

دراسة نموذجية للنسيج الهرمي على سطح الخلية

الشمسية السيليكونية وتأثيره على السلوك

الكهربائي لها

صالح الدرويش¹ د.أحمد العبدو² أ.د.ناصر سعد الدين³

ملخص:

تم في هذا البحث نمذجة الخلية الشمسية السيليكونية أحادية التبلور (monocrystalline) وفق بارامترات العمل القياسية وعند درجة حرارة 25°C باستخدام برنامج PC1D، ثم قمنا بدراسة الميزة (I-V) والميزة (P-V) للخلية الشمسية السيليكونية البدائية، تم حساب قيمة الكفاءة وعامل الملاء والتي كانت 16.3% و 0.778 على الترتيب. ثم قمنا بنمذجة الطبقة السطحية الخارجية على شكل نسيج هرمي لتقليل الانعكاس الضوئي على السطح الخارجي و قمنا بدراسة تأثير تغيير زاوية ميل مخروط الهرم بين (30-70) درجة بمعدل 5 درجات لكل خطوة وذلك من اجل عدة قيم لارتفاع الهرم (7 - 5 - 3 - 1) μm على الكفاءة وعامل الملاء ووجدنا تحسّن الكفاءة بشكل عام بمعدل 3.6% حسبت بعد ترسيب النسيج الهرمي للسطح. ووجدنا أفضل قيمة للكفاءة 16.9% عند ارتفاع 5 μm وعند زاوية 70 درجة وقيمة عامل الملاء 0.7789.

كلمات مفتاحية: الخلية الشمسية السيليكونية، PC1D ، النسيج الهرمي، الكفاءة، عامل الملاء.

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

A typical study of the hierarchical texture on the surface of a silicon solar cell and its effect on its electrical behavior

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

Abstract

In this research, the monocrystalline silicon solar cell was modeled according to the standard operating parameters and at a temperature of 25°C using the PC1D program, then we studied the (I-V) and (P-V) features of the primitive silicon solar cell, the efficiency and fill factor values were calculated, which were 16.3% and 0.778 respectively. Then we modeled the outer surface layer in the form of a pyramidal texture to reduce the light reflection on the outer surface and we studied the effect of changing the angle of the pyramid cone between (30-70) degrees at a rate of 5 degrees for each step for several values of the pyramid height (1-3-5-7) μm on the efficiency and fill factor and we found an overall improvement in efficiency by 3.6% calculated after depositing the pyramidal texture on the surface. We found the best efficiency value of 16.9% at a height of 5 μm and at an angle of 70 degrees and the fill factor value of 0.7789.

Keywords: silicon solar cell, PC1D, hierarchical texture, efficiency, fill factor.

1 - مقدمة

تتزايد الحاجة العالمية للطاقة بشكل مستمر وبالتالي، فإن مصادر الطاقة التقليدية لا تتناسب مع الطلب المتزايد على الطاقة. لذلك يسعى الباحثون لاستكشاف تقنيات مختلفة لتعزيز كفاءة أنظمة الطاقة المتجددة [2.1].

تعد الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة، حيث تتميز بوفرتها واستدامتها، مما يجعلها بديلاً واعداً للطاقة التقليدية. تعتمد كفاءة الخلايا الشمسية بشكل كبير على تصميمها البنيوي والتركيب، مما يتطلب البحث المستمر لتحسين أدائها وتطوير تقنيات جديدة لزيادة كفاءتها [3].

في هذا السياق، يعد انعكاس الضوء على السطح الخارجي للخلية الشمسية السيليكونية، من أكثر العوامل التي تؤثر سلباً في كفاءة الخلية الشمسية والتي تقلل من عدد الفوتونات الساقطة على طبقة الامتصاص وبالتالي تقلل من عدد الأزواج المتولدة ضوئياً (الكترن-ثقب) [4]. تم استكشاف العديد من الطرق لتعديل مورفولوجيا الطبقة السطحية لتحقيق أقصى قدر من الامتصاص وتقليل الانعكاس. يعد النسيج السطحي طريقة فعالة لتقليل انعكاس الضوء وتعديل التحولات البصرية [5].

وفقاً لتقنية النسيج السطحي أو ما يعرف بالأهرامات، فإن الضوء الوارد يتبع مساراً غير عمودي، وبالتالي فقد تحدث انعكاسات متعددة في طبقة الامتصاص [6].

يؤدي السقوط المائل لأشعة الضوء على السطح الأمامي ذو النسيج الهرمي لحدوث تأثير حبس الضوء. لا يساعد هذا الانتشار المائل لأشعة الضوء على زيادة طول المسار فحسب، بل يعزز أيضاً فرص إعادة الانعكاس بسبب ظاهرة الانعكاس الداخلي الكلي [7].

يمكن تنظيم الميل الزاوي للهرم عن الأفق وارتفاعه للحصول على الأداء الأمثل من الخلية الشمسية.

ومع ذلك، فإن الصعوبة التي تواجهنا مع تقنيات التحسين هذه هو أنها إما تستغرق وقتاً طويلاً أو مكلفة. وكبديل للتجارب العملية، ظهرت طرق نمذجة ومحاكاة أداء الخلية الشمسية باستخدام برامج مختلفة كأدوات محاكاة كحل جيد. خلال العقد الماضي، قام العديد من العلماء بالتحقيق في نمذجة تقنية الخلايا الكهروضوئية (PV) باستخدام مجموعة متنوعة من برامج المحاكاة والنمذجة [9,8].

