

## دراسة تغيرات المردود الكمومي بتابعة طول الموجة لخلية شمسية من السليكون أحادي التبلور بالطريقة التقليدية

د. برهان دالاتي\*

د. علي درويشو\*\*

همام ابراهيم\*\*\*

(تاريخ الإيداع 4 / 11 / 2021 – تاريخ النشر 25 / 4 / 2022)

### □ ملخص □

لما يمتلكه المردود الكمومي من أهمية جاءت هذه الدراسة لتقدم فكرة عن تغيرات المردود الكمومي بدلالة الطول الموجي لخلية الشمسية من السليكون أحادي التبلور وذلك بإستخدام إنارة LED ، وذلك بقياس التيار المنتج لكل طول موجي ومن ثم حساب المردود الكمومي وإجراء مقارنة مابين هذه القيم. حيث تبين من هذه الدراسة أن القيمة العظمى كانت عند الطول الموجي  $690\text{nm}$  بمردود حوال  $83\%$  بالإضافة لإجراء مقارنة بين الطريقة التقليدية المستخدمة و بين نظام RTQE الأني. وتجدر الإشارة إلى أن القيمة العظمى للمردود الكمومي المرجعية تبلغ نحو  $590\text{nm}$  عند استخدام الخلية نفسها ولكن بتجهيزات أفضل ، وهي قريبة من القيمة المقاسة في هذا البحث.

الكلمات المفتاحية: المردود الكمومي – أنعكاسية – فوتون – طول موجي – إعادة الاتحاد

\* دكتور – قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة تشرين-اللاذقية-سوريا

\*\* دكتور – قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة تشرين- اللاذقية -سوريا

\*\*\* طالب دراسات عليا (ماجستير) –قسم الفيزياء- كلية العلوم-جامعة تشرين- اللاذقية -سوريا

## Study of quantum efficiency changes with wavelength dependency of a monocrystalline silicon solar cell by the classical method

**Dr.B.Dalati\***  
**Dr.A.Darwisho\*\***  
**H.Ibraheem\*\*\***

(Received 4/11/2021.Accepted 25/4/2022)

### □ABSTRACT □

Because of the importance of the quantum efficiency, this study provides an idea of the changes of the quantum efficiency in terms of the wavelength of a monocrystalline silicon solar cell using LED lighting, by measuring the current produced for each wave length , and then calculate the quantum efficiency and make a comparison between these values. It was found from this study that the maximum value was at the wavelength  $690\text{nm}$  with a efficiency of about 83%, in addition to making a comparison between the traditional method used and the instantaneous RTQE system. It should be noted that the maximum value of the reference quantum yield is about  $590\text{nm}$  when using the same cell but with better equipment, which is close to the value measured in this research.

Key words:Quantum efficiency - Reflectivity - Photon - Wavelength – Recombination

---

\* Dr, Department of Physics, Faculty of Science, University of Tishreen, Latakia, Syria

\*\* Dr, Department of Physics, Faculty of Science, University of Tishreen, Latakia, Syria

\*\*\* postgraduate student, Department of Physics, Faculty of Science, University of Tishreen, Latakia,

Syria

## المقدمة

نتيجة الحاجة الملحة لمصادر الطاقة البديلة للوقود الأحفوري توجهت الأبحاث نحو مصادر الطاقة المتجددة بشكل عام وخاصةً الطاقة الشمسية. لذلك توجهت مراكز الأبحاث نحو تطوير نظم توليد الكهرباء بواسطة الأشعة الشمسية، أي بواسطة الخلايا الشمسية. لذلك تمت دراسات عديدة نحو تحسين المعاملات الرئيسية للخلايا الشمسية، و محاولة الإستفادة من أكبر قدر ممكن من الطاقة الواردة إلى الخلايا ، أي زيادة مردود الخلايا الشمسية [2] [1].

تقوم الخلايا الشمسية بتحويل الطاقة الكهرطيسية (الفوتونات) إلى طاقة كهربائية وفق مفعول الفولط الضوئي ، والذي يوضح آلية امتصاص الفوتونات الضوئية و تحرير الإلكترونات لتشكيل التيار الكهربائي، ومنه فإن تحسين أداء الخلايا الشمسية يعني زيادة عدد الإلكترونات المتحررة وبالتالي زيادة التيار الكهربائي المنتج [3].

