African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)
Online ISSN: 2957-644X
Volume 3, Issue 4, October - December 2024
Page No: 456-463
Website:
https://aaasjournals.com/index.php/ajapas/index
ISI 2024: 0.877 **SJIFactor 2024: 6.752** **معامل التأثير العربي: 1.62**

دراسة مدى تأثير فجوة الطاقة والحرارة على كفاءة الخلية الشمسية وتأثيرتركيز (Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 على كل من فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون

نجاح أحمد الزعلوك *
قسم الفيزياء، كلية التربية، جامعة مصراتة، مصراتة، ليبيا

Studying the effect of the energy gap and temperature on the efficiency of the solar cell and the effect of the concentration of (Ga) in the structure of Cu(In1−xGax)Se2 on both the energy gap and electron affinity

Najah Ahmed Alzalouk *
Physics Department, Faculty of Education, Misurata University, Misurata, Libya

*Corresponding author: zanm2012@gmail.coma

Received: October 22, 2024	Accepted: December 14, 2024	Published: December 21, 2024

الملخص

تم إجراء محاكاة ونمذجة حاسوبية لدراسة تأثير اتساع فجوة الطاقة للطبقة الماصة على كفاءة الخلايا الشمسية للحصول على أعلى فدرمن الطاقة الكهربائية، كما تم تحديد القيمة المثلى لفجوة الطاقة التي عندها تكون أعلى كفاءة للخلية الشمسية وقد وجد أنها تساوي (1.1 إلكترون فولت) عند حرارة (5800 K) وكانت عندها الكفاءة القصوى للخلية الشمسية تساوي 0.44. كذلك أجريت محاكاة حاسوبية لدراسة تأثير حرارة الشمس على الكفاءة القصوى للخلية الشمسية التي تبين أنها تقل بارتفاع حرارة الشمس مما يستدعي ضرورة ضبط التصميم وفقاً للظروف المناخية المختلفة، كما تم التبين من أن قيمة فجوة الطاقة المثلى تبقى ثابتة مع ارتفاع الحرارة. كذلك تم دراسة تأثير نسبة تركيز الجرمانيوم (Ga)في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 للخلية الشمسية نحاس أنديوم جاليوم سيلينيد (CIGS) على كل من فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون، وتحديد نسبة التركيز التي تقابل فجوة الطاقة المثلى. حيث أظهرت النتائج أن فجوة الطاقة تزداد ويقل تقارب الإلكترون بازدياد نسبة (Ga) في تركيب Cu(In1−xGax) Se2، ووجد أنه للحصول على فجوة طاقة مثلى تساوي (1.1 eV) تكون نسبة تركيز(Ga) المناسبة (0.14)، وتمت المحاكاة باستخدام الماتلاب (Math-lab). وقد تمت مناقشة وتفسير النتائج المتحصل عليها.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية، فجوة الطاقة، درجة الحرارة، الكفاءة، تركيز (Ga).

Abstract

Computer simulation and modeling were conducted to study the effect of the widening of the energy gap of the absorbent layer on the efficiency of solar cells to obtain the highest amount of electrical energy. The optimal value of the energy gap at which the solar cell has the highest efficiency was determined and it was found to be equal to (1.1 MeV) at a temperature of (K). 5800) and the maximum efficiency of the solar cell was 0.44. Computer simulations were also conducted to study the effect of the sun's heat on the maximum efficiency of the solar cell, which was found to decrease as the temperature of the sun increases, which necessitates adjusting the design according to different climatic conditions. It was also shown that the value of the optimal energy gap remains constant as the temperature increases. The effect of the concentration ratio of germanium (Ga) in the composition of Cu(In1−xGax)Se2 for the copper indium gallium selenide (CIGS) solar cell was also studied on the energy gap and electron affinity, and the concentration ratio that corresponds to the optimal energy gap was determined. The results showed that the energy gap increases with increasing percentage ((Ga) in the synthesis of Cu(In1−xGax) Se2, and it was found that to obtain an optimal energy gap equal to (eV 1.1) the ratio The appropriate Ga

concentration was 0.14, and the simulation was done using MATH-lab, and the obtained results were discussed and interpreted.

Keywords: Solar cells, energy gap, temperature, efficiency, Paraphrase text.

