

دراسة تأثير بعض العوامل الفيزيائية على كفاءة

الخلية الشمسية السيليكونية باستخدام النمذجة

صالح الدرويش¹ د. أحمد العبدو² د. ناصر سعد الدين³

ملخص:

تم في هذا البحث دراسة الدارة الالكترونية المكافئة للخلية الشمسية السيليكونية ودراسة بارامترات خرج الخلية الشمسية السيليكونية والمنحنيات المميزة لها مثل منحنى (الطاقة - جهد) ومنحنى (الجهد - تيار) ثم قمنا بدراسة تأثير بعض العوامل الفيزيائية مثل درجة الحرارة وشدة الإشعاع الساقط ومساحة سطح الخلية الشمسية وسماكة كل من المنطقتين n ، p وتركيز الإشابة في كل من نصفي الناقلين n و p على عمل وكفاءة الخلية الشمسية السيليكونية وذلك باستخدام برنامج PC1D .

وذلك عن طريق تثبيت بارامترات العمل وتغيير البارامتر المراد معرفة تأثيره على كفاءة الخلية الشمسية ورسم المنحنيات المميزة وحساب الكفاءة بعد إجراء كل تغيير.

كلمات مفتاحية: الخلية الشمسية السيليكونية، PC1D ، تركيز الإشابة، الكفاءة، عامل الملء.

1- طالب دكتوراه في قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة حمص 2- أستاذ مساعد في قسم الفيزياء-كلية العلوم
قسم الفيزياء 3- أستاذ في قسم الفيزياء-كلية العلوم-قسم الفيزياء

Studying the effect of some physical factors on the efficiency of silicon solar cells using modeling

Saleh Aldarwish
University of Al-Baath Faculty of science
Dept. of Physics –Homs-Syria

Abstract

In this research, the equivalent electrical circuit of the silicon cell was studied, and the solar thermal decomposition features and their distinctive features from silicon were studied, such as the (energy-voltage) curve and the (voltage-current) curve, then the desire to study some physical factors such as temperature, intensity of reading the effect of the solar energy surface and the thickness of each of the two regions n, p and the concentration of the ion in each of the two semiconductors n and p on the work of solar agricultural contributions was studied using the PC1D program. This was done by installing the plans of the parameters of the work of changing the parameters to know their effect on the effective solar energy and drawing the distinctive points and calculating the commitment after making each change.

Keywords: silicon solar cell, PC1D, doping concentration, efficiency, fill factor

1 - مقدمة

مع تزايد الطلب على الطاقة عالمياً وزيادة القلق بشأن الآثار البيئية السلبية الناتجة عن استخدام الوقود الأحفوري أصبح توليد الكهرباء العالمي ينمو بشكل دائم على مدى العقود الماضية [1]. حيث أصبح التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة أمراً ضرورياً لتحقيق التنمية المستدامة. تُعد الطاقة المتجددة الخيار الأمثل نظراً لاستدامتها وقلة تأثيرها البيئي، حيث تتوفر مصادرها بكميات لا تنفذ مثل الشمس والرياح والمياه [2].

وبحسب تقرير الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)، فإن الطاقة المتجددة ساهمت بشكل متزايد في إنتاج الطاقة العالمي، حيث تضاعفت القدرات الإنتاجية للطاقة الشمسية والريحية في العقد الأخير [3].

تُعد الطاقة الشمسية أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة نظراً لتوفرها الكبير في جميع أنحاء العالم ولقدرتها على توليد كميات كبيرة من الكهرباء بدون انبعاثات كربونية [4]. وتُستخدم الخلايا الشمسية السيليكونية على نطاق واسع في هذا المجال، إذ تشكل نحو 90% من سوق الخلايا الشمسية العالمية [5].

تعتبر هذه الخلايا أحد أبرز التقنيات المستخدمة في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية نظراً لكفاءتها العالية نسبياً وتوافر مادة السيليكون بشكل جيد [6].

ومع ذلك، لا تزال كفاءة الخلايا الشمسية السيليكونية تتأثر بعدة عوامل فيزيائية، مثل درجة الحرارة، والإشعاع الشمسي، وجودة المواد المستخدمة في تصنيع وتوصيل الخلايا السيليكونية، مما يحفز الباحثين لتحسين أدائها من خلال النمذجة والمحاكاة.

تحسين كفاءة هذه الخلايا ليس فقط يزيد من قدرتها على إنتاج الطاقة ولكنه يساهم أيضاً في تقليل التكلفة الاقتصادية والطاقة المهدورة [7].

حيث يوجد دائماً مقايضة بين تكاليف الإنتاج وكفاءة التحويل لذلك، من الضروري فهم آليات الخسارة المختلفة التي تحد من كفاءة جهاز الطاقة الكهروضوئية المطلوب لتحسين التكاليف المقابلة للإنتاج [8].

نظراً لأن التأثيرات التكنولوجية والفيزيائية متعددة حتى على مستوى الخلية الواحدة (بما في ذلك المواد الأساسية وهندسة الخلية والعمليات الفيزيائية وتحسين الخلايا الفردية). إن محاكاة الأجهزة الكهروضوئية تعتبر نهج ممتاز لمعالجة هذه المهمة المعقدة والصعبة. وبالتالي، فإن مفتاح النمذجة الدقيقة والتنبؤية للأجهزة هو المعرفة السليمة والفهم للفيزياء الأساسية [9].

ومن هنا، تأتي أهمية دراسة تأثير العوامل الفيزيائية المختلفة على أداء الخلايا الشمسية السيليكونية.

2 - أهداف البحث:

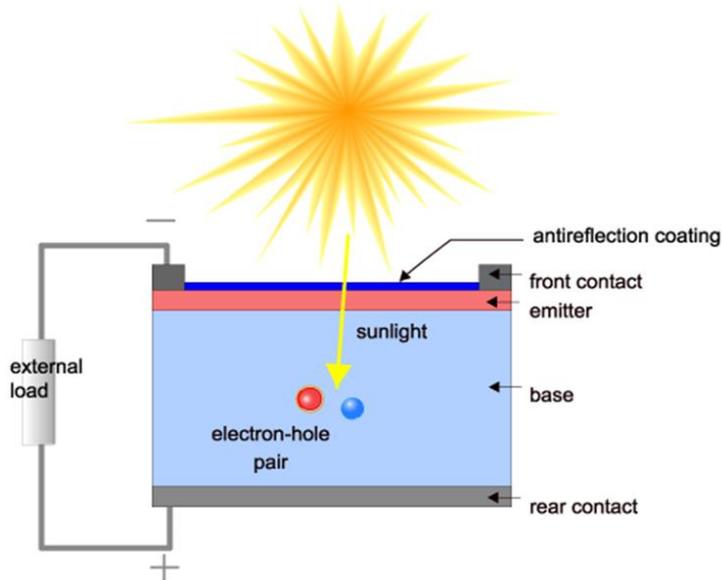
يهدف البحث إلى:

- 1 - دراسة الدارة المكافئة للخلية الشمسية السيليكونية أحادية التبلور *monocrystalline*.
- 2- نمذجة الخلية الشمسية السيليكونية أحادية التبلور *monocrystalline* باستخدام برنامج PC1D وفق بارامترات عمل بدائية محددة تتناسب مع تقنيات التصنيع.
- 2 - دراسة الميزة I-V والميزة P-V وحساب الكفاءة وعامل الملء للخلية الشمسية للخلية الشمسية الأولية.
- 3 - تطبيق تغييرات في أحد العوامل الفيزيائية وثبيت بقية العوامل ثم حساب الكفاءة وعامل الملء ورسم الميزتين I-V والميزة P-V لمعرفة تأثير هذا العامل على أداء الخلية الشمسية السيليكونية.

3 - مواد وطرق البحث:

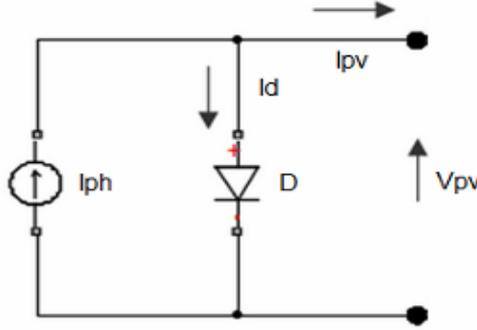
الخلية الشمسية هي عبارة عن جهاز إلكتروني يحول ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء. ينتج الضوء الساقط على سطح الخلية الشمسية تياراً وجهداً لتوليد الطاقة الكهربائية [10]. تتطلب هذه العملية أولاً، مادة يرفع فيها امتصاص الضوء إلكترونات إلى حالة طاقة أعلى، وثانياً، نقل هذا الإلكترون ذي الطاقة الأعلى من الخلية الشمسية إلى الدارة خارجية. ثم يبذل الإلكترون طاقته في الدارة الخارجية ويعود إلى الخلية الشمسية. يمكن لمجموعة متنوعة من المواد والعمليات أن تلبى متطلبات تحويل الطاقة الكهروضوئية، ولكن في الحالة العملية، تستخدم جميع عمليات تحويل الطاقة الكهروضوئية تقريباً مواد أنصاف النواقل مثل السيليكون والجرمانيوم في شكل وصلة p-n [11].