إن أهم المعاملات الأساسية للخلايا الشمسية هي مميز تيار-كمون والذي يظهر تيار الدارة المغلقة  $I_{sc}$ ، وكمون الدارة المفتوحة  $V_{oc}$ ، والطاقة المنتجة الأعظمية  $P_M$ ، ومعامل الامتلاء  $FF$ ، والمردود  $\eta$  بالإضافة للمردود الكوموي  $\eta_{QE}$ ، لذلك فإن تحسين قيم هذه المعاملات يعني تحسين أداء الخلية الشمسية والذي يعود بفائدة اقتصادية كبيرة من ناحية تقليل التكلفة المادية للواط الواحد، و تقليل المساحات الجغرافية لحقول الطاقة الشمسية.

ويمثل المردود الكوموي في الخلايا الشمسية مقدار التيار الكهربائي المنتج عند امتصاص إشعاع فوتوني وحيد اللون (طول موجة محدد) أي عدد أزواج الإلكترونات المتحررة في الثقب الى عدد الفوتونات الممتصة . إن أهمية المردود الكوموي تكمن في تأثيره المباشر في شدة التيار المتولد عن خلية شمسية [4]:

$$J_{sc} = q \int b_s(W) \eta_{QE}(W) dW$$

حيث أن  $\eta_{QE}$  يعبر عن المردود الكوموي، و  $b_s$  كثافة تدفق طيف الفوتونات الوارد، و  $W$  طاقة الفوتون الواحد.

يتم حساب المردود الكوموي للخلايا الشمسية وفق طريقتين :

١- الطريقة التقليدية والتي تعتمد فيها على تسليط ضوء وحيد طول الموجة (LED Light Emitting Diodes) على الخلية الشمسية المدروسة وقياس تيار الدارة المغلقة  $I_{sc}$  المتولد ومن ثم إجراء تناسب بين عدد الفوتونات الممتصة في الخلية وعدد الإلكترونات المتولدة، وهي الطريقة التي سوف أبنى عليها دراستي.

٢- نظام RTQE (Real-Time Quantum Efficiency System) وهو نظام قياس يعطي المردود الكوموي لكل طول موجة بشكل آني ومباشر وبسهولة مطلقة مع إمكانية المراقبة المباشرة للتغيرات في التيار المتولد عند الأنتقال من طول موجة إلى آخر .

وللمردود الكوموي نوعين:

١-مردود كوموي خارجي (EQE) والمقصود به نسبة عدد الإلكترونات التي تجمعها الخلية الشمسية إلى عدد الفوتونات الواردة الى الخلية خلال ثانية.

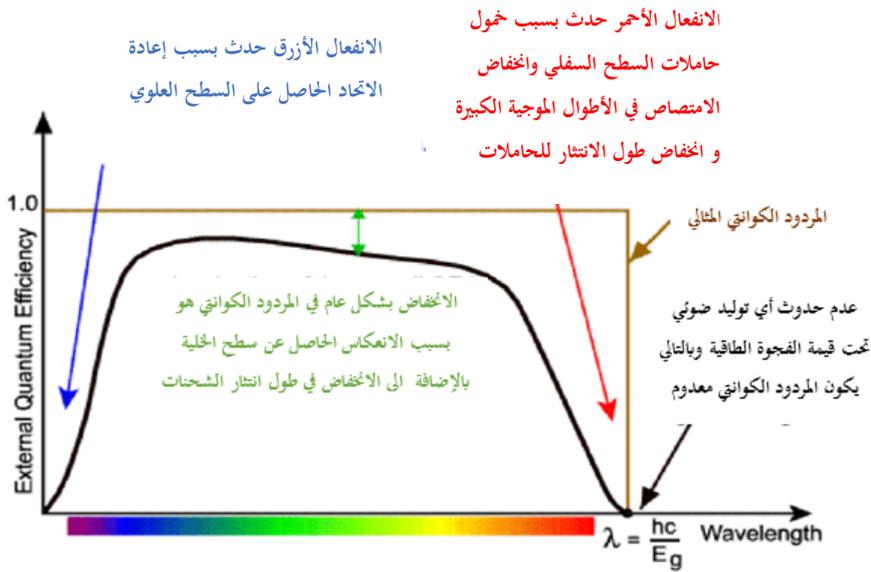
$$EQE = \frac{\text{electrons / sec}}{\text{photo / sec}} = \frac{\text{current} / e}{\text{total power of photons} / \text{energy of one photon}}$$

٢-مردود كمومي داخلي (  $IQE$  ) والمقصود بها نسبة الإلكترونات التي تجمعها الخلية الشمسية إلى عدد الفوتونات الممتصة من قبل الخلية خلال ثانية [5]

$$IQE = \frac{\text{electrons / sec}}{\text{absorbed photon / sec}} = \frac{EQE}{1 - R - T}$$

المردود الكوموي ذو أهمية كبيرة للخلايا الشمسية لأنه يرتبط بمعدل الامتصاص وفاعلية انفصال الشحنات لكنه لا يعتمد على الطيف الضوئي الوارد بشكل مباشر، حيث أنه من المهم أن تمتلك الخلايا مردوداً كمومياً جيداً  $\eta_{QE}$  عندما تكون كثافة التدفق الفوتوني عالية، وذلك ضمن مجال أطوال الموجة (  $400 \rightarrow 1300nm$  ) ، حيث يقاس فقط عند أطوال موجية صغيرة (  $AM 1.5$  ) [6].

