

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد بوضياف - المسيلة

ميدان: علوم المادة

فرع: فيزياء

تخصص: فيزياء تطبيقية



كلية: علوم المادة

قسم: الفيزياء

رقم:

## مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر أكاديمي

تم الاعداد من طرف:

الطالب (ة): أكرم قايد

# محاكاة خلية شمسية كهروضوئية

## ذات أساس $Cu_2ZnSnS_4$

### باستعمال برنامج SCAPS - 1D

2023/06/20 أمام اللجنة المكونة من :

أستاذ رئيسي

أستاذ مناقش

أستاذ مشرف

تمت المناقشة يوم

الأستاذة مقاق نغيسه

الأستاذة مفدي حجاب

الأستاذ مقلالي عمار

السنة الجامعية 2022/2023

---

---

# فهرس المحتويات

I	فهرس المحتويات	1
III	فهرس الاشكال	5
V	قائمة الجداول	5
VI	إهداء	5
1	المقدمة العامة	5
4	I الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية	5
5	1.1 الطاقة الشمسية	5
5	1.1.1 مقدمة	5
5	2.1.1 مصدر الطاقة الشمسية	5
5	3.1.1 الإشعاع الشمسي	5
6	4.1.1 طيف الإشعاع الشمسي	6
9	2.1 الخلايا الشمسية الكهروضوئية	9
9	1.2.1 مقدمة	9
9	2.2.1 تعريف الطاقة الكهروضوئية	9
10	3.2.1 تعريف الخلية الكهروضوئية	10
11	4.2.1 نبذة تاريخية عن الطاقة الكهروضوئية	11
12	5.2.1 مبدأ عمل الخلية الشمسية	12
13	6.2.1 مكونات الخلية الشمسية	13
16	7.2.1 الوصلة الثنائية PN	16
17	8.2.1 الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية	17
20	9.2.1 تأثير التغيرات المناخية على كفاءة الخلية الكهروضوئية	20
22	10.2.1 أنواع الخلايا الشمسية	22
23	3.1 خلاصة	23
24	II الفصل الثاني خصائص المركب الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D	24
25	1.1.1 كبريتيد القصدير والزنك النحاسي $Cu_2ZnSnS_4$	25
25	1.1.1.1 مقدمة	25
25	2.1.1.1 تعريف شبه الناقل الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$	25
26	3.2.1.1 الخصائص الهيكلية للمركب الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$	26

---

---

27	4.1.1. الخصائص البصرية للرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ .....
29	5.1.1. الخصائص الكهربائية للرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ .....
30	6.1.1. إيجابيات الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ .....
31	7.1.1. سلبيات الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ .....
32	8.1.1. خلاصة .....
33	2.11 برنامج SCAPS – 1D .....
33	2.1.1. مقدمة .....
34	2.2.1. تعريف برنامج SCAPS – 1D .....
34	3.2.1. تشغيل برنامج SCAPS - 1D .....
42	4.2.1. العيوب .....
<b>44</b>	<b>III الفصل الثالث: مناقشة نتائج المحاكاة.....</b>
45	1.111 مقدمة .....
45	2.111 هيكل الخلية المدروسة .....
46	3.111 تحديد خواص الطبقات الرقيقة المستعملة في محاكاة الخلية الشمسية من النوع CZTS .....
48	4.111 المخطط الطافي .....
49	5.111 تأثير سمك طبقة CZTS على الخواص تيار - جهد .....
50	6.111 تأثير سمك الطبقة الماصة CZTS على الخصائص الكهربائية للخلية .....
52	7.111 تأثير سمك CZTS على المردود الكونتي .....
54	8.111 تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية للخلية CZTS1 و CZTS4 .....
58	9.111 خاتمة .....
<b>59</b>	<b>خاتمة عامة .....</b>
<b>60</b>	<b>المراجع .....</b>
<b>64</b>	<b>الملخص .....</b>

# فهرس الاشكال

- الشكل (1-1) : توزيع الإشعاع الشمسي ..... 6
- الشكل (2-1) : طيف الأشعة الشمسية ..... 8
- الشكل (3-1) : خلية شمسية كهروضوئية ..... 10
- الشكل (4-1) : مكونات الخلية الشمسية الكهروضوئية ..... 11
- الشكل (5-1) : مبدأ عمل خلية كهروضوئية ..... 13
- الشكل (6-1) : تطعيم السيليكون بالذرات المانحة P للحصول على شبه ناقل من النوع N ..... 14
- الشكل (7-1) : تطعيم السيليكون بذرات البور B للحصول على مادة شبه ناقل من النوع P ..... 15
- الشكل (8-1) : الوصلة الثنائية PN ، (a) بعد الاتصال، (b) قبل الاتصال ..... 16
- الشكل (9-1) : الخاصية الكهربائية للخلية الشمسية (V)J ..... 19
- الشكل (10-1) : تغير الاستطاعة P المولدة من طرف الخلية بدلالة فرق الكمون V ..... 19
- الشكل (11-1) : تأثير الإضاءة على استطاعة الخلية ..... 21
- الشكل (12-1) : تأثير درجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية ..... 22
- الشكل (13-1) : أنواع الخلايا الشمسية ..... 22
- الشكل (1-11) : نموذج بنية CZTS حسب نموذج الألوان ثلاثي الأبعاد ..... 26
- الشكل (2-11) : واجهة برنامج المحاكاة SCAPS - 1D ..... 35
- الشكل (3-11) : واجهة إنشاء طبقات الخلية شمسية ..... 36
- الشكل (4-11) : علبة حوار تحديد قيم نقطة العمل ..... 37
- الشكل (5-11) : واجهة استخدام المنحنيات ..... 38
- الشكل (6-11) : حفظ المنحنى الباني كبيانات تقرأ فقط بالبرنامج أو الحفظ كصورة ..... 39
- الشكل (7-11) : علبة حوار تعديل وحدات قياس المنحنيات البيانية ..... 39
- الشكل (8-11) : إظهار القيم الرقمية للمنحنيات البيانية ..... 40
- الشكل (9-11) : إنشاء طبقة جديدة ..... 40
- الشكل (10-11) : واجهة البرنامج لإدارة الطبقات ..... 41

---

---

42	الشكل ( 11-III ) : علبة حوار العيوب .....
46	الشكل ( 1-III ) الهيكل التخطيطي لخلية الأغشية الرقيقة المستندة على CZTS المستخدمة في المحاكاة .....
49	الشكل ( 2-III ) مخطط عصابات الطاقة للخلية الشمسية بدلالة $x$ .....
50	الشكل ( 3-III ) منحى تغيرات كثافة التيار بدلالة الجهد لخلية شمسية من النوع CZTS من أجل قيم سمك مختلفة .....
51	الشكل ( 4-III ) تغيرات FF بدلالة سمك الطبقة الماصة .....
51	الشكل ( 5-III ) تغيرات Voc بدلالة سمك الطبقة الماصة .....
51	الشكل ( 6-III ) تغيرات Icc بدلالة سمك الطبقة الماصة .....
51	الشكل ( 7-III ) تغيرات $\eta$ بدلالة سمك الطبقة الماصة .....
53	الشكل ( 8-III ) منحى تغيرات المردود QE بدلالة طول موجة الإشعاع الضوئي لمختلف الخلايا الشمسية المدروسة .....
55	الشكل ( 9-III ) منحى تغير Icc بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS4 و CZTS1 .....
56	الشكل ( 10-III ) تغير Voc بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS4 و CZTS1 .....
57	الشكل ( 11-III ) تغير FF بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS4 و CZTS1 .....
57	الشكل ( 12-III ) تغير $\eta$ بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS4 و CZTS1 .....

---

---

---

# قائمة الجداول

- جدول (1.ii) : الخصائص الهيكلية للرباعي  $Cu_2ZnSnS_4$  ..... 27
- جدول (2.ii) : الخصائص البصرية للرباعي  $Cu_2ZnSnS_4$  ..... 28
- جدول (3.ii) : الخصائص الكهربائية للرباعي  $Cu_2ZnSnS_4$  ..... 30
- جدول (1-iii) : خواص الطبقات الرقيقة المستعملة في المحاكاة ..... 47
- جدول (2-iii) : خواص الطبقة الماصة CZTS ..... 47
- جدول (3.iii) : خواص الاتصال الأمامي والاتصال الخلفي ..... 48

---

## إهداء

أهدي مذكرة التخرج هذه لكل من أسرتي وأصدقائي وأستاذي الموقر مقلالي عاركما أتوجه بالشكر الجزيل إلى الأساتذة بجنة المناقشة، على تفضلهم بقبول مناقشة هذه المذكرة وتقديم الملاحظات والتوجيهات السديدة جازاهم الله خير كما أتقدم أيضاً بشكر وعرفان للأستاذ أبرير الميلود. أشكر جميع الذين دعوني وشجعوني طوال فترة إعداد المذكرة. أود أن أعبر عن امتناني العميق لهم على دعمهم اللامحدود وتشجيعهم المستمر. أشكرهم على وقوفهم إلى جانبي وتقديم الدعم العاطفي والمعنوي في كل مرحلة من مراحل البحث والكتابة. أنا ممتن لتفانيهم وثقتهم في قدراتي، وهذه المذكرة تعكس بشكل كبير جهودنا المشتركة وتفانينا في مجال الطاقة الشمسية. أتمنى أن يكون هذا العمل مفيداً وملهماً للأشخاص الذين يهتمون بالبحث والتطوير في مجال الطاقة المستدامة. شكراً لكم جميعاً على الدعم والتشجيع الذي لا يقدر بثمن.

---

# كلمة شكر

بسم الله الرحمن الرحيم  
السلام عليكم ورحمة الله وبركاته

أرغب في تقديم أخلص كلمات الشكر والتقدير للسيد مارك بورجمان (Marc bergman)، مطور برنامج سكايس. تفانيك وإبداعك في تطوير هذا البرنامج لها أثر كبير في تحسين تجربتنا وجعلها أكثر سهولة وفعالية. نشكرك على الجهد الكبير الذي بذلته في تحسين الأداء وتوفير الميزات الرائعة التي جعلت سكايس أداة قوية وفعالة. تفانيك في تلبية احتياجات المستخدمين والاستماع إلى ملاحظاتهم يعكس التزامك الحقيقي بتقديم تجربة استخدام متميزة.

نشن جهودك الرائعة ونتطلع إلى مستقبل مليء بالتحديثات والابتكارات التي تجعل من سكايس أداة لا غنى عنها في مجال تطوير البرمجيات.

شكراً لك، مارك بورجمان، على تفانيك وإسهامك القيم في مجال تطوير البرمجيات.

---

# المقدمة العامة

تعد الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة والتي تحظى بمكانة متميزة في العالم الحديث. إذ أنها تعتبر من المصادر الطاقوية النظيفة والمتجددة التي لا تنفذ، وبالتالي فهي تعتبر البديل الأفضل للوقود الأحفوري الذي يؤدي استخدامه إلى تلوث الهواء والتربة والمياه، وتأثيره على التغير المناخي العالمي.

حاليا لا يتم استغلال الطاقة الشمسية بشكل كامل رغم أن كمية الطاقة التي تتلقاها الأرض من الشمس يكفي لتزويد الكوكب بالطاقة دون أي مشاكل وذلك نظرا لوجود بعض العيوب في استغلال الطاقة الشمسية مثل التكلفة والتغير في المناخ وتعاقب الليل والنهار.

رغم ذلك تتواصل الأبحاث من أجل تحسين تكنولوجيا الطاقة الشمسية كي يتم استغلالها على نطاق واسع وأكثر شمولاً مع حل مختلف العيوب.

من أجل استغلال الطاقة الشمسية هناك حاجة لاستعمال الألواح الشمسية، وهذه الألواح نوعان حسب طريقة عملها.

النوع الأول هو ألواح شمسية عاكسة من أجل عكس أشعة الشمس وتركيزها في نقطة واحدة من أجل تسخين الماء وتشغيل مولدات الطاقة.

النوع الثاني يسمى بالخلايا الشمسية يقوم مبدأها على تحويل الطاقة الشمسية مباشرة إلى طاقة كهربائية.

تتكون الخلايا الشمسية من عدة مواد شبه موصلة يتم تركيبها في شكل طبقات، وهي تستخدم لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. ويمكن أن تكون الخلايا الشمسية متعددة الأشكال والأحجام وتختلف في تكنولوجيا الصنع والمواد المستخدمة فيها، وهذا يؤدي إلى تغير في كفاءتها وتكلفتها وزمن حياتها.

من أشهر المركبات المستعملة في أشباه الموصلات، السيليكون (Silicon) بسبب وفرته وتكلفته المنخفضة بالإضافة إلى (Cadmium Tellurid) الذي يستعمل في صناعة الخلايا الشمسية الرقيقة وهو أقل تكلفة من السيليكون و نحاس الإندسيوم غالسيوم السيلينيوم (CIGS) والذي يتميز بكفاءته العالية كما يوجد أيضا جاليوم الزنك والذي يستعمل بكثرة في صناعة الخلايا الشمسية عالية الكفاءة وذات تحمل عالي للحرارة.

---

---

في هذه العمل، اخترنا مركب  $Cu_2ZnSnS_4$ .

$Cu_2ZnSnS_4$  هو مركب نصف موصل يستخدم في صناعة الخلايا الكهروضوئية. يتميز هذا المركب بخواصه الفريدة التي تجعله مادة مثالية لتطبيقات الخلايا الشمسية، مثل قدرته على امتصاص الإشعاع الشمسي بشكل فعال في نطاق الطول الموجي المناسب، وقدرته على تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية بكفاءة عالية.

ويعد  $Cu_2ZnSnS_4$  من بين المركبات النصف موصلة ذات الأبعاد النانوية التي تمتاز بالاستقرار الحراري والكيميائي العالي، كما أنها تتميز بكونها غير سامة وغير قابلة للذوبان في الماء، مما يجعلها مادة آمنة للاستخدام في الخلايا الشمسية.

تمت دراسة خصائص  $Cu_2ZnSnS_4$  بشكل واسع في السنوات الأخيرة، وقد تم استخدامه في تطوير الخلايا الشمسية ذات الكفاءة العالية والتي تستخدم في توليد الطاقة الشمسية. يعتبر استخدام  $Cu_2ZnSnS_4$  في تصنيع الخلايا الشمسية بديلاً مثيراً للاهتمام للاستخدام المتعارف عليه لأشباه الموصلات التقليدية.

تم تطوير محاكاة خلية شمسية ذات أساس  $Cu_2ZnSnS_4$  باستخدام برنامج SCAPS - 1D بهدف دراسة وتحليل أداء هذه الخلية. حيث تم استخدام المحاكاة الرقمية لتحليل العوامل المؤثرة على الأداء الكهربائي للخلية الشمسية، مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة والخصائص الفيزيائية للخلية.

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتحليل أداء الخلية الشمسية  $Cu_2ZnSnS_4$  وتحليل أثر تغيرات درجة الحرارة والإشعاع الشمسي على أداء الخلية. كما سيتم تحليل مكونات الخلية وتأثيرها على كفاءة الخلية والتعرف على العوامل التي يمكن تحسينها

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو نمذجة خلية شمسية كهروضوئية ذات أساس  $Cu_2ZnSnS_4$  باستعمال برنامج SCAPS - 1D اعتماداً على الخصائص الفيزيائية لشبه الموصل.

في الفصل الأول سنتحدث عن جزئين رئيسيين. في الجزء الأول سنتناول عموميات حول الطاقة الشمسية، مصدرها واستعمالاتها وخصائص الضوء مثل الإشعاع الشمسي. الجزء الثاني يتحدث عن الخلايا الكهروضوئية بشكل عام، بنيتها خصائصها، أنواعها ومبدأ عمل الخلايا الشمسية الكهروضوئية، كما سنذكر النقاط الإيجابية التي تدفعنا لاستعمال الطاقة الشمسية.

مثل الفصل الأول، يتحدث الفصل الثاني أيضاً عن نقطتين رئيسيتين هما شبه الموصل  $Cu_2ZnSnS_4$ ، سنذكر مختلف خصائصه الهيكلية، البصرية، الكهربائية والتي دفعتنا لاختياره في هذا العمل.

---

الجزء الثاني سنشرح أساسيات برنامج SCAPS – 1D وكيفية تثبيته وتشغيله وكذا استعماله في محاكاة خلية شمسية كهروضوئية ومختلف الاعداد الضرورية لإجراء هذه المحاكاة.

في الفصل الثالث والأخير سنقوم بإجراء محاكاة عددية لخلية شمسية بغرض دراسة مدى كفاءتها بالتغير في درجة الحرارة وتغيير سمك الطبقة الماصة.

الغرض من هذه الدراسة هو تحديد درجة حرارة الوسط والسمك المناسبين للحصول على أفضل أداء من الخلية الشمسية.

---

الفصل الأول: عموميات على الطاقة

الشمسية والخلايا الكهروضوئية

### 1.1 الطاقة الشمسية

#### 1.1.1 مقدمة

هناك الكثير من أشكال الطاقة المتجددة على سطح الأرض مثل طاقة الرياح الحركية والطاقة الشمسية الحرارية حيث يتم تحويلها بطرق مختلفة إلى شكل طاقة قابلة للإستعمال البشري مثل الطاقة الكهربائية. من بين الطاقات المتجددة الطاقة الشمسية التي تعتبر من أهم أشكال الطاقة بسبب وفرتها حيث إذا تمكنا من استغلال ولو عشرة بالمئة من الطاقة المتوفرة على الأرض فسيكون بالإمكان تزويد العالم بالطاقة لعدة سنوات. في هذا الفصل، سنستعرض بعض العموميات على الطاقة الشمسية وكيفية استغلالها.

#### 2.1.1 مصدر الطاقة الشمسية

تتولد الطاقة الشمسية في نواة الشمس حيث توجد أعلى كثافة وتتجاوز درجة الحرارة 16 مليون كلفن بسبب اندماج ذرتي هيدروجين من أجل تكوين ذرة هليوم حيث ينتج عن ذلك طاقة هائلة يصل جزء منها إلى الأرض عن طريق الإشعاع الشمسي [1]

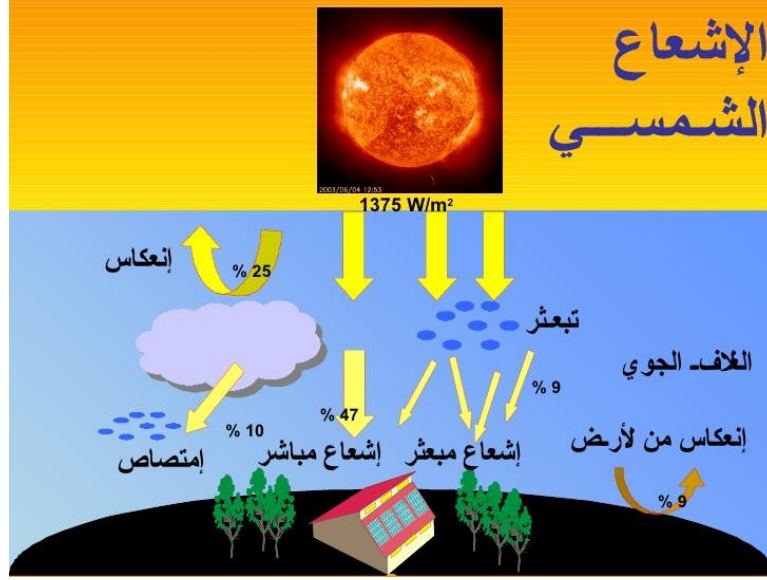
#### 3.1.1 الإشعاع الشمسي

الإشعاع الشمسي أو ضوء الشمس هو عبارة عن مجموع من الموجات الكهرومغناطيسية، يمكن لعين الإنسان رؤية مجال منها يسمى ضوء المجال المرئي أما المجال الباقي لا يرى بالعين المجردة. تتميز الأشعة المرئية من طيف الشمس بأنها تتكون من أشعة لونية من الأحمر إلى البنفسجي وهي ألوان قوس قزح. موجات الأحمر لها طول موجة يساوي 700 نانومتر وموجات البنفسجي قصيرة الموجة وطول موجتها حوالي 400 نانومتر. جزئين من طيف الشمس لا ترى بالعين المجردة: كما في الشكل (1.1) الجزء ذو موجة أطول من 700 نانومتر (تصل إلى نحو 2700 نانومتر) وهذا هو نطاق الأشعة تحت الحمراء، والجزء الآخر ذو طول موجات أقل من 400 نانومتر، وهو يسمى نطاق الأشعة فوق البنفسجية. [02]

يمكن تقسيم الأشعة الشمسية إلى أربعة أنواع وهي كالتالي:

## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

- شعاع مباشر يخترق الغلاف الجوي ويصل إلى سطح الأرض دون مشاكل ودون تشتت ويبقى على حاله دون ضياع.
- شعاع منعكس ينعكس على الأرض أو على الأجسام الموجودة على سطح الأرض.
- شعاع منتشر يتعرض للتشتت بواسطة الغلاف الجوي وقد يتسرب بعضه اعتمادا على حالة الطقس.
- الشعاع الكلي الناتج عن مجموع الأشعة المباشرة والمنعكسة والمنتشرة.



