Kingdom of Saudi Arabia
Imam Mohammad Ibn Saud Islamic University (IMSIU)
Faculty of Sciences – Department

حساب الحد النظري لكفاءة الخلية الشمسية عند فجوات طاقة متعددة

Calculation of Theoretical Efficiency Limit of Solar Cells at Different Bandgaps

إعداد الطالب

عبد العزيز بن عبد الله العنزي

الرقم الجامعي: ٤٣٨٠١٤٠٨٤

مشروع تخرج مقدم لقسم الفيزياء استكمالا جزئيا لمتطلبات الحصول

على درجة البكالوريوس في العلوم الفيزيائية

إشراف

د. محمود سعيد حزام

الفصل الدراسي الثاني ١٤٤٦ هـ

١. المقدمة

تعتبر الطاقة الشمسية من أبرز مصادر الطاقة المتجددة التي تحظى باهتمام متزايد على مستوى العالم، وذلك لما تتمتع به من مميزات عديدة، مثل كونها مصدرًا نظيفًا وصديقًا للبيئة. يعد استخدام الخلايا الشمسية لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية أحد التطبيقات الأكثر شيوعًا لهذه التقنية، مما يسهم في تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية مثل الوقود الأحفوري.

ولكن رغم تقدم تكنولوجيا الخلايا الشمسية، لا تزال كفاءتها في تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء تشكل تحديًا كبيرًا. تعتمد كفاءة الخلايا الشمسية على مجموعة من العوامل، بما في ذلك نوع المادة المستخدمة في تصنيع الخلية وخصائصها الكهروضوئية، درجة الحرارة، زاوية الإشعاع، وتوزيع الضوء على سطح الخلية.

وتعد خاصية طاقة الفجوة (Bandgap) إحدى الخصائص الفيزيائية الهامة التي تحكم كفاءة الخلية الشمسية. وسنقوم في هذا البحث بدراسة كفاءة الخلية الشمسية عند طاقات فجوة مختلفة.

٢. الخلفية العلمية

٢. ١ أنواع الخلايا الشمسية

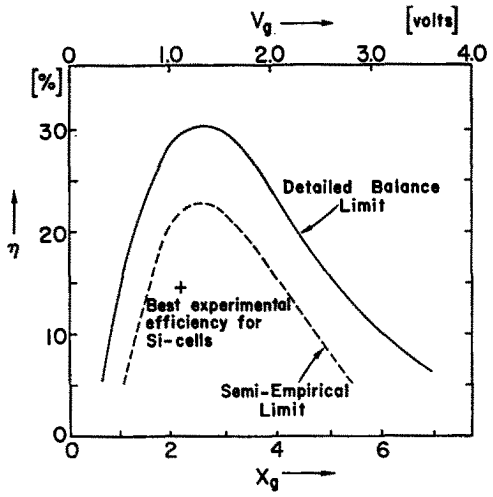
أشباه الموصلات المستخدمة في الخلايا الشمسية تشمل مواد مختلفة مثل السيليكون (Si) و زرنيخ الغاليوم (GaAs) ، ولكل منها خصائص تجعلها مناسبة لتطبيقات محددة. وفيما يلي نظرة على كل نوع:

١. خلايا السيليكون (Si): السيليكون هو أكثر المواد شيوعًا في صناعة الخلايا الشمسية، ويستخدم في أكثر من ٩٠٪ من الخلايا المنتجة عالميًا. يوجد نوعان رئيسيان من خلايا السيليكون: (١) السيليكون الأحادي البلورة (Monocrystalline Si) ويتميز بكفاءة عالية بسبب انتظام بلوراته إلا أنه مكلف نسبيًا (٢) السيليكون متعدد البلورات (Polycrystalline Si) وهو أقل تكلفة من الأحادي البلورة كما أنه أقل كفاءة نسبياً. وصلت أعلى كفاءة لخلية سيليكون أحادي الخلية إلى ٢٦,١٪ بينما وصلت الكفاءة لمتعدد البلورات إلى ٢٣,٣٪. كما يوجد نوع ثالث من خلايا السيليكون أقل انتشاراً وأقل كفاءة (١٤٪) وهو السيليكون غير المتبلور (Amorphous Si)، ويستخدم في تطبيقات الخلايا الشمسية الرقيقة (Thin-film solar cells).

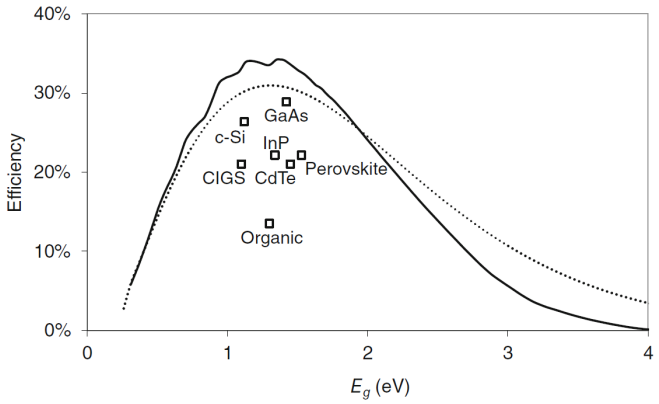
٢. خلايا زرنيخ الغاليوم (GaAs): وهي مادة شبه موصلة مركبة تتكون من الغاليوم والزرنيخ، وهي تستخدم في الخلايا الشمسية ذات الكفاءة العالية تصل إلى ٢٧,٨٪ في الخلايا المفردة، وأعلى من ذلك في الخلايا متعددة الوصلات (Multi-junction cells). وتعتبر خلايا الـ GaAs مقاومة عالية للإشعاع، مما يجعلها مثالية للاستخدام في الأقمار الصناعية والمركبات الفضائية. إلا أن تكلفة إنتاجها مرتفعة جدًا مقارنة بالسيليكون.