يعبر عن المردود الكوموي المثالي بالمستطيل في الشكل (١)، ولوخط أن المردود الكوموي ينخفض بفعل إعادة الاتحاد لأزواج (الكترن - ثقب) الحاصلة ضمن الخلية و الذي يسبب إنخفاض التيار المنتج وبالتالي يسبب إنخفاض في المردود الالمردود الكوموي .



الشكل (١) : تغيرات المردود الكوموي الخارجي بتابعة طول الموجي وأهم العوامل المؤثرة.

### أهمية البحث وأهدافه:

دراسة تغيرات المردود الكوموي بتابعة الطول الموجي للخلايا الشمسية وتوضيح أهم المؤثرات بشكل مباشر على قياسات وآلية قياسه.

## طرائق البحث ومواده:

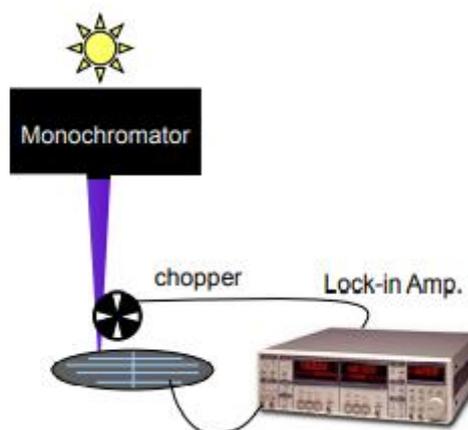
سنوضح أهم آلية قياس المردود الكومومي بتابعة طول الموجي لمجموعة من أطوال الموجية وحيدة اللون LED على خلية شمسية من السليكون أحادي التبلور

### تفاصيل التجربة

تقوم التجربة على تسليط إشعاع ضوئي وحيد اللون LED (أزرق ، أخضر ، أصفر ، برتقال ، أحمر) كل على حدى على خلية شمسية أحادية التبلور بمساحة  $(5 \times 5 \text{ cm}^2)$ . حيث تم تثبيت إضاءة الـ LED على قواعد وترقيمها من ١ إلى ٥ ( بحسب الألوان امرتبة سابقاً) و تثبيت الخلية الشمسية مع وصل دائرة قصر لحساب تيار  $I_{sc}$ .

الطريقة: في البداية تم تعليق القاعدة ١ (الخاصة باللون الأزرق) على الحامل و وصلها بمولد كمون  $(12V)$  ومن ثم تثبيت عدسة مجمعة أسفل القاعدة وإجراء معايرة للعدسة ، بعد ذلك قمنا بتسجيل شدة التيار الخاصة بالقاعدة (١) ، و تكرر العملية للقواعد المتبقية.

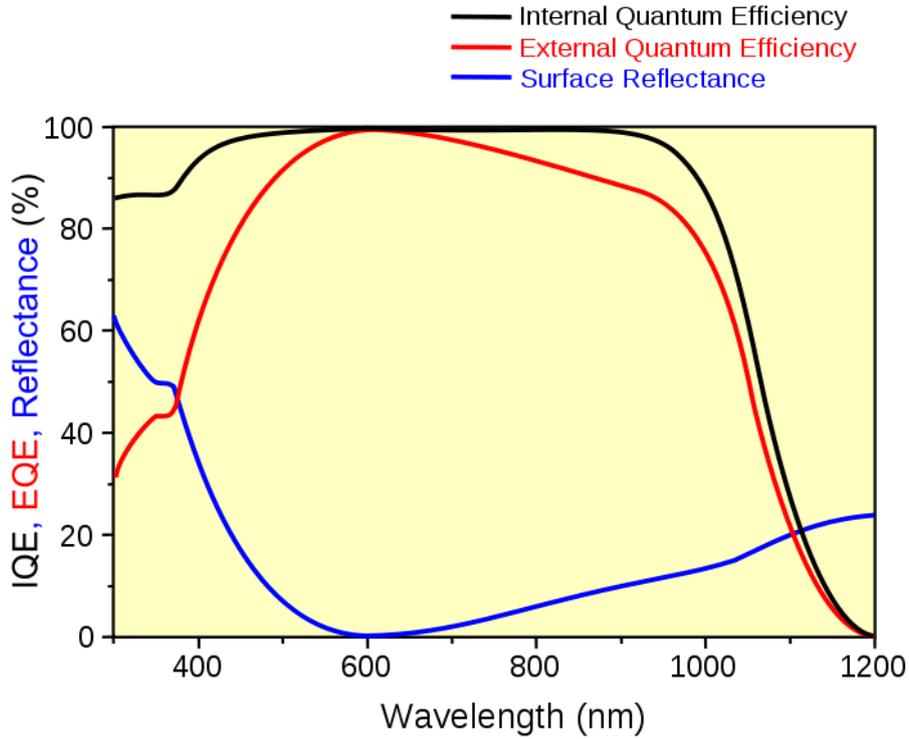
ومن المهم ذكر أنه بعد معرفة كثافة الإشعاع الضوئي و طول موجة الضوء وحيد اللون المسلط يصبح من السهل حساب عدد الفوتونات الوارد إلى سطح الخلية ومن ثم حساب عدد الالكترونات الناتجة وذلك بحساب التيار الكهربائي الناتج عن الخلية المدرسة [7] [8].