المقدمة

تعتبر الخلايا الشمسية خياراً واعداً لحل مشكلة نقص الكهرباء حيث أنها تولد الطاقة الكهربائية مباشرةً من الإشعاع الشمسي إلى تيار مستمر وباستخدام منخفض للمواد [16] . وقد حظيت باهتمام كبير في السنوات الأخيرة من قبل العديد من الباحثين [4، 5، 6، 18،19] وذلك لزيادة الاهتمام بالبحث عن بدائل الوقود الأحفوري من أجل توليد الطاقة الكهربائية الكافية إذ أن استخدام التقنيات البديلة يخفف من مشكلة نقص الكهرباء حيث أن لها العديد من المزايا منها : أنها نظيفة ، وخالية من المخلفات، ويتم توليدها بسهولة وبكميات كبيرة، ويمكن توليدها بطرق عديدة في مساحات كبيرة [1،2،3،19]. ولأن مصدر الطاقة الشمسية متاح بكثرة لهذا الهدف والذي يعتبر من أهم المصادر البديلة ويمكن الاستفادة منه بشكل مباشر لتوليد الكهرباء لذلك تعد الخلايا الشمسية أحد هذه التقنيات البديلة وقد تكون أهمها.

والخلية الشمسية هي جهاز يحول ضوء الشمس إلى تيار كهربائي ويوجد عدة أنواع للخلايا الشمسية ولكن اهتمام الباحثين في السنوات الأخيرة تركز على دراسة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة لما لها من ميزات كثيرة أهمها: قلة تكاليفها، وأنها تتكون من مواد صديقة للبيئة [3،4،14] .

تتركب الخلايا ذات الأغشية الرقيقة عادة من عدة طبقات كما موضح بالشكل (1) [16] ، وتتأثر كفاءة الخلية الشمسية بعدة عوامل منها: درجة حرارة الشمس، ودرجة حرارة الخلية الشمسية، ومدى اتساع فجوة الطاقة ،حيث قام (Farhana 2017 Anwar وزملاؤه) بدراسة تأثير درجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية [6].

وتعرف فجوة الطاقة على أنها "النطاق الطاقي بين الجزء العلوي لنطاق التكافؤ والجزء السفلي من نطاق التوصيل للمادة شبه الموصلة" كما تتضح من خلال الشكل (2) الذي يوضح فجوة الطاقة للمادة شبه الموصلة [3،7،8] ، وقد درس بعض الباحثين تأثير فجوة الطاقة على كفاءة الخلية الشمسية [9،10،11]، وبين (Nserdin A. Ragab وزملاؤه) أن كفاءة الخلية الشمسية تتغير بنسبة (3% لكل 1 إلكترون فولت) [15] .

تناولت هذه الدراسة مدى تأثير اتساع فجوة الطاقة للطبقة الماصة على كفاءة الخلية الشمسية وتحديد القيمة المثلى لها للحصول على أعلى كفاءة وأيضا تناولت دراسة مدى تأثير حرارة الشمس على أقصى قيمة للكفاءة. و كذلك تم دراسة مدى تأثير نسبة تركيز (Ga) في تركيب Cu(In1−xGax) Se2 على فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون الذي تناول دراسته العديد من البحاث منهم (Dr. LuqmanSufer Ali وزميله، 2011).

منهجية البحث

تعتبر الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة من أهم أنواع الخلايا الشمسية لذلك تم في هذا البحث اعتماد الخلية الشمسية (CIGS) نموذجا للدراسة لما له من العديد من المزايا فهو يتميز بقلة التكاليف وصداقته للبيئة وفجوة طاقة مناسبة والشكل (1) يوضح تركيب الخلية الشمسية ذات الأغشية الرقيقة (CIGS) [4] .

يعطى التيار الذي ينتج من الخلية الشمسية من المعادلة (1).

$$I_{sc} = \frac{q}{E_g}\ \eta\ p_s \qquad (1)$$

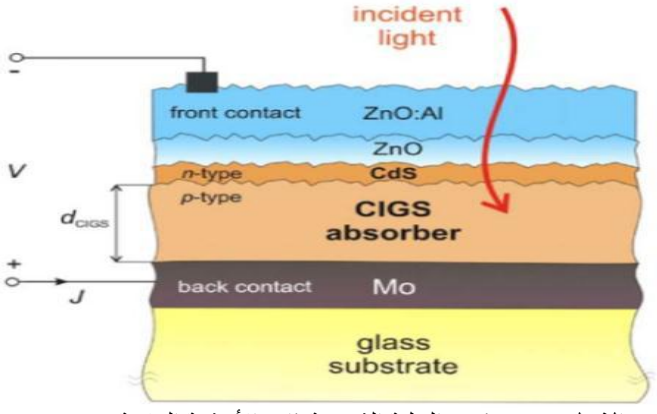
حيث:

I_{sc} :تيار الدائرة القصيرة

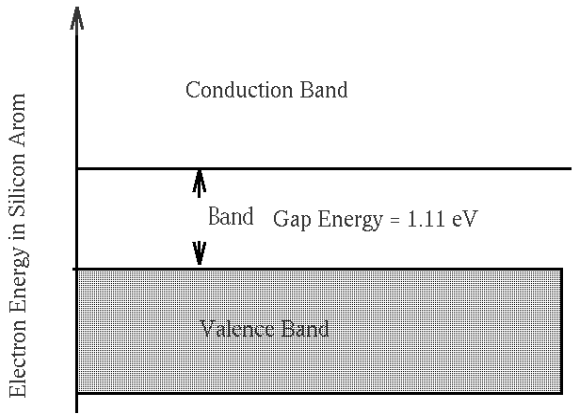
E_g: فجوة الطاقة.

