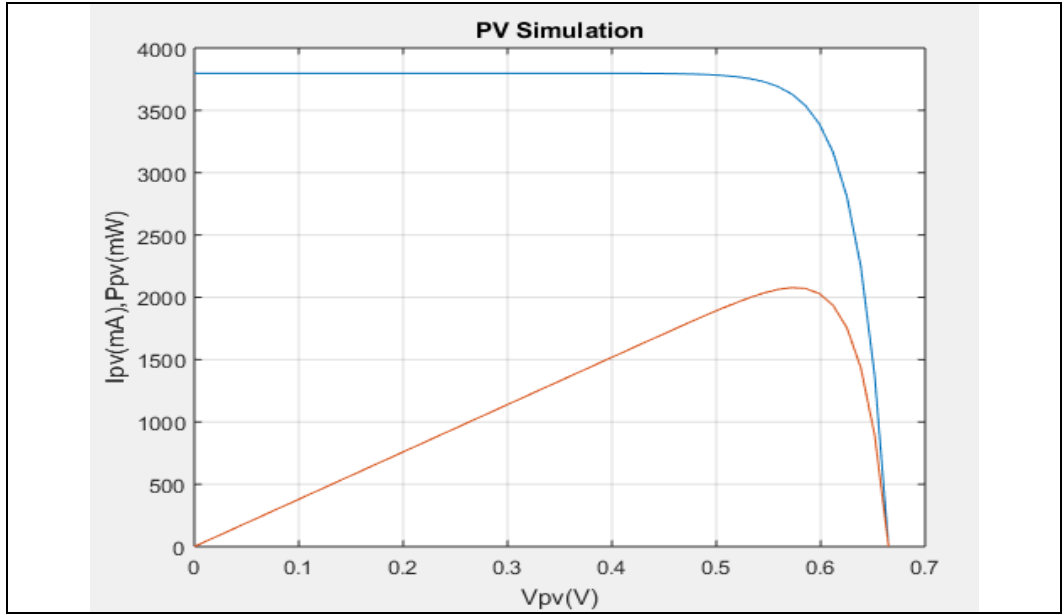
الشكل (12) مخطط نمذجة ومحاكاة اللوح الشمسي بوجود مادة b-Si

وبعد تنفيذ النموذج نحصل على النتائج الموضحة في الشكل (13):



الشكل (13): نتائج تشغيل النموذج منحنيات التيار والاستطاعة كتابع لجهد اللوح

ويوضح الشكل(14) منحنى الاستطاعة والتيار التابعة للجهد والنااتجة من كتابة كود برمجي خاص بالنموذج.



الشكل (14): منحنى الاستطاعة (أحمر) والتيار (أزرق) بدلالة الجهد

نستنتج من منحنىي (تيار-جهد) و(استطاعة-جهد) تطابق نقطة الاستطاعة الأعظمية. لقد ذكرنا أن عمليات إعادة الاتحاد تقلل من كفاءة الخلية وتسبب تدهوراً في خصائصها الكهربائية. ثم إن خاصية التنظيف الذاتي التي تمتلكها مادة b-Si تسبب مشكلة لترسيب طبقة المعدن عليها أو ترسيب طبقة التثبيط، لذلك يجب التحكم بسماكة الطبقة النانوية وحجمها للحصول على توازن في الخصائص الكهربائية والضوئية للخلية [9]. من المعلوم أنه بازدياد مساحة السطح تزداد سرعة إعادة اتحاد حوامل الشحنة في الخلية، وهذا بدوره يقلل من فترة حياة حوامل الشحنة، مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة الخلية. وفي الوقت ذاته، تزداد سرعة إعادة الاتحاد بازدياد سماكة الخلية وفق العلاقة التالية :

$$S_{eff}^f = \left(\frac{W}{2}\right) \left(\frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_{in}}\right) \quad (12)$$

W: سماكة الرقاقة، τ_{eff} : فترة حياة حوامل الشحنة الفعالة ، ، τ_{in} : فترة حياة حوامل الشحنة الذاتية

S_{eff}^f : سرعة إعادة الاتحاد حوامل الشحنة عند السطح الأمامي للخلية.