ورغم العمل البحثي الدؤوب خلال أكثر من ٥٠ عاماً على كلا النوعين خلايا السيليكون وخلايا GaAs، إلا أنها خلايا GaAs تتمتع بكفاءة أعلى، ويعود ذلك بالأساس إلى فجوة الطاقة الخاصة بـ GaAs (Eg = 1.42 eV) مقارنة بفجة الطاقة الخاصة بالسيليكون Si (Eg = 1.1 eV) حيث أن فجوة الطاقة لها تأثير كبير على أقصى كفاءة ممكنة للخلية.

وقد قام شوكلي وكوازييه عام ١٩٦١ بحساب منحنى أقصى كفاءة نظرية للخلية الشمسية وحيدة الوصلة، كما هو مبين في الشكل ١. يهدف هذا البحث إلى إنشاء منحنى شوكلي-كوازييه الخاص بالإشعاع الشمسي القياسي AM1.5G كما هو مبين في الشكل ٢.



الشكل ١: منحنى شوكلي-كوازييه باعتبار الشمس جسم أسود درجة حرارته ٦٠٠٠ كلفن (١)



الشكل ٢: منحنى شوكلي-كوازييه باعتبار الإشعاع الشمسي القياسي AM1.5G (٢)

يهدف هذا البحث إلى إعادة حساب المنحنى في الشكل ٢ والذي يعطي أقصى كفاءة نظرية بالنسبة لطاقة الفجوة.

٢. ٢ الإشعاع الشمسي القياسي

يمكن اعتبار الشمس على أنها جسم أسود، حيث يمكن حساب إشعاع الجسم الأسود (الإشعاع الحراري المنبعث من جسم أسود مثالي يمتص جميع الأطوال الموجية ويعيد إصدارها) وفقًا لقانون بلانك:

$$\phi_0(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

حيث λ هي الطول الموجي للفوتون، c سرعة الضوء في الفراغ، h ثابت بلانك، k ثابت بولتزمان، و T درجة حرارة الجسم الأسود (درجة حرارة الشمس حوالي ~٥٧٧٨ كلفن). وبدلالة طاقة الفوتون E يمكن كتابة طاقة الجسم الأسود كالتالي:

$$\phi_0(E) = \frac{2\pi}{c^2h^3} \frac{E^2}{\exp\left(\frac{E}{kT}\right) - 1}$$

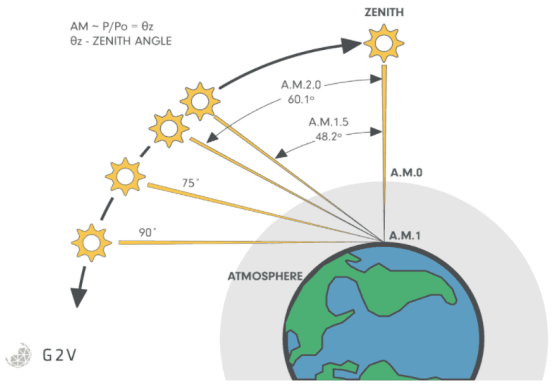
الشمس تُعتبر تقريبًا جسمًا أسود حراريًا، وتصدر إشعاعًا يتمركز عند طول موجي معين (حوالي ٥٠٠ نانومتر) بسبب درجة حرارتها العالية (~٥٧٧٨ كلفن). إلا أن الغلاف الجوي يمتص وينثر جزءًا كبيرًا من الإشعاع الشمسي، مما يؤدي إلى:

- انخفاض شدة الإشعاع: تقل الطاقة الضوئية التي تصل إلى سطح الأرض
- تغيير الطيف الشمسي: يتم امتصاص الأطوال الموجية فوق البنفسجية والأطوال الموجية البعيدة تحت الحمراء بواسطة الغازات مثل الأوزون وبخار الماء

يقلل الغلاف الجوي من كمية الإشعاع الذي يمكن تحويله إلى كهرباء، مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة الخلية. نتيجة لذلك، يقل الأداء المثالي للخلايا الشمسية مقارنة بما هو ممكن في الفضاء.

إن تأثير الغلاف الجوي على الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض كبير جداً حيث يتسبب في اختلاف الإشعاع الشمسي من موقع إلى آخر على سطح الأرض، ومن فصل إلى آخر، ومن يوم إلى آخر، كما يختلف أثناء اليوم ما بين الشروق والغروب بعكس الفضاء حيث يكون الإشعاع الشمسي ثابتاً طوال العام.