η كفاءة الخلية الشمسية.

p_s ::قدرة الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الخلية الشمسية.



الشكل (1): تركيب الخلية الشمسية ذات الأغشية الرقيقة [16].



الشكل (2): يوضح فجوة الطاقة لذرة السيليكون [17].

وهناك اختلاف في الخلايا الشمسية من حيث كفاءتها نظرا لوجود مؤثرات قد تزيدها أو تقللها وتعرف الكفاءة أنها" نسبة القدرة الكهربائية القصوى الناتجة (P_{max}) وقدرة الإشعاع الشمسي الداخلة (P_{in}) في ظل ظروف الإضاء القياسية [14]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \qquad (2)$$

حيث:

η كفاءة الخلية الشمسية.

P_{max} : قدرة الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الخلية الشمسية.

P_{in} : قدرة الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الخلية الشمسية.

تعد فجوة الطاقة من العوامل التي تؤثر على كفاءة الخلية الشمسية وحيث أن هناك إمكانية لضغط فجوة الطاقة وتغييرها باستخدام تقنية النانو عن طريق تغيير البنية الداخلية للخلية وكمية شبه الموصل في الطبقة الماصة [13,4]وأيضاً قيمة فجوة الطاقة تتأثر بتغير الرقم الذري لمادة شبه الموصل لذلك يمكن التحكم في اتساعها [12] . ومن جهة أخرى وجد أن فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون تتغيران بتغير نسبة الشوائب في الطبقة الماصة وقد تم دراسة هذا التأثير أيضا في هذا البحث.

الطريقة

المحاكاة والنمذجة الحاسوبية أدوات حيوية لدراسة وتحسين كفاءة الخلايا الشمسية تمكن الباحثين من تحليل تأثير المتغيرات المختلفة دون الحاجة إلى إجراء تجارب مكلفة ومعقدة، كما تتيح لهم استكشاف سيناريوهات متعددة بسرعة ودقة.

الدراسة في هذا البحث تمت باستخدم المحاكاة الحاسوبية الماتلاب (Math-lab)، وكان الهدف دراسة مدى تأثير اتساع فجوة الطاقة للطبقة الماصة على كفاءة الخلية الشمسية ذات الوصلة (p -n) لتوليد الطاقة الكهربائية والمتمثلة في تحديد أقصى قدرة لها ودراسة إمكانية زيادة كفاءة الخلية الشمسية من خلال التحكم في فجوة الطاقة وذلك بنمذجة سلوكها من خلال المعادلة الرياضية (4) التي تعرف بمعادلة شوكلي وكوسيه [7]، وذلك بتغيير قيمة فجوة الطاقة وجعل باقي المؤثرات الأخرى ثابتة، ومن ثم معرفة قيمة فجوة الطاقة المثلى التي تقابل أعلى كفاءة شمسية لضمان الحصول على أعلى فائدة من الخلية الشمسية المصنعة. أيضا تم استخدام المحاكاة الحاسوبية الماتلاب (Math-lab) لدراسة مدى تأثير حرارة الشمس على أقصى قيمة لكفاءة الخلية الشمسية.

كما تم أيضا استخدام المحاكاة الحاسوبية لدراسة مدى تأثير التغيير في نسبة Ga/(In + Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 على كل من فجوة الطاقة واقتراب الإلكترون .

المعادلة (3) تبين العلاقة بين نسبة Ga/(In + Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 و فجوة الطاقة.

$$E_g = 1.04 + 0.391x + 0.262x^2 \qquad (3)$$

E_g :فجوة الطاقة.

x: نسبة تركيز في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 (Ga).