الشكل ( 1-11 ) : توزيع الإشعاع الشمسي

### 4.1.1 طيف الإشعاع الشمسي

الأشعة الشمسية تحمل طاقة وتختلف طاقتها بحسب طول موجتها، فكلما زاد طول الموجة الضوء كلما انخفضت طاقته. معنى ذلك ان الأشعة فوق البنفسجية طاقتها عالية نسبيا، ولذلك فهي ضارة لجلد جسم الإنسان إذا تعرض إليها طويلا. تسقط أشعة الشمس على الأرض بعد مرورها من خلال الغلاف الجوي. ويقوم الغلاف الجوي بامتصاص جزء منها. ويبين الشكل (2.1) أجزاء الطيف التي تصل إلى سطح الأرض (معلمة باللون البني في الشكل) حيث أن الغازات المختلفة المتواجدة في الجو من نتروجين وأكسجين وثاني أكسيد الكربون وبخار الماء وغيرها لها قدرات مختلفة على امتصاص أشعة الشمس. ضوء الشمس المباشر قد يكون مضيئا بكفاءة (Lumens 93) اشعاعا

## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

لكل واط من التدفق، وهو يضم الأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي، والأشعة فوق البنفسجية. ويبلغ متوسط القدرة للطاقة الشمسية الساقطة على المتر المربع من سطح الأرض:

$$E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$$

يسمى هذا الثابت بالثابت الشمسي (Global Solar Constant) GSC

يميز العلماء ثلاثة أنواع من الأشعة التي يتألف منها الإشعاع الشمسي والتي تشمل:

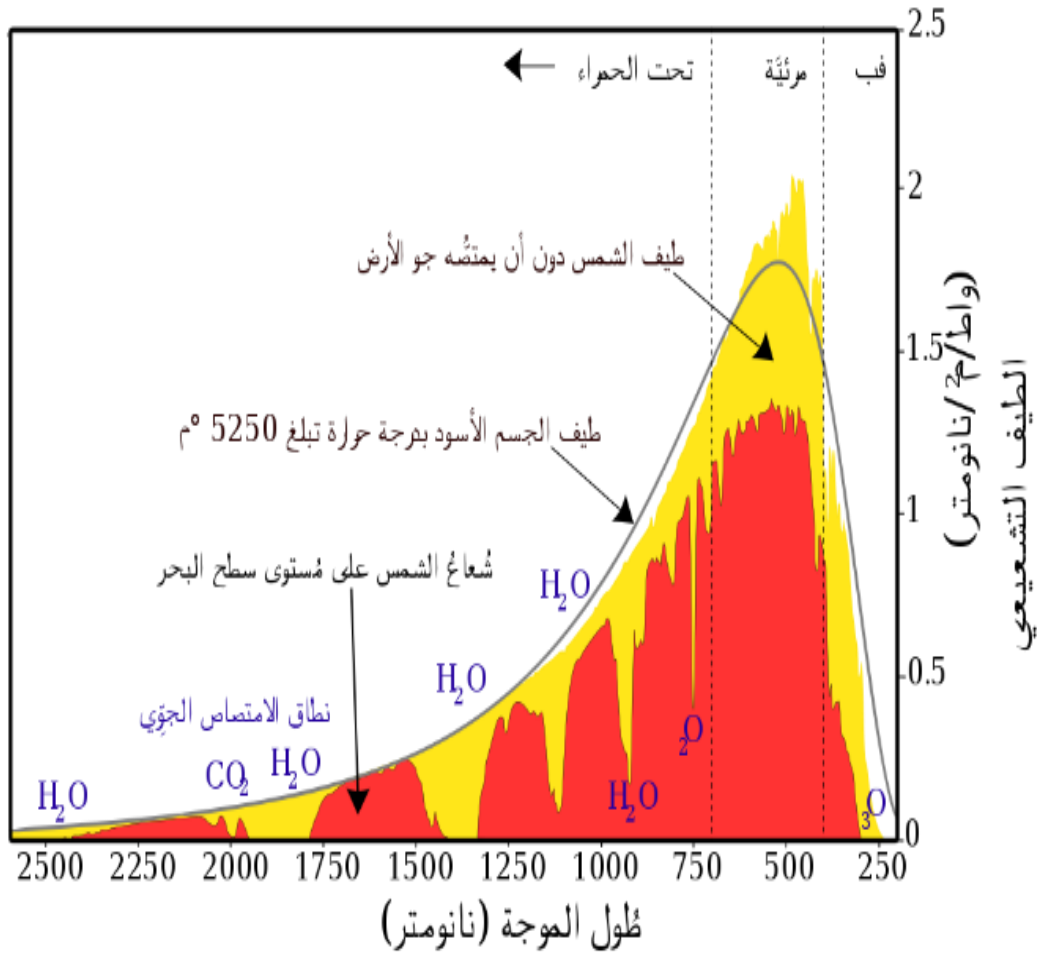
**الأشعة الحرارية** أو الأشعة تحت الحمراء وهي غير مرئية وتقدر نسبتها بنحو (50%) من جملة الإشعاع الشمسي ويتراوح طول موجاتها من (0.75-4.0) ميكرون (1/1000 من ملليمتر) وتلعب دوراً هاماً في النشاط بأسره.

**الأشعة الضوئية** المسماة مرئية وهي في الحقيقة غير مرئية، فأشعة الشمس المرئية مثلاً تخترق الفضاء الكوني من غير أن نراها، ولكنها تنير الوسط المادي الشفاف التي تنتشر فيه مثل غلافنا الجوي أو تنعكس منه مثل سطح القمر. والتشتت أو التناثر هو السر في إنارة الجو بضوء النهار مع العلم أنه يمكن تحليل الضوء بمنشور زجاجي إلى مكوناته الأساسية وتقدر نسبة الأشعة الضوئية المرئية بنحو 37% من جملة الإشعاع الشمسي، ويتراوح طول موجاتها من (0.40-0.74) ميكرون، وتزداد قوة الأشعة الضوئية على سطح الأرض في وقت الظهيرة أثناء النهار في فصل الصيف.

**الأشعة فوق البنفسجية** وتسمى أيضاً (الأشعة الحيوية) وهي غير مرئية وتقدر نسبتها بنحو (13%) من

جملة الإشعاع الشمسي ويختلف طول موجتها من (0.17-0.40) ميكرون. [03]

## طيف الأشعة الشمسية (الأرض)



الشكل ( 2-11 ) : طيف الأشعة الشمسية

### 2.1 الخلايا الشمسية الكهروضوئية

#### 1.2.1 مقدمة

تعتبر الطاقة الكهروضوئية واحدة من المصادر البديلة للطاقة التي تحظى بشعبية متزايدة في العالم، حيث تتميز بكونها طاقة نظيفة ومتجددة وغير ملوثة للبيئة. تعتمد هذه الطاقة على استخدام الخلايا الشمسية لتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية، يمكن استخدامها في تشغيل المعدات الكهربائية المنزلية والصناعية.

بفضل هذه الخلايا أصبح بالإمكان استغلال الطاقة الشمسية وتحويلها مباشرة إلى طاقة كهربائية عن طريق نقل وإنتاج مادة شبه موصلة ذات شحنات كهربائية موجبة وسالبة تحت تأثير الضوء، وتسمى الطاقة الكهربائية التي تم الحصول عليها من الطاقة الضوئية بالطاقة الكهروضوئية (Photoelectric)

تعد الطاقة الكهروضوئية من بين أهم وأكثر أنواع الطاقه المتجددة استخداماً في العالم، حيث يتم استخدامها في العديد من المجالات مثل توليد الكهرباء اللازمة لتشغيل المنازل والمباني، وتزويد المصانع والمنشآت الصناعية بالطاقة الكهربائية اللازمة للإنتاج، وحتى توليد الطاقة اللازمة لتشغيل المركبات الكهربائية. وتشكل الطاقة الكهروضوئية بمثابة الحل الأمثل لمشكلة الانبعاثات الضارة وتلوث البيئة التي تسببها المصادر التقليدية للطاقة مثل الفحم والنفط والغاز، وتعتبر خياراً جيداً لتلبية الطلب المتزايد على الكهرباء في العالم والحفاظ على الموارد الطبيعية.

#### 2.2.1 تعريف الطاقة الكهروضوئية

الطاقة الكهروضوئية هي الطاقة التي تستخرج من تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية باستخدام الخلايا الشمسية. تتكون الخلايا الشمسية من أشباه موصلات مثل السيليكون والتي تحول الإشعاع الشمسي إلى تيار كهربائي عندما يصطدم بالمواد الأشباه الموصلة في الخلايا.

تعد الطاقة الكهروضوئية من أهم وأكثر أنواع الطاقات المتجددة استخداماً في العالم، حيث تتميز بكونها طاقة نظيفة ومتجددة وصديقة للبيئة. وتتميز الطاقة الكهروضوئية بعدة مزايا، منها عدم إنتاج أي غازات ضارة أو ملوثة للبيئة، وعدم الحاجة إلى الوقود الأحفوري الذي يعد مصدراً رئيسياً لتلوث الهواء والمياه والتربة.

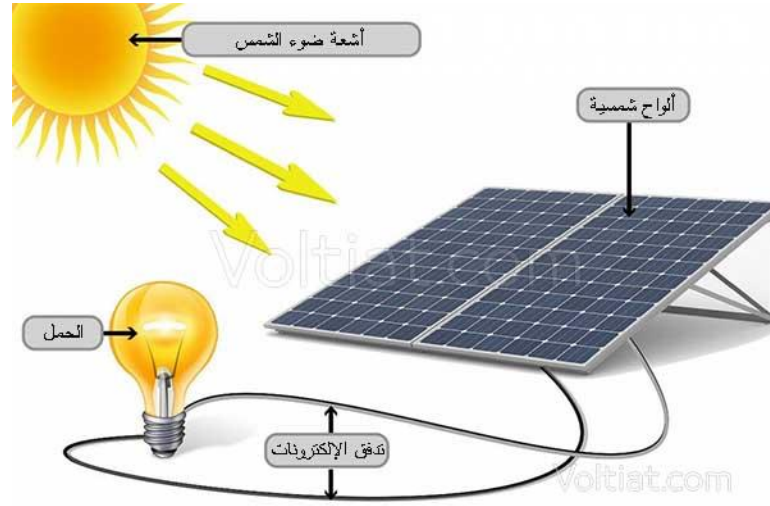
وتعتبر الطاقة الكهروضوئية خياراً رئيسياً للمناطق النائية أو التي تفتقر لشبكات الكهرباء المركزية، حيث يمكن استخدامها لتزويد المباني والمنازل بالكهرباء اللازمة. وتعتبر الطاقة الكهروضوئية أيضاً مصدراً جيداً لتشغيل الأجهزة الصغيرة مثل الحواسيب المحمولة والهواتف الذكية والمصابيح الصغيرة والأدوات الصغيرة الأخرى.

## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

ويمكن توليد الطاقة الكهروضوئية في أي مكان يتوفر فيه الإشعاع الشمسي، وتعتبر تلك العملية مستدامة ولا تنفذ من مصادرها كما هو الحال مع الوقود الأحفوري. [05]

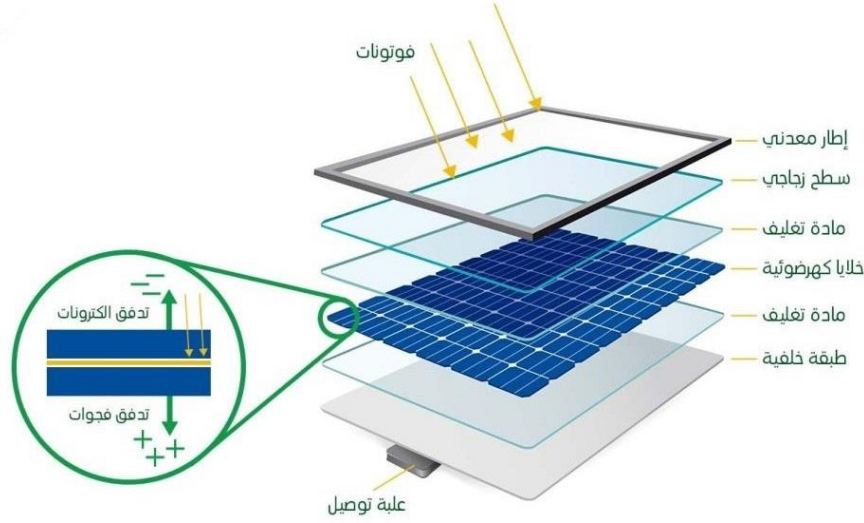
### 3.2.1 تعريف الخلية الكهروضوئية

الخلية الشمسية الكهروضوئية، والمعروفة أيضاً باسم الخلية الشمسية أو الخلية الشمسية الفعل الكهروضوئية، هي جهاز يحول الطاقة الشمسية المباشرة إلى طاقة كهربائية باستخدام تأثير الفعل الكهروضوئي. [04]



الشكل ( 3-II ) : خلية شمسية كهروضوئية

تتكون الخلية الشمسية الكهروضوئية عادة من ورقة رقيقة من المواد الشبه الموصلة، مثل السيليكون، وهي تحتوي على طبقتين رقيقتين تمتص الضوء، وتقوم بتحويله إلى شحنة كهربائية.



الشكل ( 4-11 ) : مكونات الخلية الشمسية الكهروضوئية

### 4.2.1 نبذة تاريخية عن الطاقة الكهروضوئية

1839: اكتشف الفيزيائي الفرنسي إدموند بيكريل عملية استخدام ضوء الشمس لإنتاج تيار كهربائي في مادة صلبة. هذا هو التأثير الكهروضوئي.

1875: Werner Von Siemens من أكاديمية برلين للعلوم ينشر مقالاً علمياً عن التأثير الكهروضوئي في أشباه الموصلات. لكن حتى الحرب العالمية الثانية، كانت هذه الظاهرة لا تزال تثير فضول المختبر.

1905: أكد ألبرت أينشتاين أن الضوء يمكن أن يدخل داخل الذرات، وأن الاصطدام بين الفوتونات والذرات يمكن أن يخرج الإلكترونات من مداراتها ويسمح بتكوين تيار كهربائي.

1912: ألبرت أينشتاين يشرح ظاهرة التأثير الكهروضوئي، ويحصل على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1921 لهذا التفسير.

1954: قام ثلاثة باحثين أمريكيين، تشابين وبيرسون وبرنس، بتطوير خلية كهروضوئية عالية الكفاءة في وقت تبحث فيه صناعة الفضاء الناشئة عن حلول جديدة لتشغيل أقمارها الصناعية.

1958: تم تطوير خلية بكفاءة 9%. وإرسال الأقمار الصناعية الأولى التي تعمل بالخلايا الشمسية إلى الفضاء.

## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

1973: تم بناء أول منزل يعمل بالخلايا الكهروضوئية في جامعة ديلاوير.

1983: أول سيارة تعمل بالطاقة الكهروضوئية تقطع مسافة 4000 كيلومتر في أستراليا.

1995: تم إطلاق برامج الطاقة الكهروضوئية على الأسطح المتصلة بالشبكة في اليابان وألمانيا ، وانتشرت

على نطاق واسع منذ عام 2001.

[06]

### 5.2.1 مبدأ عمل الخلية الشمسية

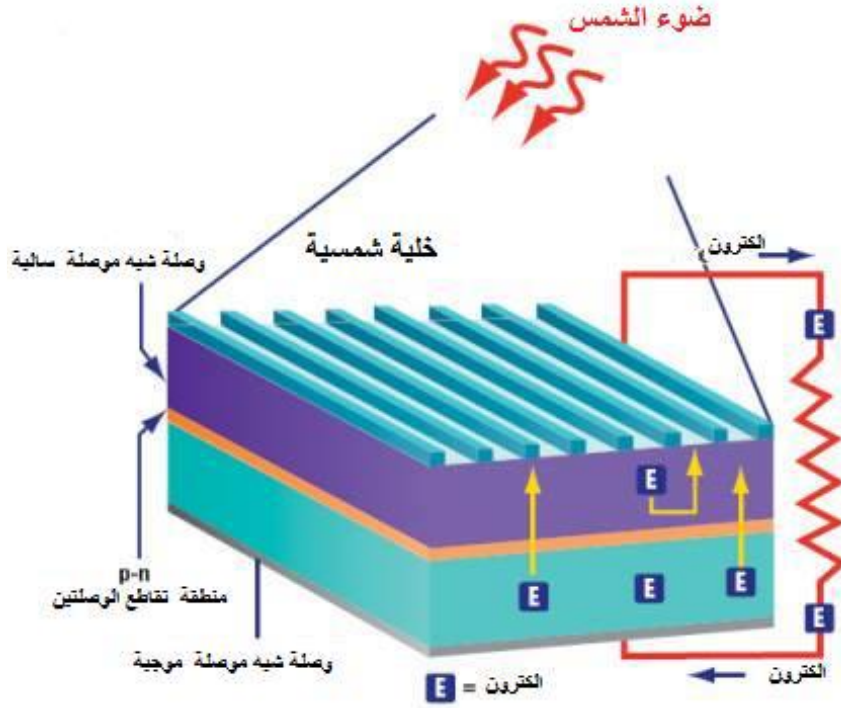
يستند مبدأ عمل الخلايا الكهروضوئية إلى تحويل الطاقة الضوئية المباشرة من الشمس إلى طاقة كهربائية باستخدام تأثير الفعل الكهروضوئي. تتكون الخلية الشمسية الكهروضوئية من طبقة رقيقة من المواد شبه الناقلة الموجودة بين طبقتين من المواد ذات الشحنة المعاكسة.

عندما تتعرض الخلية الشمسية للضوء الشمسي، يتم تحرير الإلكترونات في المادة شبه الموصلة، وتتحرك هذه الإلكترونات باتجاه الطبقة العلوية من الخلية الشمسية. تتحرك الإلكترونات المحررة من المادة شبه الموصلة إلى الطبقة العلوية بفعل التأثير الكهروستاتيكي الذي ينشأ بين الطبقتين المختلفتين في المادة شبه الموصلة.

وعندما تصل الإلكترونات إلى الطبقة العلوية، تتحرك عبر سلك خارجي وتتجه إلى الطبقة السفلى من الخلية الشمسية، وتحصل على طاقة كهربائية خلال هذا العملية. تتم إنتاج الطاقة الكهربائية بواسطة خلايا شمسية متعددة متصلة بشكل تسلسلي أو متوازي.