يبين الشكل (1) مقطع عرضي للخلية الشمسية.



الشكل (1) مقطع عرضي للخلية الشمسية السيليكونية

حيث يمكن تمثيل الخلية الشمسية السيليكونية بواسطة متصل ثنائي PN. وبالتالي يمكن الحصول على الدارة المكافئة للخلية الشمسية عن طريق نموذج الداوود المفرد. حيث يبين الشكل (2) الدارة المكافئة للخلية الشمسية المثالية [12].



الشكل (2) الدارة المكافئة للخلية الشمسية المثالية

تتكون الدائرة المكافئة للخلية الشمسية من الصمام الثنائي ومنبع التيار المتصلين على التفرع. ينتج المصدر الضوئي التيار I_{ph} ، والذي يتناسب طردياً مع الإشعاع الشمسي G . البارامترات الرئيسية المستخدمة لتوصيف الخلية الكهروضوئية (PV) هي تيار الدائرة القصيرة وجهد الدائرة المفتوحة [13].

المعادلة التي تصف الدارة المكافئة المثالية مشتقة من قانون كيرشوف:

$$I_{PV} = I_{PH} - I_d \quad (1)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V_{PV}}{NKT}} - 1 \right) \quad (2)$$

بالتعويض بالمعادلة (1) ينتج لدينا: [14]

$$I_{PV} = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V_{PV}}{NKT}} - 1 \right) \quad (3)$$

حيث:

I_{PH} التيار الضوئي والذي يساوي تيار الدائرة القصيرة I_{SC} .

I_{PV} التيار الناتج عن الخلية الشمسية المثالية.

I_d تيار الدايدود.

I_0 تيار الإشباع العكسي للدايدود.

q شحنة الإلكترون.

N عامل المثالية للدايدود (قيمه من أجل الخلايا الشمسية الجيدة تكون قريبة من الواحد)

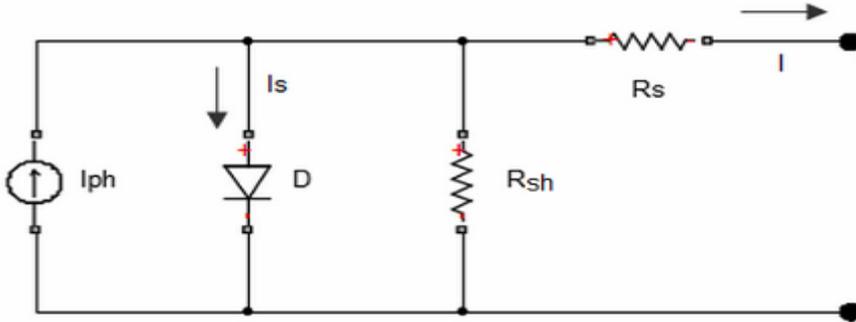
K ثابت بولتزمان.

T درجة حرارة الوصلة الثنائية.

V_{PV} الجهد عبر الخلية الشمسية.

للحصول على تمثيل أفضل للسلوك الكهربائي للخلية الشمسية العملية، يأخذ النموذج الثاني في الاعتبار المقاومة التسلسلية والمقاومة التفرعية بسبب الخسائر الكهربائية في مستويات التلامس بين طبقتي الخلية الشمسية [14].

يبين الشكل (3) الدارة المكافئة للخلية الشمسية العملية والتي سوف يتم إجراء المحاكاة عليها.



الشكل (3) الدارة المكافئة للخلية الشمسية العملية والتي سوف يتم إجراء المحاكاة عليها.

حيث يعطى التيار الناتج عن الخلية الشمسية السيليكونية بالعلاقة: [15]

$$I = I_{PH} - I_0 \left(\exp \frac{q(V + R_S \cdot I)}{NKT} - 1 \right) - \frac{(V + R_S \cdot I)}{R_{SH}} \quad (4)$$

وحيث: R_S المقاومة التسلسلية، R_{SH} المقاومة التفرعية.

من المعادلة (4) يمكن حساب البارامترات الرئيسية التي تصف الخلية الشمسية مثل:
 ❖ تيار القصر I_{SC} : ويساوي التيار الناتج بواسطة الضوء عند فرق كمون معدوم أي عند قصر الدارة .

$$I_{SC} = I_{PH} \quad (5)$$

❖ جهد الدارة المفتوحة V_{OC} : نحصل عليه عندما لا يمر تيار في الخلية أي عندما نجعل التيار في المعادلة (4) يساوي الصفر ويعطى بالعلاقة: [16]

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{PH}}{I_0} + 1 \right) \quad (6)$$

حيث K : ثابت بولتزمان، T : درجة الحرارة المطلقة، q : عامل المثالية، I_{PH} : التيار الناتج بالضوء، I_0 : تيار الإشباع العكسي للدايود.

❖ عامل الملء FF : هو مقياس لمدى مربعة خصائص الخرج ويمثل نسبة السطح المحصور عند نقطة العمل المثلى الى السطح المحصور في المميّزة $I-V$. الخلايا الشمسية التجارية النموذجية لها عامل تعبئة < 0.70 . [17].

$$FF = \frac{I_{MP}V_{MP}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (7)$$

I_{MP}, V_{MP} قيمة التيار والجهد الأعظمي.

❖ كفاءة تحويل الطاقة الشمسية (المردود) [18]:

$$\eta = \frac{I_{MP}V_{MP}}{P_{IN}} = \frac{I_{SC}V_{OC}FF}{P_{IN}} \quad (8)$$

4 - النتائج والمناقشة

4 - 1 - نمذجة الخلية الشمسية السيليكونية (الدائرة الأولية):

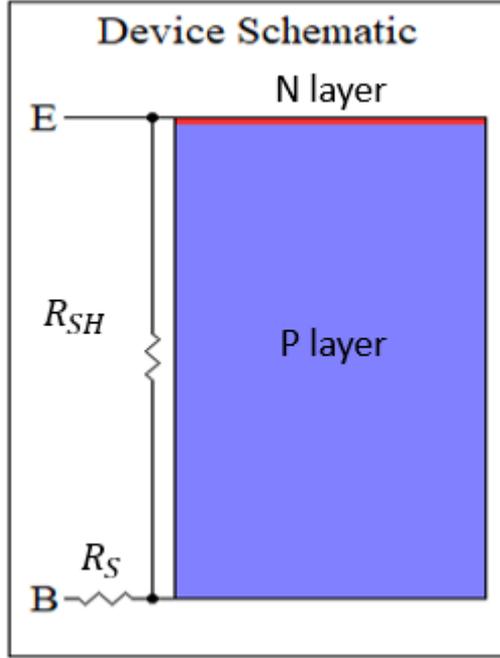
تم استخدام برنامج PC1D، الذي تم تطويره من قبل جامعة نيو ساوث ويلز، لمحاكاة خصائص الخلايا الكهروضوئية لأجهزة أنصاف النواقل البلورية، يتم إجراء محاكاة الخلية الشمسية السيليكونية عن طريق إعداد بارامترات رئيسية، والتي تشمل مساحة الجهاز، والسماكة، وعرض المجال المحطور، وما إلى ذلك. حيث يتم الحصول على العديد من الخصائص المهمة للخلايا الشمسية السيليكون عن طريق المحاكاة [19].

حيث يوضح الجدول (1) بارامترات العمل البدائية المستخدمة لنمذجة الخلية الشمسية السيليكونية أحادية التبلور mono crystalline.

الجدول (1)

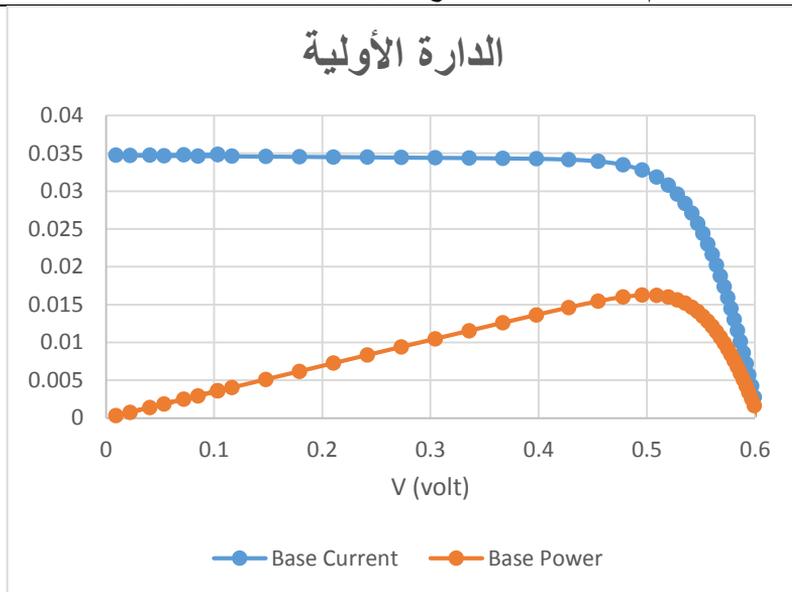
1 cm ²	مساحة الجهاز Devise area
3.33 Ω	المقاومة التفرعية R _{shunt}
0.8 Ω	المقاومة التسلسلية R _{series}
%5	الانعكاس عن السطح الأمامي
180 μm	سماكة الطبقة p
0.1 μm	سماكة الطبقة n
1 × 10 ¹⁶ cm ⁻³	تركيز إشابة المنطقة p
2 × 10 ²⁰ cm ⁻³	تركيز إشابة المنطقة n
1.124 eV	المجال المحطور
25 °C	درجة الحرارة
1.5 gr/space	الكتلة الهوائية
0.1 w/cm ²	شدة الإشعاع الشمسي

يبين الشكل (4) مخطط الدارة المكافئة للخلية الشمسية السيليكونية المنفذة وفق برنامج المحاكاة.



الشكل (4) مخطط الخلية الشمسية السيليكونية وفق برنامج المحاكاة

تم الحصول على نتائج المحاكاة ورسم الميزة I-V والميزة P-V حيث يبين الشكل (5) الميزتين I-V, P-V للخلية الشمسية السيليكونية الأولية.



الشكل (5) الميزتين I-V, P-V, للخلية الشمسية السيليكونية البدائية.

تم الحصول على قيم I_{SC} , V_{OC} , P_{MAX} من خلال المحاكاة وباستخدام العلاقتين 2 و 3 تم حساب الكفاءة وعامل الملء وتم الحصول على النتائج المبينة بالجدول (2)

بالجدول (2)

	Isc (A)	Voc(V)	Pmax(W)	FF	□	□%
البحث الحالي	0.0347	0.603	0.0163	0.78	0.163	16.3%
المرجع [20]	0.0329	0.532	0.0178	0.79	0.164	16.4%

يعود الاختلاف بين قيم البحث الحالي والمرجع لاختلاف شروط البدء.

4 - 2 - دراسة تأثير مساحة سطح الخلية الشمسية السيليكونية على أداء الخلية:

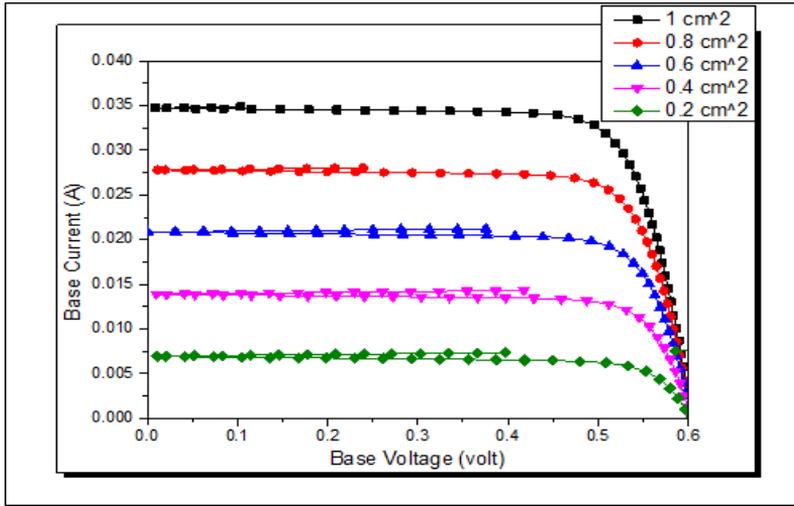
تم إجراء تغيير لمساحة سطح الخلية الشمسية السيليكونية وفق القيم (0.2-0.4-0.6-0.8-1) cm².

يبين الجدول (3) نتائج المحاكاة وحسابات الكفاءة وعامل الملء لحالات مساحة السطح المختلفة:

الجدول (3)

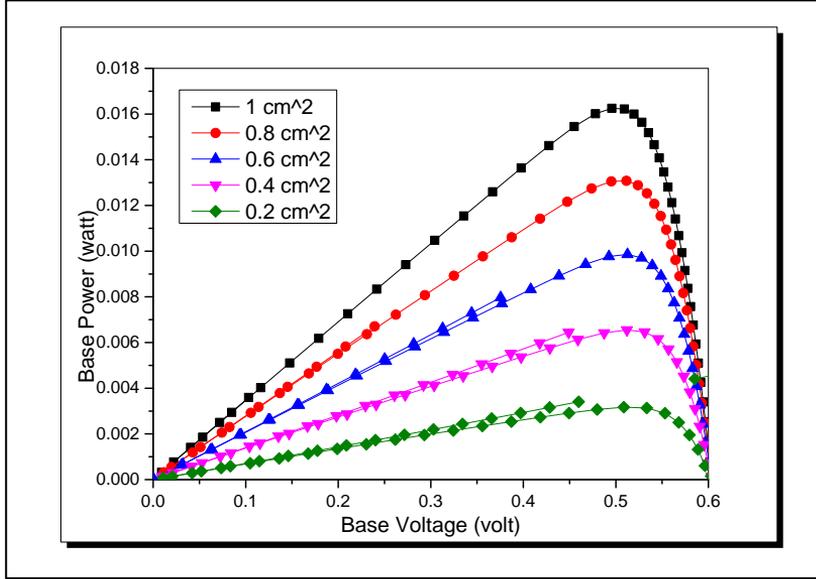
Surface area(cm ²)	Isc (A)	Voc (V)	Pmax (w)	Pin (w)	FF	η	η%
0.2	0.006947	0.6017	0.003171	0.1	0.758611	0.15855	15.855
0.4	0.0139	0.6029	0.006551	0.1	0.781713	0.163775	16.3775
0.6	0.0208	0.6033	0.009859	0.1	0.785663	0.164317	16.43167
0.8	0.0278	0.6035	0.0131	0.1	0.780817	0.16375	16.375
1	0.0347	0.6036	0.0163	0.1	0.778232	0.163	16.3

يبين الشكل (6) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم السطح المختلفة.



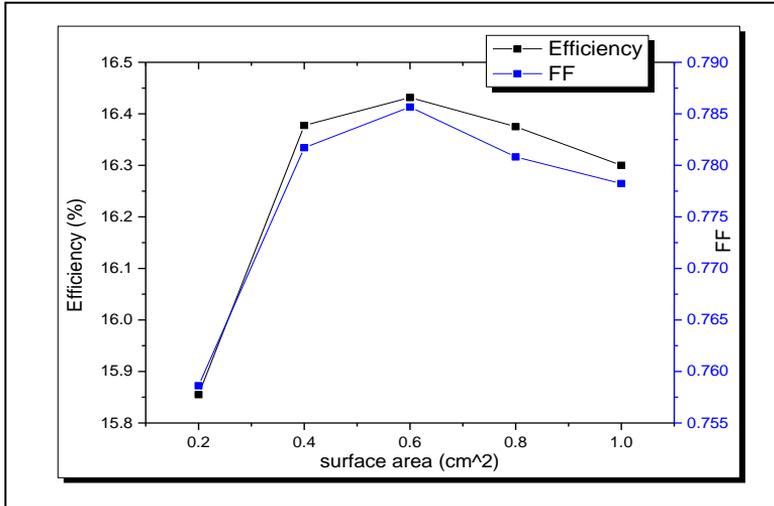
الشكل (6) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم السطح المختلفة.

كما يبين الشكل (7) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم السطح المختلفة.



الشكل (7) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم السطح المختلفة.

يبين الشكل (8) تغيرات الكفاءة وعامل الملء بدلالة مساحة سطح الخلية الشمسية السيليكونية.



الشكل (8) تغيرات الكفاءة وعامل الملء بدلالة مساحة سطح الخلية الشمسية السيليكونية.

نلاحظ من الشكل (8) والقيم في الجدول (3) زيادة الكفاءة وعامل الملاءمة مع زيادة سطح الخلية الشمسية السيليكونية المعرض للضوء وذلك بسبب زيادة تيار الدارة المقصورة بشكل واضح ولكن مع ازدياد السطح فإن قيمة الكفاءة وعامل الملاءمة تتناقص على الرغم من زيادة تيار الدارة المقصورة وكمون الدارة المفتوحة وذلك يعود الى عمليات إعادة الاتحاد السطحي التي تزداد بزيادة مساحة سطح الخلية الشمسية [21].

4 - 3 - دراسة تأثير شدة الإشعاع الشمسي على أداء الخلية الشمسية السيليكونية:
من أهم البارامترات التي تؤثر على خرج وكفاءة الخلية الشمسية السيليكونية هي شدة الإشعاع الشمسي حيث يتم تحديد اعتماد الخلية الشمسية السيليكونية على شدة الإشعاع الشمسي من خلال العلاقة: [22]

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_I(T - 298)] \frac{\beta}{100}$$

حيث:

I_{PH} التيار الضوئي (A)

K_I المعامل الحراري لتيار الدارة المقصورة $A/^\circ C$.

I_{SC} تيار الدارة المقصورة (A).

T درجة الحرارة المطلقة (K).

β شدة الإشعاع الشمسي (W/m^2)

حيث نلاحظ من العلاقة زيادة شدة التيار الضوئي بزيادة شدة الإشعاع الشمسي.

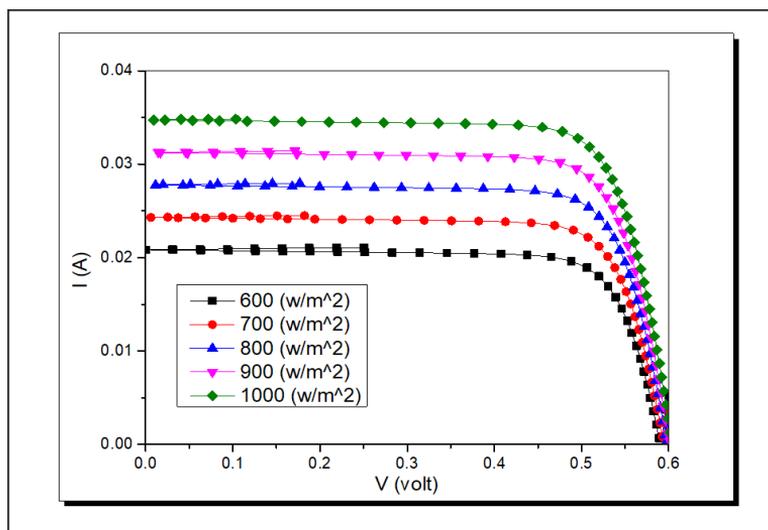
يبين الجدول (4) قيم نتائج المحاكاة المأخوذة من أجل قيم شدة الإشعاع الشمسي

(600-700-800-900-1000-1100) W/m^2

الجدول (4)

I (W/m ²)	Isc(A)	Voc(V)	P max(W)	P in(W)	FF	□	□%
600	0.0208	0.5903	0.009613	0.06	0.78293	0.160217	16.02%
700	0.0243	0.5944	0.0113	0.07	0.782336	0.161429	16.14%
800	0.0278	0.5979	0.013	0.08	0.782114	0.1625	16.25%
900	0.0313	0.6009	0.0146	0.09	0.776258	0.162222	16.22%
1000	0.0347	0.6036	0.0163	0.1	0.778232	0.163	16.30%
1100	0.0382	0.6061	0.0179	0.11	0.773117	0.162727	16.27%

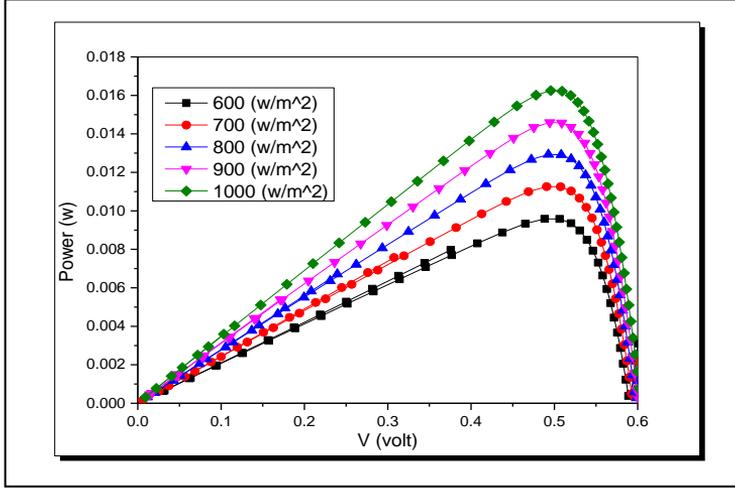
كما يبين الشكل (9) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية عند قيم شدات إشعاع شمسي مختلفة.



الشكل (9) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية عند قيم شدات إشعاع شمسي

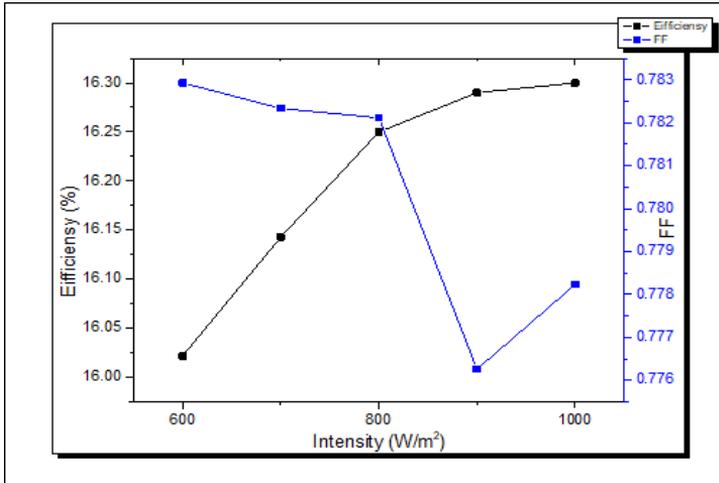
مختلفة.

كما يبين الشكل (10) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية عند قيم شدات إشعاع شمسي مختلفة.



الشكل (10) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية عند قيم شدات إشعاع شمسي مختلفة.

يبين الشكل (11) تغيرات الكفاءة وعامل الملء بدلالة قيم شدة الإشعاع الشمسي الوارد.



الشكل (11) تغيرات الكفاءة وعامل الملء بدلالة قيم شدة الإشعاع الشمسي الوارد.

نلاحظ من الشكل (11) أن الكفاءة تزداد بزيادة شدة الإشعاع الضوئي نظراً لزيادة تيار الدارة المقصورة والذي يعود الى زيادة الأزواج المتولدة ضوئياً والتي تزداد بزيادة عدد الفوتونات الساقطة مع وجود قيم مقبولة لعامل الملء عند جميع قيم الشدات الضوئية المدروسة [23].

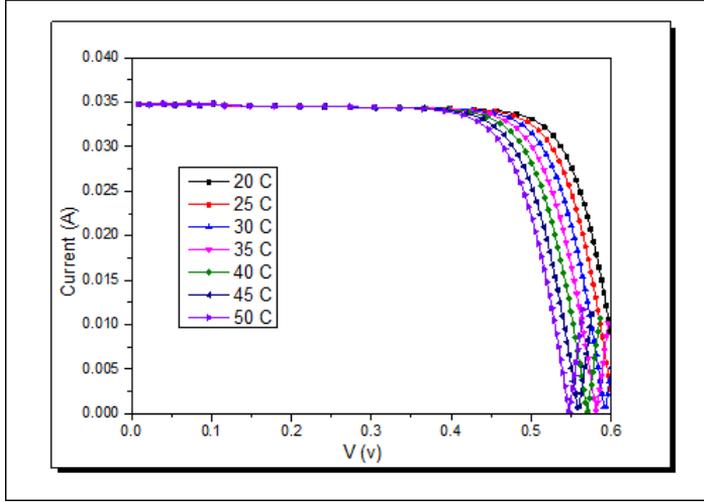
4 - 4 - دراسة تأثير درجة الحرارة على أداء الخلية الشمسية السيليكونية:

يبين الجدول (5) نتائج المحاكاة وحسابات الكفاءة وعامل الملء من أجل درجات حرارة مختلفة ضمن المجال $^{\circ}\text{C}$ (20 - 25 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50):

الجدول (5)

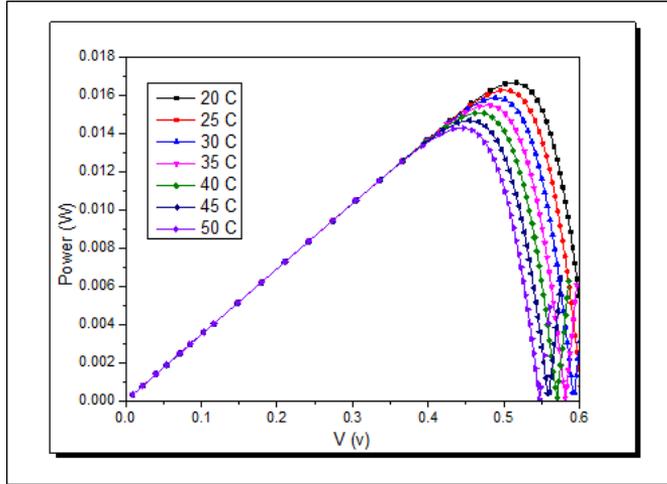
T (°C)	Isc(A)	Voc(V)	P _{max} (W)	P in(W)	FF	□	□%
20	0.0347	0.6148	0.0167	0.1	0.782804	0.167	16.70
25	0.0347	0.6036	0.0163	0.1	0.778232	0.163	16.30
30	0.0347	0.5925	0.0159	0.1	0.773356	0.159	15.90
35	0.0347	0.5813	0.0155	0.1	0.768426	0.155	15.50
40	0.0347	0.57	0.0151	0.1	0.763436	0.151	15.10
45	0.0348	0.5588	0.0147	0.1	0.75593	0.147	14.70
50	0.0348	0.5475	0.0143	0.1	0.750538	0.143	14.30

كما يبين الشكل (12) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية عند قيم درجات حرارة ضمن المجال المدروس.



الشكل (12) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية عند قيم درجات حرارة ضمن المجال المدروس.

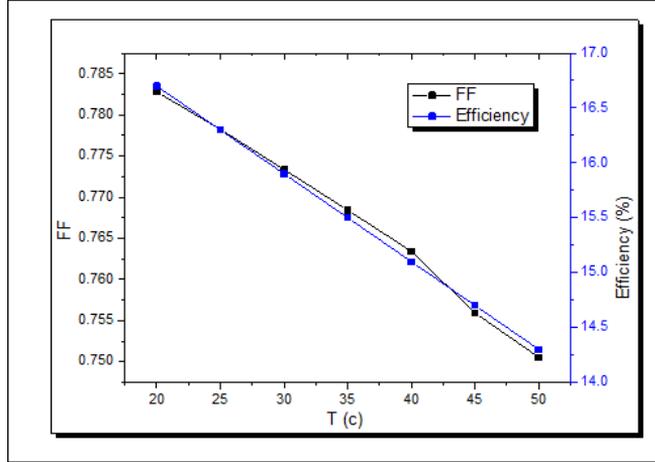
كما يبين الشكل (13) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية عند قيم درجات حرارة ضمن المجال المدروس.



الشكل (13) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية عند قيم درجات حرارة ضمن المجال المدروس.

يبين الشكل (14) العلاقة بين قيم الكفاءة وعامل الملء بدلالة درجات الحرارة ضمن المجال

المدرّوس.



الشكل (14) العلاقة بين قيم الكفاءة وعامل الملء بدلالة درجات الحرارة ضمن المجال

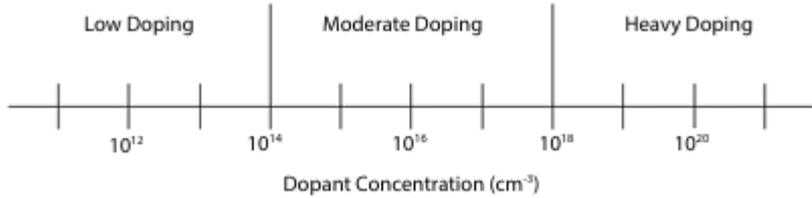
المدرّوس.

نلاحظ من الشكل (14) تناقص قيمة كفاءة الخلية الشمسية السيليكونية وعامل الملء بزيادة درجة الحرارة بالرغم من أن الخلية الشمسية السيليكونية تعتبر نصف ناقل أي تزداد ناقلية بزيادة درجة الحرارة حيث نلاحظ من الشكل (12) زيادة التيار زيادة طفيفة بزيادة درجة الحرارة ولكن الكفاءة والاستطاعة وكمون الدارة المفتوحة وعامل الملء يتناقص وهذا يتوافق مع العمل العلمي [24].

4 - 5 - دراسة تأثير تركيز الإشابات في نصفي الناقلين N,P على أداء الخلية الشمسية السيليكونية:

يتم تعديل تركيز الإلكترونات والثقوب في الخلية الشمسية المصنوعة من السيليكون وتحسينها عن طريق التشويب. يؤثر تركيز التشويب ونوع التشويب (ضحل أو عميق) على التوصيل الكهربائي لمادة أنصاف النواقل، مما يجعل الخلية الشمسية أكثر كفاءة. يعتمد التوصيل الكهربائي للخلية الشمسية المصنوعة من السيليكون بشكل أساسي على البارامترات مثل تركيز التشويب

وحركة الإلكترونات والثغوب في منطقة أنصاف النواقل للخلية الشمسية. يوضح الشكل مستويات تركيز التشويب المختلفة للخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون.



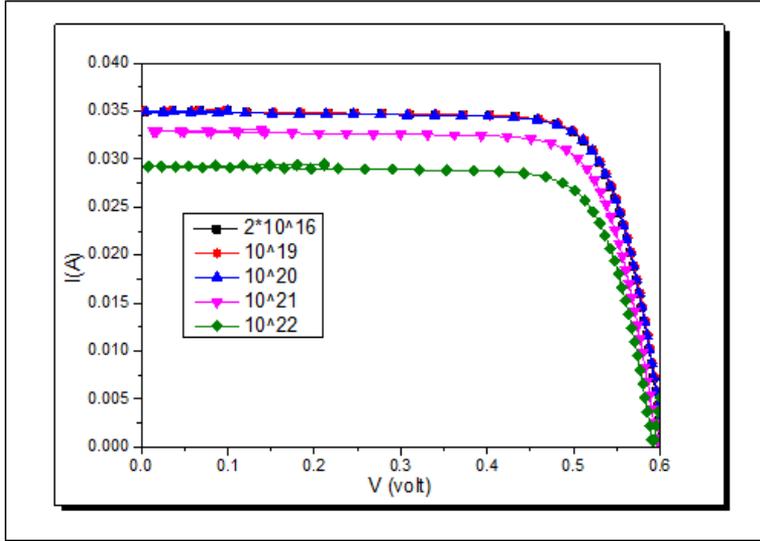
يتم امتصاص جزء كبير من الضوء على سطح الخلية الشمسية مما يؤدي إلى معدل توليد أزواج ضوئية مرتفع. يجب تصميم تركيز الإشابات وسمك الباعث بعناية من أجل امتصاص معظم الضوء الوارد. يمكن أن يؤدي تركيز المنشطات العالي في هذه الطبقات إلى انخفاض الكفاءة الكلية بسبب انخفاض نفاذية وامتصاص الضوء ومعدل إعادة اتحاد أكبر [25]. ولكن هناك حاجة أيضًا إلى تركيز عالٍ بما يكفي لمساعدة آلية النقل بالانجراف وتحقيق مقاومة صيحة أقل. 4 - 5 - 1 دراسة تأثير تركيز الإشابات في نصف الناقل N على أداء الخلية الشمسية السيليكونية:

يوضح الجدول (6) تغيرات قيمة مقاومة الصفيحة (R_{sheet}) وعمق الوصلة والكفاءة وعامل الملاء من أجل قيم مختلفة لتركيز الشوائب في المنطقة n. تُعد قيمة مقاومة صفيحة الباعث (R_{sheet}) بارامتر ذو تحكم عملي كبير في عملية تصنيع خلايا السيليكون حيث لها تأثير كبير على التكلفة.

الجدول (6)

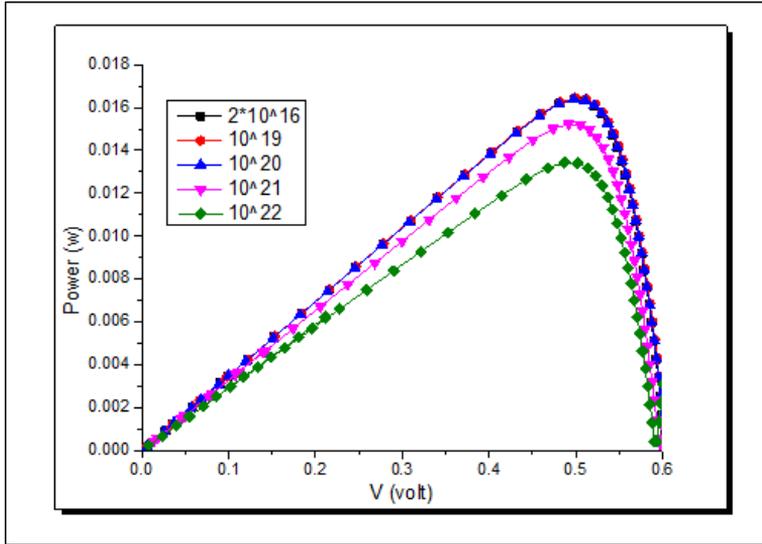
n doping (cm ⁻³)	Junction depth (um)	sheet resistance(Ω/Cm ²)	Isc(A)	Voc(V)	Pmax(W)	Pin(W)	FF	η%
10 ¹⁹	0.2327	662.4	0.035	0.6057	0.0165	0.1	0.77832	16.5
10 ²⁰	0.2751	128.1	0.0349	0.6048	0.0164	0.1	0.776974	16.4
10 ²¹	0.3123	16.76	0.0329	0.5971	0.0152	0.1	0.77375	15.2
10 ²²	0.3459	1.805	0.0292	0.592	0.0134	0.1	0.775176	13.4
2*10 ¹⁶	0.04769	79650	0.035	0.6044	0.0164	0.1	0.775267	16.4

يوضح الشكل (15) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز الإشابة في المنطقة N.



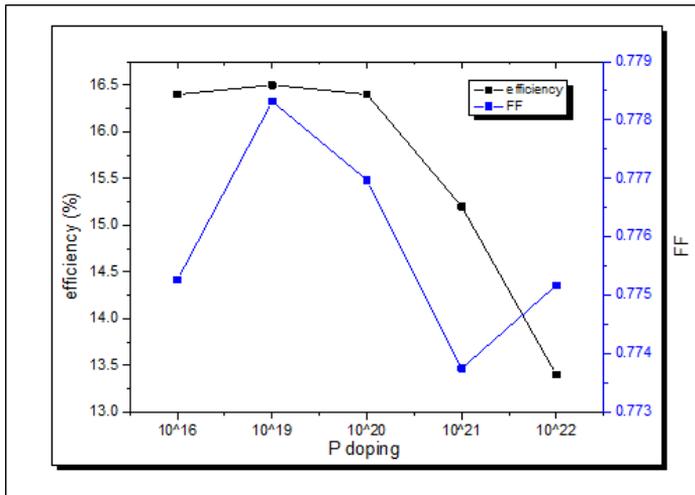
الشكل (15) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز الإشابة في المنطقة N.

يوضح الشكل (16) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز الإشابة في المنطقة N.



الشكل (16) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز الإشابة في المنطقة N.

يوضح الشكل (17) تغيرات قيمة الكفاءة وعامل الملء للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز المنطقة N.



الشكل (17) تغيرات قيمة الكفاءة وعامل الملء للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز المنطقة N.

نلاحظ من الجدول (6) والشكل (17) أن تركيز الشوائب المنخفض تكون الكفاءة عالية بسبب مقاومة الصفيحة العالية وعامل ملء ضعيف وتكون أعلى قيمة للكفاءة عند تركيز 10^{19} بسبب ضيق المجال المحطور لنصف الناقل وزيادة الناقلية ومع زيادة التركيز تتخفض الكفاءة بسبب نقصان مقاومة الصفيحة وزيادة عمليات إعادة الاتحاد بشكل كبير. [26]

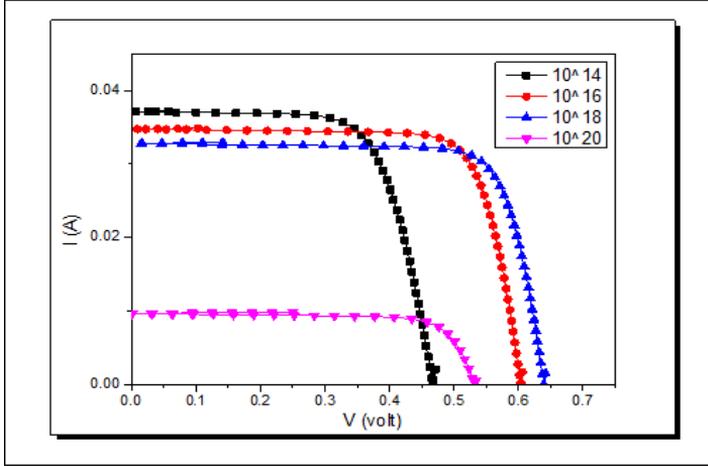
4 - 5 - 2- دراسة تأثير تركيز الإشابات في نصف الناقل P على أداء الخلية الشمسية السيليكونية:

يوضح الجدول (7) تغيرات قيمة المقاومة النوعية للصفيحة والكفاءة وعامل الملء من أجل قيم مختلفة لتركيز الشوائب في المنطقة P.

الجدول (7)

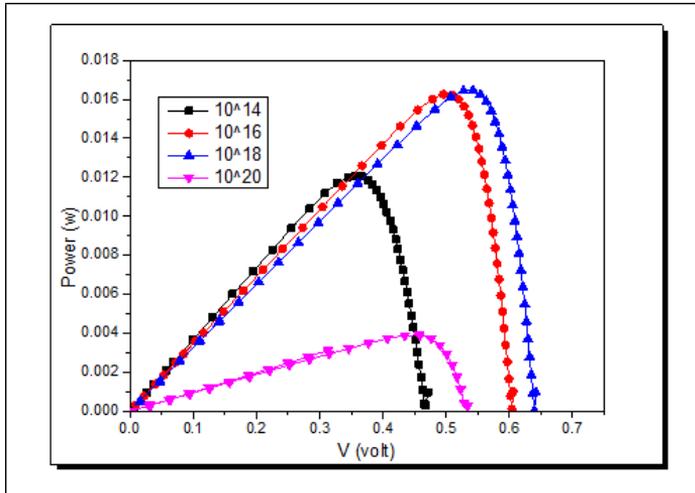
P doping(cm^{-3})	Resistivity($\Omega.\text{cm}$)	Isc(A)	Voc(V)	Pmax(W)	Pin(W)	FF	$\square\%$
10^{14}	133.5	0.0371	0.4671	0.0121	0.1	0.698235	12.1
10^{16}	1.47	0.0347	0.6036	0.0163	0.1	0.778232	16.3
10^{18}	0.03664	0.0328	0.6394	0.0165	0.1	0.786751	16.5
10^{20}	0.003124	0.009661	0.5318	0.003919	0.1	0.76279	3.919

يوضح الشكل (18) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتركيز الإشابة في المنطقة N.



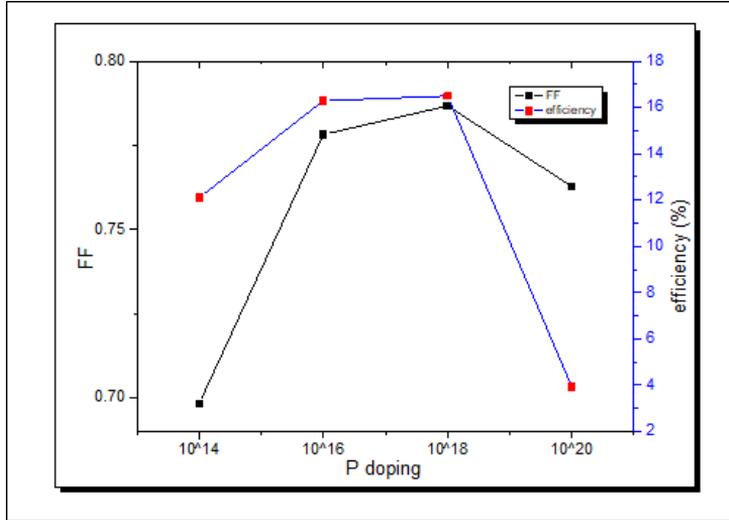
الشكل (18) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز الإشابة في المنطقة P.

يوضح الشكل (19) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز الإشابة في المنطقة P.



الشكل (19) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز الإشابة في المنطقة P.

الشكل (20) تغيرات قيمة الكفاءة وعامل الملاء للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز المنطقة P.



الشكل (20) تغيرات قيمة الكفاءة وعامل الملاء للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لتراكيز المنطقة P.

نلاحظ أن زيادة تركيز الشوائب لا تزيد دائماً من الكفاءة. وخاصةً عندما يكون تركيز الشوائب في نصف الناقل السيليكوني من النوع p أكبر من أو أقرب إلى تركيز الشوائب في نصف الناقل النوع n والتي تم تثبيتها عند قيمة $(2 \times 10^{20}) \text{cm}^{-3}$ ، تتخفض الكفاءة بشكل كبير. حيث أن الإفراط في التشويب، يؤدي لتقليل عمر حوامل الشحنة الأقلية، وبالتالي يتم أيضاً تقليل طول الانتشار وبالتالي تقليل الكفاءة [27].