يعد إضفاء نسيج هرمي على السطح العلوي للخلية الشمسية عملية مهمة لتعزيز طول المسار الضوئي لأشعة الشمس داخل الخلية الشمسية. فهو لا يزيد فقط من مساحة السطح لسقوط الضوء ولكنه يقلل أيضاً من انعكاس السطح الأمامي بسبب حبس الضوء. ومن ثم، فمن الضروري تصميم سمك وميل مثاليين لهذا النسيج. يركز هذا العمل على تأثير التغيرات في عمق النسيج السطحي وميله باستخدام محاكاة برنامج PC1D. تم اختبار البارامترات الكهربائية مثل قيم كفاءة الطاقة الكهروضوئية (η)، وقيم عامل الملء (FF)، وقيم جهد الدائرة المفتوحة (Voc)، وقيم تيار الدائرة القصيرة (Isc) من خلال المحاكاة.

2 - أهداف البحث:

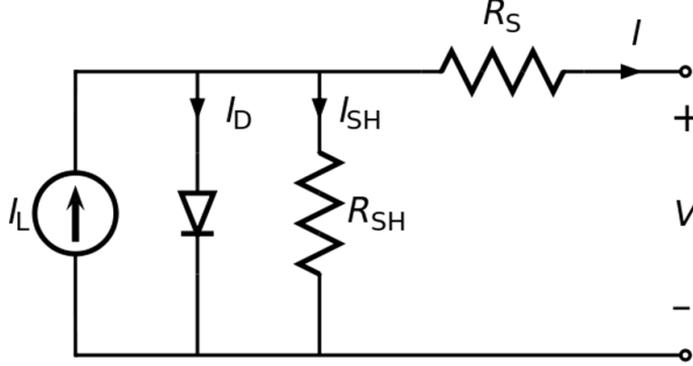
يهدف البحث إلى:

- 1 - نمذجة الخلية الشمسية السيليكونية أحادية التبلور monocrystalline باستخدام برنامج PC1D وفق بارامترات محددة تتناسب مع تقنيات التصنيع.
- 2 - دراسة الميزة I-V والميزة P-V وحساب الكفاءة وعامل الملء للخلية الشمسية بدون نسيج هرمي سطحي.
- 3 - تطبيق نسيج سطحي هرمي على سطح الخلية الشمسية السيليكونية.
- 4 - دراسة تأثير ارتفاع وزاوية ميل الهرم عن الأفق على كفاءة الخلية الشمسية وتحديد الارتفاع والزاوية الأمثل لتحقيق أفضل كفاءة.

3 - مواد وطرق البحث:

يمكن الحصول على الدارة المكافئة للخلية الشمسية عن طريق نموذج الدايدود المفرد.

حيث يبين الشكل (1) الدارة المكافئة للخلية الشمسية والتي سوف يتم إجراء المحاكاة عليها [10].



الشكل (1) الدارة المكافئة للخلية الشمسية والتي سوف يتم إجراء المحاكاة عليها.

تستخدم عادة أربع متغيرات لدراسة ما يخرج من الخلية الشمسية:

1- تيار القصر I_{SC} : ويساوي التيار الناتج بواسطة الضوء عند فرق كمون معدوم أي عند

$$I_{SC} = I_{PH} \cdot \text{قصر الدارة.}$$

2- جهد الدارة المفتوحة V_{OC} : نحصل عليه عندما لا يمر تيار في الخلية أي عندما نجعل

التيار في المعادلة يساوي الصفر ويعطى بالعلاقة: [11]

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

حيث K : ثابت بولتزمان، T : درجة الحرارة المطلقة، q : عامل المثالية، I_{PH} : التيار الناتج بالضوء، I_0 : التيار الضوئي الساقط.

3- عامل الملء FF : هو مقياس لمدى مربعة خصائص الخرج ويمثل نسبة السطح المحصور

عند نقطة العمل المثلى الى السطح المحصور في الممييزة $I-V$. بالنسبة للخلايا الشمسية التجارية

النموذجية لها عامل ملء $0.70 < [12]$.

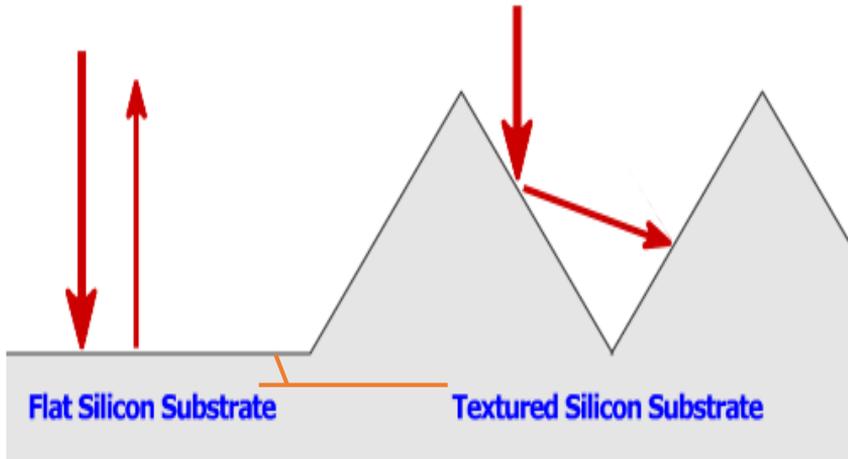
$$FF = \frac{I_{MP}V_{MP}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (2)$$