ويتم توصيل هذه الخلايا إلى جهاز تحويل الطاقة الكهربائية، حيث يتم تحويل التيار الكهربائي المستمر الذي يتم توليده من الخلية الشمسية إلى التيار الكهربائي المتردد الذي يتم استخدامه في الأنظمة الكهربائية المنزلية والصناعية. [07]

يوضح الشكل (5.1) المبدأ العام لعمل الخلية الشمسية الكهروضوئية



الشكل ( 5-II ) : مبدأ عمل خلية كهروضوئية

## 6.2.1 مكونات الخلية الشمسية

تتكون الخلية الشمسية الكهروضوئية من عدة طبقات أهمها [08][09]

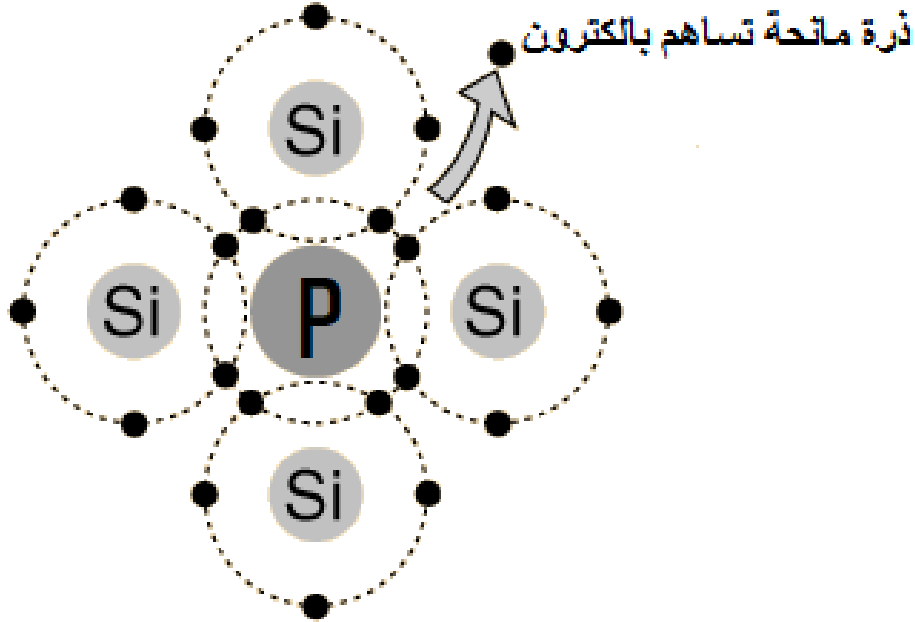
- 1 - **الخلية الشمسية الأساسية:** هي الطبقة الرئيسية للخلية الشمسية، وتتكون من شريحة واحدة من السيليكون أو غيرها من مواد أشباه النواقل.
- 2 - **طبقة التطعيم:** هي طبقة رقيقة تمثل الوصلة الثنائية بين طبقة الـ p-type والـ n-type من أشباه النواقل، وتحتوي على منطقة انتقالية يمرر من خلالها التيار الكهربائي.

### - تطعيم نوع N:

تتم إضافة ذرة الأنثيمون إلى التركيب البلوري للسيليكون النقي لتوليد الشحنة السالبة. يتم ذلك عن طريق ربط إلكترون واحد في الطبقة الإلكترونية الخارجية للذرة الأنثيمون بإلكترون واحد في طبقة الإلكترون الخارجية لأربع ذرات سيليكون المحيطة بها. هذا يترك إلكترونًا حرًا في التركيب البلوري، مما يؤدي إلى تكوين أغلبية

## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

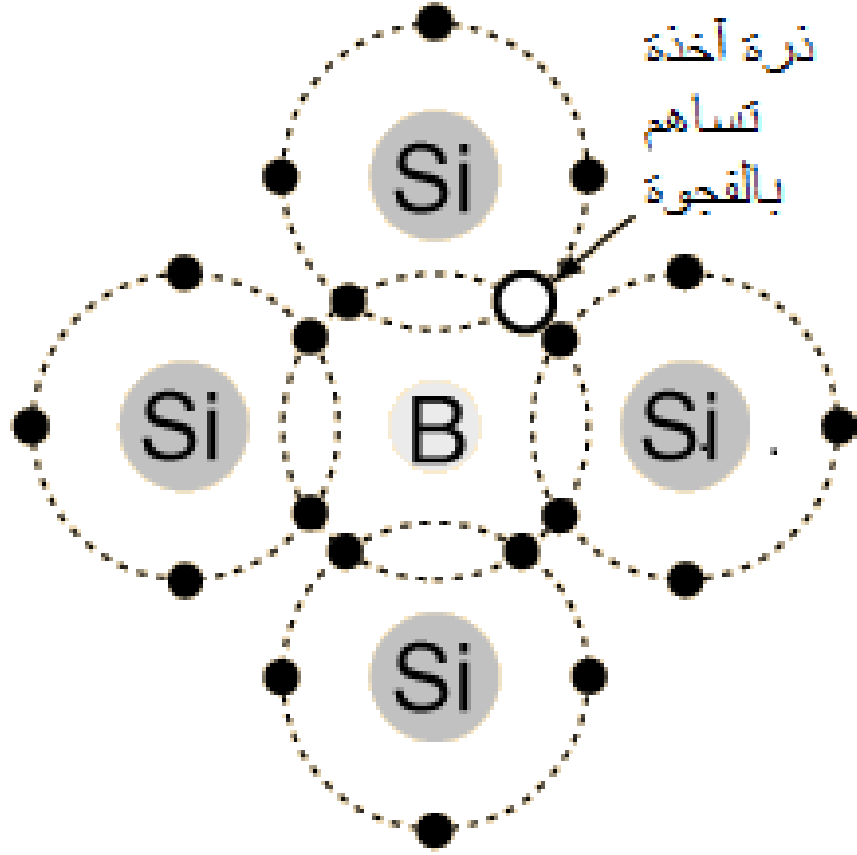
حاملات الشحنة السالبة (الإلكترونات) وأقلية حاملات الشحنة (الثقوب)، وتسمى ذرة الأنتيمون بالذرة المانحة "dN" لأنها تنتقل بإلكترون لشبكة الموصل النقي، ويطلق على هذا النوع من التطعيم "تطعيم نوع n".



الشكل ( II-6 ) : تطعيم السيليكون بالذرات المانحة p للحصول على شبه ناقل من النوع n

### - تطعيم نوع P :

لتوليد الشحنة الموجبة في شبه ناقل نقي مثل السيليكون، نضيف ذرة البور داخل التركيب البلوري. يرتبط البور الذي يحتوي على 3 إلكترون تكافؤ في الطبقة الإلكترونية الخارجية مع ثلاث إلكترونات في ذرات السيليكون، مما يؤدي إلى تكوين ثقب حر. وبالتالي، أغلبية حاملات الشحنة هي الثقوب ذات الشحنة الموجبة وحاملات الشحنات لأقلية هي الإلكترونات. المسؤولة عن عملية التوصيل الكهربائي في هذا النوع هي ذرة البور، ولذلك تسمى بالذرة الآخذة (acceptor atom). يطلق على هذا النوع من التطعيم تطعيم من نوع p.



الشكل ( 7-II ) : تطعيم السيليكون بذرات البور B للحصول على مادة شبه ناقل من النوع P

3 - طبقة الكوانتوم دوتس: هي طبقة رقيقة مكونة من نانوحبيبات صغيرة جداً من أشباه النواقل، وتستخدم لتحسين كفاءة الخلية الشمسية عن طريق زيادة مساحة سطح النظام الفعالة لالتقاط الضوء.

4 - الطبقة الشفافة الرقيقة: هي طبقة رقيقة تستخدم للحد من الانعكاس وزيادة نفاذية الضوء، وتتكون عادةً من أكسيد الزنك أو ثاني أكسيد القصدير.

5 - الطبقة الخلفية: هي طبقة توضع في الجزء الخلفي للخلية الشمسية، وتحتوي على طبقة أخرى من المواد الناقلة لجمع الإلكترونات التي تمرر خلال الخلية الشمسية.

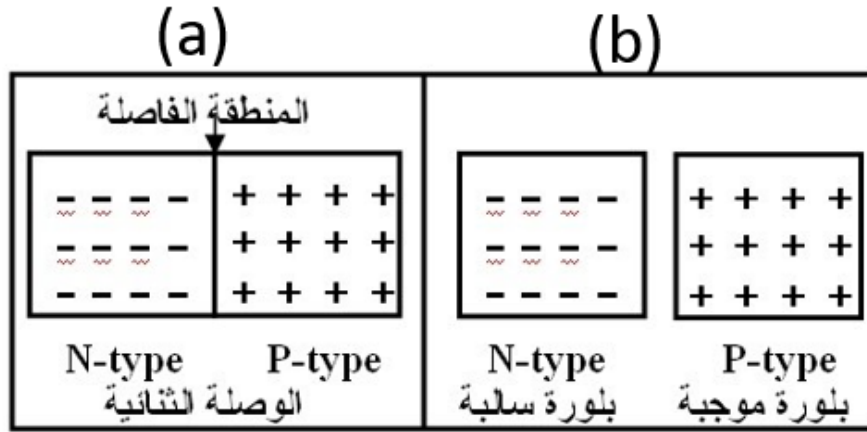
## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

5 - الخلية المركبة: هي نوع من الخلايا الشمسية التي تتكون من أكثر من طبقة من أشباه النواقل، وتستخدم لتحسين كفاءة الخلية الشمسية.

### 7.2.1 الوصلة الثنائية PN

الوصلة الثنائية PN هي مركب إلكتروني يتكون من نصفي شبه موصلات من النوع N والنوع P. تتمثل الوصلة الثنائية PN في التقاء مواد نوع N ونوع P لتشكيل واجهة بين المنطقتين. وتتكون منطقة نوع P من نوعية موصل تحتوي على ثقب مسببة للفجوات ومنطقة نوع N من نوعية موصل تحتوي على إلكترونات زائدة. ويتم تطعيم المنطقتين بالشوائب المختلفة بشكل متعمد للتحكم في تركيز الشحنات الكهربائية في المنطقة الانتقالية بين النصفين.

تعتمد خواص الوصلة الثنائية PN على تركيبها وشكلها ودرجة تطعيم النصفين وشدة المجال الكهربائي الموجود في المنطقة الانتقالية بين النصفين. وتستخدم الوصلة الثنائية PN في عدد من التطبيقات الإلكترونية مثل الخلايا الشمسية الكهروضوئية والمفاتيح الإلكترونية والمصابيح الصمامية وأجهزة الاستشعار. [26]



الشكل ( 8-II ) : الوصلة الثنائية PN ، (a) بعد الاتصال ، (b) قبل الاتصال

## 8.2.1 الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية

يمثل الشكل (1 - 9) الخاصية الكهربائية  $J(v)$  لخلية شمسية كهروضوئية وانطلاقاً من هذه الخاصية نقوم باستخراج مختلف الخواص الكهربائية للخلية والتي تتمثل في:

- تيار الدارة القصيرة
- فرق كمون الدارة المفتوحة
- الاستطاعة الأعظمية لخلية شمسية
- الاستطاعة المثالية لخلية شمسية

### 1.8.2.1 تيار الدارة القصيرة $I_{cc}$

$I_{cc}$  هو اختصار لـ "التيار القصري للدارة (Short Circuit Current) ، وهو أكبر قيمة للتيار الذي يمكن للخلية الشمسية توليده عندما يتم توصيل أطراف الخلية بدون وجود حمل كهربائي، أي في حالة قصر الدارة. يتم قياس  $I_{cc}$  بوحدة الأمبير (A) وهو يعتمد على عوامل مثل نوعية المواد المستخدمة في الخلية الشمسية ودرجة الحرارة وشدة الإضاءة. تستعمل قيمة  $I_{cc}$  لحساب الاستطاعة المثالية للخلية  $P_{idéal}$ . [10]

### 2.8.2.1 فرق كمون الدارة المفتوحة $V_{oc}$

$V_{oc}$  هو جهد الدارة المفتوحة (Open Circuit Voltage)، وهو المقدار الأقصى للجهد الذي يمكن للخلية الشمسية توليده في ظل ظروف الإضاءة الحالية عندما لا تكون هناك أي تيارات كهربائية تمر في الخلية. يتم قياس  $V_{oc}$  بوحدة الفولت (V) ويعتمد على عوامل مثل نوعية المواد المستخدمة في الخلية الشمسية ودرجة الحرارة وشدة الإضاءة. قيمة  $V_{oc}$  تستعمل كذلك لحساب الاستطاعة المثلى للخلية. [07]

ويمكن حساب قيمة  $V_{oc}$  نظرياً بالعلاقة التالية:

$$V_{oc} = \frac{K_B T}{q} \left( \frac{I_{ph}}{I_{cc}} + 1 \right) \quad (1.1)$$

حيث :

$$K_B = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J/K} \text{ حيث } K_B \text{ هو ثابت بولتزمان.}$$

## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

q : هو شحنة الالكترون وتقدر ب  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

$I_{ph}$  : هو التيار الكهربائي المتولد داخل الخلية الكهروضوئية

### 3.8.2.1 استطاعة الخلية

استطاعة الخلية هي قيمة الطاقة التي تنتجها الخلية الكهروضوئية في ظل الظروف النظامية وتقاس بالواط وتحسب كما يلي:

$$P = V \times I \quad (2.1)$$

P : استطاعة الخلية بالواط (W)

V : الجهد عبر الخلية ويقاس بالفولط (V)

I : شدة التيار المار بالخلية ويقاس بالأمبير (I)

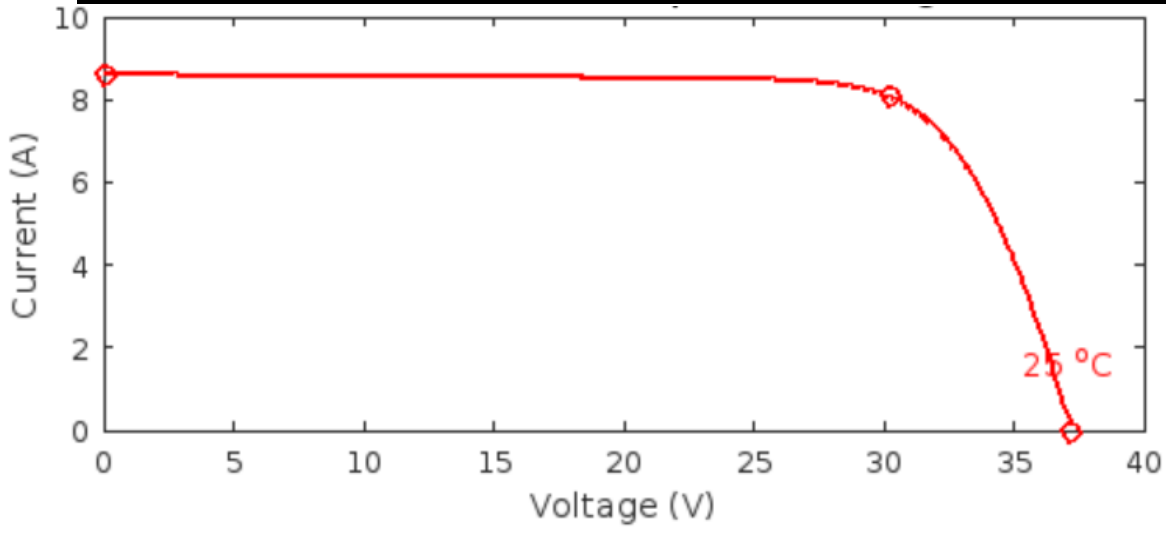
### 4.8.2.1 الاستطاعة القصوى $P_{max}$

الاستطاعة القصوى هي أقصى طاقة يمكن للخلية انتاجها عند بلوغ كل من جهد الخلية وتيار الخلية القيمة الموافقة لنقطة للطاقة الأعظمية ويحسب بالشكل:

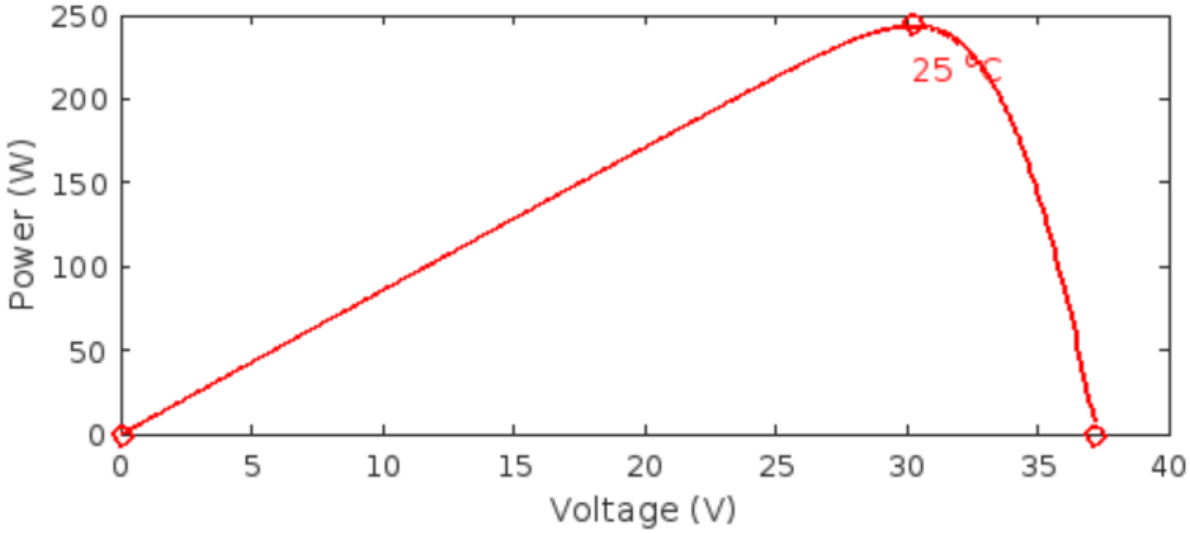
$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (3.1)$$

يتم تحديد تيار وجهد نقطة الطاقة الأعظمية بعدة طرق أشهرها خوارزمية تتبع نقطة الطاقة الأعظمية MPPT (maximum power point tracking)

الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية



الشكل ( 9-II ) : الخاصية الكهربية للخلايا الشمسية  $J(V)$



الشكل ( 10-II ) : تغير الاستطاعة P المولدة من طرف الخلايا بدلالة فرق الكمون V

### 5.8.2.1 الاستطاعة المثالية $P_{idéal}$

هي جداء جهد الدارة المفتوحة  $V_{oc}$  مع تيار الدارة المقصورة  $I_{cc}$  ويعطى وفق العلاقة:

$$P_{idéal} = V_{oc} \times I_{cc} \quad (4.1)$$

### 6.8.2.1 معامل الشكل FF

معامل الشكل هو النسبة بين المعامل بين الاستطاعة القصوى  $P_{max}$  والاستطاعة المثالية  $P_{idéal}$  وتعطى بالعلاقة التالية [07]:

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{idéal}} \quad (5.1)$$

### 7.8.2.1 مردود الخلية $\eta$

مردود الخلية أو كفاءة الخلية، هو قدرة الخلية على تحويل الطاقة وتعطى بنسبة الطاقة التي تم تحويلها  $P_{max}$  من أصل استطاعة الضوء المسلط عليها  $P_{inc}$  ويعطى بالعلاقة التالية:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (6.1)$$

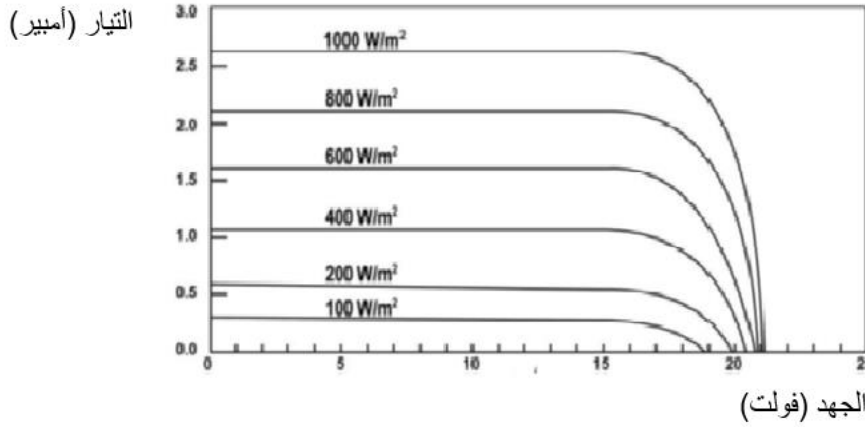
### 9.2.1 تأثير التغيرات المناخية على كفاءة الخلية الكهروضوئية

هناك عاملان مهمان يثران على أداء الخلايا الكهروضوئية وهما شدة الإضاءة ودرجة الحرارة.