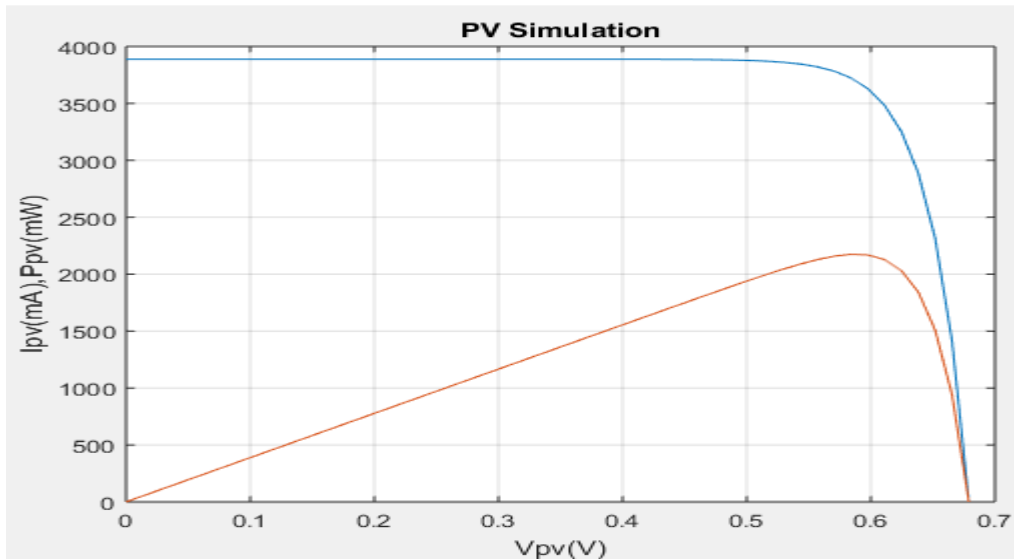
فإذا اعتبرنا أن السماكة $300\mu m$ وسرعة إعادة الاتحاد $20cm.s^{-1}$ [10] ويكون زمن حياة حوامل الشحنة $1ms$. نلاحظ أن ازدياد سماكة الطبقة سيقول من الانعكاسية، ولكن بنفس الوقت سيزيد من إعادة الاتحاد السطحي لحوامل الشحنة المتولدة ضوئياً وفقاً للعلاقة (12) .

وبفرض خفضنا السماكة سنلاحظ انخفاض في سرعة إعادة الاتحاد وزيادة في فترة حياة حوامل الشحنة لأن العلاقة فيما بينهما عكسية.

لذلك في هذه الدراسة سنختار باعثاً انتقائياً مطعماً ، بهدف تقليل مقاومة الوصلة بين ركيبة Si والطبقة المعدنية، لأن b-Si يحتوي مسامات عميقة لا يمكن للمعادن أن تسدها، وتشكيل وصلة p-n عميقة لمنع انتقال حوامل الشحنة عبرها والاتحاد مع النوع الأخر من حوامل الشحنة.