الشكل (٢): المخطط المبسط لنظام قياس المردود الكومومي بالطريقة الكلاسيكية

### القياسات التجريبية والحسابات النظرية:

بينت الدراسات والقياسات التجريبية أهمية معرفة كثافة الإشعاع الضوئي الوارد بهدف فهم وحساب المردودين الكوموميين الخارجي EQE والداخي IQE ، والمعرفة الكاملة لنسبة الأشعة المنعكسة عن سطح الخلية الشمسية المدروسة.



الشكل (3): الفرق بين المردودين الكوموميين الداخلي والخارجي والدور المباشر للإنعكاسية في الاختلاف الحاصل بينهما.

#### حساب عدد الفوتونات الواردة الى سطح الخلية:

بدايةً نحسب طاقة الفوتون الواحد من علاقة ماكس بلانك  $E_\lambda = hc / \lambda$ ، حيث أن  $h = 6.63 \times 10^{-34} Js$  و  $c = 3 \times 10^8 m.s^{-1}$  و  $\lambda$  طول الموجة .

عند ورود أشعاع ضوئي من LED الى الخلية بضوء أزرق طول موجته  $400nm$  بشدة حوالي  $1W$  لكل  $N$  فوتون في الثانية الواحدة وهذا العدد يجب أن يوافق عدد الالكترونات المتحررة في الثانية الواحدة (ضمن الشروط المثالية)

$$\frac{N}{t} = \frac{P}{E_\lambda} \quad (1)$$

$$\frac{N}{t} = \frac{P \cdot \lambda}{hc}$$

$$\frac{N_{400nm}}{t} = \frac{1W \cdot 400 \times 10^{-9} m}{6.63 \times 10^{-34} Js \times 3 \times 10^8 m.s^{-1}} = 2 \times 10^{18} \frac{photon}{sec}$$

يتطلب لحساب المردود الكومومي أولاً حساب عدد الالكترونات المتوقع إنتاجها وفق الشروط المثالية وذلك على افتراض أن كل الفوتونات الواردة قد تم امتصاصها، ثانياً حساب عدد الالكترونات الناتجة فعلياً، ومن ثم أخذ نسبة بينهما لحساب قيمة المردود الكومومي [9]، أي أن :

$$I_{400nm} = P \cdot q_e \cdot \left( \frac{\lambda}{hc} \right) \rightarrow I_{100\%}$$

$$\frac{I_{400nm}}{P} = 0.32 \frac{A}{W}$$

حيث يمثل  $I_{400nm}$  مقدار التيار المتولد لكل  $1W$  من الإشعاع الفوتوني في حالة الظروف المثالية أي بامتصاصية 100% من الفوتونات الواردة،  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  ،  $P$  طاقة الإشعاع الضوئي الوارد، ولكن عند إجراء الحساب للتيار الناتج عن الخلية الشمسية وجد أن التيار المتولد لكل  $1W$  أقل من ذلك، إذ أن القيمة الناتجة تجريبياً كانت:

$$\frac{I_{400nm}}{P} = 0.23 \frac{A}{W}$$

وبالتالي فإن المردود الكوموي الناتج عن ضوء وحيد اللون بطول موجة  $400nm$  أو ما يمكن تسميته باحتمالية توليد إلكترون من كل فوتون بطول موجة  $400nm$  ممتص في الخلية الشمسية [10] يساوي :