يختلف الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض حسب زاوية سقوط الشمس، وبالتالي حسب سماكة الغلاف الجوي الذي يمر ضوء الشمس من خلالها، وتسمى الكتلة الهوائية (Air Mass) كما هو مبين في الشكل ٣.



الشكل ٣: حساب الكتلة الهوائية (AM) حسب زاوية سقوط الشمس. الإشعاع القياسي AM1.5G يكون عند زاوية سقوط تساوي ٤٨,٢ ° (٣)

وكما هو مبين في الشكل ٣، يمكن حساب سمك الكتلة الهوائية (AM) من زاوية سقوط الإشعاع الشمسي θ بالعلاقة:

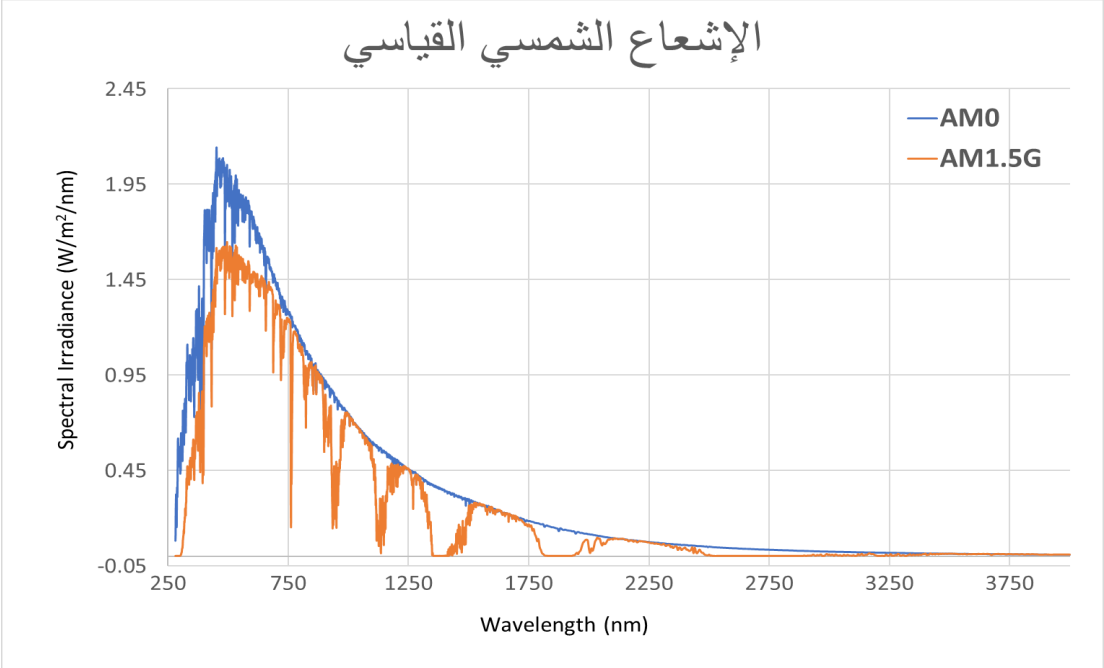
$$AM = \frac{1}{\cos\theta}$$

وكلما زادت الكتلة الهوائية، كلما قل الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض كما هو مبين في الجدول ١.

θ	$1/\cos\theta$	AM
0	1	AM1
30	1.15	AM1.15
40	1.3	AM1.3
48.2	1.5	AM1.5
50	1.56	AM1.56

الجدول ١: حساب الكتلة الهوائية (AM) لعدد من زوايا السقوط

وقد تم الاتفاق دولياً على استخدام AM1.5 كمعيار لقياس الإشعاع الشمسي، وتم الاتفاق على الإشعاع الشمسي القياسي AM1.5G والذي يستخدم في معايرة المحاكي الشمسي (solar simulator) الذي يستخدم في فحص كفاءة الخلية الشمسية. يبين الشكل ٤ الطيف الشمسي القياسي AM1.5G كما يبين أيضاً الطيف الشمسي القياسي في الفضاء (AM0) والذي لا يحتوي على نطاقات امتصاص الغلاف الجوي كما ذكرنا سابقاً.



الشكل ٤: الطيف الشمسي القياسي AM1.5G والطيف الشمسي القياسي AM0. تم أخذ البيانات من موقع المختبر الوطني الأمريكي للطاقة المتجددة (NREL) (٤)

٢. ٣ حساب كفاءة الخلية الشمسية

تنتج الخلية الشمسية تياراً كهربائياً وفرق جهد كهربائي عند تعرضها للضوء، وبالتالي يمكن توصيلها كهربائياً مع حمل كهربائي في دائرة كهربائية لبذل شغل وتشغيل الأجهزة. هناك ثلاثة أوضاع للدائرة الكهربائية الشمسية:

١. الدائرة المفتوحة (Open Circuit)

- الوصف: في هذه الحالة، تكون الدائرة غير متصلة (لا يوجد تيار كهربائي يمر عبر الدائرة.
- يتم قياس الجهد الناتج عن الخلية الشمسية في هذه الحالة ويُعرف باسم جهد الدائرة المفتوحة (Voc).
- الخصائص: التيار الكهربائي (I) = صفر.
- الجهد يكون عند أقصى قيمة ممكنة و التي تعتمد على مادة الخلية وشدة الإشعاع الضوئي.
- لا يتم استغلال الطاقة فعليًا في هذه الحالة.
- تستخدم هذه الحالة في قياس أداء الخلية الشمسية عند أقصى جهد.
- التطبيق: تُستخدم لتحديد خصائص الخلية الشمسية مثل الجهد الأقصى القابل للتوليد (Voc) والذي يساعد في حساب كفاءة الخلية الشمسية.