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

4- كفاءة تحويل الطاقة الشمسية (المردود):

$$\eta = \frac{I_{MP}V_{MP}}{P_{IN}} = \frac{I_{SC}V_{OC}FF}{P_{IN}} \quad (3)$$

يمكن استخدام نسيج السطح، إما بالاشتراك مع طلاء مضاد للانعكاس أو بمفرده، لتقليل الانعكاس. يقلل نسيج السطح من الانعكاس عن طريق زيادة فرص ارتداد الضوء المنعكس إلى السطح، بدلاً من خروجه إلى الهواء المحيط. يبين الشكل (2): زيادة فرص ارتداد الضوء المنعكس إلى السطح عن طريق تطبيق تقنية النسيج [13].



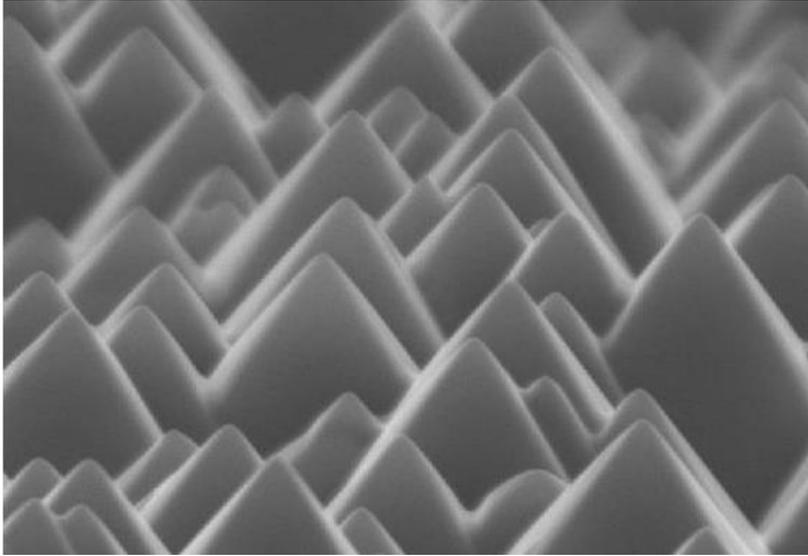
الشكل (2) زيادة فرص ارتداد الضوء المنعكس إلى السطح عن طريق تطبيق تقنية النسيج.

يمكن إنجاز نسيج السطح بعدد من الطرق:

- الحفر الكيميائي: حيث يمكن تنسيج ركييزة بلورية واحدة عن طريق الحفر على طول وجوه المستويات البلورية. حيث ينتج عن البنية البلورية للسيليكون سطح مكون من أهرامات إذا تم حفر السطح بشكل مناسب. يظهر الشكل (3) صورة مجهر إلكتروني

لسطح سيليكون ذو نسيج هرمي مأخوذة من دراسة أجريت في جامعة ويلز في استراليا. يسمى هذا النوع من النسيج نسيج "الهرم العشوائي"، ويستخدم عادةً في الصناعة للرقائق البلورية الأحادية [14,15].

- التآكل الأيوني: يتم بقصف سطح الخلية بأيونات مشحونة وإزالة المادة من السطح وتكوين أشكال هرمية في هذه الطريقة يمكن التحكم بشكل وحجم الاهرامات المتشكلة.
- الطباعة الحجرية.



الشكل (3) صورة مجهر إلكتروني لسطح سيليكون ذو نسيج هرمي.

4 - النتائج والمناقشة

4 - 1 - نمذجة الخلية الشمسية السيليكونية البدائية:

تم استخدام برنامج 2021 PC1D (Personal Computer One Dimensional)، الذي تم تطويره من قبل جامعة نيو ساوث ويلز، لمحاكاة خصائص الخلايا الكهروضوئية لأجهزة أشباه الموصلات البلورية، يتم إجراء محاكاة الخلية الشمسية السيليكونية عن طريق إعداد

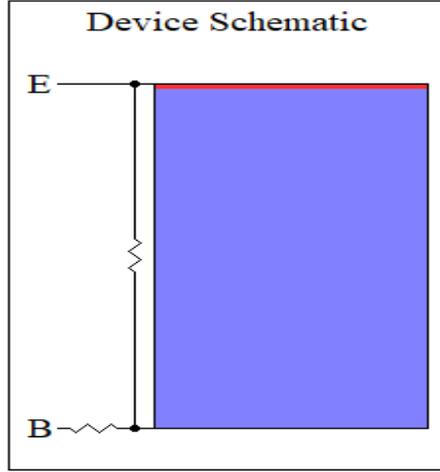
دراسة نموذجية للنسيج الهرمي على سطح الخلية الشمسية السيليكونية وتأثيره على السلوك الكهربائي لها

بارامترات رئيسية، والتي تشمل مساحة سطح الخلية، والسماكة، وعرض المجال المحظور، وتركيز الشوائب ونوعها وسرعة الحاملات. حيث يتم الحصول على العديد من الخصائص المهمة للخلايا الشمسية السيليكونية عن طريق المحاكاة. حيث يوضح الجدول (1) بارامترات النمذجة المستخدمة والمطبقة على الخلية الشمسية السيليكونية أحادية التبلور mono crystalline.