أما العلاقة التي تربط بين كفاءة الخلية الشمسية وفجوة الطاقة فإنها تعطى من المعادلة (4)

$$\eta = \frac{15}{\pi^4} X_s \int_{X_s}^{\infty} \frac{x^2}{e^x - 1} dx \qquad (4)$$

حيث:

$$X_{s=} = \frac{E_g}{K_B T}$$

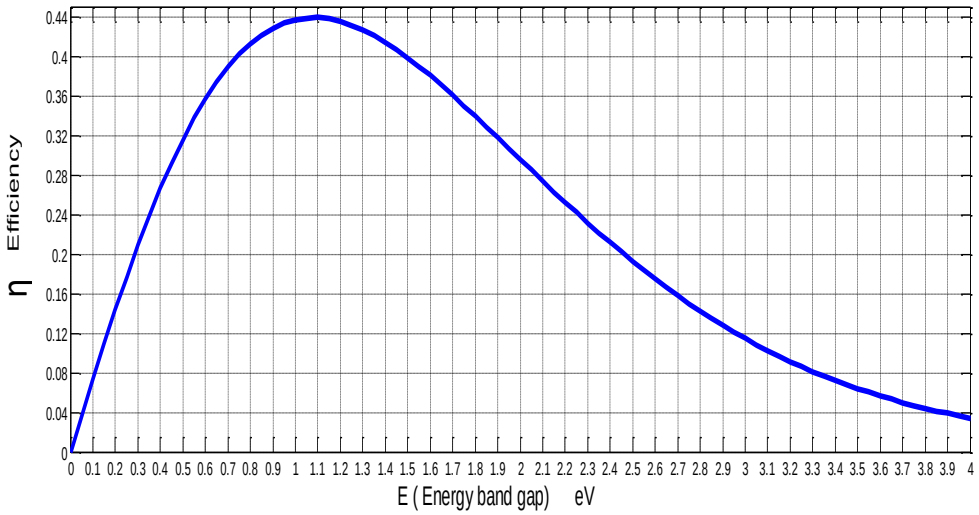
η : كفاءة الخلية الشمسية.
E_g : فجوة الطاقة.
T: درجة حرارة الشمس.
K_B: ثابت الإشعاع $= 8.62\times10^{-5}$
X_e: تفارب الإلكترون.

النتائج والمناقشة

تم بنجاح محاكاة العلاقة التي توضح تأثير اتساع فجوة الطاقة للطبقة الماصة على كفاءة الخلية الشمسية ومعرفة القيمة المثلى لها التي تقابل أقصى تيار دائرة مفتوحة، وتم أيضا دراسة مدى تأثير ارتفاع درجة الحرارة على تغير أقصى قيمة لكفاءة الخلية الشمسية، ومن جهة أخرى تم محاكاة تأثير تغيير نسبة تركيز Ga/(In + Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 على كل من فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون وكانت المحاكاة باستخدام برنامج المحاكاة الحاسوبية (Math-lab).

تأثير فجوة الطاقة للطبقة الماصة على كفاءة الخلية الشمسية

تمت المحاكاة الحاسوبية باستخدام قيم لفجوة الطاقة تتراوح بين (0 -4) إلكترون ڤولت وباعتبارحرارة الشمس (5800K) فنتج عن المحاكاة الشكل (3).



الشكل (3): العلاقة بين كفاءة الخلية الشمسية مع فجوة الطاقة.

E_g=(0 -4) إلكترون ڤولت.

من خلال الشكل (3) يتبين أن كفاءة الخلية الشمسية تزداد بازدياد اتساع فجوة الطاقة إلى أن تصل إلى قيمة معينة تكون عندها كفاءة الخلية الشمسية أقصى ما يمكن، وتظهر هذه القيمة عند قمة المنحنى، يطلق على هذه القيمة (القيمة المثلى لفجوة الطاقة)، وبعد هذه القيمة تبدأ كفاءة الخلية الشمسية بالتناقص تدريجياً بازدياد فجوة الطاقة. ويتضح من الشكل أن القيمة المثلى لفجوة الطاقة عند حرارة (5800 K) تساوي (1.1 إلكترون ڤولت) وهذا ما جاء متوافقاً مع دراسات سابقة [7].

ويفسر ذلك بأنه عند فجوات طاقة صغيرة يكون امتصاص الفوتونات كبير وعند فجوات طاقة كبيرة يكون امتصاص الفوتونات كبير فتكون هناك فجوات طاقة مثلى [14] ، وأن فجوة الطاقة تؤثر على امتصاص الضوء وتحويله إلى طاقة كهربائية، حيث أنه كلما كانت فجوة الطاقة مناسبة زادت قدرة الخلية الشمسية على تحويل أشعة الشمس إلى طاقة مستدامة ويحدث ذلك عندما تكون فجوة الطاقة مثلى حيث أن الخلية الشمسية تستطيع التقاط نطاق أوسع من الطيف الشمسي مما يزيد من كفاءتها في توليد الطاقة ، وعند ازدياد اتساع فجوة الطاقة بقيمة أكبر من القيمة المثلى يقل الامتصاص ويقل تيار الدائرة القصيرة على الجانب الأخر [4].