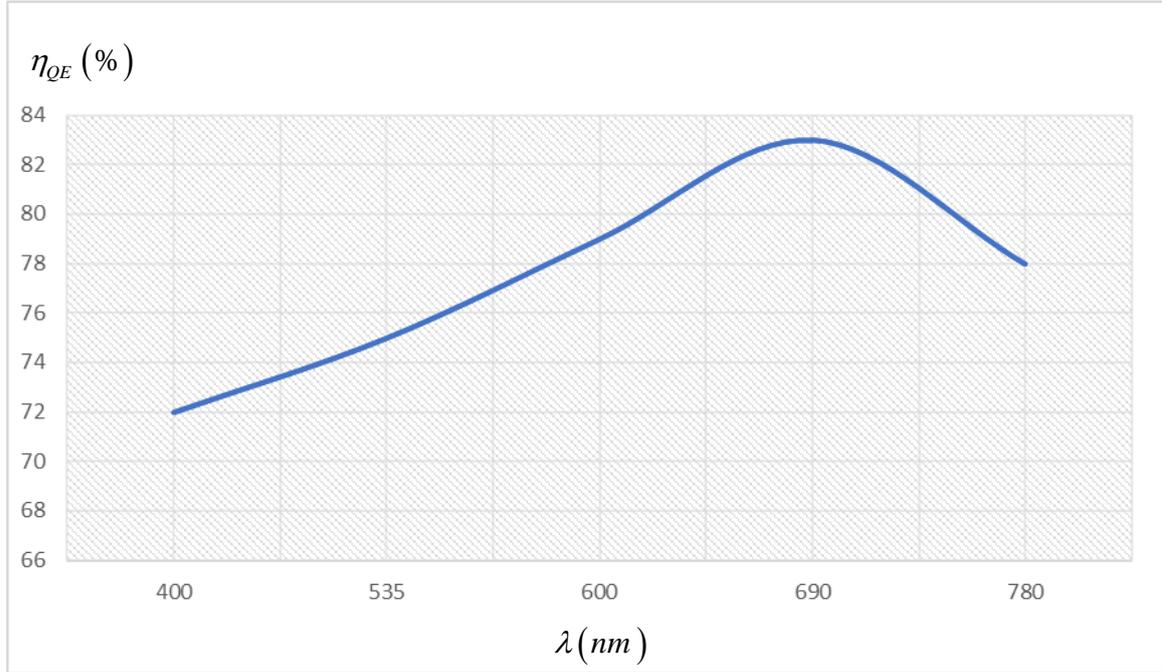
$$QE_{400nm} = \frac{0.23}{0.32} = 72\%$$

نلاحظ وجود انخفاض واضح في قيمة التيار الناتج عن القيمة المتوقعة التي وصلت الى حوالي 28%، وذلك بسبب الخسارة في أزواج حاملات الشحنات المتولدة من الفوتونات الممتصة. إن أهم مسببات ما حصل هو آلية إعادة الاتحاد الحاصلة ضمن الخلية الشمسية، لذلك يجب أن يتم العمل على زيادة زمن بقاء أزواج الإلكترون- ثقب دون إتحاد وتقليل نسبة إعادة اتحاد الحاملات وهذا ماقد يساهم بشكل مباشر في زيادة المردود الكوموي وبالتالي التيار الكهربائي المتولد [11] [12].

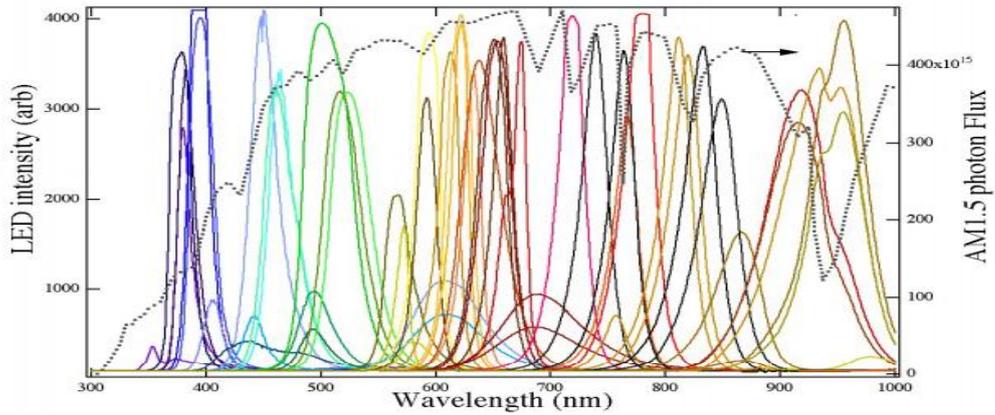
يوضح الجدول (١) القيم التجريبية والنظرية للقياسات التي تم إجراؤها:

المردود الكوموي $\eta_{QE}$	التيار الكهربائي المنتج لكل $1W$	$I_{100\%}$ ( $A / W$ )	$N_{ph}$ Photon / sec	الطول الموجي $\lambda$	اللون
72%	$0.23 \text{ A / W}$	0.32	$2 \times 10^{18}$	$400 \text{ nm}$	الأزرق
75%	$0.324 \text{ A / W}$	0.432	$2.7 \times 10^{18}$	$535 \text{ nm}$	الأخضر
79%	$0.38 \text{ A / W}$	0.48	$3 \times 10^{18}$	$600 \text{ nm}$	الأصفر
83%	$0.458 \text{ A / W}$	0.552	$3.45 \times 10^{18}$	$690 \text{ nm}$	البرتقالي
78%	$0.487 \text{ A / W}$	0.624	$3.9 \times 10^{18}$	$780 \text{ nm}$	الأحمر

ويتضح من الجدول (١) أن أعظم قيمة للمردود الكوموي كانت عند طول الموجة  $690 \text{ nm}$  حيث وصلت إلى حول 83% كما هو موضح في الشكل (٤).



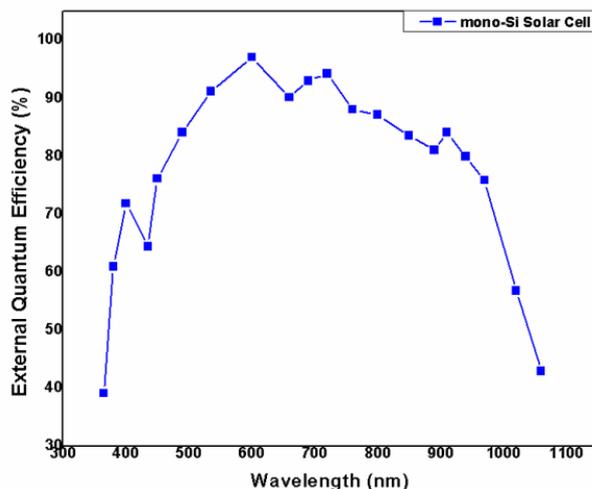
الشكل (4): المنحني البياني لتغيرات المردود الكوموي  $\eta_{QE}$  بدلالة طول الموجة  $\lambda$



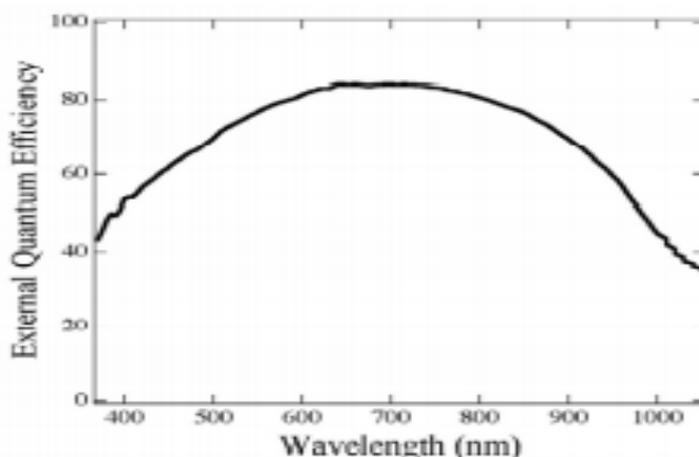
الشكل (5): كثافة التدفق الفوتوني المتوقع للإشعاع الضوئي لإنارة LED بتابعة طول الموجة [13] .

تعتبر كل قمة من القمم عن قيمة التدفق الفوتوني الخاص بكل طول موجي ، حيث تم حساب كل قمة من هذه القمم على حدى (باستخدام أجهزة قياس الشدة الضوئية لمعرفة شدة الإشعاع الضوئي وباستخدام العلاقة (1) تحسب كثافة التدفق الفوتوني) ومن ثم إجراء اسقاط لقيم المردود الكوموي (الخط المنقط) الخاصة بهذه الأطوال الموجية لخلية شمسية من السليكون أحادي التبلور .

قام Subhash وزملاءه في جامعة Mohanlal Sukhadia عام ٢٠١٤ بإجراء تجربة لقياس قيم المردود الكوموي لخلية شمسية أحادية التبلور بدلالة طول الموجة باستخدام إنارة أحادية اللون (LED) ضمن مجال (350–1100 nm) وفق منهجية عمل مختلفة عن التي قمنا بها.



الشكل (٦) النتائج التي حصل عليها Subhash للمردود الكوموي بتابعة طول الموجة ، حيث يتضح من الشكل أن أعظم قيمة للمردود



الكوموي هي عند قيمة (590 nm) [14].