ولكن هذا الإجراء سيزيد من إعادة اتحاد أوجي، ولتفادي ذلك في جزء الخلية غير المغطى بالمعدن نقلل في الوقت ذاته من تركيز المطعومات (أي نقلل من تركيز الفوسفور) من خلال تقليل حجم التركيب النانوي. فمثلاً في حال تم تغطية الباعث ليشمل 83% منه سنحصل على قيم مرتفعة لعامل الملء 83.46% ، وبالتالي لجهد الدارة المفتوحة 679mV ، وكثافة تيار $J_{sc} = 42.3 \text{mA/cm}^2$ ، والكفاءة $\text{PCE} = \frac{V_{oc} I_{sc}^{FF}}{P_{in}} = 23.48\%$ ، وذلك باستخدام باعث درجة حرارة تطعيمه منخفضة ، لأنه عند درجات حرارة تطعيم أعلى سنلاحظ انخفاض في الكفاءة: والسبب في ذلك بأن الخلية ستدخل بمرحلة التسخين، وبالتالي سيقبل عدد حوامل الشحنة المتولدة ضوئياً، وسنحصل على إعادة اتحاد حوامل 1 شحنة كبير. هذا يؤثر بشكل سلبي على كفاءة الخلية. كما سنلاحظ ازدياد في قيمة الاستطاعة حيث تبلغ اعتماداً على هذه القيم 215.74 mW.

بنمذجة الخلية وفقاً لهذه المواصفات $V_{oc} = 679 \text{mV}$ و $J_{sc} = 42.3 \text{mA/cm}^2$ ، ووفقاً لشروط النمذجة نحصل على المنحني الموضح في الشكل (16)، والذي يبين زيادة الاستطاعة عن الحالة السابقة وبالتالي زيادة الكفاءة.



الشكل (15): منحني الاستطاعة (أحمر) والتيار (أزرق) بدلالة الجهد

النتائج والمناقشة:

نلاحظ ازدياد كثافة التيار بوجود الطبقة النانوية عنه في الخلية العادية بمقدار 15.58mA/cm^2 ، والكفاءة تزداد بحوالي 9% في الحالة الأولى، وفي حال زدنا تغطية الباعث لتشمل 83% نلاحظ أن كثافة التيار تزداد بمقدار 0.1mA/cm^2 عن الخلية النانوية ذات الكفاءة 22.1% ، وذلك بنفس الشروط التي تمت فيها النمذجة لكلتا الخليتين عند درجة حرارة وشدة إشعاع ثابتين.

نلاحظ من الخط البياني (7) تطابق نقطة الاستطاعة الأعظمية في كلا المنحنيين والمحسوبة من العلاقة البرمجي المنفذ لرسم منحنيات الاستطاعة والتيار كتابع لجهد اللوح، وكذلك بالنسبة للمنحني (15) بوجود المادة النانوية وفقاً للعلاقات المستخدمة في النمذجة.

كما نلاحظ ازدياد شدة تيار الدارة المقصورة مع ازدياد شدة الإشعاع الشمسي الساقط على الخلية؛ ويزداد بشكل طفيف مع ارتفاع درجة الحرارة.

كما نلاحظ أنه بازدياد سرعة إعادة اتحاد حوامل الشحنة سيؤثر على كفاءة الخلية والسبب في ذلك انخفاض فترة حياة حوامل الشحنة المتولدة ضوئياً كما هو موضح سابقاً.

لتخفيض عمليات إعادة اتحاد أوجي نخفض درجة حرارة تطعيم الباعث ونسبة تركيز الفوسفور والبور المستخدمان في تطعيمه.

تؤدي طبقة التثبيط في b-Si دوراً فعالاً في تقليل الانعكاسية عن سطح الخلية، والتي تحقق عملية امتصاص ضوئي عالٍ، وتقلل من عمليات إعادة الاتحاد. كما أن وجود طبقة b-Si يزيد من طول مسار الشعاع الفعال الساقط ويزيد من كفاءة الخلية كما هو موضح سابقاً.

الاستنتاجات والتوصيات:

تتمتع طبقة b-Si بإمكانية لتخفيض تكلفة تصنيع الخلايا الشمسية: من خلال تقليل الهدر في فصل رقائق السليكون من سبيكته باستخدام الطرق التقليدية، كما أن طبقة التثبيط في الخلايا المعيارية تتطلب سماكة معينة لا تتطلبها في مادة b-Si النانوية [12].