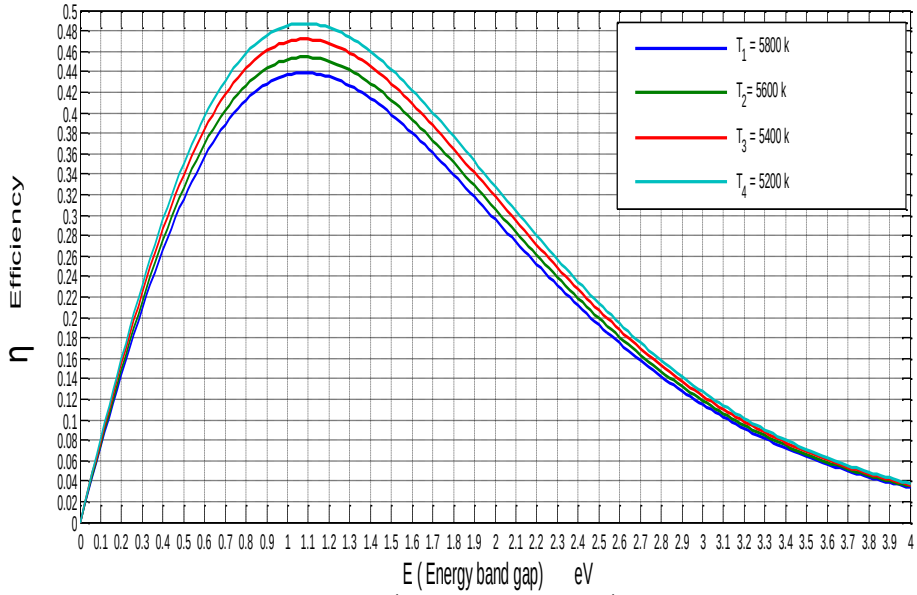
الجدول (1) بوضح بعض من القيم المتحصل عليها لكفاءة الخلية الشمسية مع ما يقابلها من قيم فجوة الطاقة، وكما بالجدول أن الكفاءة تزداد حتى تصل إلى قيمة (0.438) عند فجوة طاقة تساوي (1.1) إلكترون ڤولت.

الجدول (1): تغير كفاءة الخلية الشمسية بازدياد اتساع فجوة الطاقة.

SN	Band gap E_g	Efficiency η	SN	Band gap E_g	Efficiency η
1	0.0	0	12	1.1	0.438
2	0.1	0.074	13	1.2	0.435
3	0.2	0.144	14	1.3	0.427
4	0.3	0.209	15	1.4	0.414
5	0.4	0.267	16	1.5	0.398
6	0.5	0.316	17	1.6	0.380
7	0.6	0.357	18	1.7	0.360
8	0.7	0.389	19	1.8	0.339
9	0.8	0.412	20	1.9	0.318
10	0.9	0.428	21	2	0.296
11	1.0	0.436	22	2.1	0.274

تأثيردرجة حرارة الشمس على أقصى قيمة لكفاءة الخلية الشمسية

تم دراسة تأثير درجة حرارة الشمس على أقصى كفاءة للخلية الشمسية، وتمت المحاكاة الحاسوبية باستخدام الماتلاب (Math-lab) وكانت درجات الحرارة الواقعة تحت الدراسة (5800 K-5600 K-5400 K- 5200 K) وتم تحديد القيمة القصوى لكفاءة الخلية الشمسية التي تقابل كل درجة حرارة، ونتج عن المحاكاة الشكل (4) .



الشكل (4): تأثيردرجة الحرارة على أقصى كفاءة للخلية الشمسية.

من الشكل (4) يتبين أن درجة حرارة الشمس تؤثر على القيمة القصوى لكفاءة الخلية الشمسية، وأن القيمة القصوى للكفاءة تقل كلما ازدادت حرارة الشمس في الارتفاع. و لدرجات الحرارة الواقعة تحت الدراسة والتي كانت (5400 K- 5200 K 5800 K-5600 K) تراوحت القيمة القصوى لكفاءة الخلية الشمسية ما بين (0.44 - 0.49)، حيث أن أقصى قيمة لكفاءة الخلية الشمسية عند حرارة (T =5200 k) كانت (0.49) ويبين ذلك المنحنى الأزرق الفاتح، وكانت (0.47)عند حرارة (T = 5400 k) ويبين ذلك المنحنى الأحمر، وعندما كانت الحرارة (T= 5600 k) كانت قيمة الكفاءة القصوى (0.45) وبين ذلك المنحنى الأخضر، أما المنحنى الأزرق الغامق والذي كانت عنده درجة الحرارة (T=5800 k) كانت الكفاءة القصوى (0.44). وبالتالي فإن قيمة الكفاءة القصوى للخلية الشمسية تقل بارتفاع حرارة الشمس، وقد تراوحت ما بين (0.44 -0.49) للنطاق الحراري الذي يتراوح بين (5200K- 5800 K).

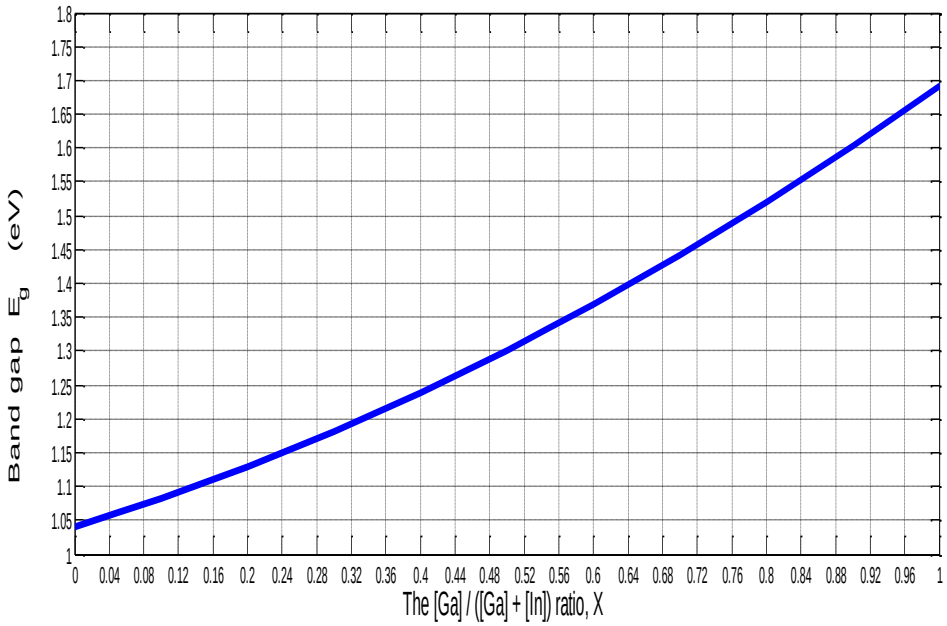
ويُعزى ذلك إلى التغيرات في الخصائص الإلكترونية والبصرية لمواد الشبه الموصلة مع التغير في درجة الحرارة، وأن تيار التشبع العكسي يزداد بزيادة درجة الحرارة مما يؤدي إلى نقصان جهد الدائرة المفتوحة مما يستدعي تصميم خلايا متخصصة لكل نطاق درجة حرارة. لذلك يمكن تحسين كفاءة الخلايا الشمسية من خلال استخدام مواد تستجيب بشكل أفضل لحرارة الشمس.

تأثير نسبة تركيز(Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 على فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون

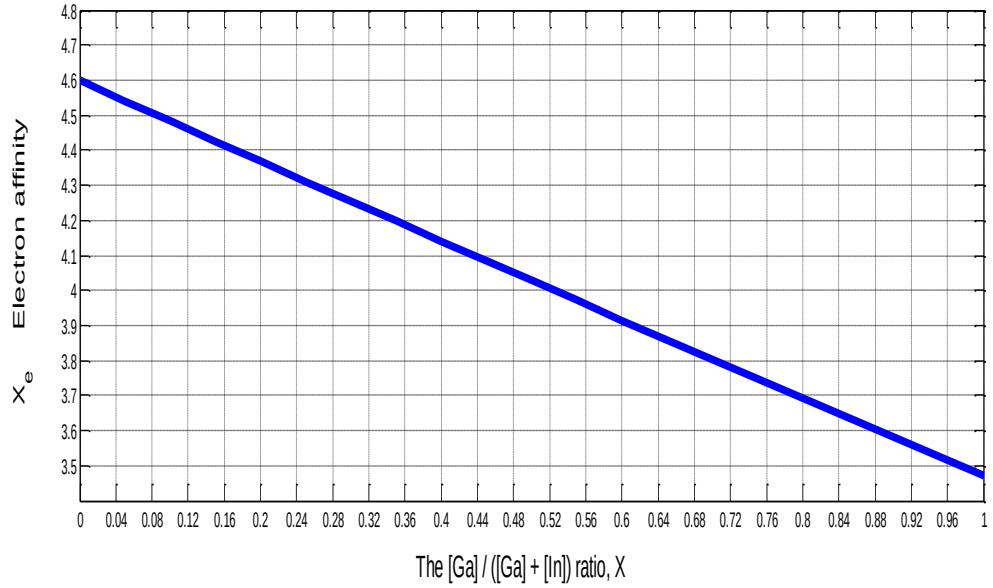
تم أيضاً في هذا البحث دراسة تأثير نسبة تركيز Ga/(In + Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 على كل من فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون لمعرفة التركيز الأمثل الذي تقابله أعلى كفاءة للخلية الشمسية حيث تبين من النتائج التي تم حسابها والمبينة في الجدول (2) أن قيمة فجوة الطاقة تزداد وتقارب الإلكترون يقل بزيادة نسبة تركيز Ga/(In + Ga) داخل تركيب Cu(In1−xGax)Se2، ودعمت هذه النتائج بمحاكاة حاسوبية تم إجراءها والتي نتج عن تطبيقها الشكلين (4)، (5).