٢. الدائرة المغلقة (Short Circuit)

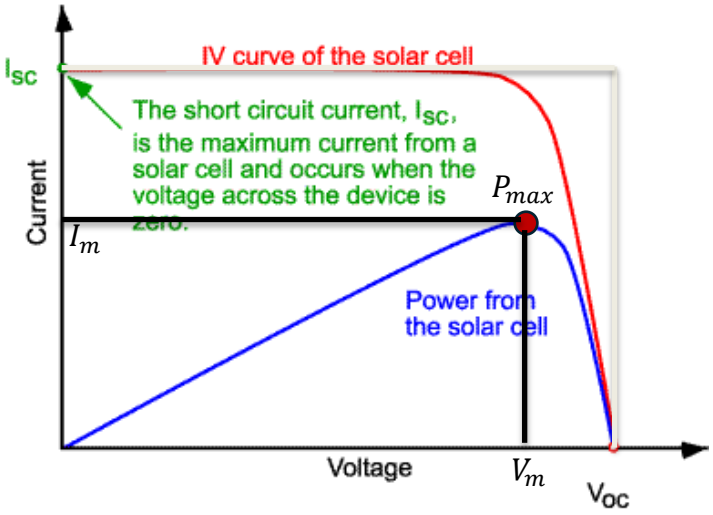
- في هذه الحالة، يتم توصيل الطرفين الموجب والسالب للخلية الشمسية مباشرةً (بدون مقاومة خارجية).
- يتم قياس التيار الناتج عن الخلية الشمسية ويُعرف باسم تيار الدائرة المغلقة (Isc).
- الخصائص: الجهد الكهربائي (V) = صفر.
- التيار يكون عند أقصى قيمة ممكنة تعتمد على مساحة الخلية وشدة الضوء.
- لا يتم استغلال الطاقة فعليًا في هذه الحالة أيضا.
- التطبيق: تُستخدم لتحديد أقصى تيار يمكن أن تولده الخلية الشمسية (Isc) والذي يساعد في حساب كفاءة الخلية الشمسية.

٣. وجود مقاومة بين الطرفين (Load Resistance)

- الوصف: في هذه الحالة، تكون الدائرة متصلة بمقاومة كهربائية خارجية أو حمل كهربائي.
- تمر الكهرباء عبر المقاومة، ويتم تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية تُستخدم لتشغيل الحمل.
- الخصائص: الجهد والتيار يعتمدان على قيمة المقاومة الخارجية.

- عند قيمة معينة للمقاومة، تعمل الخلية عند نقطة القدرة القصوى (Maximum Power Point - MPP)، حيث يتم تحقيق أقصى استفادة من الطاقة الناتجة عن الخلية، وتكون هذه القيمة القصوى عند جهد كهربائي وتيار كهربائي معين (Im،Vm)
- هذه هي الحالة العملية التي تُستخدم فيها الخلية الشمسية.
- التطبيق: تُستخدم لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام لتشغيل الأجهزة أو تخزين الطاقة.

يبين الشكل ٥ كافة حالات التوصيل أعلاه، يسمى هذا المنحنى I-V curve (منحنى الجهد-التيار).



الشكل ٥: رسم توضيحي لمنحنى الجهد-التيار للخلية الشمسية

يتم حساب كفاءة الخلية الشمسية عند النقطة (Vm, Im) وهي نقطة القدرة القصوى، ويتم حساب كفاءة الخلية الشمسية كالتالي:

$$\eta\% = \frac{P_{solar\ cell}}{P_{sun}} \times 100$$

ولحساب قدرة الخلية الشمسية:

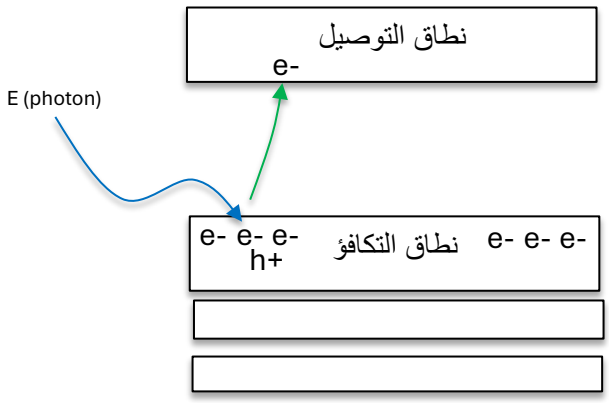
$$P_{solar\ cell} = V_m I_m = \left(\frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}\right) V_{oc} I_{sc} = FF V_{oc} I_{sc}$$

حيث يسمى FF معامل الامتلاء (Fill Facor) والذي يعطي نسبة مساحتي المستطيلين $V_m I_m$ و $V_{oc} I_{sc}$ كما هو مبين في الشكل ٥.