الشكل (٧): تغيرات المردود الكوموي الخارجي EQE بتابعة طول الموجة باستخدام نظام (RTQE) لخلية شمسية أحادية التبلور.

ويلاحظ بعد المقارنة بين الشكلين (٥) (٧) أن أعظم قيمة للمردود الكوموي كانت في المجال

(650 → 770 nm) [15] [16].

## النتائج و التوصيات:

• بمقارنة بين الشكلين (4) و (٦) نجد أن الدراسة التي قام بها Subhash أشمل وحصل على قيم أعلى للمردود الكوموي وذلك بسبب استخدامه لخلية شمسية بمردود أعلى بالإضافة إلى أن التجهيزات المستخدمة كانت أفضل .

• عند المقارنة بين الشكلين (٤) و (٧) يظهر الفرق بين الطريقتين التقليدية التي استخدمت و بين نظام (RTQE) من ناحية التنوعية والسرعة في إجراء القياسات حيث أن الوقت الذي تطلبه إجراء القياسات بالطريقة التقليدية حوالي ٣٠ دقيقة من أجل ٥ أطوال موجية، في حين يتطلب نظام (RTQE) اقل من دقيقة لإجراء كامل القياسات والحسابات والرسم.

• بالإضافة إلى أنها لا تمتلك المرونة الكافية في التنقل بين قيم أكثر للأطوال الموجية بينما الطريقة التقليدية محصورة فقط بالأطوال الخاصة بال LED.

### المقترحات :

- نقترح استخدام نظام (RTQE) لقياس المردود الكوموي لأنه أدق وأسرع وأكثر شمولية.
- نقترح اجراء تغيرات في بنية الخلية ومن ثم إعادة دراسة المردود الكوموي بهدف تحديد المتغيرات العشوائية المؤثرة به و محاولة تحسينه ، بالإضافة لأثر درجة الحرارة في إنخفاض المردود الكوموي.

## References

- [1] Y.S. Lee, J. Heo, S.C. Siah, J.P. Mailoa, R.E. Brandt, S.B. Kim, R.G. Gordon, T. Buonassisi, *Energy Environ. Sci.* 6 (2013) 2112–2118.
- [2] R.L.Z. Hoyer, D. Muneoz-Rojas, K.P. Musselman, Y. Vaynzof, J.L. MacManus-Driscoll, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7 (2015) 10684–10694.
- [3] C.S. Solanki, B.M. Arora, J. Vasi and M.B. Patil, *Solar Photovoltaics*, Cambridge University Press India Pvt. Ltd., New Delhi (2013).
- [4] L. Castan˜er, S. Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice*, John Wiley & Sons, Chichester, 2002.
- [5] M.Z.Farah Khaleda, B.Vengadaesvaran ,N.A.Rahim , *Spectral response and quantum efficiency evaluation of solar cells* , Energy Materials , chapter 18 . 2021
- [6] Baker-Finch, Simeon C.; McIntosh, Keith R.; Yan, Di; Fong, Kean Chern; Kho, Teng C. (2014-08-13). "Near-infrared free carrier absorption in heavily doped silicon". *Journal of Applied Physics*. 116 (6): 063106. doi:10.1063/1.4893176. hdl:1885/16116. ISSN 0021-8979.
- [7] S.S. Wilson, J.P. Bosco, Y. Tolstova, D.O. Scanlon, G.W. Watson, H.A. Atwater, *Energy Environ. Sci.* 7 (2014) 3606–3610.
- [8] S. Rühle, A.Y. Anderson, H.-N. Barad, B. Kupfer, Y. Bouhadana, E. Rosh-Hodesh, A. Zaban, *J. Phys. Chem. Lett.* 3 (2012) 3755–3764.
- [9] Y. Ievskaya, R.L.Z. Hoyer, A. Sadhanala, K.P. Musselman, J.L. MacManus-Driscoll, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 135 (2015) 43–48.
- [10] "Quantum efficiency". *HiSoUR - Hi So You Are*. 2018-09-11. Retrieved 2020-08-19.