4 - 6 - دراسة تأثير سماكة منطقتي نصفي الناقلين N,P على أداء الخلية الشمسية السيليكونية:

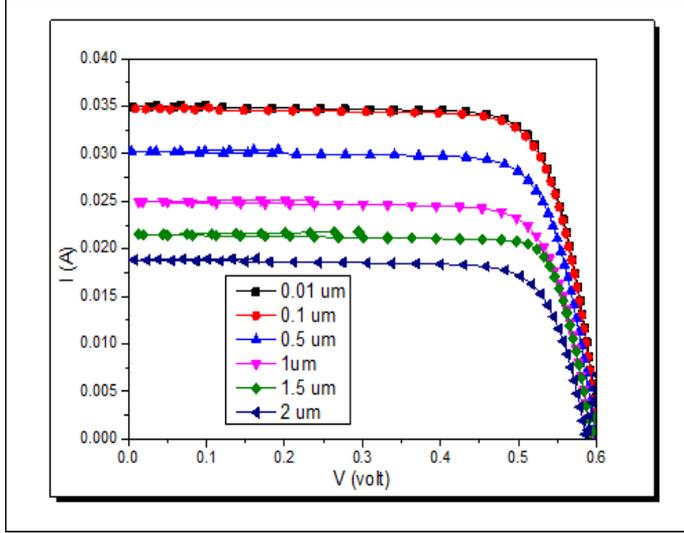
أحد العوامل الرئيسية في تحديد جدوى تصنيع الأجهزة الكهروضوئية هو تكلفة المواد أنصاف النواقل. يعد الاختيار الدقيق للمواد ذات السماكة المثالية عاملاً مهماً في تقليل النفقات مع تعظيم كفاءة الجهاز [28].

4-6-1 دراسة تأثير تركيز سماكة نصف الناقل N على أداء الخلية الشمسية السيليكونية: يبين الجدول (8) تغيرات قيم مقاومة الصفيحة وتيار الدارة المقصورة وكمون الدارة المفتوحة وعامل الملء والكفاءة بتغير قيم سماكة نصف الناقل النوع N.

الجدول (8)

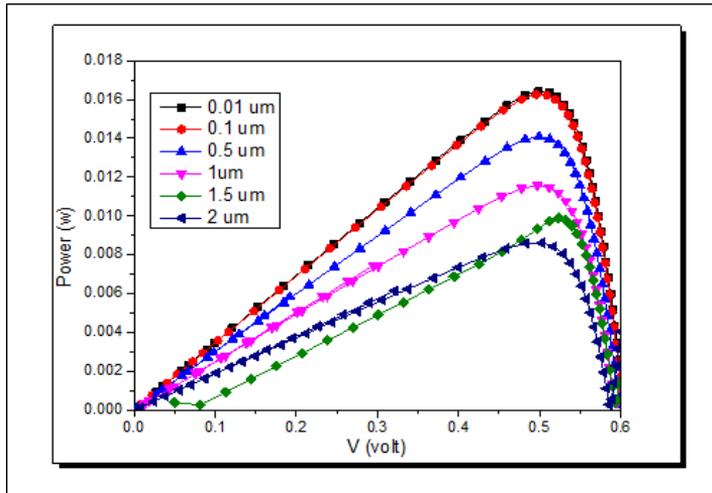
Thickness n (um)	Rsh (ohm/m ²)	Isc (A)	Voc (V)	Pmax (W)	Pin (W)	FF	□ %
0.01	718.5	0.035	0.6049	0.0164	0.1	0.774626	16.4
0.1	71.85	0.0347	0.6036	0.0163	0.1	0.778232	16.3
0.5	14.37	0.0302	0.5986	0.0141	0.1	0.779966	14.1
1	7.185	0.0249	0.594	0.0116	0.1	0.784282	11.6
1.5	4.79	0.0214	0.5903	0.009883	0.1	0.782352	9.883
2	3.593	0.0188	0.5869	0.008634	0.1	0.78251	8.634

كما يبين الشكل (21) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لسماكة في المنطقة N.



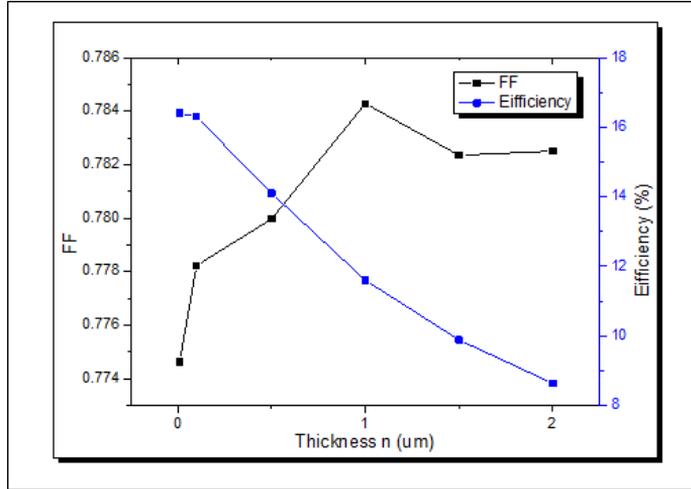
الشكل (21) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لسماكة في المنطقة N.

كما يبين الشكل (22) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة للسماكة في المنطقة N.



الشكل (22) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة للسماكة في المنطقة N.

كما يبين الشكل (23) تغيرات قيمة الكفاءة وعامل الملاء للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لسماكة المنطقة N.



الشكل (23) تغيرات قيمة الكفاءة وعامل الملاء للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لسماكة المنطقة N.

نلاحظ انخفاض قيمة I_{sc} و V_{oc} مع زيادة سمك الباعث وكذلك تنخفض قيمة مقاومة الصفيحة. إن انخفاض مقاومة صفيحة الباعث أمر مرغوب فيه في الجهاز، ولكن هناك بعض العيوب في وجود باعث سميك. حيث لا يمكن أن يخترق الضوء طبقة الباعث السميكة والمشبعة بشدة، مما يؤثر على توليد حامل الشحنة، وبالتالي يؤدي إلى انخفاض كفاءة الجهاز [29].

4-6-2 دراسة تأثير تركيز سماكة نصف الناقل P على أداء الخلية الشمسية السيليكونية:

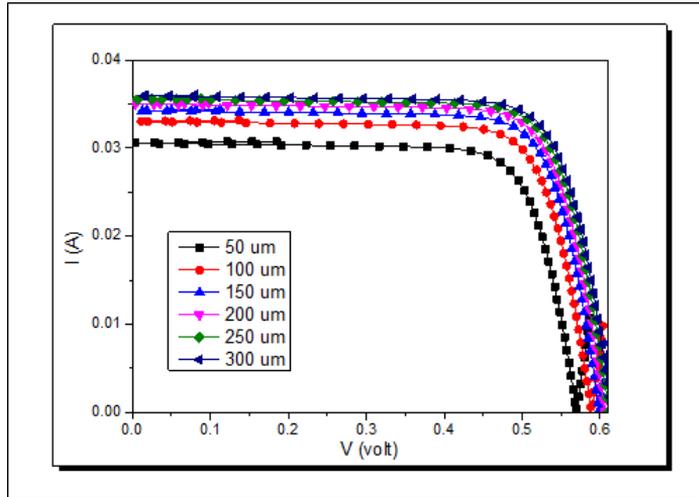
تعد طبقة الامتصاص الجزء الأكثر سمكاً في الخلايا الشمسية السيليكونية التجارية التي تمتص الضوء وتولد حاملات شحنة متحركة يتم نقلها إلى جهات الاتصال وجمعها من أجل توليد الكهرباء [30]. لا تعني طبقة الامتصاص الأكثر سمكاً كفاءة أعلى بسبب التأثيرات العكسية على I_{sc} , V_{oc} وذلك عند وجود طبقة إضافية مائلة للمنطقة P والتي تكون مرغوبة لزيادة الكفاءة.

يبين الجدول (9) تغيرات قيم تيار الدارة المقصورة وكمون الدارة المفتوحة وعامل الملء والكفاءة بتغيير قيم سماكة نصف الناقل النوع P.

الجدول (9)

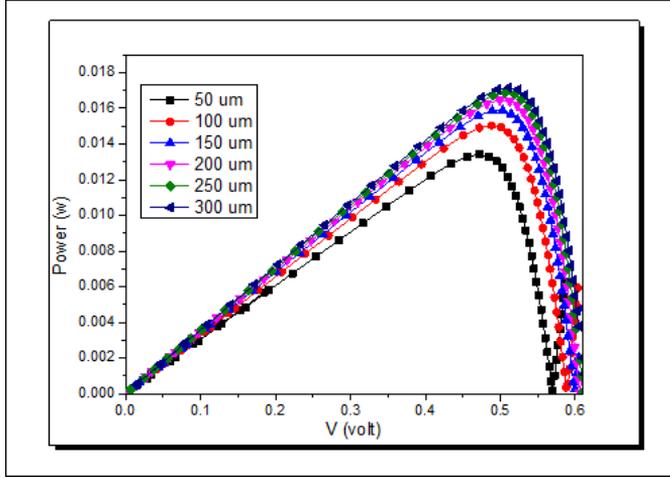
Thickness P (um)	Isc (A)	Voc (V)	Pmax (W)	Pin (W)	FF	□ %
50	0.0306	0.5698	0.0134	0.1	0.76853	13.4
100	0.033	0.5888	0.015	0.1	0.771986	15
150	0.0342	0.5992	0.0159	0.1	0.775888	15.9
200	0.035	0.6061	0.0165	0.1	0.777807	16.5
250	0.0355	0.6111	0.0169	0.1	0.779015	16.9
300	0.0359	0.6148	0.0172	0.1	0.779292	17.2

كما يبين الشكل (23) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لسماكة في المنطقة P.