إن وجود طبقة (b-Si) يقلل من انعكاس الإشعاع الساقط على الخلية، ويزيد من خصائصها الضوئية، كما وتحقق كفاءة أعلى بالنسبة للخلية العادية.

كما وتؤدي درجة حرارة تطعيم الباعث دوراً مهماً في التحكم بإعادة الاتحاد في التراكيب النانوية، لذلك يجب دراسة تأثيرها على تلك التراكيب، ومقدار التحكم بها ونمذجتها لزيادة الكفاءة، والحد من تراجع الخصائص الكهربائية في النبيلة الفوتوفلطائية.

كما يوصى بدراسة تأثير زيادة مساحة سطح الخلية على تيار الدارة المقصورة وكفاءة الخلية مع المحافظة على سرعات إعادة اتحاد حوامل الشحنة منخفضة ضمن بنية الخلية.

المراجع

- 1] Yu, R. Qingfeng, L. Siu-Fung, L. and Zhiyong, F." *Nanomaterials and nanostructures for efficient light absorption and photovoltaics*". Nano energy 1, no. 1 ,2012,pp: 57-72.
- 2] Tsai HL, Tu CS, Su YJ. Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK. In Proceedings of the world congress .(on Engineering and computer science 2008 Oct 22 (Vol. 2008, pp. 1-6
- 3] FOTIS, K. "*Modeling and simulation of a dual-junction CIGS solar cell using Silvaco ATLAS*". Naval Postgraduate School Monterey CA, 2012.
- 4] Villalva MG, Gazoli JR, Ruppert Filho E. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. IEEE Transactions on power electronics. 2009 May;24(5):1198-208
- 5] González-Longatt, Francisco M. *Model of photovoltaic module in Matlab. Ii Cibelec 2005* (2005): 1-5.
- 6] Würfel, P and Uli, W." *Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts*". John Wiley & Sons, 2016.
- 7] González-Pedro, V. Xueqing, X. Iván Mora-S, and Juan, B. "Modeling high-efficiency quantum dot sensitized solar cells." ACS nano 4, no. 10 (2010): 5783-5790.
- 8] Zhenxiao-P,Huashang-R,Ivan Mora-S,Juan-B,and Xinhua Z."Quantum dot-sensitized solar cell". aCollege of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China.2018
- 9] Zhong, S. Zengguang, H. Xingxing, L. Yang, Z. Yechi, M. and Wenzhong, Sh. "*High-Efficiency Nanostructured Silicon Solar Cells on a Large Scale Realized Through the Suppression of Recombination Channels*." Advanced materials 27, no. 3, 2015,PP: 555-561.
- 10] Savin,H. Päivikki ,R. Guillaume –Von, G.Pablo, O.Eric, C. Moises , G. and Ramon, A. "*Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency*." Nature nanotechnology 10, no. 7,2015,pp: 624.
- 11] Oh, J. Hao-Chih, Y.and Howard M, Br. "*An 18.2%-efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures*." Nature nanotechnology 7, no. 11 ,2012,pp: 743.
- 12] Liu, X. Paul R, C. Marius, P. Bram, H. Jacqueline M, C. and Derek J, F. "*Black silicon: fabrication methods, properties and solar energy applications*." Energy & Environmental Science 7, no. 10 ,2014,pp: 3223-3263.
- 13] Plakhotnyuk, M. Rasmus Schmidt, D. Michael Stenbæk, S. Radu, M.Eugen, S.and Ole ,H. "*Lifetime of nano-structured black silicon for photovoltaic applications*." In 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2016.
- 14] Garin, J. Heinonen, L. Werner, P. Pasanen, V. Vahanissi, A. Haara ,h. and H. Savin. "*Black silicon UV photodiodes achieve > 130% external quantum efficiency*." arXiv preprint arXiv:1907. 13397 , 2019.
- 15] Al Thnakodi.Suresh. "*Modeling and simulation of grid connected photovoltaic system using Matlab/Simulink*." november, 2009.