- [11] A. Rogalski, K. Adamiec and J. Rutkowski, *Narrow-Gap Semiconductor Photodiodes*, SPIE Press, 2000
- [12] R.L.Z. Hoye, S. Heffernan, Y. Ievskaya, A. Sadhanala, A.J. Flewitt, R.H. Friend, J. L. MacManus-Driscoll, K.P. Musselman, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6 (2014) 22192–22198.
- [13] Y.S. Lee, D. Chua, R.E. Brandt, S.C. Siah, J.V. Li, J.P. Mailoa, S.W. Lee, R. G. Gordon, T. Buonassisi, *Adv. Mater.* 26 (2014) 4704–4710.
- [14] Subhash Chander, A. Purohit, Anshu Nehra, S.P. Nehra, and M.S. Dhaka, *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH Subhash Chander et al.*, Vol.5, No.1, 2015
- [15] David L. Young, Brian Egaas, Scott Pinegar, and Paul Stradins. *National Renewable Energy laboratory, Golden, Colorado 80401 (USA)* (2008)
- [16] T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, *Appl. Phys. Express* 9 (2016), 052301. REN 21, “Renewables 2016 Global Status Report,” Paris, 2016.
- [2] M. D. Platzer, “U.S. Solar Photovoltaic Manufacturing: Industry Trends Global Competition, Federal Support,” USA, 2015.
- [3] S. Abermann, “Non-vacuum Processed Next Generation Thin Film Photovoltaics: Towards Marketable Efficiency and Production of CZTS Based Solar Cells,” *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 37–70, 2013.
- [4] International Renewable Energy Agency, “Solar Photovoltaics,” Abu Dhabi, UAE, 2012.
- [5] W. J. Yang, Z. Q. Ma, X. Tang, C. B. Feng, W. G. Zhao, and P. P. Shi, “Internal quantum efficiency for solar cells,” *Sol. Energy*, vol. 82, no. 2, pp. 106–110, 2008.
- [6] J. Metzdorf, “Calibration of solar cells. 1: The differential spectral responsivity method,” *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 9, pp. 1701–1708, 1987.
- [7] S. Chander, A. Purohit, A. Nehra, S. P. Nehra, and M. S. Dhaka, “A Study on Spectral Response and External Quantum Efficiency of Mono-Crystalline Silicon Solar Cell,” *Int. J. Renew. energy Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–4, 2015.
- [8] A. Ennaoui et al., “Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin film solar cells from electroplated precursors: Novel low-cost perspective,” *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 7, pp. 2511–2514, 2009.
- [9] C. Goh, S. R. Scully, and M. D. McGehee, “Effects of molecular interface modification in hybrid organic-inorganic photovoltaic cells,” *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 11, 2007.
- [10] K. Vandewal et al., “The relation between open-circuit voltage and the onset of photocurrent generation by charge-transfer absorption in polymer: Fullerene bulk heterojunction solar cells,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 18, no. 14, pp. 2064–2070, 2008.
- [11] ASTM International, *ASTM E1021-15 Standard Test Method for Spectral Responsivity Measurements of Photovoltaic*. USA, 2015, p. 11.
- [12] K. Emery, “Uncertainty Analysis of Certified Photovoltaic Measurements at the National Renewable Energy Laboratory,” Colorado, USA, 2009.
- [13] M. Machado, T. Baenas, and N. Yurrita, “Optical model for multilayer glazing systems: Experimental validation through the analytical prediction

- of encapsulation-induced variation of PV modules efficiency,” Sol. Energy, vol. 135, pp. 77–83, 2016.
- [14]Thorlabs, “FDS 1010 Si Photodiode,” 2015.
- [15] Bentham, *M300 Monochromator User Manual*, Version 2. Reading, UK: Bentham Instruments Ltd, 2015.
- [16]Bentham, *IL1 QH Light Source*. Reading, UK: Bentham Instruments Ltd.
- [17] W. Ananda, “External Quantum Efficiency (EQE) Measurement of Solar Cells,” The University of Manchester, unpublished.
- [18]ASTM International, *ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2.9.2*. USA, 2003, p. 79.
- [19]J . M . Kroon , M . M . Wienk , W . J . H . Verhees , and J . C . Hummelen ,  
“Accurate efficiency determination and stability studies of conjugated polymer/fullerene solar cells,” Thin Solid Films, vol. 403–404, pp. 223–228, 2002.
- [20] J. Burschka et al., “Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells.,” Nature, vol. 499, no. 7458, pp. 316–320, 2013.
- [21] OSI Optoelectronics, *Planar Diffused Silicon Photodiodes*. USA.
- [22]J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*. London, UK: Imperial College Press, 2003.
- [23]infinityPV, *infinityPV Solar Cells*. Lyngby, Denmark, 2016.
- [24] J. Halme, P. Vahermaa, K. Miettunen, and P. Lund, “Device physics of dye solar cells,” Adv. Mater., vol. 22, no. 35, 2010.
- [25]K. Hara and H. Arakawa, “Dye-Sensitized Solar Cells,” in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, West Sussex, England: John Wiley and Sons Ltd, 2003, pp. 663–700.
- [26]H. J. Snaith, “Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost , High-Efficiency Solar Cells,” J. Phys. Chem. Lett, vol. 4, p. 3623i3630, 2013.