---

### 1.9.2.1 تأثير شدة الإضاءة على استطاعة الخلية الكهروضوئية

تعتمد كفاءة الخلايا الشمسية الكهروضوئية على شدة الإضاءة التي تستقبلها. فعندما تتعرض الخلية الشمسية لضوء الشمس، يتم تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية ويتم توليد التيار الكهربائي. وعند زيادة شدة الإضاءة، يزيد تدفق الفوتونات على الخلايا الشمسية، مما يؤدي إلى زيادة تدفق الكهرباء. وعندما تقل شدة الإضاءة، يقل تدفق الفوتونات، وبالتالي يقل تدفق الكهرباء. يتأثر أداء الخلايا الشمسية بطول موجة الإضاءة وتردداتها. وتحدث العديد من التفاعلات الفيزيائية والكيميائية في الخلية الشمسية بترددات مختلفة. وعندما تكون طول موجة الإضاءة متساوية مع طول الموجة الأمثل لتوليد الكهرباء في الخلية الشمسية، يكون الأداء الكهربائي أفضل [11].



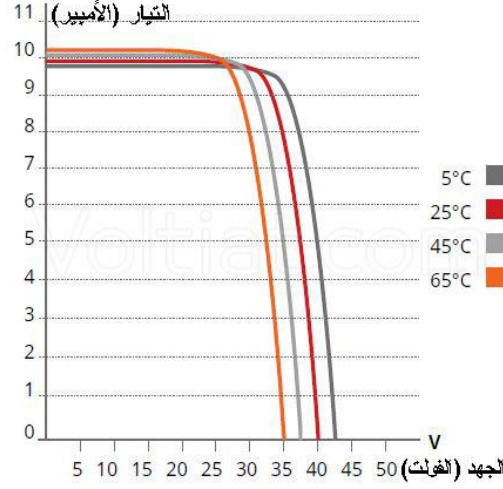
الشكل ( 11-II ) : تأثير الإضاءة على استطاعة الخلية

### 2.9.2.1 تأثير درجة الحرارة على استطاعة الخلية

تؤثر درجة الحرارة على أداء الخلايا الكهروضوئية بشكل كبير، حيث تتأثر كل من مقاومة الخلية وجهد الدائرة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) والتيار الدائرة القصيرة ( $I_{cc}$ ) وكفاءة التحويل. بشكل عام، يزيد تسارع الحرارة من توسع الإلكترونات في الخلايا، مما يزيد من مقاومة الخلية ويخفض من كفاءة التحويل. كما أن ارتفاع درجة الحرارة يقلل من جهد الدائرة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) والتيار الدائرة القصيرة ( $I_{cc}$ )، مما يقلل من قدرة الخلية الكهروضوئية على توليد

## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

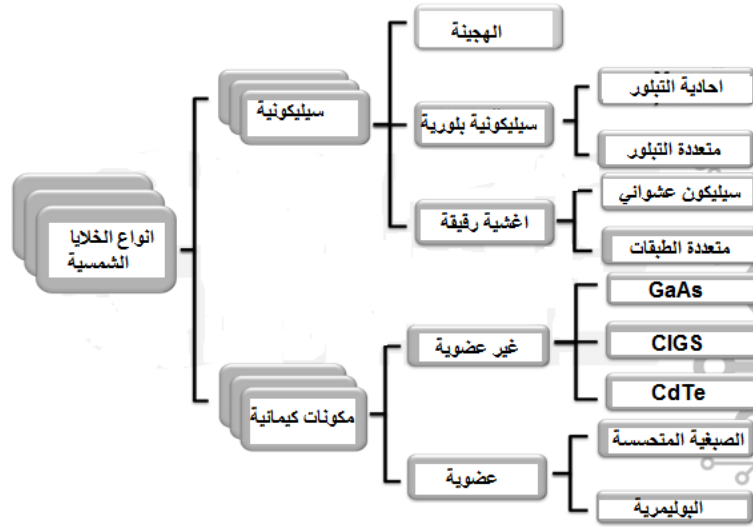
الطاقة. وبشكل عام، يمكن افتراض أن كل ارتفاع درجة حرارة بـ 1 درجة مئوية يؤدي إلى خفض كفاءة الخلية بمقدار 0.5% إلى 0.6% [12].



الشكل ( II-12 ) : تأثير درجة الحرارة على كفاءة الخلية الشمسية

### 10.2.1 أنواع الخلايا الشمسية

توجد العديد من أنواع الخلايا الشمسية الكهروضوئية، يمكن تصنيفها حسب مكونات التصنيع وكفاءتها كالتالي:



الشكل ( II-13 ) : أنواع الخلايا الشمسية

## 3.1 خلاصة

في هذا الفصل تعرفنا على الطاقة الشمسية، طبعتها وطرق استغلالها كما أخذنا لمحة خفيفة عن تاريخ الطاقة الكهروضوئية والمعرفة الأساسية حول الألواح الشمسية الكهروضوئية مثل مكوناتها وأنوعها وحتى مبدأ عملها.

---

الفصل الثاني خصائص المركب  
الرباعي  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  وبرنامج  
SCAPS – 1D

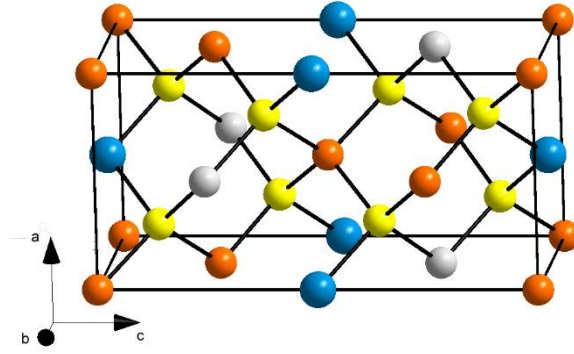
## 1.1. كبريتيد القصدير والزنك النحاسي $Cu_2ZnSnS_4$

### 1.1.1. مقدمة

ظهرت تكنولوجيا الخلايا الكهروضوئية كمصدر واعد للطاقات المتجددة في السنوات الأخيرة، ويقوم الباحثون باستمرار باستكشاف مواد وتقنيات جديدة لتحسين كفاءة وفعالية تكلفة الأجهزة الكهروضوئية. إحدى هذه المواد التي جذبت اهتمامًا كبيرًا في مجال الكهروضوئية هي كبريتيد القصدير والنحاس والزنك ( $Cu_2ZnSnS_4$  أو CZTS). CZTS عبارة عن مادة شبه موصلة رباعية لها فجوة نطاق قابلة للضبط ، ومعامل امتصاص عالي ، وخصائص كهربائية وبصرية جيدة ، مما يجعلها مرشحًا جذابًا للاستخدام في الخلايا الشمسية. تتكون المادة من عناصر وفيرة في القشرة الأرضية وغير سامة ، مما يجعلها بديلاً صديقاً للبيئة لمواد أخرى شائعة الاستخدام مثل الكاديوم تيلورايد CdTe ونحاس الإنديوم سيلينيد الغاليوم CIGS. وقد أدى ذلك إلى اهتمام كبير بالتكنولوجيا الكهروضوئية القائمة على CZTS ، حيث يعمل الباحثون على تطوير خلايا شمسية CZTS عالية الأداء يمكنها التنافس مع التقنيات الكهروضوئية الحالية. في هذا السياق يهدف هذا العمل إلى استكشاف إمكانات CZTS كمادة للتطبيقات الكهروضوئية ، ومناقشة التطورات والتحديات الأخيرة في تطوير الخلايا الشمسية القائمة على CZTS.

### 2.1.1. تعريف شبه الناقل الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$

الرباعي  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS) هي مادة شبه موصلة. يتكون من النحاس والزنك والقصدير والكبريت ويمكن أن يتواجد في بنية بلورية من النوع كسنزيت اوستانيت. اكتسبت CZTS الانتباه كمرشح محتمل للاستخدام في الخلايا الشمسية نظرًا لخصائصها البصرية والإلكترونية الفريدة. إنها مادة واعدة للخلايا الكهروضوئية ذات الأغشية الرقيقة لأنها وفيرة وغير سامة ولها معامل امتصاص عالي في المناطق المرئية والقريبة من الأشعة تحت الحمراء من الطيف الكهرومغناطيسي ( $> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ). علاوة على ذلك ، يتمتع CZTS بإمكانية تحقيق كفاءات تحويل عالية للطاقة ويمكن تصنيعها باستخدام تقنيات تصنيع منخفضة التكلفة وقابلة للتطوير [14].



الشكل ( 1-III ) : نموذج بنية CZTS حسب نموذج الألوان ثلاثي الأبعاد

نموذج الألوان ثلاثي الأبعاد هو نموذج لتمثيل الذرات على شكل كرات مع أحجام وألوان مميزة تحكمها معايير محددة.

حسب نموذج الألوان ثلاثي الأبعاد:

(S) أصفر شاحب

(Sn) أبيض فضي

(Zn) أزرق شاحب.

(Cu) أحمر برتقالي.

## 3.2.11 الخصائص الهيكلية للمركب الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$

$Cu_2ZnSnS_4$  المستعمل في التطبيقات الكهروضوئية له بنية بلورية تشبه معدن الستانيت. إنه مركب رباعي يتكون من ذرات النحاس (Cu) والزنك (Zn) والقصدير (Sn) والكبريت (S) مرتبة في نمط معين.

يمكن وصف التركيب البلوري لـ CZTS كنظام رباعي الزوايا  $\alpha = \beta = \sigma = \frac{\pi}{2}$  و  $a = b \neq c$  مع نظام

تناظر I-42m تتكون خلية وحدة CZTS من أربع وحدات صيغة ( $Cu_2ZnSnS_4$ ).

## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

في التركيب البلوري CZTS ، تشكل ذرات النحاس والزنك والقصدير شبكة رباعية السطوح ، بينما تشغل ذرات الكبريت المسافات بين رباعي الوجوه. التنسيق رباعي السطوح للكاثيونات المعدنية مسؤول عن الخصائص الإلكترونية لـ CZTS ، والتي تشمل فجوة نطاق قابلة للضبط ومعامل امتصاص عالي في المناطق المرئية والقريبة من الأشعة تحت الحمراء من الطيف الكهرومغناطيسي.

بشكل عام ، يلعب التركيب البلوري لـ CZTS دورًا مهمًا في خصائصه الإلكترونية والبصرية ، مما يجعله مادة واعدة للاستخدام في الخلايا الشمسية.

يمكن إبراز أهم القيم للخصائص الهيكلية في الجدول التالي [13]:

جدول ( 1.II ) : الخصائص الهيكلية للرباعي  $Cu_2ZnSnS_4$

الخواص	القيمة
الصيغة الكيميائية	$Cu_2ZnSnS_4$
النوع	نصف موصل من نوع P
الناقلية الحرارية	1.4 - 4.3 W/mK
ثابت العزل الكهربائي	10.2 - 14.5 $\epsilon_0$

### 4.1.1. الخصائص البصرية للرباعي $Cu_2ZnSnS_4$

يحتوي  $Cu_2ZnSnS_4$  على خصائص بصرية فريدة تجعله مرشحًا واعدًا للاستخدام في التطبيقات الكهروضوئية. تتضمن بعض الخصائص البصرية الرئيسية لـ CZTS ما يلي [15]:

- معامل الامتصاص العالي: يحتوي CZTS على معامل امتصاص عالي في المناطق المرئية والأشعة تحت الحمراء القريبة من الطيف الكهرومغناطيسي، مما يجعله ممتصًا فعالًا للإشعاع الشمسي : لأشعة فوق البنفسجية (UV) والمرئية، يتراوح معامل الامتصاص بين  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  و  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ .

## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

- للأشعة تحت الحمراء (IR)، يتراوح معامل الامتصاص بين  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  و  $10^3 \text{ cm}^{-1}$ .
- ذات فجوة الحزمة القابلة للضبط: يمكن ضبط فجوة النطاق الخاصة بـ CZTS عن طريق تعديل تكوينها. يمكن أن تتراوح فجوة النطاق الخاصة بـ CZTS من 1.0 eV فولت إلى 1.5 eV ، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في كل من الخلايا الشمسية البسيطة والخلايا الشمسية المركبة.
- الناقلية البصرية: يتمتع CZTS بناقلية بصرية جيدة في منطقة الأشعة تحت الحمراء ، وهو أمر مهم لتقليل الخسائر الحرارية في الأجهزة الكهروضوئية.
- انعكاسية منخفضة: تتمتع CZTS بانعكاسية منخفضة في المنطقة المرئية، مما يساعد على زيادة كمية الضوء التي تمتصها المادة.

بشكل عام ، تعتبر الخصائص البصرية لـ CZTS مناسبة تمامًا للاستخدام في التطبيقات الكهروضوئية ويواصل الباحثون دراسة هذه الخصائص وتحسينها لتحسين كفاءة وأداء الخلايا الشمسية القائمة على CZTS.

### جدول ( 2.II ) : الخصائص البصرية للرباعي $Cu_2ZnSnS_4$

الخواص البصرية	القيمة
معامل الامتصاص $\alpha$	$10^4 \text{ cm}^{-1}$
طاقة الفجوة $E_g$	1.0 - 1.5 eV
الناقلية البصرية	$10^{-2} - 10^{-1} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$
معامل الانعكاس R	25 - 35%
اللون	أصفر داكن
قرينة الانكسار n	2.5

## 5.1.11 الخصائص الكهربائية للرباعي $Cu_2ZnSnS_4$

$Cu_2ZnSnS_4$  له خصائص كهربائية فريدة تجعله مرشحًا واعدًا للاستخدام في التطبيقات الكهروضوئية. تتضمن بعض الخصائص الكهربائية الرئيسية لـ CZTS ما يلي [16]:

- حركية حاملات الشحنة: تتمتع CZTS بحركية عالية لحاملات الشحنة (الإلكترونات والثقوب)، والتي تشير إلى السرعة التي يم كن أن تتحرك بها حاملات الشحنة في المادة. يعد التنقل العالي لحاملات الشحنات أمرًا مهمًا لتحقيق كفاءة تحويل عالية في الأجهزة الكهروضوئية.
  - معامل التحام إلكترون - ثقب المنخفض : معامل الالتحام هو عدد الإلكترونات والثقوب المختلفة في وحدة الحجم خلال وحدة الزمن. مقارنة مع المواد الأخرى، معامل الالتحام لـ CZTS يعتبر منخفضا نسبيا وهذا ما يجعل زمن حياة حاملات الشحنة أكبر وبالتالي تحقيق كفاءة تحويل عالية للخلية الشمسية.
  - الجهد العالي للدارة مفتوحة: CZTS لديها القدرة على تحقيق جهد كهربائي مرتفع في الدارة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) بسبب طاقة الفجوة القابلة للضبط ومعامل الامتصاص العالي. يعد  $V_{oc}$  معاملا مهمًا لتحقيق كفاءة تحويل عالية في الأجهزة الكهروضوئية.
  - تركيز حاملات الشحنات: يمكن التحكم في تركيز حاملات الشحنة في CZTS عن طريق تعديل تركيبته. هذا مهم لتحسين الخواص الكهربائية للمادة وتحقيق كفاءة تحويل عالية في الأجهزة الكهروضوئية.
- بشكل عام ، تعتبر الخصائص الكهربائية لـ CZTS مناسبة تمامًا للاستخدام في التطبيقات الكهروضوئية ، ويواصل الباحثون دراسة هذه الخصائص وتحسينها لتحسين كفاءة وأداء الخلايا الشمسية القائمة على CZTS.

جدول ( 3.II ) : الخصائص الكهربائية للرباعي  $Cu_2ZnSnS_4$

الخواص	القيمة
حركية حاملات الشحنة $\mu$	$10^3 - 10^2 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
جهد الدارة المفتوحة $V_{oc}$	0.6 - 0.7 V
تركيز حاملات الشحنة	$10^{17} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
النوع	نصف موصل من النوع P
الناقلية الحرارية	1.4 - 4.3 W/mK

## 6.1.1.1 إيجابيات الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$

هناك العديد من المزايا لاستخدام كبريتيد الزنك والنحاس ( $Cu_2ZnSnS_4$ ) كمواد للتطبيقات الكهروضوئية (PV). في ما يلي ذكر بعض مزايا الرباعي CZTS [17]:

- الوفرة والاستدامة: يتكون CZTS من عناصر وفيرة وغير سامة، مما يجعله بديلاً مستداماً وصديقاً للبيئة للمواد الكهروضوئية الأخرى الشائعة الاستخدام مثل تيلوريد الكادميوم CdTe ونحاس الإنديوم غالسيوم سيلينيد  $Cu(In, Ge)Se_2$ .
- طاقة فجوة الحزمة القابلة للضبط: يمكن ضبط طاقة فجوة النطاق الخاصة بـ CZTS عن طريق تعديل تكوينها، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في كل من الخلايا الشمسية أحادية الوصلة والخلايا التقاطعية الترادفية. وهذا يسمح بمزيد من المرونة في تصميم وتحسين الأجهزة الكهروضوئية القائمة على CZTS.
- معامل الامتصاص العالي: تتمتع CZTS بمعامل امتصاص مرتفع ، مما يعني أنها تستطيع امتصاص جزء كبير من الطيف الشمسي وتحويله إلى طاقة كهربائية. وهذا يجعلها مرشحاً واعداً للاستخدام في الخلايا

## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

الشمسية ذات الأغشية الرقيقة ، والتي يمكن جعلها أرق وأخف وزناً من الخلايا الشمسية التقليدية القائمة على السيليكون.

- الخصائص الكهربائية الجيدة: تتمتع CZTS بخصائص كهربائية جيدة ، بما في ذلك حركية حاملات الشحنة ومعامل التحام منخفض ، مما يجعلها مناسبة تمامًا للاستخدام في الخلايا الشمسية عالية الكفاءة.
- الفعالية من حيث التكلفة: تتكون CZTS من مواد غير مكلفة ووفيرة ، مما يجعلها بديلاً فعالاً من حيث التكلفة للمواد الكهروضوئية الأخرى.

### 7.1.1.1. سلبيات الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$

في حين أن كبريتيد القصدير والزنك النحاسي ( $Cu_2ZnSnS_4$ ) له العديد من المزايا كمادة للتطبيقات الكهروضوئية (PV) ، هناك أيضًا بعض العيوب التي يجب معالجتها. تشمل بعض العيوب الرئيسية ما يلي [18]:

- كفاءة منخفضة: بينما أظهرت CZTS واعدة في المختبر ، إلا أن كفاءتها في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء لا تزال أقل من تلك الموجودة في المواد الكهروضوئية الأخرى مثل السيليكون ، والكادميوم تيلورايد ، ونحاس إنديوم غالسيوم سيلينيد. هذا يعني أن الخلايا الشمسية القائمة على CZTS قد تتطلب مساحة سطح أكبر و / أو استخدام مواد أعلى لتحقيق نفس الناتج مثل المواد الأخرى.
- الافتقار إلى التسويق التجاري: على الرغم من إمكاناتها ، لا تزال التكنولوجيا الكهروضوئية القائمة على CZTS في مرحلة البحث والتطوير ، والإنتاج على نطاق تجاري غير متاح بعد. قد يجعل هذا النقص في التسويق من الصعب العثور على مصنعي وموردي الخلايا الشمسية القائمة على CZTS.
- جودة المواد: يمكن أن تتأثر جودة مادة CZTS بالشوائب والعيوب ، مما قد يؤدي إلى انخفاض كفاءة الخلايا الشمسية القائمة على CZTS. هذا يعني أن مواد CZTS عالية الجودة مطلوبة للأجهزة الكهروضوئية الفعالة ، والتي قد يكون إنتاجها صعبًا ومكلفًا.
- الاستقرار والتدهور: يمكن أن تواجه الخلايا الشمسية القائمة على CZTS مشكلات الاستقرار والتدهور بمرور الوقت بسبب عوامل مثل الرطوبة والأكسجين ودرجة الحرارة. هذا يمكن أن يؤدي إلى انخفاض في كفاءة وأداء الخلية الشمسية.

## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

بشكل عام ، في حين أن CZTS لديها العديد من المزايا المحتملة كمواد للتطبيقات الكهروضوئية ، هناك أيضاً العديد من التحديات التي يجب معالجتها من أجل تحقيق إمكاناتها بالكامل. يواصل الباحثون العمل على تحسين كفاءة واستقرار وموثوقية الخلايا الشمسية القائمة على CZTS ، وستكون معالجة هذه التحديات مفتاحاً للتطوير المستقبلي للتكنولوجيا الكهروضوئية القائمة على CZTS.

### 8.1.11 خلاصة

في هذا الجزء تطرقنا إلى الرباعي  $Cu_2ZnSnS_4$  حيث قمنا بذكر أهم مكوناته وخصائصه ذات الصلة باستعماله في الخلايا الشمسية الكهروضوئية.

من أجل إكمال الدراسة لابد من إجراء محاكاة باستعمال أحد برامج الحاسوب وقد اخترنا برنامج SCAPS - 1D والذي سنتطرق إليه في الجزء الثاني.

## 2.11 برنامج SCAPS – 1D

### 2.1.11 مقدمة

تعد الخلايا الشمسية من أهم وسائل توليد الطاقة النظيفة والمتجددة، حيث تقوم بتحويل طاقة الشمس إلى طاقة كهربائية باستخدام التأثير الفولت الكهروضوئي. وتعتبر الخلايا الشمسية مكونات أساسية في مصادر الطاقة المتجددة، حيث تساعد في الحد من الاعتماد على الوقود الأحفوري الذي يتسبب في إطلاق الكثير من الانبعاثات الضارة بالبيئة. ومن أجل تطوير تقنيات الخلايا الشمسية وتحسين أدائها، يتم استخدام العديد من البرامج الحاسوبية المتخصصة، ومن بين هذه البرامج برنامج SCAPS-1D والذي يعني ( Solar Cell Analysis Program System 1 Dimension) والذي يعني برنامج تحليل أنظمة الخلية الشمسية أحادية البعد. يعد هذا البرنامج من أهم البرامج المستخدمة في تصميم ونمذجة الخلايا الشمسية، حيث يساعد على فهم وتحليل العديد من العوامل المؤثرة في أداء الخلايا الشمسية، مثل تأثير الشمس ودرجة الحرارة وشكل وخصائص المواد المستخدمة في صناعة الخلية .

وفي هذا الجزء من الفصل الثاني سنقوم بشرح كيفية استخدام برنامج SCAPS-1D في تحليل ونمذجة الخلايا الشمسية، والذي يعتبر أداة قوية لفهم أداء الخلايا الشمسية وتحسينه. وسيتم توضيح مراحل استخدام البرنامج وكيفية استخراج النتائج المرجوة، كما سيتم التطرق إلى العديد من المفاهيم والمصطلحات التي يجب فهمها لتحقيق الأداء الأمثل للخلايا الشمسية.

### 2.2.11 تعريف برنامج SCAPS – 1D

برنامج SCAPS - 1D هو برنامج حاسوبي متخصص في نمذجة وتحليل خلايا الطاقة الشمسية. وقد تم تطوير هذا البرنامج في الأصل من قبل الباحثين في جامعة Gent البلجيكية، وهو متاح للاستخدام العام ومجاني.


هدف برنامج SCAPS - 1D هو توفير أداة حاسوبية قوية ودقيقة لنمذجة وتحليل خلايا الطاقة الشمسية بطريقة مفصلة وشاملة، وذلك بتوفير نماذج فيزيائية ورياضية تستند إلى أحدث الأبحاث في مجال الخلايا الشمسية.

تتمثل وظيفة برنامج SCAPS - 1D في نمذجة أداء الخلية الشمسية وتحليلها بدقة، حيث يسمح البرنامج للمستخدمين بإنشاء نماذج لخلايا شمسية أحادية الأبعاد (1D) وتحليل أدائها. ويتميز البرنامج بدقته العالية ومرورته، حيث يتيح للمستخدمين إمكانية تعديل وتغيير العديد من المتغيرات المختلفة المتعلقة بتصميم وتكوين الخلية الشمسية وبيئتها [19].

ويمكن لبرنامج SCAPS - 1D أن يساعد المستخدمين في فهم وتحليل عدد كبير من الظواهر المختلفة المرتبطة بأداء الخلايا الشمسية، مثل كفاءة التحويل الضوئي وتوزيع درجة الحرارة داخل الخلية والتغيرات المرتبطة بالإضاءة والدرجة الحرارة والمعاملات الكهربائية والمواد المستخدمة في الخلية الشمسية.

### 3.2.11 تشغيل برنامج SCAPS- 1D

هناك العديد من الإصدارات لهذا البرنامج وفي حالتنا سنستعمل الإصدار 3.3.09. غالبا باستثناء بعض التحديثات فإن طريقة استعمال البرنامج هي نفسها وكذلك طريقة التثبيت لكن قد يتغير هذا في الإصدارات الأحدث. بعد تثبيت البرنامج بالطريقة النظامية مثل أي برنامج آخر، هناك طريقتان من أجل تشغيل البرنامج حسب الإعدادات الافتراضية أثناء التثبيت :

- الطريقة الأولى هي بالضغط مرتين على اختصار سطح المكتب  scaps3309.exe
- الطريقة الثانية في حالة عدم وجود اختصار على سطح المكتب هي بالتوجه إلى C:\Program Files\Scaps3309 (x86) ويمكن العثور على نفس الأيقونة والضغط عليها مرتين.

## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

عند تشغيل البرنامج ستظهر الواجهة (2.11) واجهة المستخدم والتي تحتوي على الإجراءات الأساسية التالية:

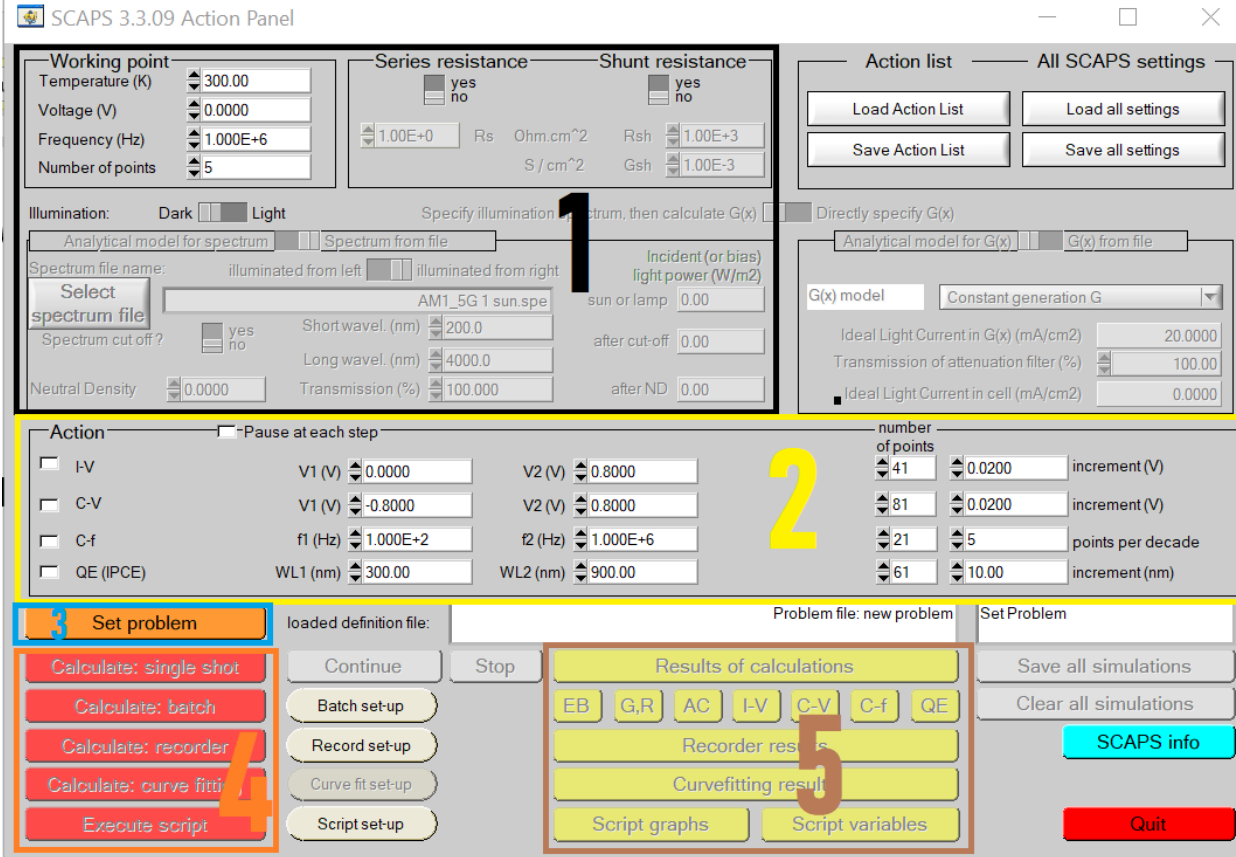
1 - تحديد المشكلة والهندسة والمواد وكافة الخصائص للخلية الشمسية المراد دراستها.

2 - تحديد الظروف التي يتم إجراء المحاكاة فيها .

3 - الإشارة إلى القياس المراد محاكاتها.

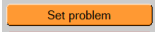
4 - بدأ العملية الحسابية.

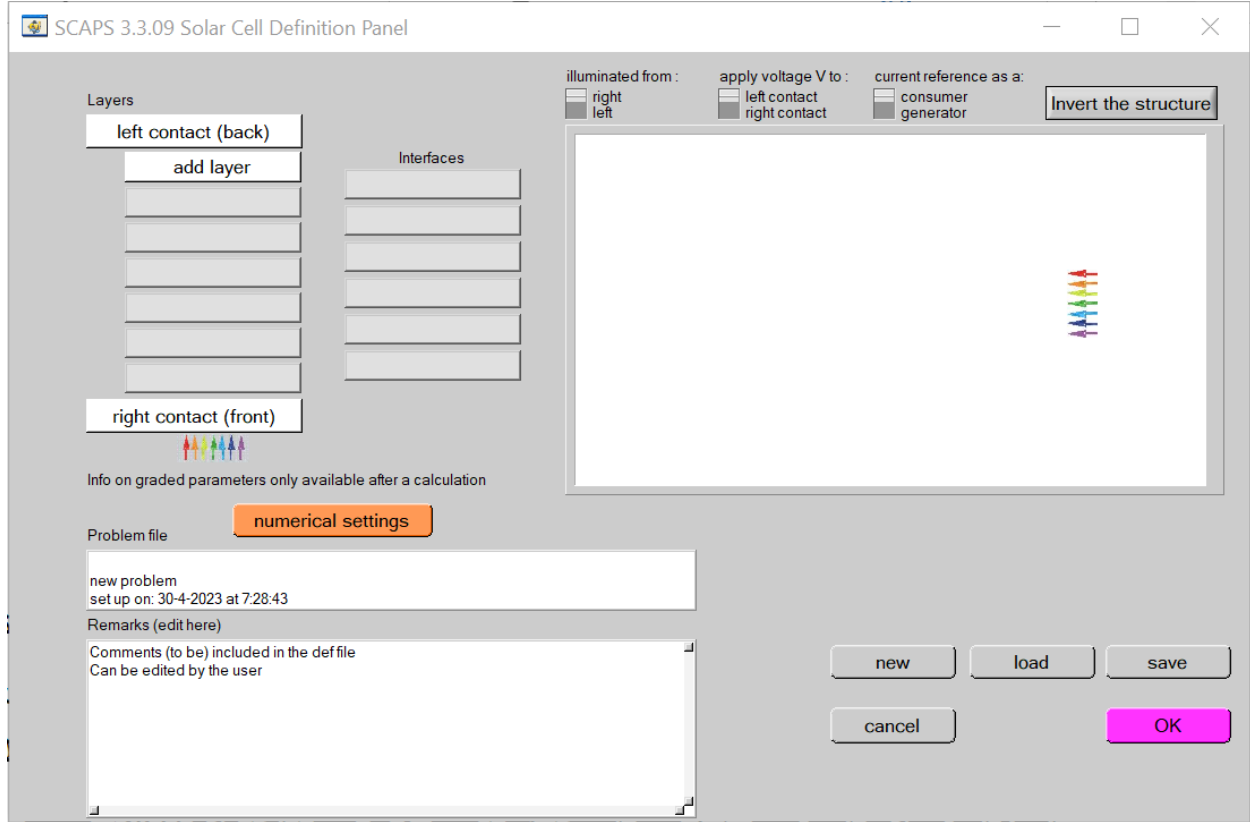
5 - عرض منحنيات المحاكاة.



الشكل (2-III) : واجهة برنامج المحاكاة SCAPS - 1D

## 1.3.2.11 حدد المشكلة

اضغط على زر تحديد مشكلة (set problem) ذو الأيقونة  كي تظهر الواجهة التالية:



الشكل ( 3-III ) : واجهة إنشاء طبقات الخلية شمسية

بعد ذلك اضغط على زر التحميل (load) في الزاوية السفلى على اليمين من أجل تحميل نموذج من النماذج الموجودة في بنك المعلومات أو يمكن استعمال الواجهة الحالية من أجل انشاء نموذج جديد حيث يجب إدراج جميع الخصائص بشكل يدوي.

في هذه النافذة، يمكننا تحديد الهياكل التي تتكون من طبقات حتى 9 طبقات. الطبقة الأولى هي طبقة الاتصال ؛ يمكن للمستخدم تحديد خصائص طبقات مختلفة يمكن SRH أشباه الموصلات المتوسطة 7 ( كحد أقصى ) لكل طبقة ، ما يصل إلى ثلاثة تحديد مراكز إعادة التركيب ( منفصلة أو موزعة في الطاقة ) ، ولكل واجهة ما يصل إلى ثلاثة مراكز إعادة تشكيل الواجهة المختلفة ( منفصلة أو موزعة في الطاقة ) . باستثناء الاتصال الأمامي والخلفي ، تحتوي كل طبقة على خصائص أشباه الموصلات التالية [02]:

## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

- سمك الطبقة بـ ( $\mu\text{m}$ )
- طاقة الفجوة بـ (eV)
- تقارب الإلكترون (الطاقة اللازمة لإضافة إلكترون) (eV)
- السماحية الكهربائية للطبقة (النسبية)
- كثافة التكافؤ الفعال للحالات ( $\text{cm}^{-2}$ )
- سرعة التحام الإلكترونات (cm/s).
- السرعة التحام الثقوب (cm/s)
- كثافة الذرات المانحة ( $N_D$ ) بـ  $\text{cm}^{-3}$
- كثافة الذرات الآخذة ( $N_A$ ) بـ  $\text{cm}^{-3}$

تحدد نقطة العمل المعلمات التي لم تتغير في محاكاة القياس والتي لها صلة بهذا القياس. هكذا:

درجة الحرارة **T** : مناسبة لجميع القياسات

**الجهد V**: يتم التخلص منه في محاكاة V-I و C-V . في SCAPS - 1D يبدأ الجهد دائما من الصفر ويستمر حتى نقطة العمل.

**التردد f**: يتم التخلص منه في محاكاة I-V/QE/C-f هو التردد الذي تتم في محاكاة C-V

**الإضاءة**: تستعمل لجميع القياسات. القيمة الافتراضية للإضاءة هي  $1000 \text{ W/m}^2$  وبالإمكان تغيير هذه القيمة كما يوجد العديد من خيارات الطيف كما يمكن تحميل المعلومات مباشرة من أجهزة القياس من أجل محاكاة أكثر دقة وخصوصية.

Action	Pause at each step		number of points	
<input type="checkbox"/> I-V	V1 (V) 0.0000	V2 (V) 0.8000	41	0.0200 increment (V)
<input type="checkbox"/> C-V	V1 (V) -0.8000	V2 (V) 0.8000	81	0.0200 increment (V)
<input type="checkbox"/> C-f	f1 (Hz) 1.000E+2	f2 (Hz) 1.000E+6	21	5 points per decade
<input type="checkbox"/> QE (IPCE)	WL1 (nm) 300.00	WL2 (nm) 900.00	61	10.00 increment (nm)

الشكل ( III-4 ) : علبه حوار تحديد قيم نقطة العمل

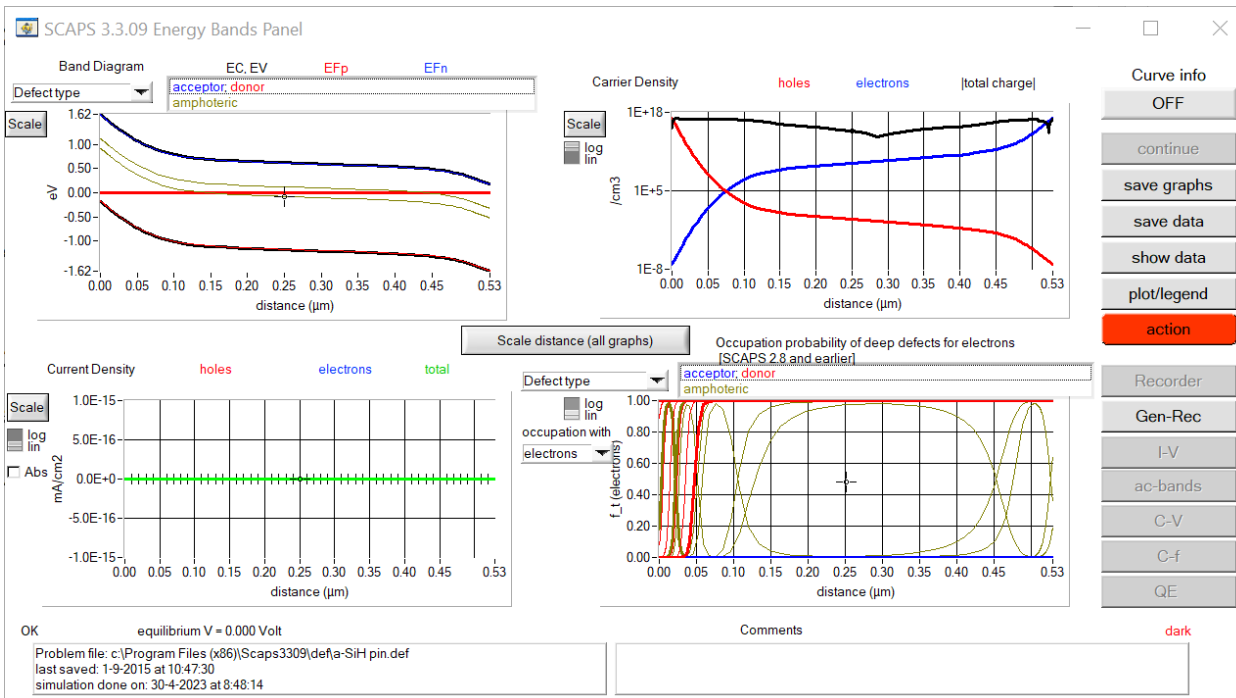
## 2.3.2.11 حدد القياس

هنا يمكن تحدد واحد أو أكثر من أنماط المحاكاة بعد تقديم البداية والنهاية وعدد الخطوات  
يمكن إجراء محاكاة واحدة في كل مرة.

Calculate: single shot

## 3.3.2.11 ابدأ الحساب

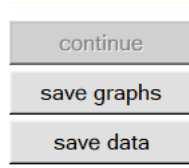
عند الضغط على الزر، تظهر واجهة Energy Bands وتبدأ عمليات الحساب.  
في حالة حصول أي نوع من الأخطاء فستظهر نافذة خطأ وعند الانتهاء من الحسابات:



الشكل ( 5-III ) : واجهة استخدام المنحنيات

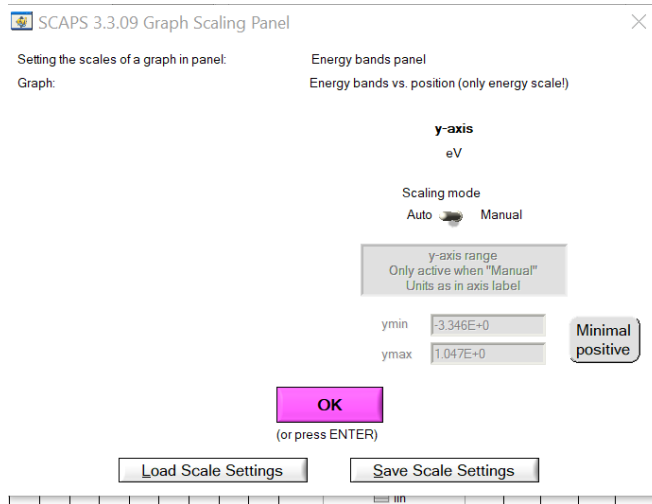
## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

في هذه الواجهة يمكن القيام بالعديد من العمليات مثل إجراء بعض التعديلات وملاحظة التغييرات، استخراج المنحنيات البيانية وحفظها من خلال قائمة الحفظ:



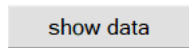
الشكل ( III-6 ) : حفظ المنحنى البياني كبيانات تقرأ فقط بالبرنامج أو الحفظ كصورة

كما يمكن تغيير وحدات المنحنيات البيانية وإضافة العديد من الخصائص لها:



الشكل ( III-7 ) : علبة حوار تعديل وحدات قياس المنحنيات البيانية

كما يمكن إظهار جميع القيم الرقمية للمنحنيات:



## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

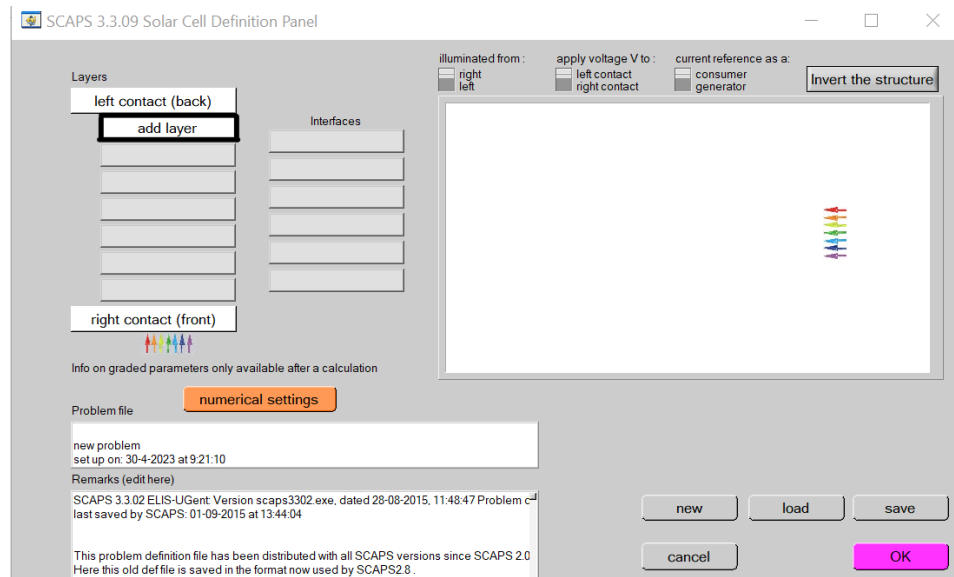
IF	x(un)	jn1(mA/cm2)	jn2(mA/cm2)	jp1(mA/cm2)	jp2(mA/cm2)	jn1[with tunn]
0	1.000000	0.0000000e+00	0.0000000e+00	0.0000000e+00	0.0000000e+00	0.0000000
1	1.015000	3.23859970e-23	-3.25514892e-23	-1.65472172e-25	2.24335511	0.0000000
2	1.115000	0.0000000e+00	0.0000000e+00	0.0000000e+00	0.0000000e+00	0.0000000

الشكل ( 8-III ) : إظهار القيم الرقمية للمنحنيات البيانية

كما أن هناك بعض الواجهات المتخصصة التي يمكن استعمالها.

### 4.3.2.11 الطبقات

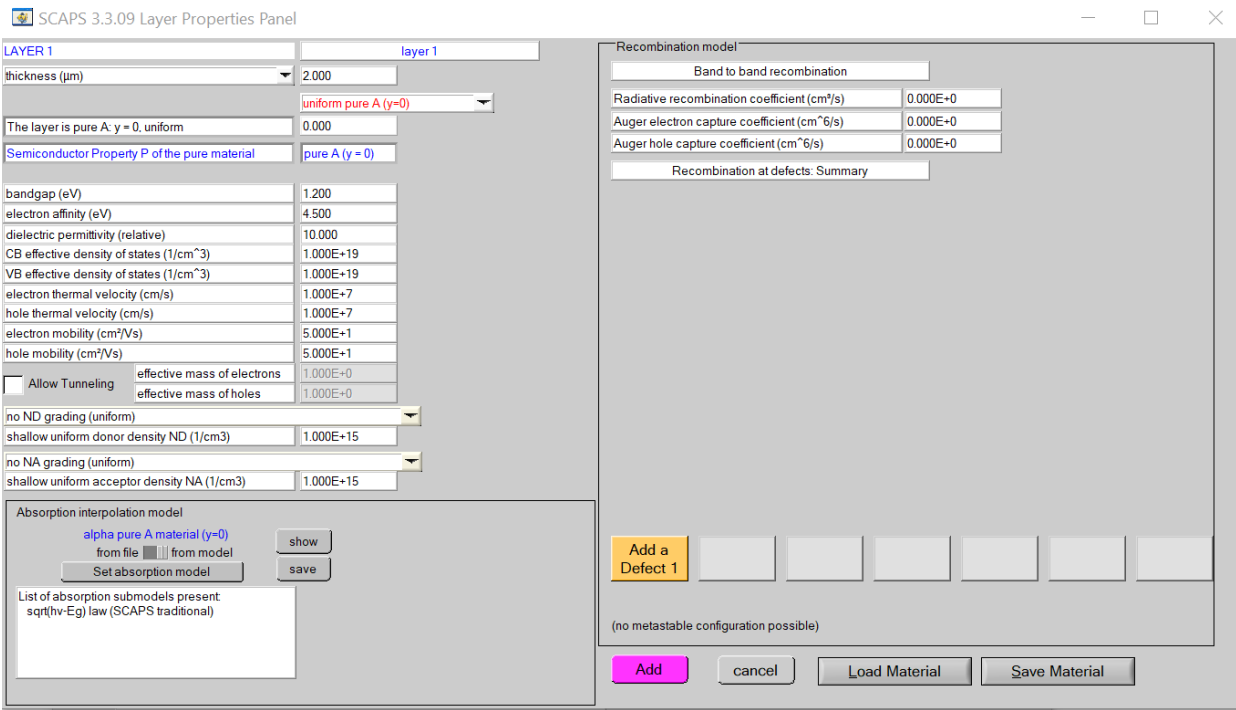
من أجل إضافة طبقة جديدة نذهب إلى قائمة التحميل LOAD و نضغط على add layer (إضافة طبقة)



الشكل ( 9-III ) : إنشاء طبقة جديدة

فنتحصل على النافذة التالية:

## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D



الشكل ( 10-III ) : واجهة البرنامج لإدارة الطبقات

من خلال هذه النافذة يمكن إضافة المعلمات المختلفة للمواد المراد تقديمها سواء كانت معلمات منتظمة أو غير منتظمة.

في المربع الأول ندخل اسم الطبقة الذي يتوافق مع نوع التطعيم.

في المربع الثاني ندخل سماكة الطبقة

يتعلق المربع الثالث بنقاء المادة وشكلها الجانبي.

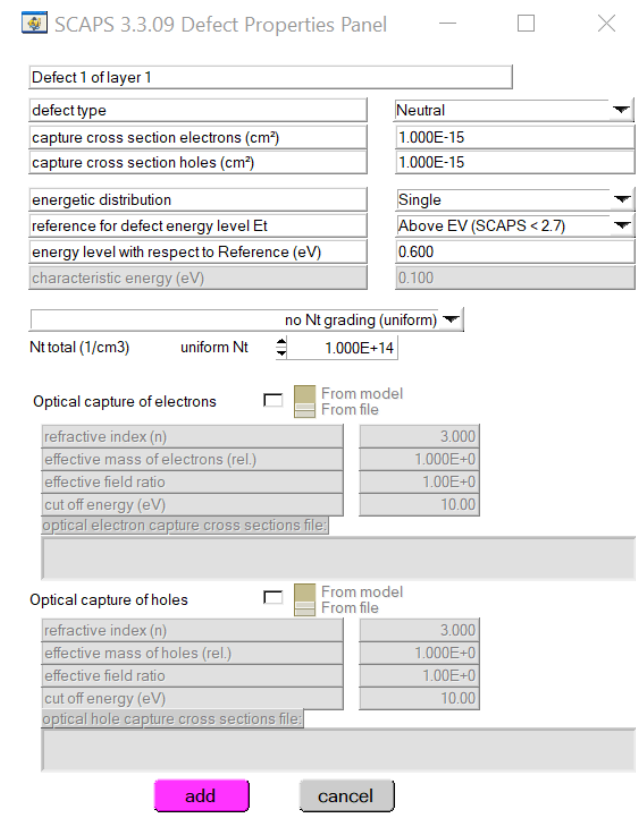
في المربع الرابع ندخل: فجوة الطاقة، تقارب الإلكترون، سماحية العزل، الكثافة الفعالة لنطاق التوصيل والتكافؤ، السرعات الحرارية للإلكترونات والثقوب الحرة، تنقل الإلكترونات والثقوب. أخيراً، الصندوق، الذي يسمح بإضافة الكتل الفعالة للإلكترونات والثقوب إذا أخذنا في الاعتبار نقل الموجات الحاملة عن طريق تأثير النفق.

في المربع الخامس نقدم التطعيم والنوع والكثافة كما في الشكل

في المربع السادس نحدد امتصاص الطبقة

## 4.2.11 العيوب

يمكن فتح نافذة إعدادات العيوب من نافذة الطبقات



الشكل ( III-11 ) : علبّة حوار العيوب

العيوب هي أهم معايير الدراسة في SCAPS - 1D ويتم تحديد العيوب بالمعايير التالية:

- مكانة مستوى الطاقة في الفجوة
- نوع العيب
- المقطع العرضي لالتقاط الإلكترون الحراري
- المقطع العرضي لالتقاط الثقب الحراري
- التوزيع النشط

## الفصل الثاني : خصائص الرباعي $Cu_2ZnSnS_4$ وبرنامج SCAPS – 1D

---

- مرجع عيوب مستوى الطاقة
- المقطع العرضي لالتقاط البصري للالكترون
- المقطع العرضي لالتقاط البصري للثقب
- تركيز العيب

---

# الفصل الثالث: مناقشة نتائج المحاكاة

---

## 1.111 مقدمة

بسبب ارتفاع تكاليف التقنيات التجريبية المستعملة في ترسيب الشرائح الرقيقة المستعملة في الخلايا الشمسية، اتجه العلماء إلى المحاكاة، تسمح محاكاة الخلايا الشمسية بالتنبؤ بمدى تأثير مختلف الخواص الكهربائية والفيزيائية والإلكترونية لأي طبقة على مردود الخلية.

هناك العديد من برامج المحاكاة مثل 1D - AMPAS و PC1D و Silvaco وأشهرها برنامج - SCAPS 1D . تم تطوير 1D - SCAPS بشكل أساسي لنمذجة خلايا الطاقة الشمسية القائمة على طبقات رقيقة مثل CIGS وعائلة CdTe.

التطورات الأخيرة تجعل تطبيق البرنامج بنجاح لنموذج الخلايا الشمسية على أساس مواد أخرى مثل الخلايا الشمسية البلورية ZnO و CZTS.

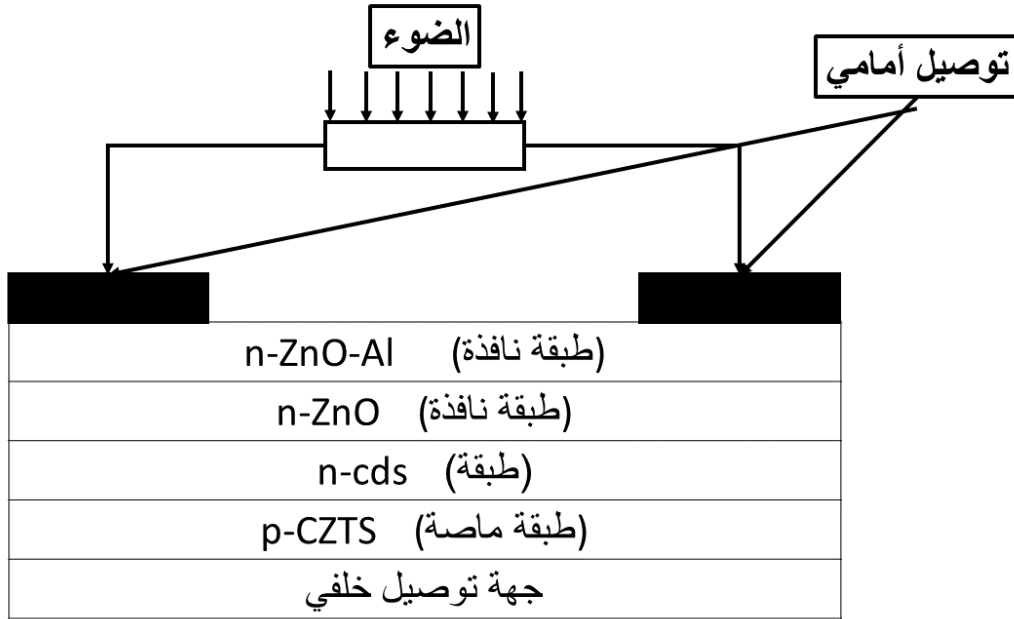
تم تصميم برنامج 1D - SCAPS لمحاكاة منحنى الخاصية الكهربائية  $J(V)$  ومعامل الشكل (FF) وكثافة تيار الدارة القصيرة ( $I_{CC}$ ) وجهد الدارة المفتوحة ( $V_{OC}$ ) ومردود التحويل الطاقى ( $\eta$ )، حيث يصف هذا الفصل هيكل الخلية الشمسية وبعض الإعدادات الفيزيائية المتعلقة بتأثير سمك الطبقة CZTS ودرجة الحرارة على وصلة غير متجانسة CZTS|CdS|ZnO|ZnO-Al.

يعرض هذا الفصل ويناقش نتائج تم الحصول عليها باستعمال برنامج 1D - SCAPS.

## 2.111 هيكل الخلية المدروسة

لإجراء محاكاة باستعمال برنامج 1D - SCAPS من الضروري أن نقوم بتحديد البنية للمحاكاة.

تتكون الخلية الشمسية من مجموعة من أغشية رقيقة شبه موصلة، في دراستنا، الخلية المدروسة تتكون من أربع طبقات وهي: n-ZnO.Al|n-ZnO|n-CdS-p-CZTS، الشكل (1.111) يمثل مخطط مبسط لهذه الخلية.



الشكل (III - 1) الهيكل التخطيطي لخلية الأغشية الرقيقة المستندة على CZTS المستخدمة في المحاكاة

في هذه البنية الغير متجانسة التي رأيناها في الشكل (1.III) تتشكل طبقات رقيقة نذكرها: الوصل الأمامي، الطبقة النافذة (n-ZnO-Al) والطبقة النافذة (n-ZnO)، الطبقة (n-Cds)، الطبقة الماصة (p-CZTS)، الوصل الخلفي.

سنحدث في الجزء التالي من هذا الفصل عن جميع خواص الطبقات الرقيقة المستعملة في المحاكاة.

### 3.III تحديد خواص الطبقات الرقيقة المستعملة في محاكاة

#### الخلية الشمسية من النوع CZTS

في الجدول (1.III) (2.III) (3.III) قمنا بتحديد الخواص المتعلقة بكل طبقة من الطبقات التي تكون الخلية الشمسية والتي تم الحصول عليها من المراجع (20) (21) (22) (23) (24).

جدول (III - 1) خواص الطبقات الرقيقة المستعملة في المحاكاة

CZTS	CdS	ZnO	ZnO-Al	الخواص (الوحدة)
متغير	0.08	0.08	0.45	السماك ( $\mu\text{m}$ )
7	09	09	09	السماحية النسبية ( $\epsilon_r$ )
متغير	2.42	3.27	3.4	طاقة الفجوة Eg (eV)
4.37	4.45	4.5	4.51	T(eV) الكهروسلبية
$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	$2.2 \times 10^{18}$	كثافة الحالات في عصابة التوصيل $N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1.8 \times 10^{19}$	$9 \times 10^{19}$	كثافة الحالات في عصابة التكافؤ $N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
06	50	100	100	حركية الإلكترونات ue ( $\text{cm}^2   \text{v.s}$ )
10	25	25	25	حركية الثقوب uv ( $\text{cm}^2   \text{v.s}$ )
/	$1 \times 10^{17}$	$1 \times 10^{17}$	$1 \times 10^{17}$	تركيز المانحات Nd ( $\text{cm}^{-3}$ )
$1 \times 10^{16}$	/	/	/	تركيز المستقبيلات Na ( $\text{cm}^{-3}$ )

جدول (III - 2) خواص الطبقة الماصة CZTS

CZTS	السماك ( $\mu\text{m}$ )	Eg (eV)
CZTS1	6.23	1.34
CZTS2	5.24	1.42
CZTS3	4.66	1.52
CZTS4	3.15	1.4

### جدول ( 3.III ) خواص الاتصال الأمامي والاتصال الخلفي

الخاصية	الاتصال الأمامي	الاتصال الخلفي
سرعة التحام الإلكترون	$1 \times 10^7$ cm/s	$1 \times 10^7$ cm/s
سرعة التحام الثقوب	$1 \times 10^7$ cm/s	$1 \times 10^7$ cm/s
طاقة عامل الخروج	4.1 eV	5eV

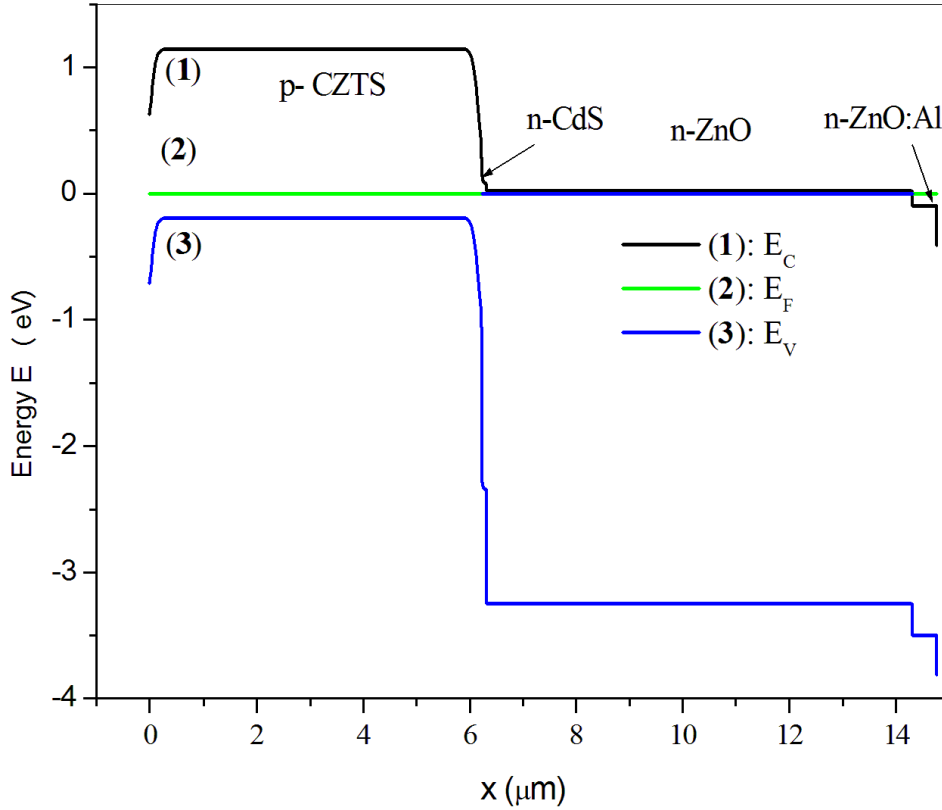
تم تحديد معاملات أداء الخلايا الشمسية FF،  $V_{oc}$  و  $I_{cc}$  و المردود  $\eta$ . انطلاقاً من الخاصية الكهربائية للخلية  $J(v)$ .

المحاكاة تمت عند إشعاع ضوئي AM1.5 بإستطاعة  $P = 1000 \frac{W}{m^2}$  وتم أخذ درجة حرارة تشغيل الخلية على أنها درجة حرارة الغرفة ( $300^\circ K$ )

## 4.III المخطط الطاقى

الشكل (2.III) يمثل مخطط عصابات الطاقة للخلية الشمسية بدلالة  $x$ ;  $x$  يتغير من 0 (الاتصال الخلفي) إلى  $14.3 \mu m$  الإتصال الأمامي.

نلاحظ بأن EF ثابت ولا يتغير بدلالة  $x$  لأن الخلية في حالة توازن تيرموديناميكي. الحواجز الطاقية المولدة في عصابة التكافؤ وعصابة التوصيل بين CZTS و CdS من جهة وبين CdS و ZnO وبين ZnO و ZnO-Al من جهة أخرى ناجمة عن الاختلاف في الطاقة الكهروسلبية وطاقة الفجوة لأنصاف النواقل CZTS, CdS, ZnO, ZnO-Al.



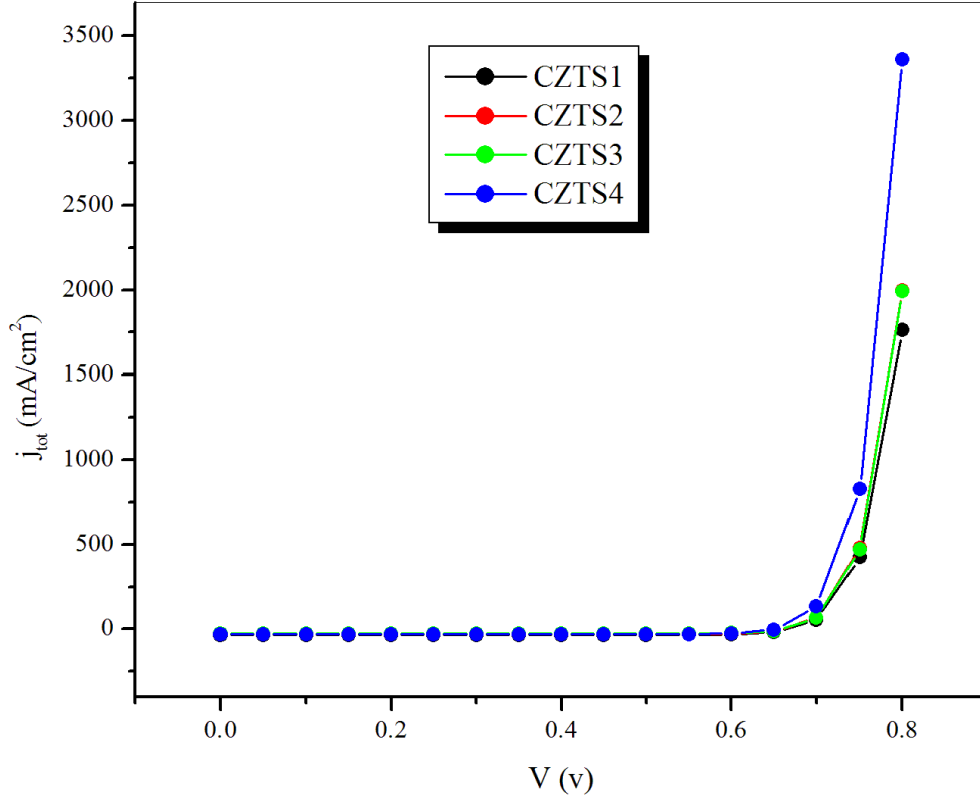
الشكل (III - 2) مخطط عصابات الطاقة للخلايا الشمسية بدلالة  $x$

### 5.111 تأثير سمك طبقة CZTS على الخواص تيار - جهد

بوضح الشكل (3.111) منحنى تغيرات كثافة التيار بدلالة الجهد للخلايا الشمسية الأربعة من نوع CZTS وهذا بعد تغيير سمك الطبقة في كل مرة من  $3.15 \mu\text{m}$  إلى  $6.23 \mu\text{m}$  وإدخال طاقة الفجوة الموافقة لكل سمك. باستعمال برنامج SCAPS - 1D يظهر المنحنى تغيرات واضحة لكثافة التيار عند تغيير سمك طبقة CZTS حيث نسجل أقصى قيمة لكثافة التيار عند سمك  $6.23 \mu\text{m}$ .

هذه التغيرات لكثافة التيار مرتبطة أساس بتغيير في عرض منطقة النضوب والتي تأثر بصورة واضحة

على ناقلات الشحنة. [25]



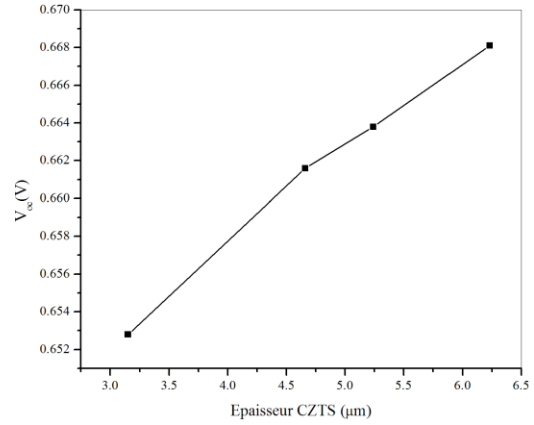
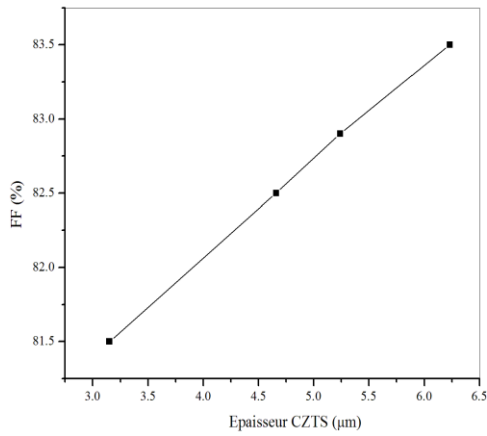
الشكل (III - 3) منحنى تغيرات كثافة التيار بدلالة الجهد لخلية شمسية من النوع CZTS من أجل قيم سمك مختلفة

## 6.111 تأثير سمك الطبقة الماصة CZTS على الخصائص الكهربائية للخلية

في هذا الجزء من المذكرة قمنا بدراسة تأثير سمك الطبقة الماصة CZTS على الخصائص الكهربائية (FF|V<sub>oc</sub>|I<sub>cc</sub>|η) من أجل هذا قمنا بتغيير قيمة السمك من 3.15 μm إلى 6.23 μm. فيما يلي سنقوم بعرض النتائج المتحصل عليها من المحاكاة على شكل رسوم بيانية وسنقوم بشرحها.

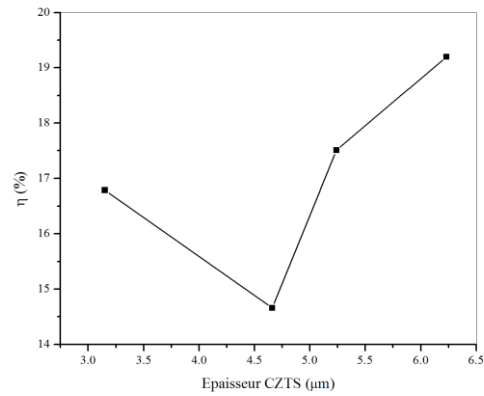
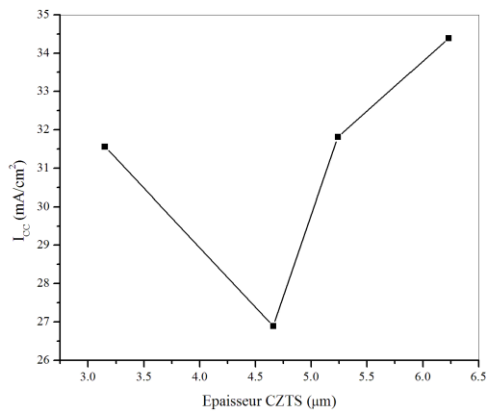
الأشكال (4.III) (5.III) (6.III) (7.III) تمثل على التوالي منحنيات تغيرات  $(FF)$   $(V_{oc})$   $(I_{cc})$   $(\eta)$  بدلالة

سمك الطبقة الماصة CZTS.



الشكل (III - 4) تغيرات  $FF$  بدلالة سمك الطبقة الماصة

الشكل (III - 5) تغيرات  $V_{oc}$  بدلالة سمك الطبقة الماصة



الشكل (III - 6) تغيرات  $I_{cc}$  بدلالة سمك الطبقة الماصة

الشكل (III - 7) تغيرات  $\eta$  بدلالة سمك الطبقة الماصة

من الشكل (4.III) و الشكل (5.III) نلاحظ أن كلا من  $V_{oc}$  و FF يتزايدان خطيا بدلالة سمك الطبقة الماصة CZTS، فمن أجل سمك الطبقة الذي يتغير من  $3.15 \mu\text{m}$  إلى  $6.23 \mu\text{m}$  نلاحظ أن  $V_{oc}$  يمر من القيمة  $0.65\text{V}$  إلى  $0.66\text{V}$  ومعامل الشكل FF يزداد من  $81.5\%$  إلى  $83.5\%$ .

يمكن القول أن  $V_{oc}$  لا يتأثر كثيرا بتغير سمك الطبقة الماصة. من جهة أخرى نلاحظ أن تغير تيار الدارة المقصورة  $I_{cc}$  والمردود  $\eta$  بدلالة السمك لهما نفس المنحى. فعندما يتغير سمك CZTS من  $3.15 \mu\text{m}$  إلى  $4.66 \mu\text{m}$  فمردود الخلية يتناقص من  $16.7\%$  إلى  $14.6\%$  و  $I_{cc}$  يتغير من  $31.5 \text{ mA/cm}^2$  إلى  $26.88 \text{ mA/cm}^2$ . عندما يتغير سمك الطبقة الماصة من  $4.66 \mu\text{m}$  إلى  $6.23 \mu\text{m}$  نلاحظ أن كلا من  $I_{cc}$  والمردود يتزايدان حتى يصل إلى قيمتهما الأعظمية على التوالي  $I_{cc} = 34.38 \text{ mA/cm}^2$  و  $\eta = 19.20\%$ .

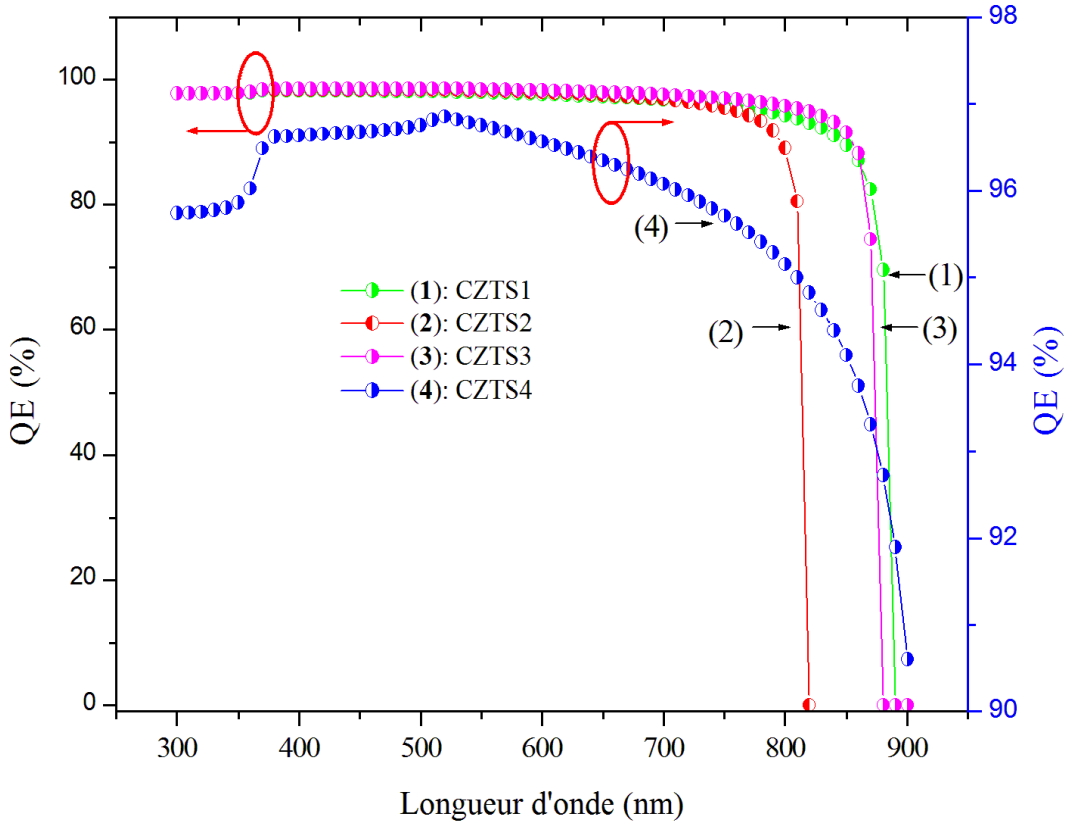
نظريا نعلم أن مردود الخلية هو دالة لـ  $V_{oc}$  و  $I_{cc}$  وبما أن  $V_{oc}$  لا يتغير بدلالة سمك الخلية فإن المردود يبقى دالة لـ  $I_{cc}$ . لهذا نلاحظ أن زيادة  $I_{cc}$  تؤدي إلى زيادة المردود وانخفاض  $I_{cc}$  يؤدي إلى انخفاض المردود.

زيادة المردود بدلالة السمك في المجال ( $4.66 \mu\text{m}$  إلى  $6.23 \mu\text{m}$ ) يمكن تفسيره بزيادة امتصاص الطبقة الماصة مع زيادة سمكها وهذا ما يؤدي إلى زيادة عدد حاملات الشحنة (الأزواج إلكترون - ثقب) المتولدة بفعل امتصاص الضوء وبالتالي زيادة تركيزها وهذه الأخيرة تؤدي إلى زيادة التيار  $I_{cc}$  في المجال  $3.15 \mu\text{m}$  -  $4.66 \mu\text{m}$ , انخفاض المردود أو بالأحرى التيار  $I_{cc}$  يعود إلى زيادة معامل الالتحام ما بين الأزواج إلكترون - ثقب أي انتقال الإلكترون من عصابة التوصيل إلى عصابة التكافؤ. أي أن ليس كل الإلكترونات والثقوب المولدة بالفعل الكهروضوئي تشارك في عملية توليد التيار أي أن جزء منها يضيع بالالتحام فيما بينها.

## 7.III تأثير سمك CZTS على المردود الكونتي

يمثل الشكل (8.III) تغير المردود الكونتي QE بدلالة طول موجة الإشعاع الضوئي لمختلف الخلايا الشمسية المدروسة. نلاحظ بأن المردود للخلايا CZTS1, CZTS2, CZTS3 له نفس المنحى وهو يقارب  $98\%$  في المجال  $300 \text{ nm}$  إلى  $700 \text{ nm}$  ثم يتناقص بسرعة إلى قيم ضعيفة جدا.

فمردود الخليتين CZTS1 و CZTS3 يصل إلى 0 من أجل أطوال موجة أكبر أو تساوي  $860 \text{ nm}$  في حين أن مردود CZTS2 يصل إلى الصفر من أجل أطوال موجة تساوي  $810 \text{ nm}$  أو أكثر. على عكس هذه الخلايا الثلاث فمردود الخلية CZTS4 يقارب  $90\%$  من أجل طول موجة يساوي  $900 \text{ nm}$ . إذا الخلايا CZTS1 و CZTS2 و CZTS3 و CZTS4 تقوم بالتحويل الكهروضوئي في المجال المرئي فقط أما CZTS4 فتمتص وتحول كذلك الأشعة تحت الحمراء وتحولها إلى كهرباء.



الشكل (III - 8) منحنى تغيرات المردود  $QE$  بدلالة طول موجة الإشعاع الضوئي لمختلف الخلايا الشمسية المدروسة

في الجزء التالي من هذه المذكرة سنقوم بدراسة تأثير درجة الحرارة على الخواص الكهربائية للخليتين الشمسيين CZTS1 و CZTS4 نذكر أن سمك الطبقة الماصة وطاقة الفجوة بالنسبة للخليتين CZTS1 و CZTS4 هما على التوالي  $1.4 \text{ eV}$  و  $3.15 \mu\text{m}$  و  $1.34 \text{ eV}$  و  $6.23 \mu\text{m}$ .

## 8.iii تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية للخلية CZTS1 و CZTS4.

في هذا الجزء من المذكرة، سنقوم بدراسة فعل درجة حرارة الوسط على الأداء الكهروضوئي للخليتين CZTS1 و CZTS4 وهذا من أجل السمك الموافق للأداء العالي (أحسن مردود). اخترنا الخليتين CZTS1 و CZTS4 لدراسة تأثير درجة الحرارة كون الخلية CZTS1 ذات السمك الأعلى  $6.23 \mu\text{m}$  أعطت أكبر مردود (19.20%) و الخلية CZTS4 ذات السمك الأقل مردودها أقل نسبياً (17%)

الخلية CZTS1 سمكها عالي أي صناعتها يتطلب استهلاك أكبر للمادة وبالتالي ارتفاع كلفته.

تصنيع هذه الخلية على عكس الخلية CZTS4 التي يتطلب تصنيعها نصف كمية تصنيع الخلية CZTS1 وبالتالي تخفيض كلفتها.

وكما هو معلوم فإن تخفيض كلفة إنتاج الخلايا الشمسية هو أحد التحديات الكبرى لمختلف فرق البحث الناشطة في مجال التحويل الكهروضوئي.

في دراستنا هذه قمنا بتغيير درجة الحرارة من  $263^\circ\text{K}$  ( $-10^\circ\text{C}$ ) إلى  $323^\circ\text{K}$  ( $50^\circ\text{C}$ ) بخطوة  $10^\circ\text{K}$

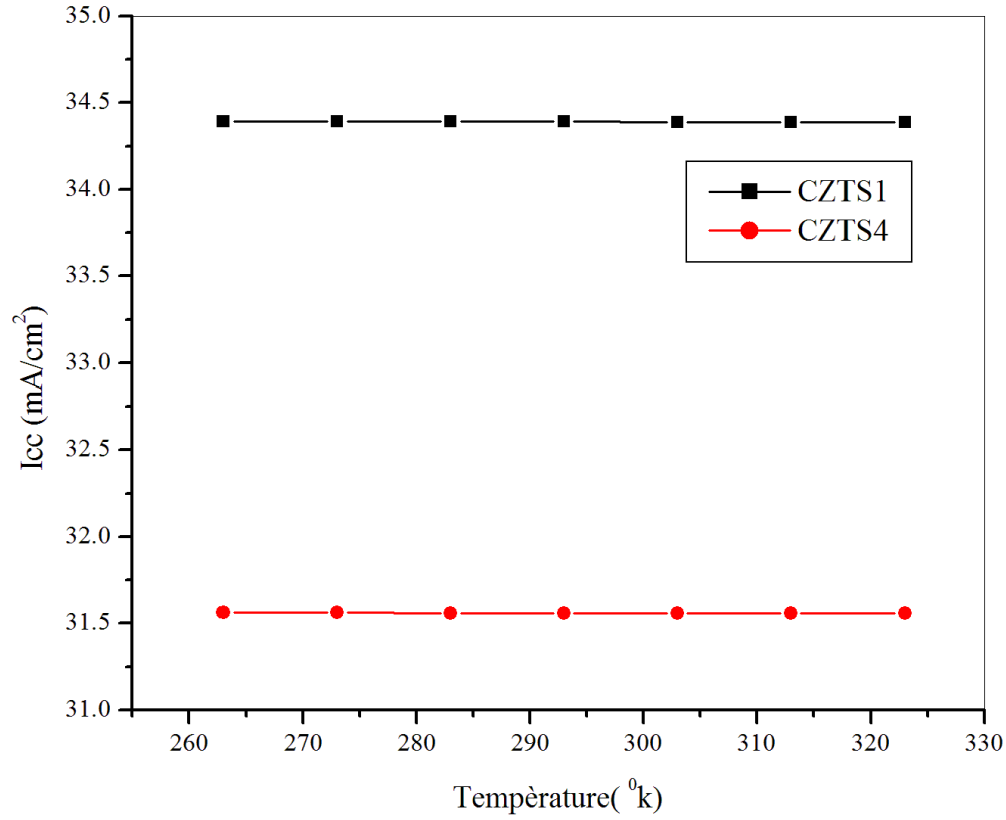
انطلاقاً من الخاصية الكهربائية  $J(V)$  لكلا الخليتين من أجل مختلف درجات الحرارة نقوم باستخراج الخواص الكهربائية  $V_{oc}$ ،  $FF$ ،  $I_{cc}$ ،  $\eta$  ونقوم بدراسة تأثير درجة الحرارة على تغييرها.