أما القدرة الشمسية للإشعاع الشمسي فيمكن حسابها بتكامل جميع طيف الإشعاع الشمسي في الشكل ٤ وهو 1002.63 واط/م^2، ويسمى هذا الرقم بالثابت الشمسي (Solar Constant).

٢.٤ امتصاص اشباه الموصلات للاشعاع الشمسي

في الخلية الشمسية، المادة شبه الموصلة هي التي تقوم بامتصاص الضوء (الفوتونات). ويعتمد امتصاص أشباه الموصلات للإشعاع الشمسي على فجوة الطاقة (Bandgap)، وهي الطاقة المطلوبة لنقل إلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل. في نطاق التكافؤ، الإلكترونات تكون مرتبطة بالنواة (غير حرة)، أما في نطاق التوصيل فتتحرر الإلكترونات من الارتباط بالنواة وتصبح حرة الحركة، وبالتالي يمكنها نقل تيار كهربائي. عند امتصاص فوتون ذي طاقة تساوي أو تزيد عن فجوة الطاقة، ينتقل الإلكترون إلى نطاق التوصيل، مكونًا زوجًا من إلكترون (electron) سالب وفجوة (hole) موجبة، كما هو مبين في الشكل ٦. أما الفوتونات ذات الطاقة الأقل من فجوة الطاقة فإنها تمر عبر المادة دون امتصاص. الإلكترونات والفجوات الناتجة يتم فصلها باستخدام مجال كهربائي داخلي، مما يولد تيارًا كهربائيًا.



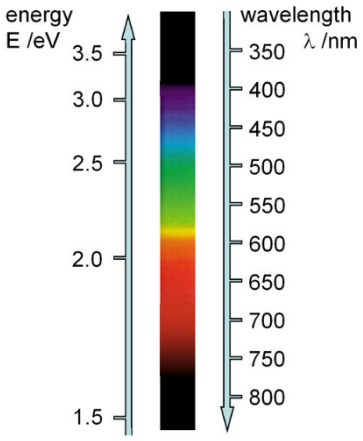
الشكل ٦: رسم توضيحي يبين طريقة امتصاص الخلية الشمسية للفوتونات الشمسية

نستخدم العلاقة التالية لحساب الطول الموجي للفوتونات من طاقتها أو العكس:

$$E_{ph} = \frac{1240}{\lambda}$$

يمكن استخدام المعادلة أعلاه مع ملاحظة أن طاقة الفوتون يجب أن تكون بوحدة eV والطول الموجي للفوتون بوحدة nm.

يبين الشكل ٧ الأطوال الموجية والطاقة لفوتونات الطيف المرئي.



الشكل ٧: رسم توضيحي للأطوال الموجية والطاقة لفوتونات الطيف المرئي

المادة شبه الموصلة	فجوة الطاقة (eV)	الأطوال الموجية التي يمكن امتصاصها (nm)
السيليكون (Si)	1.1	الأشعة فوق اللنفسجية-الطيف المرئي-الأشعة تحت الحمراء إلى ١١٠٠ نانومتر
زرنيخ الغاليوم (GaAs)	1.42	الأشعة فوق اللنفسجية-الطيف المرئي-الأشعة تحت الحمراء إلى ٨٧٣ نانومتر
تيلوريد الكادميوم (CdTe)	1.5	الأشعة فوق اللنفسجية-الطيف المرئي-الأشعة تحت الحمراء إلى ٨٢٧ نانومتر
البيروفسكايت	~1.5	الأشعة فوق اللنفسجية-الطيف المرئي-الأشعة تحت الحمراء إلى ٨٢٧ نانومتر

الجدول ٢: قيم فجوة الطاقة لعدد من أشبه الموصلات المستخدمة في الخلايا الشمسية والأطول الموجية التي يمكن امتصاصها

كما يبين الجدول ٢ قيم فجوة الطاقة لعدد من أشبه الموصلات المستخدمة في الخلايا الشمسية والأطول الموجية التي يمكن امتصاصها.

في هذا البحث، سنفترض أن شبه الموصل يمتص جميع الفوتونات التي طاقتها أعلى من طاقة الفجوة، وأن امتصاص الفوتونات هو صفر تماماً للفوتونات الأقل طاقة، وبالتالي يأخذ منحنى الامتصاص شكل دالة الخطوة (step function) كما هو مبين في الشكل ٨، رغم أنه مخبرياً لا يكون منحنى الامتصاص مثالياً بهذا الشكل كما هو مبين في الشكل ٨ أيضاً.