الجدول (2) : تغير فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون بتغير نسبة Ga/(In + Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2

SN.	Ga/(In + Ga) ratio, x	Band gap E_g	تقارب الإلكترون X_e
1	0.0	1.04	4.6
2	0.1	1.08	4.483
3	0.2	1.13	4.367
4	0.3	1.18	4.259
5	0.4	1.14	4.129
6	0.5	1.30	4.012
7	0.6	1.37	3.890
8	0.7	1.44	3.770
9	0.8	1.52	3.648
10	0.9	1.60	3.526
11	1.0	1.70	3.472



الشكل (4): تأثير نسبة تركيز(Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 على فجوة الطاقة.



الشكل (5): تأثير نسبة تركيز(Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 على تقارب الإلكترون.

الشكل (4) يبين أنه بزيادة نسبة تركيز Ga/(In + Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 تزداد قيمة فجوة الطاقة، وبذلك يمكن اختيار التركيز المناسب الذي عنده يتم الحصول على فجوة الطاقة المثلى باعتبار درجة الحرارة المعطاة وبالتالي الحصول على أعلى كفاءة للخلية الشمسية، أما تقارب الإلكترون فإنه يقل بزيادة نسبة Ga/(In + Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 ويتضح ذلك من الشكل (5) , وقد وجد أن التركيز المناسب لGa/(In + Ga) في تركيب Cu(In1−xGax)Se2 للحصول على فجوة الطاقة المثلى (1.1 إلكترون ڤولت) يكون (0.14) وكانت هذه النتيجة متوافقة مع النتائج النظرية.

الخاتمة

تكمن الأهمية العملية في تحسين فجوة الطاقة في القدرة على تصميم خلايا شمسية ذات كفاءة عالية، مما يزيد من قدرة هذه الخلايا على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية بشكل أفضل. أظهرت نتائج هذه الدراسة أن هناك قيمة مثلى لفجوة الطاقة تحقق أعلى كفاءة للخلايا الشمسية، وتبين أن كفاءة الخلية الشمسية تقل بارتفاع حرارة الشمس. كما أوضحت المحاكاة الحاسوبية أن نسبة تركيز (Ga) داخل الطبقة الماصة له تأثير على قيمة فجوة الطاقة وتقارب الإلكترون، ولذلك فإن الأداء الأمثل يمكن تحقيقه عند تعديل تركيز (Ga) داخل الطبقة الماصة للحصول على فجوة الطاقة لتتناسب مع أعلى كفاءة للخلية الشمسية.

تحديات تصميم خلايا شمسية ذات فجوة طاقة مثلى عديدة من أبرز هذه التحديات هو تحقيق التوازن الدقيق بين اتساع فجوة الطاقة ومواد الخلية الشمسية لضمان الأداء الأمثل وكذلك تطوير مواد شبه موصلة ذات فجوة طاقة مثالية. بالإضافة إلى ذلك، يمكن تحسين تصميم الخلية الشمسية لتقليل الفقد الطاقي في الأجزاء المختلفة من النظام. كما يمكن استخدام تقنيات التبريد الفعالة للحفاظ على درجة حرارة الخلية ضمن نطاق مثالي لضمان أعلى كفاءة ممكنة.

مستقبل الطاقة الشمسية واعد ومن المتوقع أن تشهد تطورات كبيرة في السنوات المقبلة لذلك من المهم أن تتركز الدراسات والأبحاث على دراسة كيفية زيادة كفاءتها.