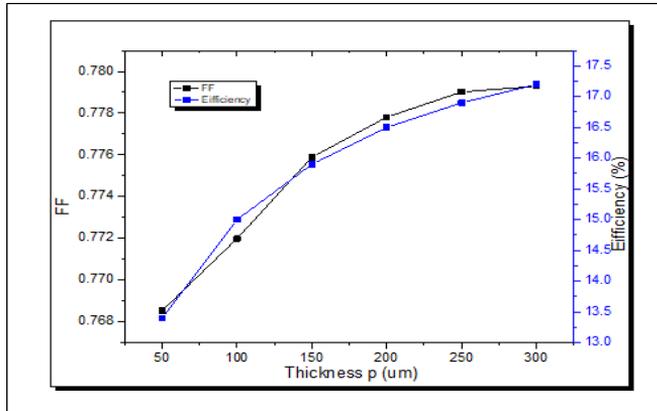
الشكل (24) الميزة (I-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لسماكة في المنطقة P.

كما يبين الشكل (25) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة للسماكة في المنطقة P.



الشكل (25) الميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة للسماكة في المنطقة P.

كما يبين الشكل (26) تغيرات قيمة الكفاءة وعامل الملء للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لسماكة المنطقة P.



الشكل (26) تغيرات قيمة الكفاءة وعامل الملء للخلية الشمسية السيليكونية من أجل قيم مختلفة لسماكة المنطقة P.

نلاحظ من الشكل (26) ومن الجدول (9) زيادة الكفاءة وعامل الملء بزيادة سمك المنطقة P وذلك بزيادة قيم تيار الدارة المقصورة وقيم كمون الدارة المفتوحة نتيجة توليد حاملات شحنة ضوئياً حيث أن زيادة السمك يعزز امتصاص الضوء بشرط أن يكون سماكة المنطقة P أكبر

من طول الانتشار الضوئي في البلورة السيليكونية الذي يبلغ بين 100-300 um في السيليكون وهذا ما يفسر زيادة الكفاءة [31].

5 - الاستنتاجات والتوصيات

1. تم نمذجة الدارة المكافئة للخلية الشمسية السيليكونية باستخدام برنامج PC1D ووضع البارامترات المبدئية للعمل.
2. تم دراسة تأثير درجة الحرارة على عمل الخلية الشمسية السيليكونية والتي تبين أن لها تأثير سلبي على الكفاءة.
3. تم دراسة تأثير شدة الإضاءة على أداء الخلية الشمسية ولوحظ التناسب الطردي بين الكفاءة وشدة الإشعاع الساقط.
4. تم دراسة تأثير زيادة سماكة المنطقة n والتي تبين أنها تؤدي دور سلبي في كفاءة اللوح الشمسي
5. تم دراسة زيادة سمك المنطقة p وتبين أن زيادة سمك هذه المنطقة يلعب دور إيجابي بزيادة الكفاءة
6. كما تم دراسة زيادة تركيز الإصابات في كل من المنطقتين n,p وتبين أنها تزيد من الكفاءة

نوصي بـ :

1. دراسة تأثير العوامل الفيزيائية الأخرى المؤثرة على أداء وكفاءة الخلية الشمسية السيليكونية مثل زمن استرخاء حوامل الشحنة والمقاومة التسلسلية والمقاومة التفرعية وعامل السطح وتأثير إضافة الطبقات المانعة للإنعكاس.
2. الاستفادة من الدراسة النظرية بتحسين كفاءة اللوح الشمسي السيليكوني وذلك عن طريق تطبيق التعديلات بشكل عملي أثناء عملية التصنيع.

6 - المراجع

1. International Energy Agency, Paris, France. Key World Energy Statistics, 2015.

2. Twidell, J., & Weir, T. (2015). *Renewable Energy Resources*. Routledge.
3. Nikolina, S. A. J. N. (2016). International renewable energy agency (IRENA)..
4. Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley.
5. Green, M. A. (2020). Silicon Solar Cells: Evolution and Current Performance. *IEEE Journal of Photovoltaics*.
6. Rastogi, A., Yadav, S., Hussain, S., Kataria, S., Hajihashemi, S., Kumari, P., ... & Brestic, M. (2021). Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...?. *Plant Physiology and Biochemistry*, 169, 40-48.
7. Alonso-Abella, M., et al. (2014). Enhancing the Efficiency of Silicon Solar Cells by Using Advanced Photovoltaic Techniques. *Renewable Energy*.
8. Szlufcik, J., Sivoththaman, S., Nlis, J. F., Mertens, R. P., & Van Overstraeten, R. (1997). Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells. *Proceedings of the IEEE*, 85(5), 711-730.
9. Kowsar, A., Billah, M., Dey, S., Debnath, S. C., Yeakin, S., & Farhad, S. F. U. (2019, December). Comparative study on solar cell simulators. In *2019 2nd International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET)* (pp. 1-6). IEEE.
10. Zouak, B. (2012). *Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectrique des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque-thermoélectricité* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
11. Bagher, A. M., Vahid, M. M. A., & Mohsen, M. (2015). Types of solar cells and application. *American Journal of optics and Photonics*, 3(5), 94-113.
12. Panchal, R., & Jolly, L. (2013). Optimization of Silicon solar cell in MATLAB/SIMULINK for improved efficiency. *International Journal of Management & Information Technology* 5, 3, 576-85.
13. T. Markvart, L. Castaner, 2003 Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Elsevier.
14. M. Marcu, F. Popescu, I. R. Slusariuc, 2013 Simulation of a solar cell with simple diode model, Analele Universității din Petroșani.

15. M. A. Hamdy, R. L. Cell, 1987 The effect of the diode-ideality factor on the experimental determination of series resistance of solar cells Sol cells.
16. Ankaiah, B., & Nageswararao, J. (2013). Enhancement of solar photovoltaic cell by using short-circuit current MPPT method. *International Journal of Engineering Science Invention*, 2(2), 45-50.
17. Emery, K. A., & Osterwald, C. R. (1986). Solar cell efficiency measurements. *Solar Cells*, 17(2-3), 253-274.
18. Blakers, A., Zin, N., McIntosh, K. R., & Fong, K. (2013). High efficiency silicon solar cells. *Energy Procedia*, 33, 1-10.
19. . Haug, J. Greulich, A. Kimmerle, E. S. Marstein. PC1Dmod 6.1 - state-of-the-art models in a well-known interface for improved simulation of Si solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 142: 47–53, 2015.
20. ALia, K., Tariq, Z., Khan, H., Javed, Y., Sultan, M., Anmol, M., ... & Alia, A. (2019). Analysis of Non-Uniform Doping in Silicon Solar Cell and Optimization Using PC1D. *J. Ovonic Res*, 15, 215-220.
21. Belarbi, M., Benyoucef, A., & Benyoucef, B. (2014). Simulation of the solar cells with PC1D, application to cells based on silicon. *Advanced Energy: An International Journal (AEIJ)*, 1(3).
22. Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., & Masmoudi, A. (2012). Matlab/simulink based modeling of photovoltaic cell. *International journal of renewable energy research*, 2(2), 213-218.
23. Kachhiya, K., Lokhande, M., & Patel, M. (2011, May). MATLAB/Simulink model of solar PV module and MPPT algorithm. In *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology* (Vol. 13).
24. Muhfidin, R., & Yu, S. (2021, October). Temperature Effects on the Performance of Silicon Solar Cells using PC1D.

- In *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial and Technology and Information Design, ICITID 2021, 30 August 2021, Yogyakarta, Indonesia.*
25. M. Wolf, “The Influence of Heavy Doping Effects on Silicon Solar Cell Performance”, Solar .
 26. Cuevas, A.; Sinton, R.A. Characterisation and diagnosis of silicon wafers and devices. In *Practical Handbook of Photovoltaics*; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2005; pp. 163–188.
 27. Brendel R (2011) *Thin-film crystalline silicon solar cells*. Wiley, Weinheim.
 28. B. Liu, S. Zhong, J. Liu, Y. Xia and C. Li ,“Silicon nitride film by inline PECVD for black silicon solar cells,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, pp. 2–7, 2012.
 29. Shwan, Y. H., & Ghafoor, B. N. (2024). Study the Effect of Doping and Thickness on IV characteristic of Silicon Solar Cells Using PC1D Simulation. *Tikrit Journal of Pure Science*, 29(1), 128-135.
 30. C.-T. Sah, K.A. Yamakawa, R. Lutwack ,“Effects of Thickness on Silicon Solar Cell Efficiency”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 29, no. 5, 1982.
 31. Solanki, C.: *Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies and Applications*, 3rd edn. PHI Learning Private Limited, Delhi (2015).