الجدول (1)

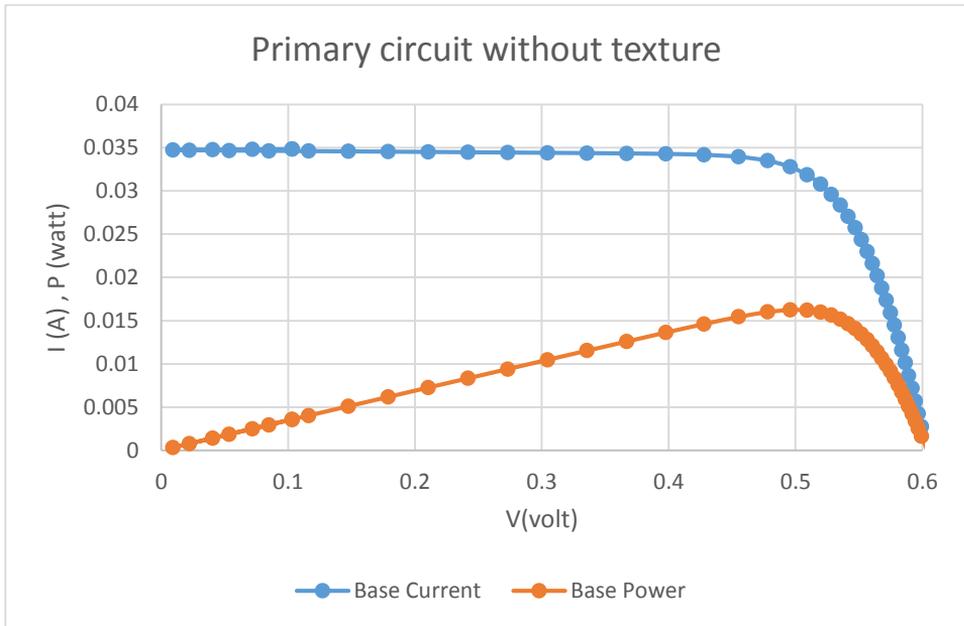
1 cm ²	مساحة الخلية Device area
3.33 Ω	المقاومة التفرعية R _{shunt}
0.8 Ω	المقاومة التسلسلية R _{series}
%5	الانعكاس عن السطح الأمامي
180 μm	سماكة الطبقة p
0.1 μm	سماكة الطبقة n
1 × 10 ¹⁶ cm ⁻³	تركيز إثابة المنطقة p
2 × 10 ²⁰ cm ⁻³	تركيز إثابة المنطقة n
1.124 eV	المجال المحظور
25 °C	درجة الحرارة
1.5 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 بدون نسيج.



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

دراسة نموذجية للنسيج الهرمي على سطح الخلية الشمسية السيليكونية وتأثيره على السلوك الكهربائي لها

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	Voc	P max	FF	μ	$\mu\%$
البحث الحالي	0.0347	0.6036	0.0163	0.778	0.163	16.30%
المرجع [16]	1.735	0.6567	0.9529	0.83	0.09529	9.53

يعود الاختلاف بين قيم البحث الحالي والمرجع لاختلاف شروط البدء وخاصة مساحة سطح الخلية.

4 - 2 - دراسة مميزات الخلية الشمسية عند ارتفاع $1\mu m$ وعند زوايا رأس الهرم (30-35-40-45-50-55-60-65-70):

يبين الجدول (3) نتائج المحاكاة وحسابات الكفاءة وعامل الملء لهذه الحالة:

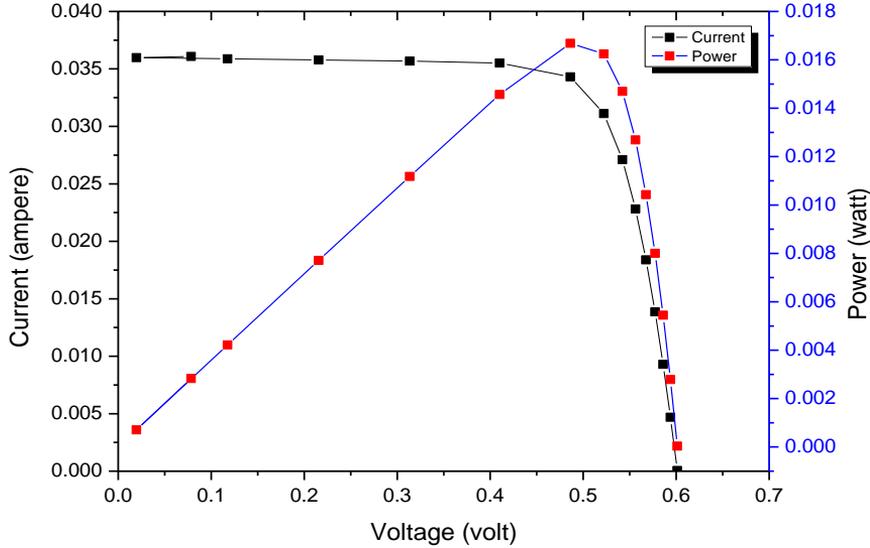
الجدول (3)

angle	depth 1						
	Isc (A)	Voc (V)	Pmax(W)	Pin(W)	FF	μ	$\mu\%$
30	0.0349	0.6035	0.0164	0.1	0.77865	0.164	16.4
35	0.035	0.6034	0.0163	0.1	0.77182	0.163	16.3
40	0.0351	0.6033	0.0165	0.1	0.77919	0.165	16.5
45	0.0352	0.6032	0.0165	0.1	0.77711	0.165	16.5
50	0.0353	0.603	0.0166	0.1	0.77986	0.166	16.6
55	0.0354	0.6028	0.0166	0.1	0.77791	0.166	16.6
60	0.0356	0.6025	0.0167	0.1	0.77859	0.167	16.7

65	0.0358	0.602	0.0167	0.1	0.77488	0.167	16.7
70	0.036	0.6012	0.0168	0.1	0.77623	0.168	16.8

نلاحظ أعلى قيمة للكفاءة 16.8% عند زاوية 70° وأعلى قيمة لعامل الملاءمة 0.77986 عند زاوية 50° حيث نلاحظ اندياد الكفاءة وتيار الدارة المفتوحة مع زيادة رأس هرم النسيج السطحي ويعزى ذلك إلى احتجاز المزيد من الضوء الساقط في الخلية الكهروضوئية مما يؤدي إلى المزيد من توليد الأزواج الضوئية. ونتيجة لنفس الظاهرة، تتناقص فولتية الدارة المفتوحة مع زيادة المنحدر [17].

حيث يبين الشكل (6) منحنيات I-V و P-V لنموذج الخلية الشمسية المصمم بعمق نسيج سطحي يبلغ 1 ميكرومتر عند أفضل كفاءة وذلك عند زاوية 70° درجة.



الشكل (6) منحنيات I-V و P-V لنموذج الخلية الشمسية المصمم بعمق نسيج سطحي يبلغ 1 ميكرومتر عند أفضل كفاءة وذلك عند زاوية 70° درجة

4 - 3 - دراسة مميزات الخلية الشمسية عند ارتفاع $3\mu m$ وعند زوايا رأس الهرم (30-35-40-45-50-55-60-65-70):

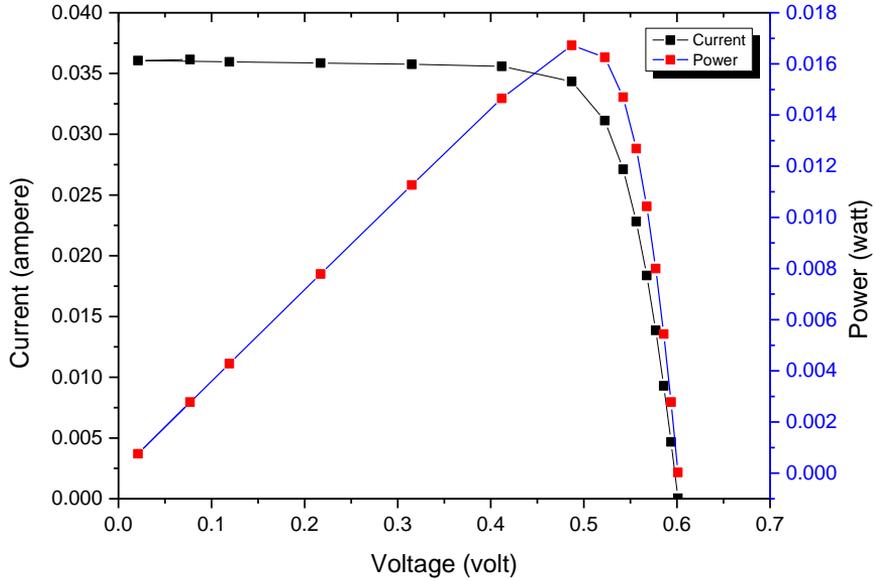
يبين الجدول (4) نتائج المحاكاة وحسابات الكفاءة وعامل الملء لهذه الحالة:

الجدول (4)

angle	depth 3						
	Isc (A)	Voc(V)	Pmax (w)	Pin(w)	FF	μ	μ %
30	0.0349	0.6035	0.0162	0.1	0.769152	0.162	16.2
35	0.035	0.6034	0.0163	0.1	0.771817	0.163	16.3
40	0.0351	0.6033	0.0165	0.1	0.77919	0.165	16.5
45	0.0352	0.6032	0.0165	0.1	0.777105	0.165	16.5
50	0.0353	0.603	0.0166	0.1	0.779859	0.166	16.6
55	0.0355	0.6027	0.0166	0.1	0.775851	0.166	16.6
60	0.0356	0.6024	0.0167	0.1	0.77872	0.167	16.7
65	0.0358	0.6019	0.0168	0.1	0.779654	0.168	16.8
70	0.0361	0.6011	0.0169	0.1	0.778812	0.169	16.9

نلاحظ أعلى قيمة للكفاءة 16.9% عند زاوية 70° وأعلى قيمة لعامل الملء 0.779859 عند زاوية عند زاوية 50° حيث نلاحظ ازدياد الكفاءة وتيار الدارة المفتوحة مع زيادة رأس هرم النسيج السطحي.