➤ تيار الدارة المقصورة  $I_{cc}$  و جهد الدارة المفتوح  $V_{oc}$ :

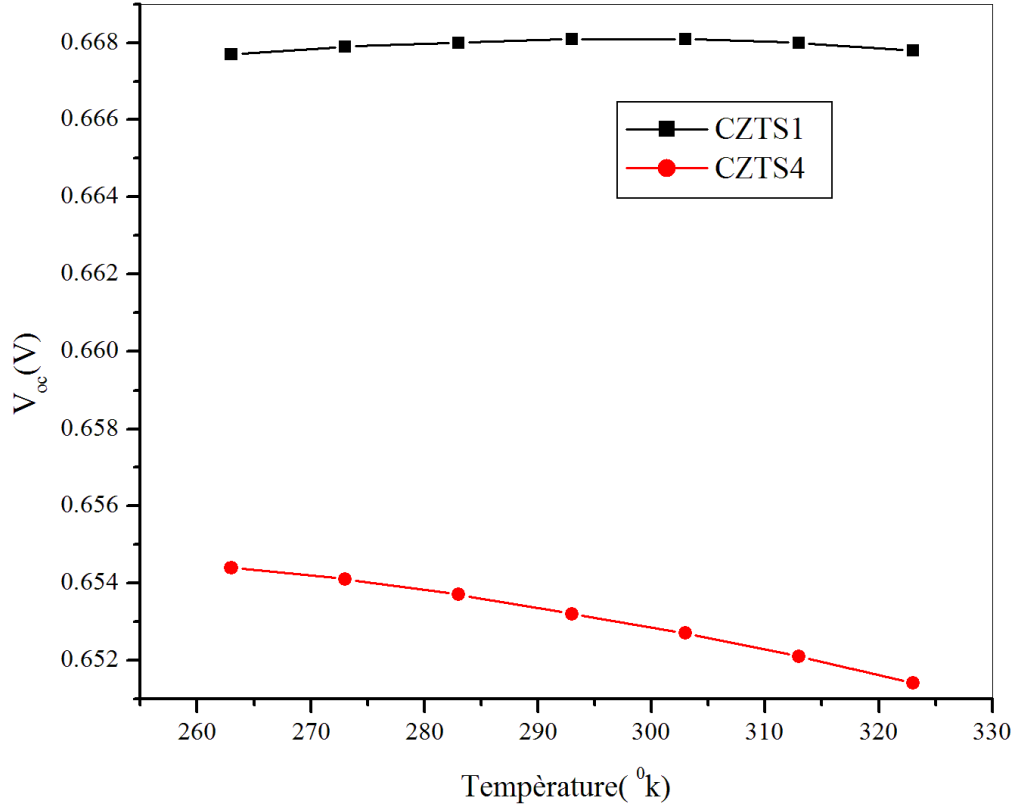
الشكلان (9.iii) و (10.iii) يمثلان تغيير كل من تيار الدارة المقصورة  $I_{cc}$  وجهد الدارة المفتوحة  $V_{oc}$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS4. من الشكل (9.iii) نلاحظ أن  $I_{cc}$  لا يتأثر بدرجة الحرارة لكن يتأثر بسمك الطبقة الماصة.

من أجل درجة الحرارة التي تتغير من  $263^\circ\text{K}$  إلى  $323^\circ\text{K}$  فإن  $I_{cc}$  يساوي  $34.3 \text{ mA/cm}^2$  لـ CZTS1 ويساوي  $31.5 \text{ mA/cm}^2$  لـ CZTS4.

أما بالنسبة إلى  $V_{oc}$  فهو لا يتأثر بالحرارة بالنسبة للخلية CZTS1 ويساوي  $0.66 \text{ V}$  ويتناقص تناقص طفيف بالنسبة لـ CZTS4.



الشكل (III - 9) منحنى تغير  $I_{cc}$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS4



الشكل (III - 10) تغير  $V_{oc}$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS4

➤ معامل الشكل FF و المردود  $\eta$

الأشكال (11.III) و (12.III) تمثل على التوالي منحنيات تغيرات FF،  $\eta$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين

CZTS1 و CZTS4.

نلاحظ أن تغير هذان العاملين مع درجة الحرارة لهما نفس السلوك. فهما يتناقضان خطياً مع ارتفاع درجة

الحرارة، بالنسبة لـ FF في الشكل (12.III) يتناقص من 85.4% إلى 82.2% بالنسبة للخلية CZTS1 و من

82.6% إلى 81% بالنسبة للخلية CZTS2 من أجل تغير درجة الحرارة من 263 °k إلى 323 °k ولا يتأثر

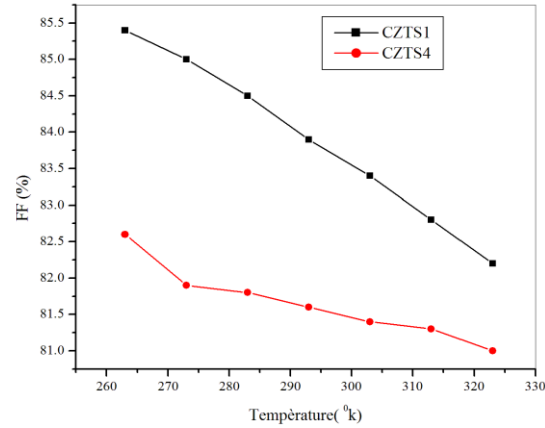
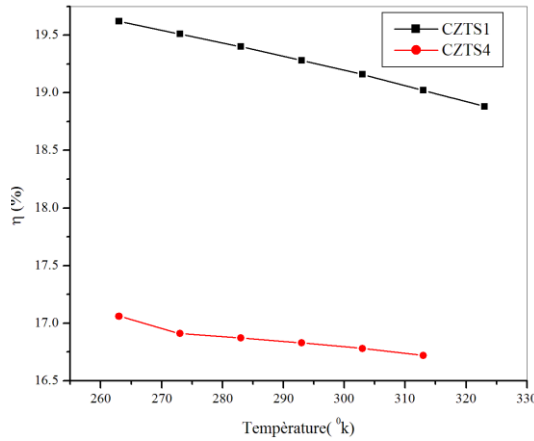
تقريباً بنوع الخلية أو بتعبير أكثر دقة بنوع الطبقة الماصة.

أما فيما يخص المردود  $\eta$  حسب ما يظهر في الشكل (11.iii) فهو يتناقص من القيمة 19.62% إلى القيمة 18.88% بالنسبة للخلية CZTS1 ومن القيمة 17.06% إلى القيمة 16.66% بالنسبة للخلية CZTS2 من أجل تغير درجة الحرارة من 263 °k إلى 323 °k.

يعود سبب انخفاض مردود الخليتين بدلالة درجة الحرارة إلى ارتفاع معامل الالتحام R بين حاملات الشحنة مقارنة مع معامل التوالد G. الالتحام بين حاملات الشحنة هو انتقال الإلكترونات المتولدة بالفعل الكهروضوئي من عصابة التوصيل BC للالتقاء بالثقوب في عصابة التكافؤ BV على عكس معامل التوالد الذي يمثل انتقال الإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى عصابة التوصيل وهذا بامتصاص طاقة الأشعة الشمسية [01].

إن ارتفاع معامل الالتحام مقارنة مع معامل التوالد يؤدي إلى انخفاض في تركيز عدد الإلكترونات والثقوب، مما يؤدي إلى انخفاض في التيار المولد من طرف الخلية وبالتالي انخفاض المردود.

المردود القياسي لكلا الخليتين يتواجد عند درجة الحرارة 263 °k يساوي 19.62% بالنسبة لـ CZTS1 و 17.06% بالنسبة لـ CZTS2.



CZTS2

الشكل (11 - III) تغير FF بدلالة درجة الحرارة للشليتين CZTS1 و CZTS4  
 الشكل (12 - III) تغير  $\eta$  بدلالة درجة الحرارة للشليتين CZTS1 و CZTS4

## 9.111 خاتمة

قمنا في هذا الفصل بإجراء محاكاة عددية لخلية شمسية من نوع CZTS وهذا باستخدام برنامج المحاكاة

SCAPS - 1D حيث

قمنا في هذا الفصل باستخدام برنامج SCAPS – 1D الفعال والمناسب من أجل تقييم أداء وكفاءة الخلية الشمسية القائمة على CZTS المتمثلة في (CZTS | cds | ZnO | ZnO-Al) من خلال دراسة الخلية الشمسية القائمة على الطبقة الماصة CZTS حيث كانت كفاءتها ( $\eta = 16.7\%$ ) تم تغيير سمك الطبقة الماصة CZTS ورفع درجة حرارة التشغيل إذ تبين من هذه الدراسة:

إن تغيير سمك الطبقة الماصة من  $3.14 \mu m$  إلى  $4.66 \mu m$  فإن  $V_{OC}$  و  $FF$  يتزايدان خطياً، على عكسهما فإن  $I_{CC}$  يتناقص من  $31.5 mA/cm^2$  إلى  $26.88 mA/cm^2$  وكذلك تناقص المردود إلى (14.6%) عند السمك  $4.66 \mu m$  أي بفارق 2.1% على الرغم من مضاعفة سمك الطبقة الماصة.

أما عند تغيير السمك من  $4.66 \mu m$  إلى  $6.23 \mu m$  فإن مخرجات الخلية الشمسية ترتفع قليلاً حيث تم الحصول على كفاءة  $\eta = 19.2\%$ .

عند رفع درجة حرارة الوسط من  $263^\circ K$  إلى  $323^\circ K$  تم تسجيل انخفاض طفيف في كل من جهد الدرة المفتوحة  $V_{OC}$  ومعامل الشكل  $FF$  وكفاءة الخلية  $\eta$  وكذلك تيار الدارة القصيرة  $I_{CC}$ .

---

## خاتمة عامة

أدت دراسات المركبات الثنائية إلى زيادة إنتاج مواد جديدة للخلايا الشمسية حيث ركزت الأبحاث على الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة لتحقيق كفاءة عالية وتكلفة منخفضة نسبيا ومن أهم أشباه الموصلات المستغلة حاليا في تصنيع الخلايا الشمسية المركب الرباعي (CZTS)  $Cu_2ZnSnS_4$  الذي يتمتع بفجوة طاقة بين - 1eV و 1.5eV كما أن العناصر المكونة له وفيرة كما تتمتع بمعامل امتصاص كبير بما يكفي.

قمنا في هذا العمل بمحاكات عددية لأداء وكفاءة خلية شمسية من النوع CZTS المتمثلة في (CZTS | cds | ZnO | ZnO-Al) باستخدام برنامج المحاكاة SCAPS – 1D حيث درسنا تأثير كل من سمك الطبقة الماصة CZTS ودرجة الحرارة على أداء وكفاءة الخلية الشمسية المتمثلة في كثافة التيار  $I_{CC}$  و جهد الدارة المفتوحة  $V_{OC}$  و معامل الشكل FF و المردود  $\eta$ .

أظهرت نتائج المحاكات المتحصل عليها:

أنه بزيادة درجة حرارة الوسط من  $263^{\circ}K$  إلى  $323^{\circ}K$  نلاحظ انخفاض معتبر في كل من جهد الدارة المفتوحة  $V_{OC}$  ومعامل الشكل FF ومردود الخلية وهذا يعني أن الخلايا القائمة على CZTS لديها القدرة على العمل في درجات حرارة عالية مما يسمح للخلية الشمسية بالحفاظ على كفاءة عالية ويحد من نسبة التدهور المرتبطة بدرجات الحرارة وعليه يمكن الاستثمار في هذا النوع من الخلايا الشمسية.

بينما عند تغيير سمك الطبقة الماصة CZTS من  $3.14 \mu m$  إلى  $6.23 \mu m$  يؤثر بزيادة أو نقصان في

وسائط الخلية المدروسة، كما سجلنا كفاء جيدة عند سمك  $6.23 \mu m$  حيث بلغت  $\eta = 19.62$

---

## المراجع

1. Hashruf Hanifa - Study of the effect of front junction barrier height and operating temperature on the performance of solar cells, University of M'sila - Master's Thesis 2020. ZnO/CdS/CZTS
2. International Solar Energy Federation: <https://www.ises.org> / Visible light | Scientific Mission Directorate." science.nasa.gov. Archived from the original on 2022-11-07. Viewed on 08/17/2022 .
3. <https://www.nrel.gov/research/re-photovoltaics.html> :Last accessed on 6/14/2023
4. Robert Foster and Majid Qasimi, "Solar Energy: Renewable Energy and the Environment" (CRC Press, 2010) .
5. Hermann Scherr, "The Solar Economy: Renewable Energy for a Sustainable Global Future" (Earthscan Publications Ltd., 2004).
6. Hamdy Ahmed Mohamed El-Sayed, "Solar Energy and Photovoltaic Conversion: Principles and Applications" (Egyptian General Book Authority, 2010).
7. Dr. Adel Muhammad Subhi Al-Akkad, "Solar Energy Applications" (Al-Arabi Publishing and Distribution, 2009) .
8. Hermann Scherr, "The Solar Economy: Renewable Energy for a Sustainable Global Future" (Earthscan Publications Ltd., 2004). Official website of the International Solar Energy Agency:
9. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-areas/photovoltaics/components-andtechnologies/components-and-technologies.html>
10. Robert Foster and Majid Ghasemi, "Sun Energy: Renewable Energy and the Environment" (Dar Al-Farabi, 2011).
11. Muhammad Ali and Sarah Ahmed, "The Effect of Lighting Intensity on the Performance of Photovoltaic Solar Cells," Journal of Solar Physics and Electronic Materials, 2018, Volume 5, Issue 2 .
12. Hamad Khaled and Noura Muhammad, "The effect of temperature on the performance of photovoltaic solar cells," Journal of Electronic Physics and Engineering, 2016, Volume 9, Issue 3, pages 123-135 .

- 
13. K. Tanaka, T. Morikawa, T. Nishio, K. Sato, Yamanaka, "Structural properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films fabricated by sulfur precursor metal precipitation," *Applied Physics Letters*. 032117, 2008.
  14. Thin-film solar cells made of copper, zinc and tin sulfide: recent developments and prospects" Xiaojing Hao, Yulong Liu, Xiaojing Hao, et al. 2016
  15. Yoon Soo-young, Kang Min-ji, Young-Sing-yeon, and Lee Deok-ho, "Optical properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films for solar cell applications," *Journal of Applied Physics*, 043105, 2011.
  16. M. Kathariya et al., "Electrical Properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Thin Films Prepared by Dissipative Ion Centrifugation Technique," *Journal of Electronic Material*, 020405 ,
  17. S. Hajezadeh Dr. Hajezadeh, "Preparation and Properties Evaluation of Transparent-Like Quaternary Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> for Solar Cell Applications," *Journal of Fluorescence Physical Chemistry*, 212, 2013
  18. R. Stilinski et al., "Evaluation of Electrical and Optical Behavior of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition Technique," *Journal of Nanomaterials*, 062001, 2014
  19. S. Burgelman, A. Burgers, and J. Verschraegen, "Simulation of single and tandem solar cells using SCAPS-1D," in *Proceedings of the 25th European Solar Photovoltaics Conference and Exhibition*, Valencia, Spain, 2010
  20. Shahin Aniyati-McLavani, Shahram Mohammadnejad, Effect of carrier concentration and current recombination on p+pn CZTS thin film solar cells, *Optoelectronics and Quantum Electronics*, 52 (2020) 279.
  21. Leila Ghalmi, Sohaila Bensmin, Mourad El-Bar, Suleiman Chala, Hayat Marzouk, CZTS/CZTSe Tandem Cell Simulation Study Using SCAPS-1D Software, *J. NANO-ELECTRON. Phys.* 14, 06033.)2022(
  22. Samer Hassan Zyoud, Ahed Zyoud, Nasser Muhammad Ahmed, Anupama R Prasad and others. Numerical modeling of high conversion efficiency FTO/ZnO/CdS/CZTS/MO thin film based solar cells: using SCAPS-1D software, *Crystallography* 11 (2021) 1468.
  23. SCAPS data. Boudaira
-

- 
24. R., Meglali, O., Bouraiou, A., Attaf, N., Sedrati, C. et al. (2020). Optimization of temperature sulfurization for the production of single-phase CZTS composite sterite layers by electrodeposition. *Surface Engineering*, 36(9), 1000-1011.
  25. Bakoush Asmaa, Numerical simulations of the performance and efficiency of thin-layer cadmium telluride (CdTe) solar cells, Master's Degree 2022 .
  26. P-N Junction," Electronics Hub website, <https://www.electronicshub.org/pnjunction/>

---

# الملخص

في هذا العمل سنقوم بدراسة شاملة لخلايا الطاقة الشمسية الكهروضوئية ذات أساس شبه الموصل  $Cu_2ZnSnS_4$  حيث سنقوم بمحاكات هذه الخلية باستعمال برنامج SCAPS – 1D وذلك بغرض دراسة خصائص الخلية الشمسية ومدى تأثر أداء وكفاءة الخلية بالظروف الخارجية مثل الحرارة وأشعة الشمس والشروط الداخلية مثل سمك طبقة شبه الموصل وهذا من أجل الحكم على جودة شبه الموصل  $Cu_2ZnSnS_4$  مقارنة بأشباه موصل أخرى.

كلمات مفتاحية : خلية شمسية، CZTS، الوصل الأمامي، SCAPS – 1D

# Abstract

In this work, we will conduct a comprehensive study of solar photovoltaic cells based on  $Cu_2ZnSnS_4$  semiconductor, where we will simulate this cell using the SCAPS – 1D program, in order to study the characteristics of the solar cell and the extent to which the performance and efficiency of the cell is affected by external conditions such as heat, sunlight, and internal conditions such as the thickness of the semiconductor layer. This is in order to judge the quality of  $Cu_2ZnSnS_4$  semiconductor compared to other semiconductors.

Keywords: solar cell, CZTS, front coupling, SCAPS - 1D

---

# Résumé

Dans ce travail, nous allons mener une étude approfondie des cellules solaires photovoltaïques à base de semi-conducteur  $Cu_2ZnSnS_4$ , où nous simulerons cette cellule à l'aide du programme SCAPS - 1D, afin d'étudier les caractéristiques de la cellule solaire et la mesure dans laquelle les performances et l'efficacité de la cellule est affectée par des conditions externes telles que la chaleur, la lumière du soleil et des conditions internes telles que l'épaisseur de la couche semi-conductrice. Ceci afin de juger de la qualité du semi-conducteur  $Cu_2ZnSnS_4$  par rapport aux autres semi-conducteurs.

Mots clés : cellule solaire, CZTS, couplage frontal, SCAPS - 1D