References

1. A. Sylla, S.Toure , and J. vilcat , "Numerical Modeling and Simulation of CIGS-Based Solar Cells With ZnS Buffer Layer,"Open Journal of Modeling and Simulation , vol.5 , N.4.,pp , 218-231. 2017.
2. K.Mamta , V.Maurya , "Sb2se3/CZTS dual absorber Layer based solar cell With 36.32% efficiency . A numerical Simulation," Journal of Science: Advanced Material and Devices, Vol.7 , No.2.,pp , 1-8, 2022.
3. Hajar Ali Ashkirban , "Simulation Study of Thin Film Solar Cells Using Namerical Simulation Program in One Dimension (SCAPS)", 2024.
4. Md. Asaduzzaman, Mehedi Hasan and Ali Newaz Bahar, " An investigation into the effects of band gap and doping concentration on Cu(In,Ga)Se2 solar cell efficiency,' SpringerPlus, 5:578 , (2016).

5. Giorgio Tseberlidis, Vanira Trifiletti, Elisa Vitiello, Amin Hasan Husien, Luigi Frioni,† Mattia Da Lisca, José Alvarez, Maurizio Acciarri, and Simona O. Binetti. " Band-Gap Tuning Induced by Germanium Introduction in Solution-Processed Kesterite Thin Films." ACS Omega. 2022 Jul 12; 7(27): 23445–23456.
6. Farhana Anwar, Sajia Afrin, Sakin Sarwar Satter, Rafee Mahbub, Saeed Mahmud Ullah," Simulation and performance study of Nanowire CdS/CdTe Solar Cell," INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH F.Anwar et al., Vol.7, No.2, 2017.
7. C. Julian Chen, " Physics of Solar Energy," مؤسسة هنداوي, 2017.
8. Tetsuo Soga, " Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion," Elsevier, 2006.
9. William Shockley, and Hans J. Queisser , "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," Journal of Applied Physics . V.32, N.3, pp.510,(1961).
10. Giorgio Tseberlidis, Vanira Trifiletti, Elisa Vitiello, Amin Hasan Husien, Luigi Frioni, Mattia Da Lisca, José Alvarez, Maurizio Acciarri, and Simona O. Binetti , "Band-Gap Tuning Induced by Germanium Introduction in Solution-Processed Kesterite Thin Films," ACS Omega, 7, 23445−23456 , 2022.
11. Dr. Luqman Sufer Ali, and Anas Khalid Abdullah, "Computer Simulation of The Effect of Band Cap Grading of The Cigs Absorber Layer on The Performance of Cds/Cigs Thin Film Solar Cell," Al-Rafidain Engineering Vol.20 No. 3 June 2012.
12. Gasmallah Hassan Hassab Allah,Mubarak Dirar Abdallah, ,Mohammed Saeed Daw elbei & sawsan ahmed elhouri ahmed, " The change of energy gap and efficiency of Silicon solar cell when doped by some elements," International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology Vol. 6 , pp.184-192, 12–15 December.
13. Ahmed Bouazz, Jaime Mimila-Arroyo, " Optimization of Graded Band Gap CdHgTe Solar Cells", Photovoltaic Solar Energy Conference,1978.
14. Suad Muhammad Abu Zariba, Hajar Ali Ashkirban, " Design An Environmentally Friendly Thin-Film Solar Cell, and Study The Effect Of Temperature On Its Electrical Properties Using a One-Dimensional Solar Cell Simulation Program",International Science and Technology Journal, V 33,Jannary 2024.
15. Nserdin A. Ragab, Sawsan Ahmed Elhouri Ahmed, Ahmed Hassan Alfaki, Abdalsakhi S. M. H& Mubarak I. S. Tagabo," VALUE OF EFFICIENCY & ENERGY GAP FOR DIFFERENT DYE SOLAR CELLS," Global Journal of Engineering Science and Researches · August 2018.
16. Dr. Luqman Sufer Ali, Anas Khalid Abdullah," Computer Simulation of The Effect of Band Cap Grading of The Cigs Absorber Layer on The Performance of Cds/Cigs Thin Film Solar Cell," Vol.20, No. 3 Al-Rafidain Engineering, June 2012.
17. Imtiaz Mahmud#, A.H.M Tasbir Farid#2Md. Sazzadur Rahman#, Prof. Dr. Zahid Hasan Mahmood, " Study on the band-gap of nano silicon using nanotechnology to enhance the efficiency of PV solar cell**,"** 2012

المراجع العربية

18- احمودة، عائشة عويدات، عبد الحميد، هدى، " نمذجة ومحاكاة الخلايا الفولتوضوئية باستخدام الماتلاب،" جامعة سبها،2017.
19- زينب عدنان عبد الحميد، شروق صباح،" نحسين كفاءة الخلايا الشمسية"، وزارة التعليم والبحث العلمي-جامعة بابل - كلية التربية للعلوم الصرفة- قسم، لفيزياء،2023.