الامتصاص

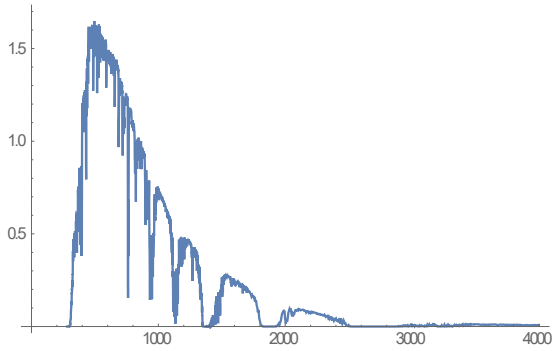
الشكل ٨: رسم توضيحي لطيف الامتصاص المثالي (باللون الأحمر) والحقيقي (باللون الأزرق) لمادة GaAs (طاقة الفجوة = ١,٤ إلكترون فولت)

٣. العمل البحثي

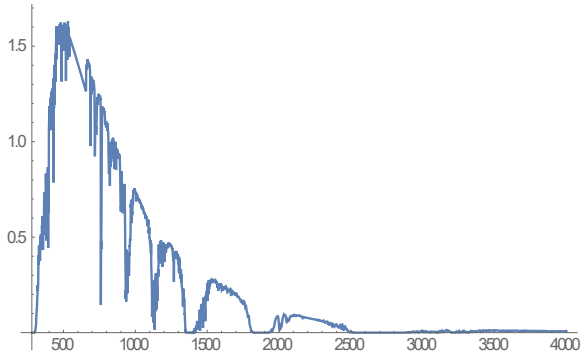
٣. ١ إنشاء دالة عدد الفوتونات الشمسية من الإشعاع الشمسي القياسي

دالة عدد الفوتونات الشمسية هي الدالة التي تعطي عدد الفوتونات الشمسية بدلالة طاقة الفوتون، وهذه الدالة أساسية في الحسابات حيث افترضنا أعلاه أن كل فوتون أعلى من طاقة الفجوة سيتم امتصاصه، وبالتالي سينتج عنه إلكترون (تيار كهربائي). ولإنشاء هذه الدالة، تم عمل الخطوات التالية باستخدام برنامج Mathematica:

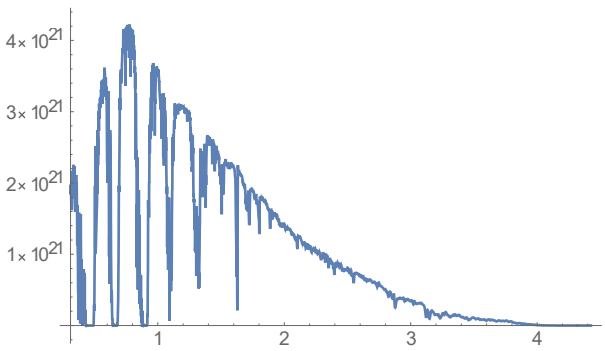
١) تحميل بيانات AM1.5G إلى البرنامج عن طريق الأمر ListPlot



٢) القيام بعملية الاستقراء الداخلي للبيانات (interpolation)



٣) إنشاء دالة لحساب عدد الفوتونات لكل طاقة فوتون n(E) لكل متر مربع لكل ثانية (electron density) بتحويل الطول الموجي إلى طاقة، وبتحويل قدرة الطيف الشمسي إلى عدد الفوتونات الصادرة.



٤) حساب الثابت الشمسي (Solar Constant) للتأكد من سلامة عملية الـ interpolation حيث أن الثابت الشمسي تم حسابه من الدالة n(E) ومقارنته بما تم حسابه من بيانات AM1.5G مباشرة حسب الجدول التالي:

الطريقة	الثابت الشمسي (جول/متر مربع/ثانية)
مباشرة من بيانات AM1.5G	1002.877
عن طريق الدالة n(E)	1002.63

نسبة الخطأ يمكن حسابها كالتالي:

$$Error\% = \frac{1002.877 - 1002.63}{1002.63} \times 100 = 0.025\%$$

مما يدل على أن عملية الاستقراء الداخلي (interpolation) لم تسبب إخلالا في الحسابات. الملحق ١ يحتوي على كافة الخطوات الحسابية.

٣. ٢ الحساب النظري لمنحنى الجهد-التيار والكفاءة لخلية شمسية واحدة تحت إشعاع شمسي قياسي

للقيام بحساب منحنى الجهد-التيار تحت إشعاع شمسي قياسي، سنقوم باستخدام برنامج Mathematica للتحليل والحساب حسب الخطوات التالية:

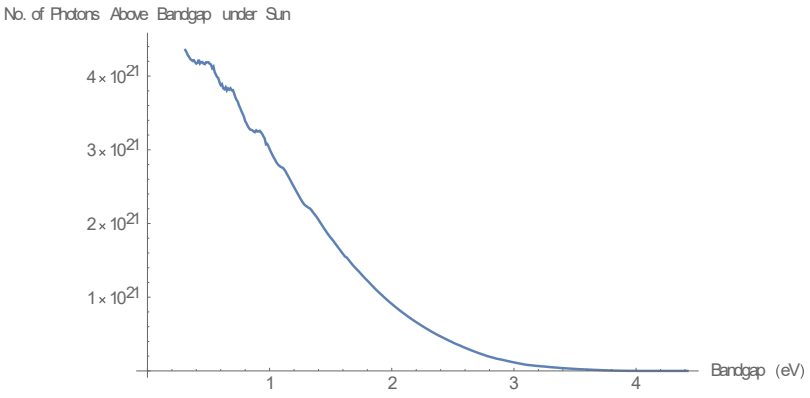
١) استخدام الدالة n(E) لإنشاء دالة أخرى تقوم بحساب عدد الفوتونات الشمسية فوق طاقة الفجوة حسب المعادلة:

$$Photons\ above\ Eg = \int_{E_g}^{E_{max}} n(E)dE$$

حيث أن E_{max} هي طاقة الفوتون ٢٨٠ nm الذي هو أقصر فوتون موجود في بيانات AM1.5G :

$$E_{max} = \frac{1240}{280} = 4.425\ eV$$

تم عمل حسابات عدد الفوتونات الشمسية فوق طاقة الفجوة باستخدام الأمر NIntegrate والذي يستخدم طريقة trapezoidal rule لعمل التكامل رقمياً.



٢) إنشاء جدول باستخدام الأمر Table والذي يحتوي على عدد الفوتونات الشمسية فوق طاقة الفجوة لكل طاقة فجوة، واستخراج الجدول باستخدام الأمر Export على صيغة csv.

٣) يلزم أن نحسب الإشعاع الكهرومغناطيسي (إشعاع الجسم الأسود) الصادر عن الخلية الشمسية نفسها حيث أن هذا سيسبب نقصاً في عدد الفوتونات التي تم امتصاصها. ولعمل هذه الحسابات، نقوم في البداية بحساب الإشعاع الشمسي الذي يمتصه الجسم الأسود من المحيط بدرجة حرارة الغرفة (T=300 K)، والذي يعطى بقانون بلانك لإشعاع الجسم الأسود:

$$\phi_0(E) = \frac{2\pi}{c^2 h^3} \frac{E^2}{exp\ exp\ \left(\frac{E}{kT}\right) - 1}$$

حيث c هو سرعة الضوء، h هو ثابت بلانك، k هو ثابت بولتزمان.

ستمتص الخلية الشمسية من المحيط في الظلام (in the dark) جميع الفوتونات التي طاقتها أعلى من Eg. أيضا، سنفرض أن معامل امتصاص الخلية الشمسية هو ١ (١٠٠٪) للفوتونات فوق طاقة الفجوة، و صفر للفوتونات أقل من طاقة الفجوة كما هو مبين في الشكل ؟؟؟؟. وبالتالي يكون عدد الفوتونات التي يمتصها شبه الموصل من المحيط (وهي نفسها التي يشعها إلى المحيط) هو:

$$G_0 = \int_{E_g}^{E_{max}} \phi_0(E) dE$$

وقد تم استخدام الأمر NIntegrate والذي يستخدم طريقة trapezoidal rule لعمل التكامل رقمياً. قمنا بعد ذلك بإنشاء جدول يحتوي على عدد الفوتونات التي يمتصها شبه الموصل من المحيط G_0 لكل طاقة فجوة.

٤) عند توصيل الخلية الشمسية، تكون الخلية تحت جهد كهربائي حتى يكون هناك أقصى قدرة Pmax للخلية الشمسية، كما ذكر في المقدمة. لكن الجهد الكهربائي الموجود عبر قطبي الخلية سوف يقوم بزيادة الإشعاع الشمسي $\phi_0(E)$ حسب المعادلة التالية:

$$\phi_V(E) = \phi_0(E) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right)$$

وهذه الزيادة يجب أخذها بالحسبان عند حساب صافي عدد الفوتونات التي تم امتصاصها من قبل الخلية الشمسية $G_V(E)$.

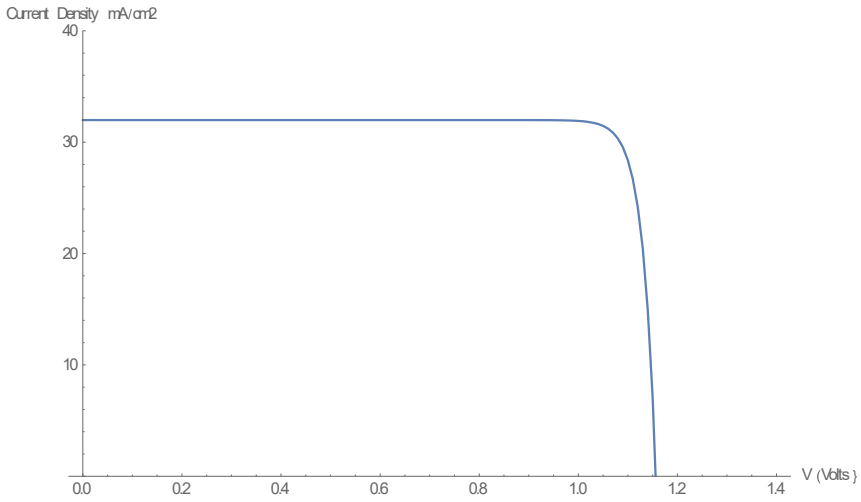
٥) لحساب التيار الكهربائي الناتج، نفترض أن كل فوتون تم امتصاصه ينتج عنه إلكترون، وبالتالي تكون لدينا العلاقة:

$$J(V) = [Photons\ above\ Eg - G_V(E)] \times e$$

يمكن من المعادلة السابقة حساب منحنى الجهد الكهربائي-كثافة التيار.