حيث يبين الشكل (7) منحنيات I-V و P-V لنموذج الخلية الشمسية المصمم بعمق نسيج سطحي يبلغ 3 ميكرومتر عند أفضل كفاءة وذلك عند زاوية 70° درجة.



يبين الشكل (7) منحنيات I-V و P-V لنموذج الخلية الشمسية المصمم بعمق نسيج سطحي يبلغ 3 ميكرومتر عند أفضل كفاءة وذلك عند زاوية 70 درجة.

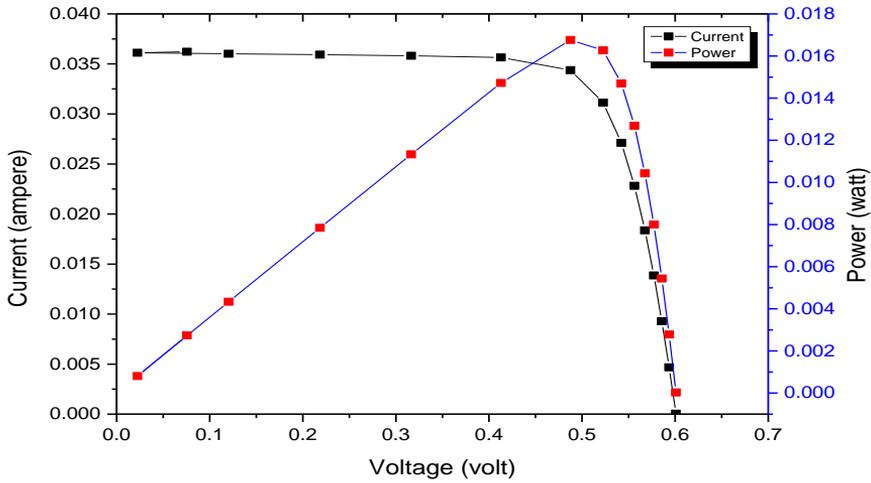
4 - 4 - دراسة مميزات الخلية الشمسية عند ارتفاع $5\mu m$ وعند زوايا رأس الهرم (30-35-40-45-50-55-60-65-70):

يبين الجدول (5) نتائج المحاكاة وحسابات الكفاءة وعامل الملء لهذه الحالة:

الجدول (5)

angle	depth 5						
	Isc (A)	Voc (V)	Pmax(w)	Pin (w)	FF	μ	μ %
30	0.0349	0.6035	0.0162	0.1	0.769152	0.162	16.2
35	0.035	0.6034	0.0164	0.1	0.776552	0.164	16.4
40	0.0351	0.6033	0.0165	0.1	0.77919	0.165	16.5
45	0.0352	0.6031	0.0165	0.1	0.777234	0.165	16.5
50	0.0354	0.6029	0.0166	0.1	0.777785	0.166	16.6
55	0.0355	0.6027	0.0166	0.1	0.775851	0.166	16.6
60	0.0357	0.6023	0.0167	0.1	0.776668	0.167	16.7
65	0.0359	0.6018	0.0168	0.1	0.777611	0.168	16.8
70	0.0361	0.601	0.0169	0.1	0.778942	0.169	16.9

نلاحظ أعلى قيمة للكفاءة 16.9% عند زاوية 70° وأعلى قيمة لعامل الملء 0.77919 عند زاوية 40° حيث نلاحظ اذدياد الكفاءة وتيار الدارة المفتوحة مع زيادة رأس هرم النسيج السطحي. حيث يبين الشكل (8) منحنيات I-V و P-V لنموذج الخلية الشمسية المصمم بعمق نسيج سطحي يبلغ 5 ميكرومتر عند أفضل كفاءة وذلك عند زاوية 70 درجة.



الشكل (8) منحنيات I-V و P-V لنموذج الخلية الشمسية المصمم بعمق نسيج سطحي يبلغ 1 ميكرومتر عند أفضل كفاءة وذلك عند زاوية 70 درجة.

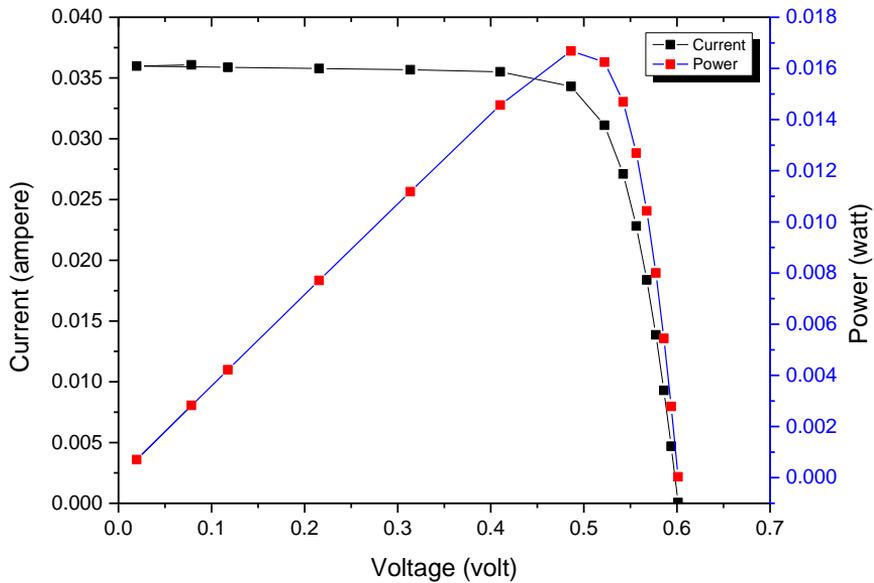
4 - 5 - دراسة مميزات الخلية الشمسية عند ارتفاع $7\mu m$ وعند زوايا رأس الهرم (30-35-40-45-50-55-60-65-70):

يبين الجدول (6) نتائج المحاكاة وحسابات الكفاءة وعامل الملء لهذه الحالة:

الجدول (6)

angle	depth 7						
	Isc (A)	Voc (V)	Pmax(w)	Pin(w)	FF	μ	μ %
30	0.0349	0.6035	0.0162	0.1	0.769152	0.162	16.2
35	0.035	0.6034	0.0164	0.1	0.776552	0.164	16.4
40	0.0351	0.6033	0.0165	0.1	0.77919	0.165	16.5
45	0.0352	0.6031	0.0165	0.1	0.777234	0.165	16.5
50	0.0354	0.6029	0.0166	0.1	0.777785	0.166	16.6
55	0.0355	0.6027	0.0167	0.1	0.780525	0.167	16.7
60	0.0357	0.6023	0.0167	0.1	0.776668	0.167	16.7
65	0.0359	0.6018	0.0168	0.1	0.777611	0.168	16.8
70	0.0362	0.6009	0.0169	0.1	0.776919	0.169	16.9

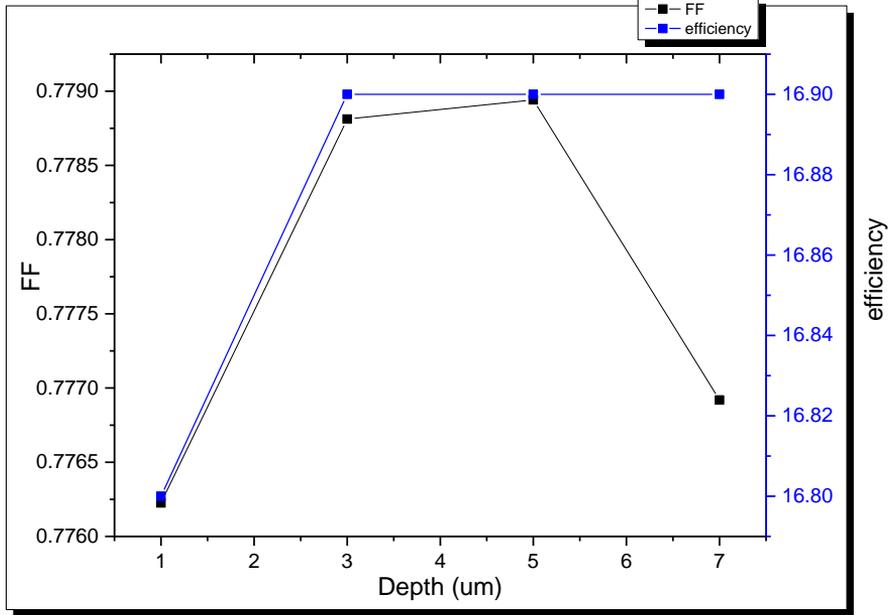
نلاحظ أعلى قيمة للكفاءة 16.9% عند زاوية 70° وأعلى قيمة لعامل الملاء 0.780525 عند زاوية 55° حيث نلاحظ ازدياد الكفاءة وتيار الدارة المفتوحة مع زيادة رأس هرم النسيج السطحي. حيث يبين الشكل (9) منحنيات I-V و P-V لنموذج الخلية الشمسية المصمم بعمق نسيج سطحي يبلغ 1 ميكرومتر عند أفضل كفاءة وذلك عند زاوية 70° درجة.



الشكل (9) منحنيات I-V و P-V لنموذج الخلية الشمسية المصمم بعمق نسيج سطحي يبلغ 1 ميكرومتر عند أفضل كفاءة وذلك عند زاوية 70° درجة.

يمكن رسم العلاقة بين قيم الكفاءة وعامل الملاء بدلالة ارتفاع الهرم عند أفضل زاوية ميل والتي بلغت 70° من أجل استنتاج العمق والميل المناسبين:

يبين الشكل (10) قيم الكفاءة وعامل الملاء بدلالة ارتفاع هرم النسيج السطحي المتشكل على سطح الخلية الشمسية السيليكونية عند أفضل زاوية ميل والتي بلغت 70° :



يبين الشكل (10) قيم الكفاءة وعامل الملء بدلالة ارتفاع هرم النسيج السطحي المتشكل على سطح الخلية الشمسية السيليكونية عند أفضل زاوية ميل والتي بلغت 70° . وبالتالي الارتفاع الأنسب الذي يحقق أفضل كفاءة وقيمة لعامل الملء هو $5\mu m$ والذي يؤدي الى ظاهرة حبس الضوء وزيادة مسار الانتشار للضوء الشمسي الساقط على الخلية الشمسية مما يقلل الانعكاس ويزيد فرصة الامتصاص داخل الخلية الشمسية [18].

5 - الاستنتاجات والتوصيات

- 1 - تم بداية نمذجة الخلية الشمسية السيليكونية وفق بارامترات بدائية مناسبة مع الأخذ بعين الاعتبار تقريب النموذج الى الواقع بإضافة المقاومة التسلسلية والتفرعية وحصلنا على كفاءة 16.3% وعامل ملء 0.778.
- 2 - تم تطبيق نسيج هرمي على سطح الخلية الشمسية ومن ثم دراسة تأثير ارتفاع الهرم وزاوية الميل على الكفاءة وعامل الملء.
- 3- من أجل ارتفاع $1\mu m$ نلاحظ أعلى قيمة للكفاءة 16.8% عند زاوية 70° وأعلى قيمة

لعامل الملء 0.77986 عند زاوية 50° .

4 - من أجل ارتفاع $3\mu m$ نلاحظ أعلى قيمة للكفاءة 16.9% عند زاوية 70° وأعلى قيمة

لعامل الملء 0.779859 عند زاوية 50° .

5 - من أجل ارتفاع $5\mu m$ نلاحظ أعلى قيمة للكفاءة 16.9% عند زاوية 70° وأعلى قيمة

لعامل الملء 0.77919 عند زاوية 40° .

6 - من أجل ارتفاع $7\mu m$ نلاحظ أعلى قيمة للكفاءة 16.9% عند زاوية 70° وأعلى قيمة

لعامل الملء 0.780525 عند زاوية 55° .

7- الارتفاع الأنسب الذي يحقق أفضل كفاءة وقيمة لعامل الملء هو $5\mu m$ والذي يؤدي الى

ظاهرة حبس الضوء وزيادة مسار الانتشار للضوء الشمسي الساقط على الخلية الشمسية مما

يقلل الانعكاس ويزيد فرصة الامتصاص داخل الخلية الشمسية.

6 - المراجع

1. Cariou, R., Labrune, M., & i Cabarrocas, P. R. (2011). Thin crystalline silicon solar cells based on epitaxial films grown at 165 C by RF-PECVD. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(8), 2260-2263.
2. Kumar, S.; Yadav, A. Comparative experimental investigation of preheated thumba oil for its performance testing on a CI engine. *Energy Environ.* 2018, 29, 533–542.
3. Green, M. A. (1982). Solar cells: operating principles, technology, and system applications. *Englewood Cliffs*.
4. Abdullah, M. F., Alghoul, M. A., Naser, H., Asim, N., Ahmadi, S., Yatim, B., & Sopian, K. (2016). Research and development efforts on texturization to reduce the optical losses at front surface of silicon solar cell. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 380-398.
5. Ackermann, J.; Videlot, C.; El Kassmi, A. Growth of organic semiconductors for hybrid solar cell application. *Thin Solid Film*. 2002, 403, 157–161.

6. Carson, J.A. (Ed.) *Solar Cell Research Progress*; Nova Publishers: New York, NY, USA, 2008.
7. Luque, A.; Mellor, A.V. *Photon Absorption Models in Nanostructured Semiconductor Solar Cells and Devices*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015.
8. Waseem, N.; George, A.S.; Hameed, S.; Yadav, A.; Pillai, .R.; Shukla, V.K. Simulation of a Dubai Based 100 KW Solar Plant on PVsyst. In Proceedings of the 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), Noida, India, 3–4 September 2021; IEEE: Toulouse, France, 2021; pp. 1–5.
9. S. C. Baker-Finch, McIntosh, K. R., and Terry, M. L., “Isotextured Silicon Solar Cell Analysis and Modeling 1: Optics”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 2, no. 4, pp. 457 - 464, 2012.
10. Panchal, R., & Jolly, L. (2013). Optimization of Silicon solar cell in MATLAB/SIMULINK for improved efficiency. *International Journal of Management & Information Technology*, 3, 576-85.
11. 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.
12. Emery, K. A., & Osterwald, C. R. (1986). Solar cell efficiency measurements. *Solar Cells*, 17(2-3), 253-274.
13. B. Dale and Rudenberg, H. G., “High efficiency silicon solar cells”, in *Proceedings of the 14th Annual Power Sources Conference*, 1960, p. 22.
14. P. Campbell and Green, M. A., “Light trapping properties of pyramidally textured surfaces”, *Journal of Applied Physics*, vol. 62, no. 1, p. 243, 1987.
15. 4.P. Campbell and Green, M. A., “High performance light trapping textures for monocrystalline silicon solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 65, no. 1-4, pp. 369 - 375, 2001.

16. 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).
17. Yadav, A., & Pillai, S. R. (2024). Effect of Texture Thickness and Angles on Performance Output of a Solar Cell. *Engineering Proceedings*, 61(1), 43.
18. Spinelli, P., & Polman, A. (2014). Light trapping in thin crystalline Si solar cells using surface Mie scatterers. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(2), 554-559.