مثال: خلية GaAs

لحساب منحنى الجهد الكهربائي-كثافة التيار لمادة GaAs (Eg=1.42 eV))، وباستخدام العلاقة السابقة، يمكن رسم منحنى الجهد الكهربائي-كثافة التيار كما هو في الشكل أدناه:



لحساب أقصى كفاءة نظرية يلزم حساب أقصى قدرة ممكنة للخلية، والتي نستخدم الأمر FindMaximum لإيجاد الجهد وكثافة التيار، والتي تم حسابها لتكون:

Vm = 1.0598 V

Jm = 33.0875 mA/cm^2

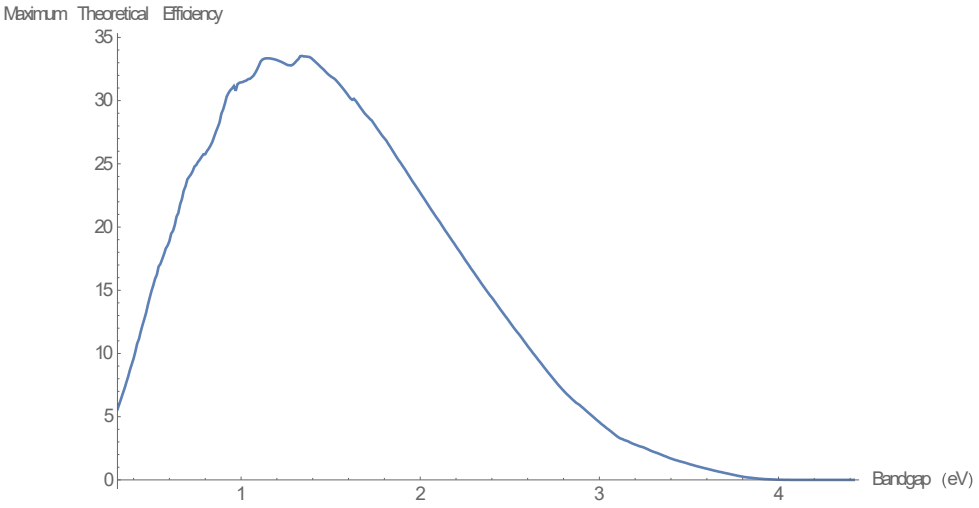
Pmax = Vm*Im = 35.07 mW/cm^2.

وحيث أن الثابت الشمسي يساوي 1002 W/m^2 = 100.2 mW/cm^2 فإن أقصى كفاءة لخلية GaAs تكون:

$$\eta\% = \frac{P_{max}}{P_{solar}} \times 100 = \frac{35.07}{100.2} \times 100 = 35\%$$

٣. ٣ الحساب النظري لكفاءة الخلية الشمسية مع طاقة الفجوة (منحنى شوكلي-كوازييه) تحت إشعاع شمسي قياسي

باستخدام برنامج Mathematica يمكن عمل نفس الحسابات التي تمت أعلاه لكل طاقة فجوة ورسمها الذي هو منحنى شوكلييه-كوازييه. بعد عمل الحسابات حصلنا على المنحنى التالي:



وكما نلاحظ، يتفق المنحنى الذي حصلنا عليه ما هو موجود في المرجع رقم ٢، وبالتالي تم تحقيق هدف المشروع بحمد لله.

٣. الخاتمة

في هذا البحث، تم عمل مسح أدبي عن الخلايا الشمسية وأهم أوضاع التشغيل وكيفية حساب الكفاءة وتأثير طاقة الفجوة على كفاءة الخلية الشمسية. بعد ذلك، تم عمل حسابات كفاءة الخلية الشمسية النظرية بإنشاء دالة حساب الفوتونات الشمسية ورسم منحنى الجهد-التيار لحساب الكفاءة لكل فجوة طاقة. تم عمل الحسابات لفجوات طاقة ما بين ٠,٣١ – ٤,٤٥ إلكترون فولت وهي طاقة الفوتونات في الإشعاع الشمسي القياسي AM1.5G. سنقوم في المستقبل بعمل حسابات كفاءة الخلية الشمسية لمناطق مختلفة من المملكة.

المراجع

1. Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, *32*(3), 510-519.

2. Markvart, T. (2022). Shockley: Queisser detailed balance limit after 60 years. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, *11*(4), e430.

3. Air Mass (AM1.5) Spectrum, G2V Company, https://g2voptics.com/solar-simulation/am1.5-spectrum/# (accessed 1 Jan 2025)

4. Reference Air Mass 1.5 Spectra, National Renewable Energy Lab, https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html (accessed 1 Jan 2025)

٥. د. أسامة أحمد العاني (رحمه الله)، الخلايا الكهروضوئية، مجلة العلوم والتقنية، العدد ٣٤، ربيع الآخر ١٤١٦ هـ، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية.