



جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات و علوم المادة
قسم الفيزياء

مذكرة ماستر أكاديمي
مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

التخصص: فيزياء طاقوية

من إعداد الطالب: بن ساسي محمد السالك

بعنوان:

نمذجة عددية لآداء الخلايا الشمسية ثلاثية الطبقات $SnO_2/CdS/CdTe$

نوقشت يوم:

2024/06/24

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيسا	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عالي	سوداني محمد البار
مناقشا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر قسم أ	عياط زهية
مشرفا	جامعة ورقلة	أستاذ محاضر قسم أ	بن حميدة سفيان

الموسم الجامعي 2024/2023

الاهداء

الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله

بعد مسيرة دامت سنوات ها أنا اليوم أقف على عتبة تخرجي أقطف ثمار تعبي و أرفع قبعتي بكل فخر و اعتزاز فالحمد لله على تمام
النعمة و اكتمال المنة و بلوغ القمة

أهدي هذا النجاح لنفسي أولاً ثم إلى كل من سعى معي لإتمام هاته المسيرة

دمتم لي سنداً لا عمراً .

إلى من كلله الله بالهيبه والوقار إلى من علمني العطاء بدون مقابل إلى من أحمل اسمه بكل افتخار يا من كنت سنداً لي ولازلت أبي
أطال الله عمرك

إلى المرأة التي كلما حاولت وصف تضحياتها من أجلي تواضعت اللغة وانحنت لعظيم عطائها هامتي، سبب صمودي واستمراري،
ما من فضل بلغنيه الله إلا وكانت سبباً فيه، وما رمت يوماً في أمر إلا وكانت أول من آمن بي أمي الغالية الحنون.

إلى من علمني الكتابة و الحروف شيخي و معلمي محفظي القراءان .

إخوتي أخواتي الذين دعموني طوال مسيرتي.

إلى الذين لم تحملهم مذكرتي وسعتهم ذاكرتي.

أقدم هذا العمل رسالة حب و شكر و تقدير دعاء للجزائر حفظاً لأمنها و حدودها و جنودها

ونصراً لمرابطينا في أولى القبلتين و ثالث الحرمين

محمد السالك

كلمة شكر

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على سيدنا محمد المبعوث رحمة للعالمين وعلى آله وصحبه

إلى يوم الدين.

قبل كل شيء أشكر الله وافر الشكر أن وفقني وأعانني على إتمام هذه الرسالة، ثم إلى أهلي الذين كانوا سندا لي طيلة مشواري الدراسي.

كما أتوجه بالشكر والتقدير إلى أستاذي الفاضل د. سفيان بن حميدة المشرف على هاته الرسالة وأشكره على رحابة صدره وسمو خلقه وأسلوبه المميز في مساعدتي على إتمام هذه الرسالة وتوجيهه وإرشاده لي، كما أتقدم بالشكر الجزيل إلى أساتذتنا الكرام الذين وافقوا على مناقشة هاته المذكرة المتواضعة: كل من الأساتذة الكرام، الأستاذ محمد البار سوداني والأستاذة عياط.

كما أتقدم بالشكر إلى كل أساتذتنا الأفاضل بقسم علوم المادة وأخص بالذكر السيد العميد أ.د. جمال بشكي على توجيهاته و نصحه لي طيلة مسيرتي الجامعية ورئيس القسم أ.د بوعنان رايح

كما أشكر كل من ساهم ومد يد العون لإكمال هذا العمل عمالا ، أساتذة و إداريين بجامعة قاصدي مرياح ورقلة. و الحمد لله في البدء و في الختام .

محتويات المذكرة

I.....	الاهداء
II.....	كلمة شكر
III.....	محتويات المذكرة
VI.....	قائمة الأشكال
VII.....	قائمة الجداول
1.....	المقدمة العامة
3.....	مراجع المقدمة العامة

الفصل الاول: الاشعاع الشمسي

5.....	1-1- مقدمة:
5.....	1-2- معلومات حول الشمس:
6.....	1-3- الاشعاع الشمسي
7.....	1-3-1- الأشعة فوق البنفسجية
7.....	1-3-2- الأشعة الضوئية
7.....	1-3-3- الأشعة الحرارية
8.....	1-4- الاشعاع الأرضي
9.....	1-5- الاشعاع الجوي
9.....	1-6- حجم الطاقة الشمسية القادمة إلى الأرض
10.....	1-7- العوامل المؤثرة في توزيع الإشعاع الشمسي على سطح الأرض:
11.....	1-8- التوزيع الجغرافي للإشعاع الشمسي:
13.....	مراجع الفصل الأول

الفصل الثاني: فيزياء الخلايا الشمسية

15.....	II-1- تمهيد
15.....	II-2- انصاف النواقل (أشباه الموصلات)
15.....	II-2-1- الموصلات
16.....	II-2-2- أشباه الموصلات
16.....	II-2-3- العوازل
16.....	II-3- الالكترونات والثقوب
17.....	II-4- التطعيم (الاشابة)
17.....	II-5- أنواع التطعيم
17.....	II-5-1- التطعيم من نوع سالب (N)
18.....	II-5-2- التطعيم من نوع موجب (P)
18.....	II-5-3- الوصلة موجب سالب (N-P)

19	6-II-تعريف الخلايا الشمسية
19	7-II-مبدأ عمل الخلية الشمسية
20	8-II-أجيال الخلايا الشمسية
20	8-II-1-1-أنواعها:
20	8-II-1-2-الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون أحادي البلورية
21	8-II-1-3-الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون متعدد البلورات
21	8-II-2-الخلايا الشمسية من الجيل الثاني
22	8-II-1-2-أنواعها
22	8-II-2-2-الخلايا الشمسية الكادميوم تيلورايد (CdTe)
22	8-II-2-3-الخلايا الشمسية سيلينيد جاليوم النحاس والإنديوم (CIGS)
23	8-II-2-4-الخلايا الشمسية غير المتبلورة المصنوعة من السيليكون (Si-a)
24	8-II-2-5-الخلايا الشمسية الكهروضوئية العضوية (OPV)
24	8-II-3-الخلايا الشمسية من الجيل الثالث
26	9-II-مكونات الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة
26	9-II-1-طبقة النافذة
26	9-II-2-طبقات ETL و HTL : (طبقة نقل الإلكترون وطبقة نقل الثقب)
27	9-II-3-طبقة الامتصاص
27	10-II-مكونات نظام الطاقة الشمسية
27	11-II-الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية :
27	11-II-1-تيار الدارة القصيرة I_{cc}
28	11-II-2-فرق كمون الدارة المفتوحة V_{oc}
28	11-II-3-استطاعة الخلية
29	11-II-4-الاستطاعة القصوى P_{max}
30	11-II-5-الاستطاعة المثالية P_{ideal}
30	11-II-6-معامل الشكل FF
30	11-II-7-مردود الخلية
30	12-II-إيجابيات و سلبيات استخدام الطاقة الشمسية
30	12-II-1-إيجابياتها
30	12-II-2-سلبياتها
32	مراجع الفصل الثاني

الفصل الثالث: نمذجة عديدة لآداء الخلايا الشمسية ثلاثية الطبقات SnO_2 /CdS/CdTe

34	III.1.تمهيد:
34	III.2. المعادلات الأساسية المستعملة لمحاكاة الخلايا الشمسية
34	III.1.2. معادلة بواسون

34	..... معادلة الاستمرارية III.2.2
35	..... برنامج محاكات الخلايا الشمسية SCAPS III.3
36	..... واجهة البرنامج III.3
39	..... تحليل النتائج و مناقشتها: III.4
39	..... بنية الخلية الشمسية SnO2 /CdS/CdTe III.1.4
40	..... تحديد الثوابت و الشروط الأولية لمحاكاة الخلية الشمسية III.2.4
40	..... تأثير الإضاءة و الإضلام على الخواص تيار-جهد للخلية الشمسية: III.4.3
41	..... تأثير تغيير درجة الحرارة على الخواص تيار-جهد لخلية شمسية III.4.4
42	..... تأثير تغيير درجة الحرارة على جهد الدارة المفتوحة و تيار الدارة القصير: III.4.5
43	..... تأثير تغيير درجة الحرارة على عامل الملئ و الكفاءة للخلية الشمسية III.4.6
45	..... مراجع الفصل الثالث
47	..... الخاتمة
48	..... الملخص

قائمة الأشكال

- الشكل (1-I) نجم الشمس 6
- الشكل (2-I) مسار الأشعة الشمسية حتى وصولها إلى الأرض 10
- الشكل (1-II) رسم تخطيطي يوضح الشبكة البلورية وكيف تؤدي حركة الإلكترون من نطاق التكافؤ إلى إحداه ثقب 17
- الشكل (2-II) المنشط N مع الفوسفور 18
- الشكل (3-II) منشط P مع البورون 18
- الشكل (4-II) الوصلة P-N 19
- الشكل (5-II) الخلايا الشمسية أحادية البلورية والسيليكون متعددة البلورات 21
- الشكل (6-II) الخلايا الشمسية الكادميوم تيلورايد (CdTe) 22
- الشكل (7-II) الخلايا الشمسية سيلينيد النحاس والإنديوم والجاليوم (CIGS) 23
- الشكل (8-II) الخلايا الشمسية السيليكونية غير المتبلورة (a-Si) 23
- الشكل (9-II) الخلايا الشمسية الكهروضوئية العضوية (OPV) 24
- الشكل (10-II) الخلايا الشمسية العضوية 25
- الشكل (11-II) طبقات مختلفة من الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة 26
- الشكل (12-II) مكونات الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة 27
- الشكل (13-II) الخاصية الكهربائية للخلية الشمسية 29
- الشكل (14-II) تغير الاستطاعة P المولدة من طرف الخلية بدلالة فرق الكمون V 29
- شكل (1-III) أيقونة برنامج SCAPS 36
- شكل (2-III) الواجهة الأساسية لبرنامج SCAPS 37
- شكل (3-III) نافذة مكونات الخلية الشمسية 37
- شكل (4-III) الوسائط الخارجية لعمل الخلية 38
- شكل (5-III) مخرجات الخلية الشمسية 38
- شكل (6-III) نافذة المنحنيات والنتائج 39
- شكل (7-III) بنية الخلية الشمسية 39
- شكل (8-III) منحني تغيرات كثافة التيار بدلالة جهد الخلية الشمسية في الظلام وتحت الإضاءة 41
- شكل (9-III) منحني تغيرات كثافة التيار بدلالة الجهد الخلية شمسية أجل قيم مختلفة لدرجة الحرارة 42
- شكل (10-III) منحني تغيرات كل من تيار الدارة القصير وجهد الدارة المفتوح للخلية شمسية من أجل قيم مختلفة لدرجة الحرارة 44
- شكل (11-III) منحني تغيرات كل من عامل الملئ والكفاءة للخلية شمسية من أجل قيم مختلفة لدرجة الحرارة 44

قائمة الجداول

- جدول II-1 أنواع الخلايا الشمسية.....25
- جدول III-1 الثوابت الفيزيائية المستعملة لمحاكات الخلية الشمسية.....40
- جدول III-2 نتائج محاكات الخلية الشمسية.....42

المقدمة العامة

تسارع العمل خلال العقود الأخيرة في تطوير مصادر الطاقة المتجددة لتكون مصادر واعدة في بناء اقتصاد طاقة مستدام وصديق للبيئة نظرا لعدة أسباب منها: الحاجة الماسة لتخفيض الانبعاثات الغازية، تزايد الطلب العالمي على الطاقة، التزايد الحاد في أسعار المشتقات النفطية، عدم استقرار مصادر التزود بالطاقة. تعتبر الطاقة القادمة من الشمس إلى الأرض المصدر الأساسي لمعظم الطاقات على الأرض ويعتمد استغلال الطاقة الشمسية على وسيلة جمعها وعلى كمية الإشعاع الذي يصل إلى سطح الأرض في المنطقة المراد استغلال الطاقة الشمسية بها، وتعتمد قيمة الإشعاع الشمسي الذي يصل الأرض على مقدار ما يعكس ويتشتت ويمتص منه أثناء مساره خلال الغلاف الجوي [1].

حظيت الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة باهتمام أكبر خلال العقود القليلة الماضية لاستخدامها المنخفض للمواد، وطريقة المعالجة عند درجات الحرارة المنخفضة، وتوفر طرق الترسيب المتنوعة، والترسيب على الركائز منخفضة التكلفة. ولكن هناك العديد من القيود التي تحد من خفض تكاليف إنتاج الطاقة منها ندرة المواد المستخدمة في تصنيع الخلايا الشمسية، والتكلفة المرتفعة لبعض المواد، مثل: الانديوم In، التليريوم Te، وبعض منها مواد سامة. إن هذه القيود أثارت مخاوف من استخدام وإنتاج الطاقة الشمسية. لذلك هناك حاجة لتحديد المواد ذات الأغشية الرقيقة التي تتكون من عناصر وفيرة وأقل سمية [2].

يعتبر تيلورايد الكاديوم CdTe من المواد الجيدة المستخدمة في الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة لما لها من مميزات تجعلها مادة امتصاص مثالية تستخدم لتكوين الطبقة الماصة كما أنها مكوناتها متوفرة حيث يتم تحضير هذا النوع من الأغشية بطرق مختلفة منها: التبخر الحراري الفراغي، الرش الكيميائي، وكذلك طريقة الحمام الكيميائي وغيرها من الطرق الفيزيائية والكيميائية [3].

تلعب المحاكاة العددية للخلايا الشمسية دورا في تحسين أداء الخلايا الشمسية وأداء صلاحية النموذج المقترح للخلية الشمسية، كما أنها طريقة مهمة للتنبؤ بتأثير المتغيرات الفيزيائية على أداء الخلية الشمسية وفحص جدوى مكونات الخلية الشمسية كما أنها تقلل من المخاطر والوقت والمال. في هذه الدراسة قمنا بمحاكاة عددية لأداء خلية شمسية مكونة أساسا من ثلاث طبقات رقيقة $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ وهذا باستخدام برنامج المحاكاة

SCAPS-1D (محاكاة سعة الخلايا الشمسية) الإصدار 3.3.0.9. حيث درسنا تأثير كل من الإضاءة والإظلام وكذلك تأثير درجة الحرارة الخارجية على أداء وكفاءة الخلية الشمسية المتمثلة في كثافة تيار الدائرة القصيرة (J_{sc})، جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc})، عامل الشكل (FF) [4,3].

تتكون هذه المذكرة من ثلاث فصول رئيسية: فصلين نظريين الأول سيتم التطرق فيه إلى الإشعاع الشمسي، معلومات عامة حول الشمس والعوامل المؤثرة في توزيع الإشعاع الشمسي على سطح الأرض، أما الفصل الثاني يستعرض فيزياء الخلايا الشمسية ويتناول الخواص العامة لأشباه النواقل أنواع وأجيال الخلايا الشمسية. أما الفصل الأخير سيتم فيه الاهتمام بالمحاكاة العددية للخلية شمسية متكونة أساسا من ثلاث طبقات رقيقة $SnO_2/CdS/CdTe$ وكذلك مناقشة النتائج المتحصل عليها مع ذكر أهم الاستنتاجات المنبثقة من هذا العمل وكذلك الآفاق المستقبلية للبحث في هذا الموضوع.

[1] Mikhaiel Salim Makhoul, Ali Badeea Kaddour, Jasem Yousef, Modeling and Performance Analysis of Stand-Alone Solar System Using a MATLAB with MPPT, Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (39) No. (3) 2017.

[2] سعاد محمد أبوزريية، هاجر علي اشكيران ، تصميم خلية شمسية ذات الأغشية الرقيقة، صديقة للبيئة، و دراسة تأثير درجة الحرارة على خصائصها الكهربائية باستخدام برنامج محاكاة الخلايا الشمسية في بعد واحد، المجلة الدولية للعلوم والتقنية، العدد 33 المجلد 2 ، 2024.

[3] بكوش أسماء ، المحاكات العددية لأداء وكفاءة الخلايا الشمسية ذات الاغشية الرقيقة من نوع CdTe ، مذكرة ماستر ، جامعة ورقلة ، 2022.

[4] دوبة مداني، زيطاري حسن ، نمذجة أداء وكفاءة الخلايا الشمسية القائمة على أساس CZTS باستخدام برنامج SCAPS-1D، مذكرة ماستر ، جامعة ورقلة ، 2022.

الفصل الأول: الأشعاع الشمسي

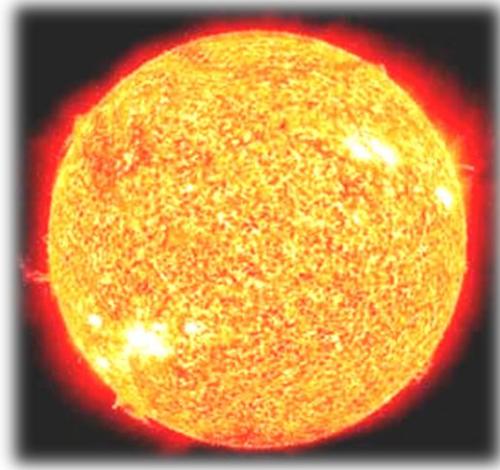
1-1 مقدمة:

إن الطاقة الشمسية تعتبر واحدة من مصادر الطاقة المتجددة حيث أنها تعتمد على الطاقة المستمدة من الشمس , وهي مصدر طاقة متجدد تساعد في توفير المال و الكهرباء بشكل كبير خصوصا على المدى البعيد وبما أن الطاقة الشمسية هي أهم مصادر الطاقة المتجددة خلال القرن القادم فإن جهود كثير من الدول تتوجه لها بمختلف صورها وترصد لها المبالغ اللازمة لتطوير المنتجات والبحوث الخاصة باستغلال الطاقة الشمسية كإحدى أهم مصادر الطاقة البديلة للنفط والغاز ، وقد أعطى النصيب الأوفر في البحوث والتطبيقات مجال تحويل المصدر من الطاقة الشمسية إلى كهرباء وهو ما يعرف باسم Photovoltaics هو أمل الدول النامية في التطور حيث توفر الطاقة الكهربائية من أهم العوامل الرئيسية لإيجاد البنى الأساسية فيها ولا يتطلب إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية إلى مركزية التوليد بل تنتج الطاقة وتستخدم بنفس المنطقة أو المكان وهذا ما سوف يوفر كثيراً من تكلفة النقل والمواصلات وتعتمد هذه الطريقة بصورة أساسية على تحويل أشعة الشمس إلى طاقة كهربائية ، وتوجد في الطبيعة مواد كثيرة تستخدم في صناعة الخلايا الشمسية والتي تجمع بنظام كهربائي وهندسي محدد لتكوين ما يسمى باللوح الشمسي والذي يعرض لأشعة الشمس بزوايا معينة لينتج أكبر قدر من الكهرباء [1].

نستعرض في هذا الفصل أسس الإشعاع الشمسي والطاقة الشمسية وخصائصها ثم نرجع إلى بعض المفاهيم الهامة والمفيدة في التطبيقات العملية للإشعاع الشمسي.

1-2- معلومات حول الشمس:

الشمس هي النجم المركزي للمجموعة الشمسية كما هو مبين في الشكل (1-I) وهي تقريباً كروية وتحوي بلازما حارة متشابكة مع الحقل المغناطيسي، حيث تعتبر أكبر جسم على الإطلاق. تبلغ كتلته 99.8% من كتلة النظام الشمسي ويبلغ قطره حوالي 109 أضعاف قطر الأرض، أي أن حوالي مليون كرة أرضية يمكن وضعها داخل الشمس. تبلغ درجة حرارة سطح الشمس حوالي 10000 درجة فهرنهايت (5500 درجة مئوية)، بينما تصل درجات الحرارة في القلب إلى أكثر من 27 مليون فهرنهايت (15 مليون درجة مئوية)، مدفوعة بالتفاعلات النووية. ويحتاج المرء إلى تفجير 100 مليار طن من الديناميت كل ثانية لتناسب مع الطاقة التي تنتجها الشمس [1].



الشكل (I-1): نجم الشمس

1 - 3- الإشعاع الشمسي

يعد الإشعاع الشمسي المصدر الرئيسي للطاقة في الغلاف الجوي إذ يساهم بأكثر من 99.97% من الطاقة المستغلة بالغلاف الجوي وعلى سطح الأرض أما المصادر الباقية للطاقة والمتمثلة بطاقة باطن الأرض وطاقة النجوم والمد والجزر فأنتها لا تسهم الا بقسط ضئيل جدا لا يزيد عن 0.3% ، والطاقة الشمسية هي المسؤولة عن جميع العمليات التي تحدث في الغلاف الجوي كالأضطرابات الجوية والسحب والأمطار والرياح والبرق والرعد وغيرها وكما انها السبب الرئيسي في الحركة المستمرة للغلاف الجوي وتقلب الطقس وتغيره ، وكما أن الاختلافات الرئيسية القائمة بين مكان وآخر هي في وفرة الطاقة الشمسية ، ويعرف الإشعاع بأنه انتقال الطاقة غير المحسمة وانتشارها كما هو الحال في الطاقة الحرارية والضوئية والكهرومغناطيسية ، وأحيانا يطلق على هذا النوع من الإشعاع اسم الإشعاع الأثيري مصدرها الشمس والشمس كتلة غازية ملتهبة أكبر من قطر الأرض بمئة مرة وحجمها بقدر مليون مرة بحجم الأرض وتقدر درجة حرارة سطحها بنحو 6000 مرة بينما تبلغ حرارة مركزها بأكثر من 20 مليون مرة ، وعلى ذلك يمكن تقسيم الإشعاع إلى ثلاثة أنواع رئيسية هي [2]:

أولاً: الإشعاع الشمسي وينقسم بدورة إلى ثلاثة أنواع من الأشعة أيضاً هي:

1- الأشعة فوق البنفسجية

2- الأشعة الضوئية

3- الأشعة الحرارية

ثانياً: الإشعاع الأرضي

ثالثاً: الإشعاع الجوي

كما سبق القول فإن الإشعاع الشمسي عبارة عن مجموعة من الإشعاعات الأثرية مصدرها الشمس وأنه يتألف من ثلاثة أنواع رئيسية من الأشعة هي:

1-3-1 - الأشعة فوق البنفسجية

وهي أشعة غير مرئية (أي لا يستطيع أن يراها الإنسان بعينه المجردة)، وتمثل هذه الأشعة 9% من جملة الإشعاع الشمسي، ويتراوح طول موجاتها ما بين حوالي 0.2 إلى 0.4 ميكرون ولهذا الأشعة عدة فوائد منها أنها تساعد على نمو الكائنات الحية، وكذلك تساعد في علاج بعض الأمراض كالسل والكساح ولذلك تقام المصحات وحمامات الشمس في المناطق الجبلية المرتفعة حيث الجو النقي والصافي، والذي يساعد على وصول هذه الأشعة إلى سطح الأرض لأن العوالق (الغبار) يقلل من نسبتها [2]..

1-3-2 - الأشعة الضوئية

أشعة مرئية وهي التي تعرف بضوء النهار، وتؤلف حوالي 41%. من إجمالي الإشعاع الشمسي ، وتتراوح أطوال موجاتها ما بين 0.4-0.7 ميكرون ، وتصل إلى أقصى حد لها في منتصف النهار وتزيد في الصيف عنها في الشتاء ، وتتصل اتصالاً وثيقاً بنمو النباتات وعملية إزهارها ، وتتكون هذه الأشعة من ألوان متعددة أهمها البنفسجية والزرقاء والخضراء والصفراء والحمراء ، والتي ينتج عن اختلاطها مع بعضها تكون الضوء الأبيض الذي نعرفه بواسطة منشور زجاجي ، أو عند سقوط هذه الأشعة على السحب العالية وظهورها بشكل قوس ضوئي ملون يعرف باسم قوس قزح ، والذي ينتج عن انتشار هذه الأشعة فوق أسطح البلورات الثلجية المكونة للسحب العالية [2] .

1-3-3 - الأشعة الحرارية

وتسمى أيضاً بالأشعة تحت الحمراء وهي أشعة غير مرئية وتؤلف أعلى نسبة من نسب أشعة الإشعاع الشمسي، حيث تمثل 50% من إجمال الإشعاع الشمسي وتتراوح أطوال موجاتها ما بين 0.7 إلى 0.8 ميكرون، وهي بذلك أطول أنواع الأشعة والممثلة للإشعاع الشمسي من حيث الموجات. وتخرج هذه الأشعة كلها من جسم الشمس وتندفع في الفضاء في شكل موجات تنتشر بسرعة الضوء المعروفة (311 ألف كم / ثانية)، ولكن لا يصل

إلى سطح الأرض من هذه الأشعة إلا القدر الضئيل والذي يقدر بحوالي جزء من 2 مليار جزء، ونجد أن هذا الجزء لا يصل كاملاً إلى سطح الأرض، حيث أن الأوكسجين الذرى في طبقة الأيون وسفير وطبقة الأوزون يعملان على امتصاص جانباً من الأشعة فوق البنفسجية (حول 2.1 % من الإشعاع الشمسي)، فإن الإشعاع الشمسي يمثل 100 %، يفقد من هذه النسبة حوالي 40 % وذلك بالانعكاس من عناصر الجو، بينما تقدر نسبة ما يمتصه الغلاف الجوي بما يحتويه من مواد عالقة حوالي 15 % من الإشعاع الشمسي، وكذلك يتم عكس 10 % من مقدار الإشعاع الشمسي بواسطة المباني والأشجار وباقي الموجودات على سطح الأرض، ونجد أن هذه النسبة تختلف من مكان لآخر وذلك لاختلاف طبيعة غطاء سطح الأرض، فمثلاً الجهات المغطاة بالحشائش تعكس ما بين 3 % إلى 10 % من الأشعة التي تصل إليها، بينما يعكس السطح المغطى بالثلوج والجليد ما بين 50 % إلى 90 % من نسبة الإشعاع الشمسي الواصل إليها وهكذا، ومن ثم فإنه ما يصل إلى سطح الأرض من الإشعاع الشمسي ويؤثر فيه يبلغ حوالي 35 % من مقدار الإشعاع الشمسي [2-3].

1-4- الإشعاع الأرضي

قبل أن يصل الإشعاع الشمسي إلى الأرض يكون قد فقد نصيباً كبيراً منه في الغلاف الغازي البعيد وكذلك في الغلاف القريب من سطح الأرض بواسطة الامتصاص من ناحية والانعكاس من ناحية أخرى ، فالمعروف أن سطح الأرض يمتص قدرًا من أشعة الشمس التي تسقط عليه بينما يرد الباقي إلى الفضاء بتأثير الألبيدو الأرضي ، ويقوم سطح الأرض بتحويل الأشعة الشمسية التي امتصها إلى طاقة حرارية تنطلق إلى الغلاف الجوي في شكل موجات طولية ، وبالتالي يستمد الغلاف الجوي حرارته من هذه الموجات الطويلة الصادرة من سطح الأرض في الوقت الذي لم يستطع الهواء امتصاص الموجات القصيرة المكونة لأشعة الشمس عند احتراقها له ، ولذلك يمكن القول بأن الهواء يستمد حرارته من الإشعاع الأرضي .

ويختلف الإشعاع الأرضي عن الإشعاع الشمسي في أن أشعته غير مرئية وحرارية وطويلة (يتراوح طول موجاتها ما بين 3 إلى 80 ميكرون) بينما تتفاوت أطوال موجات الإشعاع الشمسي ما بين 0.17 إلى 4.0 ميكرون ، ويتميز كذلك الإشعاع الأرضي عن الإشعاع الشمسي بأنه يستمر طوال الأربع والعشرين ساعة (طول اليوم . ليلاً ونهاراً) في حين أن الإشعاع الشمسي يبدأ مع شروق الشمس وينتهي عند غروبها ، كما يتزايد الإشعاع الأرضي تدريجياً بعد شروق الشمس ويبلغ أقصاه بعد الظهر (الزوال) بقليل ، ويرجع ذلك لأن الأرض تستمر محافظة على حرارتها فترة من الوقت بعد تعامد الشمس في وقت الزوال ، بينما يأخذ الإشعاع الشمسي في الهبوط تدريجياً بعد أن يمر وقت الزوال مباشرة [2-3].

1-5- الإشعاع الجوي

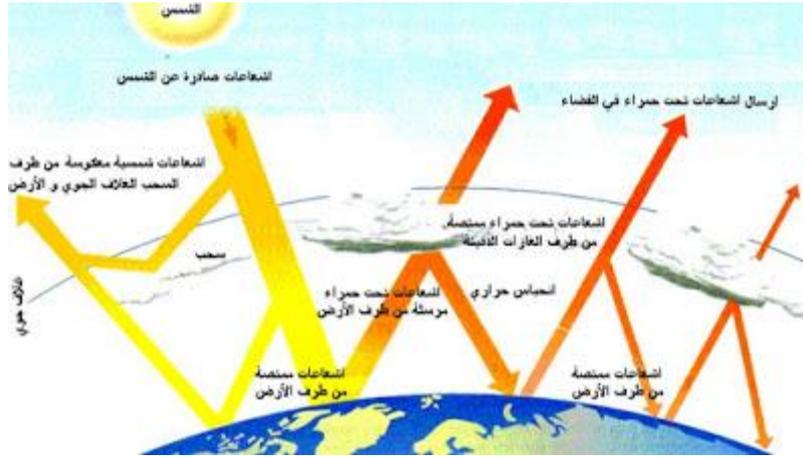
يقصد بالإشعاع الجوي تلك الموجات الإشعاعية التي تنطلق من الغازات التي يتكون منها الغلاف الغازي وما به من المواد العالقة سواء كانت ذرات الغبار أو ذرات بخار الماء ، ويجب أن نعرف أن المصدر الأصلي لهذا الإشعاع الجوي هو ما استمدته مكونات الغلاف الغازي من الإشعاع الشمسي (كما سبق القول) ، وبعد ذلك تقوم الغازات والمواد العالقة بإشعاعه مرة ثانية في جميع الاتجاهات في صورة اشعاعات حرارية وضوئية ، ويصل جزء من هذه الإشعاعات إلى سطح الأرض ، خاصة تلك الإشعاعات الحرارية التي تنطلق من بخار الماء وغاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الغازي ، ويوضح النسب المئوية للإشعاعات التي تصل من الجو إلى سطح الأرض [2-4].

1-6- حجم الطاقة الشمسية القادمة إلى الأرض

يستقبل كوكب الأرض 174 بيتا واط من الإشعاعات الشمسية القادمة إليه ، الإشعاع الشمسي عند طبقة الغلاف الجوي العليا وينعكس ما يقرب من 30% من هذه الإشعاعات عائدة إلى الفضاء بينما تمتص النسبة الباقية بواسطة السحب والمحيطات والكتل الأرضية كما هو مبين في الشكل (I-2). ينتشر معظم طيف الضوء الشمسي الموجود على سطح الأرض عبر المدى المرئي وبالقرب من مدى الأشعة تحت الحمراء بالإضافة إلى انتشار جزء صغير منه بالقرب من مدى الأشعة فوق البنفسجية تمتص مسطحات اليابسة والمحيطات والغلاف الجوي الإشعاعات الشمسية، ويؤدي ذلك إلى ارتفاع درجة حرارتها. يرتفع الهواء الساخن الذي يحتوي على بخار الماء الصاعد من المحيطات مسبباً دوران الهواء الجوي أو انتقال الحرارة بخاصية الحمل في اتجاه رأسي. وعندما يرتفع الهواء إلى قمم المرتفعات، حيث تنخفض درجة الحرارة، يتكثف بخار الماء في صورة سحب تمطر على سطح الأرض، ومن ثم تتم دورة الماء في الكون. تزيد الحرارة الكامنة لعملية تكثف الماء من انتقال الحرارة بخاصية الحمل، مما يؤدي إلى حدوث بعض الظواهر الجوية، مثل الرياح الأعاصير والأعاصير المضادة. وتعمل أطراف ضوء الشمس التي تمتصها المحيطات وتحتفظ بها الكتل الأرضية على أن تصبح درجة حرارة سطح الأرض في المتوسط 14 درجة مئوية. ومن خلال عملية التمثيل الضوئي الذي تقوم به النباتات الخضراء، يتم تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية، مما يؤدي إلى إنتاج الطعام والأخشاب والكتل الحيوية التي يُستخرج منها الوقود الحفري [2-3].

يصل إجمالي الطاقة الشمسية التي يقوم الغلاف الجوي والمحيطات والكتل الأرضية بامتصاصها إلى حوالي 3.850.000 كوتليون جول في العام وفي عام 2002، زادت كمية الطاقة التي يتم امتصاصها في ساعة واحدة عن كمية الطاقة التي تم استخدامها في العالم في عام واحد يستهلك التمثيل الضوئي حوالي 3.000 كوتليون جول من الطاقة الشمسية في العام في تكوين الكتل الحيوية. تكون كمية الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض كبيرة

للغاية، لدرجة أنها تصل في العام الواحد إلى حوالي ضعف ما سيتم الحصول عليه من مصادر الطاقة الموجودة على الأرض مجتمعة معاً، كالفحم والبتروول والغاز الطبيعي واليورانيوم الذي يتم استخراجها من باطن الأرض سوف يظهر في الجدول الخاص بمصادر الطاقة أن الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح أو طاقة الكتلة الحيوية ستكون كافية لتوفير كل احتياجاتنا من الطاقة، ولكن الاستخدام المتزايد لطاقة الكتلة الحيوية له تأثير سلبي على الاحتباس الحراري وزيادة أسعار الغذاء بصورة ملحوظة بسبب استغلال الغابات والمحاصيل في إنتاج الوقود الحيوي لقد أثارت طاقة الرياح والطاقة الشمسية موضوعات أخرى، باعتبار أنها من مصادر الطاقة المتجددة [2,4].



الشكل (2-1): مسار الأشعة الشمسية حتى وصولها إلى الارض

1-7- العوامل المؤثرة في توزيع الإشعاع الشمسي على سطح الأرض:

حيث أن الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض يتأثر بعدة عوامل من أهمها ما يلي:

1- طبيعة الغلاف الغازي والمواد العالقة به، ويتوقف ذلك على عاملين هما:

أ- سمك طبقة الهواء التي تخترقها الأشعة الشمسية.

ب- مقدار ما يحتويه الغلاف الجوي من المواد العالقة وخاصة بخار الماء، الذي له القدرة على امتصاص قدرًا أكبر من الأشعة تحت الحمراء عند نفاذ الإشعاع الشمسي خلال الغلاف الجوي في اتجاه الأرض، وقدرته على عكس جزء مما امتصه من شعاع الشمس في شكل إشعاع ذاتي نحو الأرض، مما يساعد على رفع درجات حرارة الهواء، هذا إلى جانب ماله من قدرة على امتصاص 90% من الأشعة الحرارية التي يشعها سطح الأرض، ويعني ذلك أن لبخار الماء في الهواء القدرة على تنظيم نفاذ كل من الإشعاعين الشمسي والأرضي، وبالتالي يحفظ لسطح الأرض حرارته.

2- تركيز أشعة الشمس أو الزاوية التي تصل بها أشعة الشمس إلى الأرض. نلاحظ أن شعاعاً يصل إلى سطح الأرض في زاوية مائلة تكون قوته أقل من إشعاع يصل عمودياً على سطح الأرض، وذلك لأن الإشعاع المائل يخترق مسافة أطول في الغلاف الجوي فيفقد جزءاً أكبر من قوته، بينما الإشعاع العمودي الذي يخترق مسافة أقصر يفقد جزءاً أقل، هذا فضلاً عن أن الإشعاع المائل يتوزع على مسافة أكبر من سطح الأرض فيقل تركيزه في حين أن الإشعاع العمودي يتركز في مساحة أصغر فتزداد قوته.

3 - طول المدة التي تسطع فيها الشمس فوق الأفق، ويتغير ذلك تبعاً للفصول وتبعاً للموقع بالنسبة لدوائر العرض، من هذا نستنتج أن كمية الحرارة التي تكتسبها الأرض أثناء النهار الطويل أكثر مما لو كان النهار قصير، هذا فضلاً عن أن خطوط العرض الواحدة عادة تكتسب كمية واحدة من الحرارة، وباختلاف خطوط العرض تختلف درجات الحرارة، هذا إذا ما تساوت الظروف الأخرى التي تؤثر في حرارة خط العرض.

1-8- التوزيع الجغرافي للإشعاع الشمسي:

يؤثر الغلاف الجوي في طاقة الإشعاع الشمسي بالنسبة للككرة الأرضية، فهو يعمل على تقليل هذه الطاقة، وأن جملة ما تكتسبه الأرض وجوها من هذه الطاقة في السنة لا بد أن يتعادل مع جملة ما يرتد منها إلى الفضاء، وأن هذا التعادل هو الذي يجعل للأرض ميزانية حرارية ثابتة من سنة لأخرى، ولكن ليس معنى هذا التوازن أن تكون كل أجزاء سطح الأرض أو في كل أيام السنة متعادلة في مكسبها أو خسارتها للإشعاع الشمسي، لأن توزيع هذا الإشعاع يختلف من مكان لآخر، ومن فصل إلى آخر نتيجة لتأثره بعدة عوامل أهمها ما يلي:

1- اختلاف الألبيدو الأرضي من مكان إلى آخر ومن وقت لآخر [2-4].

2- اختلاف البعد بين الأرض والشمس على حسب الفصول خاصة في الصيف عنه في الشتاء.

3- اختلاف طول الليل والنهار في العروض المختلفة وفي الفصول المختلفة كما سبق ذكره.

4- اختلاف الزاوية التي تسقط بها أشعة الشمس على سطح الأرض.

ويختلف الألبيدو الأرضي من مكان إلى آخر ومن فصل إلى آخر على حسب كمية السحب ودرجة صفاء الجو وما يغطي الأرض من غطاء نباتي أو ثلوج أو جليد.. الخ كما سيرد ذكره، أما عن العامل الثاني فإنه يلاحظ أن الأرض تكون أبعد عن الشمس في أول يوليو بنحو 4.8 مليون كيلو متر عنها في أول ديسمبر، بينما يرتبط

العاملين الثالث والرابع، بالموقع بالنسبة لدوائر العرض ارتباطاً مباشراً، ففي فصل الصيف يتزايد طول النهار على حساب طول الليل كلما اتجهنا نحو القطب حتى يصل طوله في يوم الانقلاب الصيفي (21 يونيو) إلى 24 ساعة عند الدائرة القطبية وستة أشهر عند القطب ، وتتبدل الصورة في فصل الشتاء .

مراجع الفصل الأول

[1] <https://www.baldati.com/wallposts.php?action=viewnewspost&newspostid=482>

[2] https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/pubdoc_2_5886_1669.docx 3570,03,2

[3] خلف الله عمر قاسم , نظرية الإشعاع الشمسي، جامعة أوبسالا، السويد 2021.

[4] سماحي سهيلة، فعالية أداء الخلايا الشمسية الكهروضوئية في ورقلة وتأثير شدة الإشعاع الشمسي و العوامل المناخية

عليها، مذكرة ماستر، جامعة ورقلة، 2016.

الفصل الثاني : فيزياء الخلايا الشمسية

II-1-تمهيد

الطاقة الشمسية هي من اهم المصادر المرشحة لكي تكون مصدر طاقة المستقبل. لأنها مصدر طاقة لا ينضب ونظيف. كما تعتبر مصدر طاقة متزايد يمكن ان يغطي احتياجات الكهرباء العالمية. في الواقع يمكن تحويل الإشعاع الشمسي إلى كهرباء من خلال المركبات التي تسمى الخلايا الشمسية. يتضمن هذا الفصل بعض التعريفات والمفاهيم والخصائص لفيزياء انصاف النواقل، كما يضم بعض المفاهيم النظرية حول الخلايا الكهروضوئية وتطبيقاتها على الخلايا الشمسية أنواع وأجيال الخلايا الشمسية.

II-2-انصاف النواقل (أشباه الموصلات)

أنصاف النواقل هي مواد تقع بين النواقل والعوازل من حيث الناقلية الكهربائية، تتميز بوجود ثلاث عصابات وهي عصابة النقل وعصابة التكافؤ بينهما العصابة الممنوعة، وتعد أنصاف النواقل عند درجة الحرارة المنخفضة عازلة، بينما تصبح موصلة عند رفع درجة حرارتها، وتملك أنصاف النواقل عددا من الخواص التي تجعلها في غاية الأهمية في التطبيقات العلمية فمن تلك الخواص

- ناقليتها تتأثر بالحرارة والضوء والمجال المغناطيسي ووجود كميات ضئيلة من الشوائب
- بها نوعين من حاملات الشحنة هما الالكترونات والفجوات.
- يظهر نصف ناقل ذو النقاوة العالية ناقلية ذاتية.
- القدرة الكهروحرارية التي تولدها هذه المواد عالية بالمقارنة مع تلك التي تنتج من المعادن

II-2-1-الموصلات

هي المواد التي تسمح بمرور التيار من خلالها. تتميز هذه المنتجات بمقاومة كهربائية منخفضة جداً وتتوفر في مجموعة كبيرة ومتنوعة لها خصائص مختلفة. كما أن عدد إلكترونات التكافؤ أقل من أربعة. يتداخل نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل مع بعضهما البعض. ومن الأمثلة على ذلك النحاس والألمنيوم والفضة والذهب والبرونز وما إلى ذلك [1].

II-2-2-أشباه الموصلات

هي المواد التي تمتلك مقاومة كهربائية تقع بين الموصلات والعوازل. يتم استخدامها لتصنيع الثنائيات والترانزستورات. كما أن عدد إلكترونات التكافؤ يساوي أربعة. توجد فجوة طاقة محظورة صغيرة تبلغ حوالي 1 فولت بين التوصيل ونطاق التكافؤ. أمثلة: الجرمانيوم، السيليكون، السيلينيوم، إلخ... [1].

II-2-3-العوازل

هي المواد التي لا تسمح بمرور التيار من خلالها دون خسارة ملحوظة. لديهم مقاومة كهربائية عالية جداً ومتوفرة أيضاً في مجموعة كبيرة ومتنوعة لتغطية التطبيقات المختلفة. يتم استخدام بعض المواد العازلة المحددة لغرض تخزين الطاقة الكهربائية وتسمى المواد العازلة مثل الميكا والسيراميك والورق وغيرها. وتستخدم هذه المواد كمادة عازلة في المكثفات. كما أن عدد إلكترونات التكافؤ أكثر من أربعة. فجوة الطاقة بين التكافؤ ونطاق التوصيل كبيرة جداً (أكثر من 5-6 فولت). أمثلة: الميكا والمطاط والسيراميك والزجاج والماس وما إلى ذلك [1].

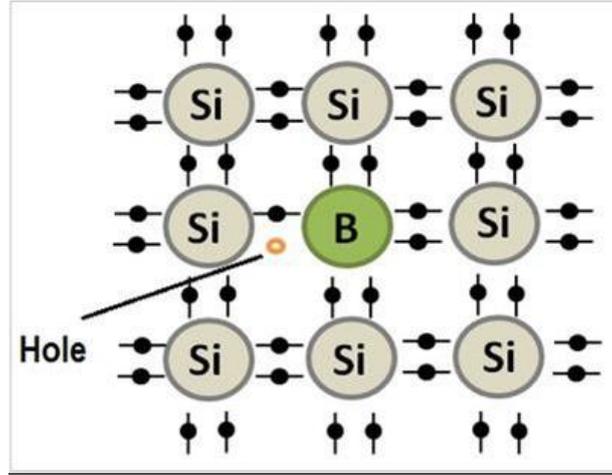
II-3-الالكترونات والثقوب

توجد البلورة عند درجة الحرارة الصفر المطلق في حالتها المثالية وتعمل كأنها عازل حيث لا يوجد أي الكترونات حرة في منطقة التوصيل لنقل الكهربائي. وعند درجة حرارة الغرفة فإن بعض الروابط التساهمية تتحطم بسبب الطاقة الحرارية المسلطة على البلورة. تحطيم الروابط التساهمية تؤدي إلى مغادرة الإلكترون من مكانه ويصبح بتالي حر بتنقله داخل البلورة بعد انتقال الالكترونات من مكانه يبقى فراغ يسمى ثقب إن أهمية هذه الثقوب في أنصاف النواقل تعادل تماماً أهمية للإلكترونات لأنها تستخدم كإلكترون في النقل الكهربائي كما هو مبين في الشكل (II-1) [2].

يمكن توضيح آلية عمل الثقوب كنواقل على النحو التالي:

1- عندما يتولد ثقب ما يسهل على أي إلكترون مجاور أن يتحرك ليملاً هذا الثقب وبدوره يتحرك مكانه ثقب آخر عندئذ نقول إن هناك حركة لهذه الثقوب في الاتجاه المعاكس لحركة الالكترونات.

2- حركة الثقوب هذه تعني حركة الشحنة السالبة في الاتجاه المعاكس في حركة الالكترونات بنفس المسافة، ولذلك يمكن أن نعتبر أن ثقب جسيمة ذات شحنة موجبة تساوي شحنة الإلكترون. وفي الأخير يمكن اعتبار أن الثقوب ناقلات ذاتية التحرك تشكل بحركتها تيار كهربائي.



الشكل (1-II) رسم تخطيطي يوضح الشبكة البلورية وكيف تؤدي حركة الإلكترون من نطاق التكافؤ إلى إحداث ثقب

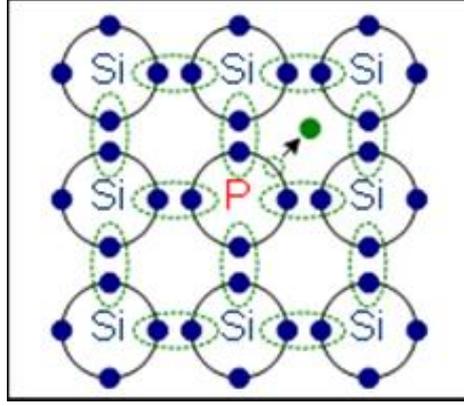
4-II-التطعيم (الاشابة)

هي تقنية تهدف الى تعديل في الطاقة المطلوبة لجعل أشباه الموصلات أكثر او اقل موصلة وهو عبارة عن حقن ذرات منتقاة جيدا في بلورات أشباه الموصلات للتحكم في شدة ناقليتها وجعلها إما أكثر ناقلية أو اقل ناقلية. الفائدة من عملية التطعيم هو التحكم في شدة الناقلية لأشباه الموصلات. إذا لم يكن شبه موصل بدون تطعيم يسمى شبه موصل نقي في الحالة المعاكسة إذا كان شبه موصل به تطعيم يطلق اسم شبه موصل خارجي لأنه يحتوي بداخله على ذرات خارجية [3].

5-II-أنواع التطعيم

1-5-II-التطعيم من نوع سالب (N)

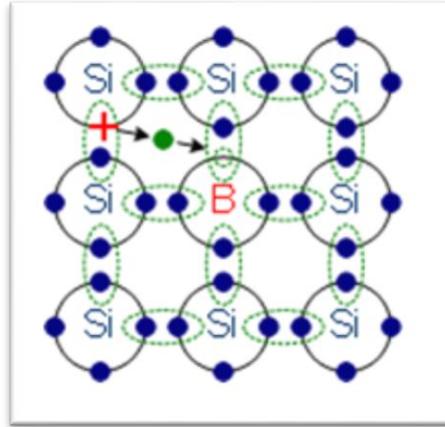
نظرا لان ذرة السيلكون تحتوي على أربع الكترونات في المدار الاخير فانه يمكننا حقنها بمادة خارجية بها خمس الكترونات سترتبط ذرة هذه المادة بعد ذلك في البلورة مع أربع روابط ولكن سيكون لها الكترون إضافي غالبا ما يتم استخدام عنصر الفوسفور نظرا لان هذا النوع من التطعيم يجلب الكترونا إضافيا بالتالي يصبح عندنا شبه موصل محقون سليبا من نوع سالب من نوع N ، كما هو مبين في الشكل (2-II) [3].



الشكل (2-II) المنشط N مع الفوسفور

II-5-2- التتطعيم من نوع موجب (P)

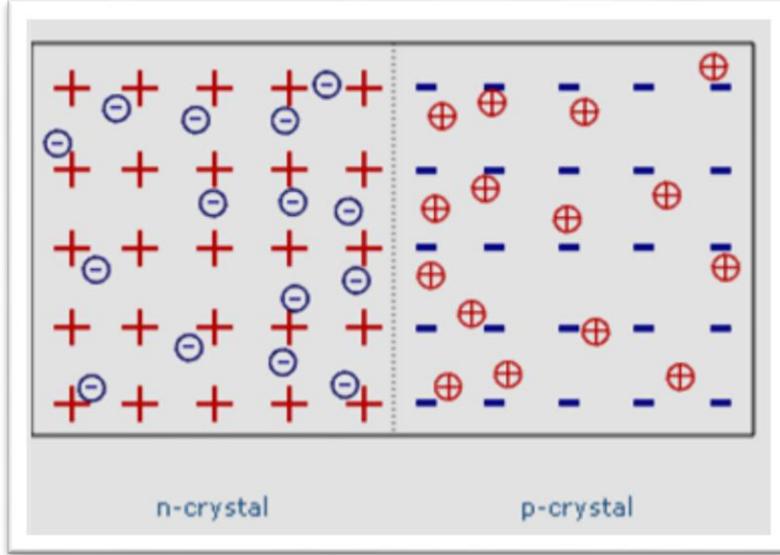
بالنسبة للتتطعيم من نوع P يتم استخدام مادة البور الذي يحتوي على ثلاث الكترولونات فقط في المدار الأخير سيتم التقاط البور في بلورة السليسيوم ذات أربع روابط لكن أحد الروابط ستفقد الكترولونا لذلك ستكون شاردة موجبة لأنها فقدت شحنة سالبة ومن هنا جاء تتطعيم من نوع P كما هو مبين في الشكل (3-II). [3]



الشكل (3-II) منشط P مع البورون

II-5-3- الوصلة موجب سالب (N-P)

هو عبارة عن مركب الكترولوني يصنع من اثنين من أشباه الموصلات المطعمة بنوع مختلف أحدهما خضع العملية التتطعيم من نوع P والآخر خضع للتتطعيم من النوع N ، عمليا يعرف بصمام ثنائي القطب (ديود) وهو مكون يسمح للتيار بالمرور في اتجاه واحد ويعيقه في الاتجاه المعاكس ، كما هو مبين في الشكل (4-II) [3].



الشكل (4-II) الوصلة P-N

6-II-تعريف الخلايا الشمسية

تعتمد الخلايا الكهروضوئية أو الخلايا الشمسية على تقنيات أشباه الموصلات التي تحول الضوء من الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية. عندما يتعرض سطح الخلية الشمسية لأشعة الشمس، والتي يثير إلكترونات المادة شبه الموصلة، مما يؤدي إلى تدفقها وإنتاج تيار مباشر (DC) المجال الكهربائي. ويمكن بعد ذلك تغذية الكهرباء المنتجة في الشبكة الكهربائية واستخدامها لتشغيل الأجهزة الإلكترونية، أو استخدامها لإعادة شحن البطاريات. ونظرًا لقدرتها على إنتاج طاقة نقية ومتجددة من الشمس، فقد ظهرت الخلايا الشمسية كمصدر هام للطاقة المتجددة في السنوات الأخيرة [4].

7-II-مبدأ عمل الخلية الشمسية

يعتمد مبدأ عمل الخلايا الشمسية على التأثير الكهروضوئي. يمكن تقسيم التأثير الكهروضوئي إلى ثلاثة إجراءات أساسية [5]:

1. امتصاص الفوتونات في أشباه الموصلات الإلكترونية ذات الوصلة p-n لتوليد حاملات الشحنة (أزواج ثقب الإلكترون). إن امتصاص فوتون بطاقة ($E = h\nu$) أعلى من طاقة الفجوة 'Eg' لمادة شبه موصلة مخدرة يعني أن طاقته تُستخدم لإثارة إلكترون من نطاق التكافؤ 'Ev' إلى نطاق التوصيل 'Ec' تاركًا فراغ (ثقب) على مستوى الستارة. يتم إعطاء طاقة حركية إضافية للإلكترون أو الثقب بواسطة طاقة الفوتون الزائدة ($h\nu - h\nu_0$). هو

الحد الأدنى من الطاقة أو دالة العمل لأشباه الموصلات اللازمة لتوليد زوج من ثقب الإلكترون. دالة الشغل هنا تمثل فجوة الطاقة. تتبدد الطاقة الزائدة على شكل حرارة في أشباه الموصلات.

2. ما يترتب على ذلك من فصل حاملات الشحنة المولدة بالضوء. في الدائرة الشمسية الخارجية، يمكن أن تتدفق الثقوب بعيداً عن الوصلة عبر المنطقة p والإلكترونات يمكن أن تتدفق عبر المنطقة n وتمر عبر الدائرة قبل أن تتحد مع الثقوب.

3. وأخيراً، يمكن استخدام الإلكترونات المنفصلة لتشغيل دائرة كهربائية. وبعد مرور الإلكترونات عبر الدائرة، فإنها تتحد من جديد مع الثقوب.

II-8-8-أجيال الخلايا الشمسية

هناك ثلاثة أجيال من الخلايا الشمسية، ولكل منها خصائصه ومزاياه الفريدة:

II-8-1-الجيل الأول من الخلايا الشمسية

وهي الخلايا الكهروضوئية القائمة على السيليكون بحيث أنها أول قطاع من الخلايا الكهروضوئية يدخل السوق، وذلك باستخدام معلومات المعالجة والمواد الخام التي توفرها صناعة الإلكترونيات الدقيقة. وتشكل الخلايا الشمسية المعتمدة على السيليكون الآن أكثر من 80% من القدرة المركبة في العالم وتبلغ حصتها في السوق 90%. ونظراً لكفاءتها العالية نسبياً، فهي الخلايا الأكثر استخداماً. يشتمل الجيل الأول من الخلايا الكهروضوئية على مواد تعتمد على طبقات بلورية سميكة مكونة من السيليكون Si. يعتمد هذا الجيل على السيليكون الأحادي والبلوري ومتعدد البلورات، بالإضافة إلى الوصلات الفردية (III-V GaAs) [6].

II-8-1-1-أنواعها:

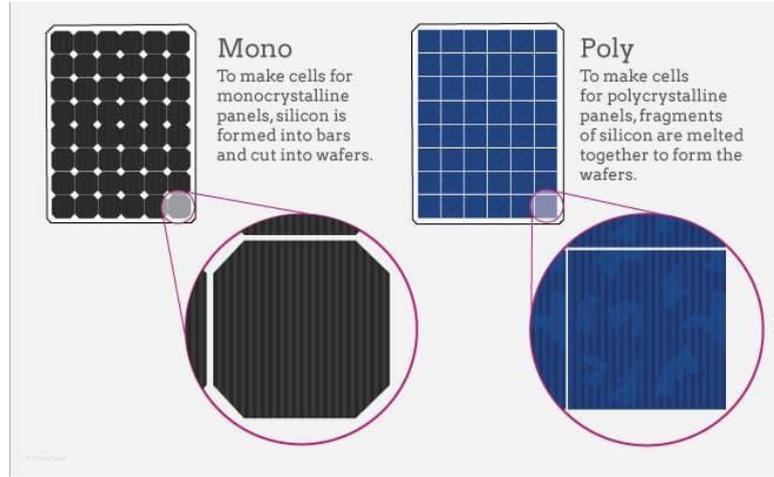
هناك نوعان رئيسيان من الخلايا الشمسية من الجيل الأول:

II-8-1-2-الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون أحادي البلورية

تصنع من بلورة واحدة من السيليكون ولها لون ومظهر موحد. تتمتع الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون أحادي البلورات بكفاءة أعلى من الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون متعدد البلورات، وعادةً ما تبلغ حوالي 20-22% [7].

II-8-1-3-الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون متعدد البلورات

وهي أيضًا مصنوعة من السيليكون ولكن ذات اتجاهات بلورية متعددة ولها لون أزرق مرقط. يعد إنتاج الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون متعدد البلورات أقل تكلفة من إنتاج الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون أحادي البلورات، ولكن لديها كفاءة أقل قليلاً، عادةً حوالي 15-17%. نظرًا لكفاءتها العالية نسبيًا وعمرها الطويل، فقد تم استخدام الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون أحادي البلورات ومتعدد البلورات على نطاق واسع للأغراض السكنية والتجارية. ومع ذلك، فإن لها العديد من العيوب مقارنة ببعض الأنواع الأكثر حداثة من الخلايا الشمسية، مثل كونها أكثر تكلفة في الإنتاج، وصلبة، وثقيلة إلى حد ما [7].



الشكل (II-5) الخلايا الشمسية أحادية البلورية والسيليكون متعددة البلورات

II-8-2-الخلايا الشمسية من الجيل الثاني

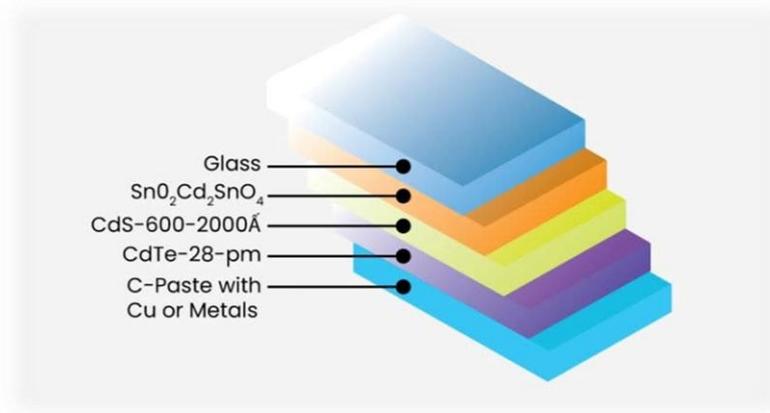
غالبًا ما تسمى الخلايا الشمسية من الجيل الثاني بالخلايا الشمسية "ذات الأغشية الرقيقة" لأنها مصنوعة من طبقات رقيقة من مادة شبه موصلة مترسبة على الركيزة. تستخدم هذه الخلايا الشمسية مواد مختلفة عن خلايا الجيل الأول، مثل تلوريد الكاديوم (CdTe)، وسيلينيد غالسيوم الإنديوم النحاسي (CIGS)، والسيليكون غير المتبلور (a-Si). تتميز الخلايا الشمسية من الجيل الثاني بكفاءة أقل من خلايا الجيل الأول، ولكنها أرخص في الإنتاج ويمكن استخدامها في نطاق أوسع من التطبيقات [7].

II-8-2-1-أنواعها

هناك عدة أنواع من الخلايا الشمسية من الجيل الثاني:

II-8-2-2-الخلايا الشمسية الكادميوم تيلورايد (CdTe)

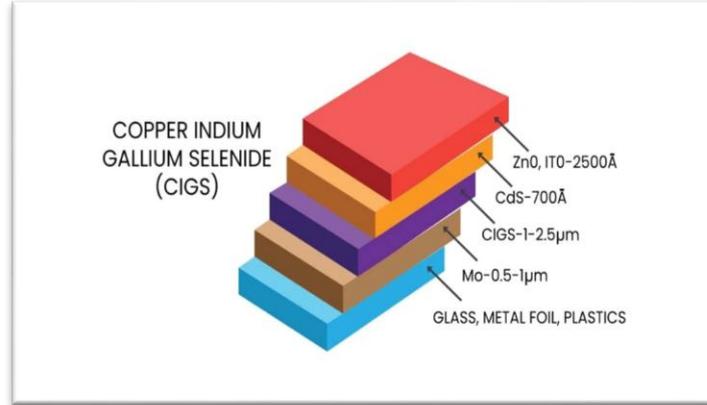
CdTe : عبارة عن مادة شبه موصلة ذات معامل امتصاص عالي وإنتاجها غير مكلف نسبيًا. تتمتع الخلايا الشمسية **CdTe** بكفاءة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة. ومع ذلك، بسبب سمية الكادميوم، حاول العلماء تطوير أنواع أخرى من مواد الأغشية الرقيقة [7].



الشكل (II-6) الخلايا الشمسية الكادميوم تيلورايد (CdTe)

II-8-2-3-الخلايا الشمسية سيلينيد جاليوم النحاس والإنديوم (CIGS)

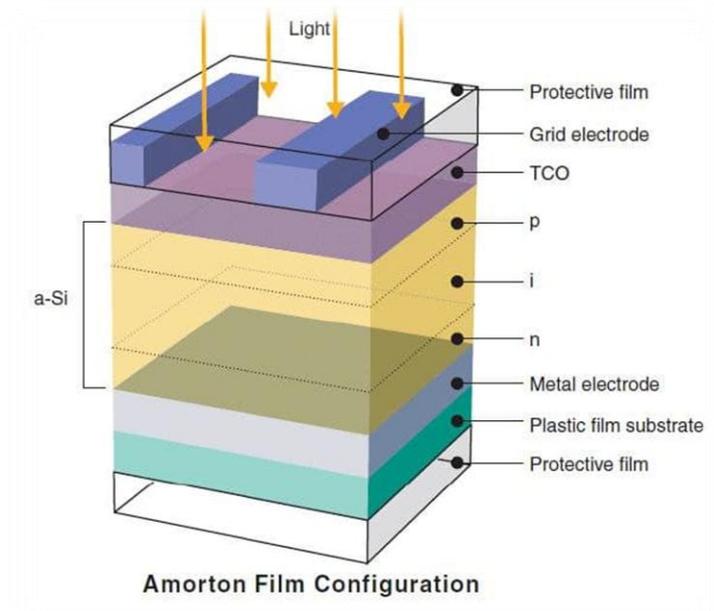
(CIGS) : هو اختصار لـ $Cu(In_x, Ga_{1-x})Se_2$ تصنع الخلايا الشمسية Se_2 من سبيكة تحتوي على خليط من النحاس والإنديوم والجاليوم والسيلينيوم بنسب معينة يتم اختزالهما في المسحوق وترسيبهما بعملية التبخر على شكل أغشية رقيقة. تبلغ كفاءتها حوالي 20% وتتميز بالمرونة، مما يجعلها مناسبة لمجموعة متنوعة من التطبيقات [7].



الشكل (7-II) الخلايا الشمسية سيلينيد النحاس والإنديوم والجالسيوم (CIGS)

II-8-2-4-الخلايا الشمسية غير المتبلورة المصنوعة من السيليكون (a-Si)

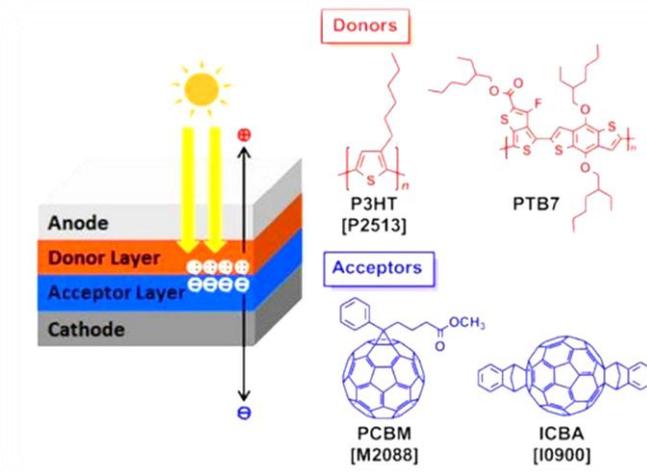
الخلايا الشمسية a-Si مصنوعة من السيليكون غير البلوري وتبلغ كفاءتها حوالي 10-12٪. فهي مرنة ويمكن وضعها على مجموعة متنوعة من الركائز، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي تكون فيها المرونة مهمة [7].



الشكل (8-II) الخلايا الشمسية السيليكونية غير المتبلورة (a-Si)

II-8-2-5-الخلايا الشمسية الكهروضوئية العضوية (OPV)

الخلايا الشمسية OPV مصنوعة من مواد عضوية، مثل البوليمرات، وتبلغ كفاءتها حوالي 10%. فهي خفيفة الوزن ومرنة ويمكن تصنيعها باستخدام عملية اللف، مما يجعلها مناسبة للإنتاج على نطاق واسع. فهي أرخص المواد [7].



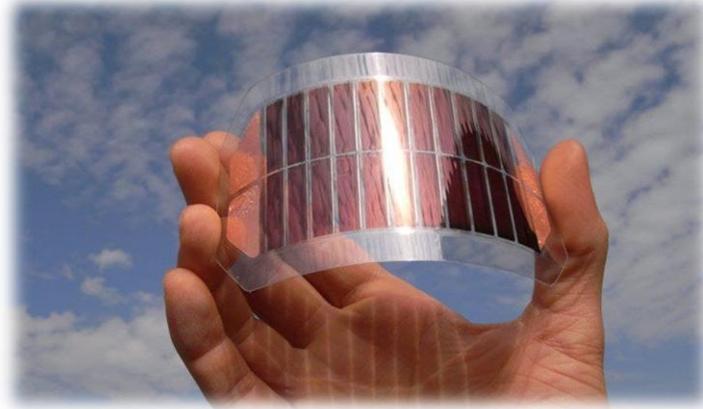
الشكل (II-9) الخلايا الشمسية الكهروضوئية العضوية (OPV)

بالمقارنة مع الخلايا الشمسية من الجيل الأول، فإن الخلايا الشمسية من الجيل الثاني أكثر مرونة، ولها تكاليف إنتاج أقل، ويمكن ترسيبها على مجموعة من الركائز. ومع ذلك، غالبًا ما يكون أداؤها أقل كفاءة من الخلايا الشمسية من الجيل الأول بسبب انخفاض استقرارها مع مرور الوقت. هذا النوع من الخلايا الشمسية حساسة للرطوبة [7].

II-8-3-الخلايا الشمسية من الجيل الثالث

يمثل الجيل الثالث من الخلايا الشمسية (بما في ذلك الخلايا الترادفية والبيروفسكايت والحساسة للصبغة والعضوية والمفاهيم الناشئة) مجموعة واسعة من الأساليب، بدءًا من الأنظمة غير المكلفة منخفضة الكفاءة (الخلايا الشمسية العضوية الحساسة للصبغة) إلى الأنظمة باهظة الثمن عالية الكفاءة (خلايا متعددة الوصلات III-V) للتطبيقات التي تتراوح من تكامل البناء إلى التطبيقات الفضائية. يُشار أحيانًا إلى الخلايا الكهروضوئية من الجيل الثالث على أنها "مفاهيم ناشئة" بسبب ضعف انتشارها في السوق، على الرغم من أن بعضًا منها تمت دراستها لأكثر من 25 عامًا [8]، لا تزال الخلايا الشمسية من الجيل الثالث في مرحلة التطوير ولم يتم استخدامها على

نطاق واسع بعد، تتمتع الخلايا الشمسية من الجيل الثالث بالقدرة على أن تكون أكثر كفاءة بكثير من الخلايا الشمسية من الجيل الأول والثاني، ولكنها أيضًا أكثر تكلفة في الإنتاج.



الشكل (10-II) الخلايا الشمسية العضوية

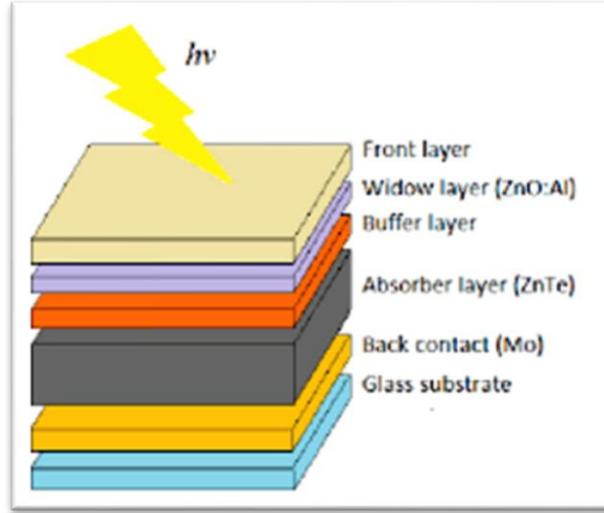
الجدول (1-II) أنواع الخلايا الشمسية

العيوب	المزايا	الكفاءة	النوع	الأجيال
* التكلفة العالية	* كفاءة عالية * حياة مديدة	ما يصل إلى 24%	السيليكون أحادي البلورية	الجيل الأول
* انخفاض الكفاءة	أقل تكلفة	13-20%	السيليكون متعدد البلورات	
* عمر أقصر * انخفاض الكفاءة	* أقل تكلفة * مرن * سهولة الإنتاج	5-10%	السيليكون غير المتبلور	الجيل الثاني
* سامة	* أقل تكلفة * امتصاص عالي	18-22%	تلوريد الكاديوم	
* تكلفة أعلى	* ارتفاع الحرارة مقاومة	15-22%	الإنديوم النحاس ثنائي سيلينيد الغاليوم	
* انخفاض الكفاءة * عمر أقصر	* وزن خفيف * صديقة للبيئة	ما يصل إلى 17%	عضوي PV	الجيل الثالث
* تكلفة عالية جداً * يجب أن تكون متكاملة مع أنظمة التتبع الشمسي وأجهزة التبريد للوصول إلى الإرتفاع كفاءة	* كفاءة عالية جداً * يتحمل درجات الحرارة العالية	40%	مركزة PV	

9-II-9- مكونات الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة

9-II-1- طبقة النافذة

في الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة، تحتوي المادة شبه الموصلة التي تشكل طبقة النافذة على أكبر فجوة نطاقية من بين جميع الأغشية الرقيقة التي تشكل الخلية الشمسية. تضمن فجوة النطاق الكبيرة أن تكون طبقة النافذة شفافة بالنسبة لمعظم الفوتونات في المنطقة المرئية من الطيف الشمسي. ستتقل معظم الفوتونات الساقطة في هذه المنطقة عبر طبقة النافذة إلى الطبقات الأساسية للخلية الشمسية، مما يضمن حدوث أكبر قدر من امتصاص الفوتون في الطبقة الماصة [9].



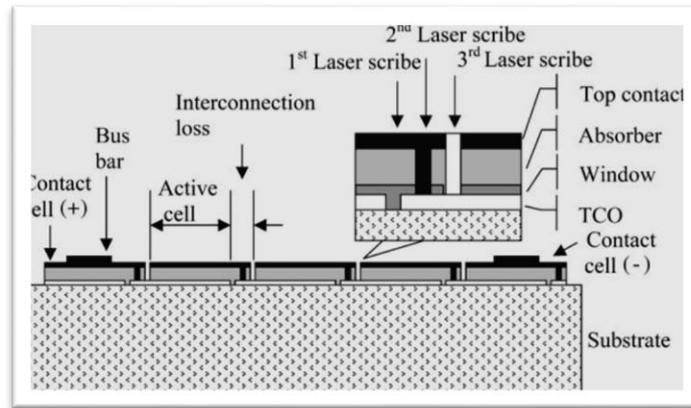
الشكل (11-II) طبقات مختلفة من الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة

9-II-2- طبقات ETL و HTL : (طبقة نقل الإلكترون وطبقة نقل الثقب)

ETL هي الطبقة التي تنتقل من خلالها الإلكترونات من البيروفسكايت المجهرى والجسيمات النانوية التقليدية لأكاسيد المعادن متوسطة المسام مثل TiO_2 و ZnO ، بينما يتم نقل الثقوب بكفاءة من خلال مجموعة متنوعة من HTLs. يتم دعم امتصاص البيروفسكايت بواسطة هذه الطبقات بشكل كبير، ولكن سمك، وتركيز الناقل، والعيوب السائبة المرتبطة بها تحتاج إلى تعديل للحصول على أفضل أداء للخلية مع استقرار متفوق.

II-9-3- طبقة الامتصاص

الطبقة الماصة عبارة عن مادة شبه موصلة غالبًا ما تُعتبر قلب جميع الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة. تم تسميتها على نحو مناسب لأنها الطبقة التي تمتص أكبر عدد من الفوتونات واستجابة لذلك تثير الإلكترونات في نطاق التوصيل لإنشاء تيار ضوئي. ونتيجة لذلك، يتم اختيار الطبقات الممتصة لجميع الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة من مواد شبه موصلة ذات طاقات فجوة نطاقية تتوافق مع المنطقة الغنية بالفوتون من الطيف الشمسي.



الشكل (II-12) مكونات الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة

II-10-10- مكونات نظام الطاقة الشمسية

يتكون النظام الكهروضوئي من لوحة شمسية ومكثف فائق وعاكس. تمتص اللوحة الشمسية طاقة الفوتون وتحولها إلى كهرباء من خلال الآلية الكهروضوئية. يتم استخدام النسخ الاحتياطي للمكثف الفائق لتوفير طاقة إضافية فقط في الأيام المشمسة. يتم تحويل طاقة التيار المستمر المولدة إلى أحمال تيار متردد لتكون مناسبة للاستخدام المنزلي.

II-11-11- الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية :

II-11-1- 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} الحساب الاستطاعة المثالية للخلية $[10]p_{ideal}$

II-11-2- 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. ويمكن حساب قيمة V_{oc} نظريا بالعلاقة التالية:

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

حيث :

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

q : هو شحنة الالكترن و تقدر ب $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

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

II-11-3- استطاعة الخلية

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

$$P = V \times I \quad (2. II)$$

P : استطاعة الخلية بالواط (W)

V : الجهد عبر الخلية ويقاس بالفولط (V)

I: شدة التيار المار بالخلية ويقاس بالأمبير (A)

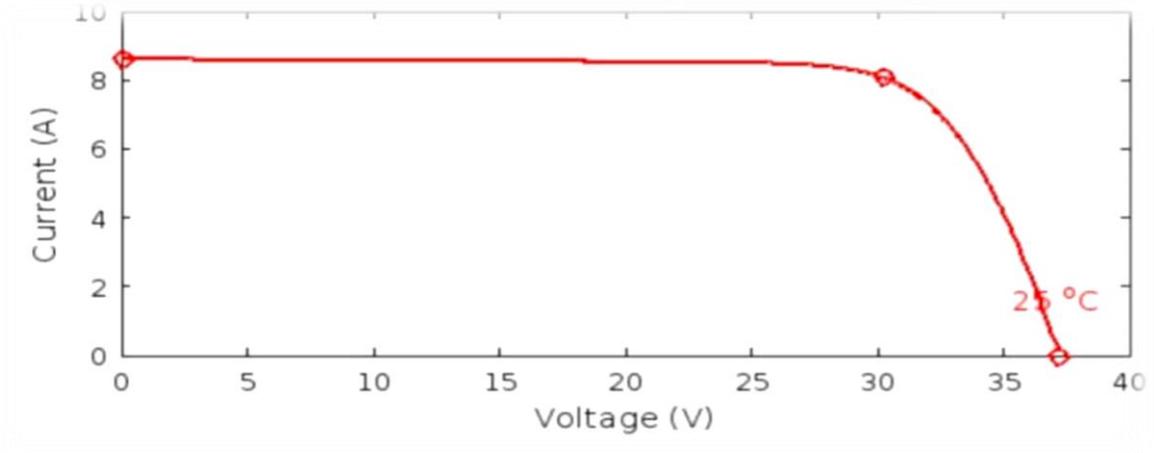
II-11-4- الاستطاعة القصوى P_{MAX}

الاستطاعة القصوى هي أقصى طاقة يمكن للخلية انتاجها عند بلوغ كل من جهد الخلية و تيار الخلية القيمة الموافقة لنقطة الطاقة الأعظمية ويحسب بالعلاقة التالية:

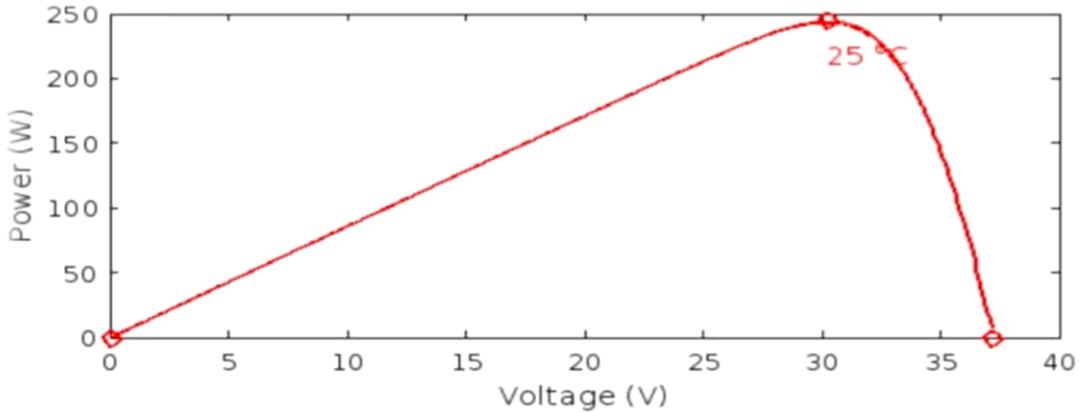
$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (3. II)$$

يتم تحديد تيار وجهد نقطة الطاقة الأعظمية بعدة طرق أشهرها خوارزمية تتبع نقطة الطاقة الأعظمية MPPT

(Maximum power point tracking)



الشكل (13-II) الخاصية الكهربائية للخلايا الشمسية



الشكل (14-II) تغير الاستطاعة P المولدة من طرف الخلية بدلالة فرق الكمونات V

II-11-5-الاستطاعة المثالية P_{IDEAL}

هي جداء جهد الدارة المفتوحة Voc مع تيار الدارة المقصورة I_{cc} . ويعطى وفق العلاقة :

$$P_{ideal} = V_{oc} \times I_{cc} \quad (4. II)$$

II-11-6-معامل الشكل FF

معامل الشكل هو النسبة بين الاستطاعة القصوى P_{max} و الاستطاعة المثالية P_{ideal} و تعطى بالعلاقة التالية :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (5. II)$$

II-11-7-مردود الخلية

مردود الخلية أو كفاءة الخلية هو قدرة الخلية على تحويل الطاقة و تعطى بنسبة الطاقة التي تم تحويلها P_{max} من أصل استطاعة الضوء المسلط عليها P_{inc} و يعطى بالعلاقة التالية :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (6. II)$$

II-12-إيجابيات و سلبيات استخدام الطاقة الشمسية

II-12-1-إيجابياتها

- تعد الطاقة الشمسية بديلا ميدانيا للوقود الأحفوري.
- تتوزع الطاقة الشمسية على سطح الكرة الأرضية، وتصل إلى الجميع فلا حاجة لنقلها وتوزيعها.
- تعتبر مصدرا آمنا بيئيا أي أنها تمنع حدوث التلوث (طاقة نظيفة).
- الطاقة الشمسية مجانية، لذلك يعتمد استخدامها على الكلفة التأسيسية فقط.

II-12-2-سلبياتها

- تعد الطاقة الشمسية قليلة الكثافة لوحدة السطح إذا ما قورنت بأنواع الطاقة التقليدية.
- عدم استمرارية الطاقة الشمسية خلال اليوم حيث تتوفر فقط لساعات معينة مما يسبب مشاكل عملية في استخدامها.

- تعتبر مشكلة التخزين من المشاكل المطروحة في استغلال الطاقة الشمسية.
- تعتبر تكاليف إنشاء محطات الطاقة الشمسية وتجهيزاتها باهظة.

مراجع الفصل الثاني

[1] https://www.brainkart.com/article/Different-between-conductors,-semiconductors-and-insulators_265/

[2] بكوش أسماء 2021 محاكاة عددية للأداء و كفاءة الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة من نوع تيلورايد الكادميوم (CdTe) جامعة قاصدي مرياح ورقلة ص(7-8)

[3] زيطاري حسن و دوبة مداني 2022 نمذجة أداء و كفاءة الخلايا الشمسية القائمة على أساس CZTS باستخدام برنامج Scaps_1D جامعة قاصدي مرياح ورقلة ص(13)

[4] Ouled Boubou Moulay Djied 2023 Simulation of electrical parameters of Perovskite a solar cell under Scaps_1D and QUCS.p(15)

[5] Khelefaoui Hala 2023 Simulation of thin film Solar Cells using the Scaps_1D program .p(12-13)

[6] Khelefaoui Hala 2023 Simulation of thin film Solar Cells using the Scaps_1D program.p13

[7] Ouled Boubou Moulay Djied 2023 Simulation of electrical parameters of Perovskite a solar cell under Scaps_1D and QUCS.p(16-17-18)

[8] Khelefaoui Hala 2023 Simulation of thin film Solar Cells using the Scaps_1D program.p14

[9] Khelefaoui Hala 2023 Simulation of thin film Solar Cells using the Scaps_1D program.p(17-18)

[10] أكرم فايد 2023 محاكاة خلية شمسية كهروضوئية ذات أساس Cu_2ZnSnS_4 باستعمال برنامج Scaps_1D ص.(17_18_19_20)

الفصل الثالث: نمذجة عددية
لأداء الخلايا الشمسية ثلاثية
الطبقات $SnO_2/CdS/CdTe$

1.III. تمهيد:

ينقسم هذا الفصل إلى ثلاثة أقسام مهمة ، القسم الأول و الذي سنركز فيه على المعادلات الأساسية المتعلقة بمحاكاة الخلايا الشمسية و نستعرض فيه برنامج المحاكاة المستعمل في هذا العمل و هو برنامج SCAPS حيث سنتعرف على أهم مكوناته طريقة عمله و كذا الخطوات العملية المستخدمة في عملية المحاكاة، اما في الجزء الثاني من هذا الفصل سوف نعرض على الخلية الشمسية المستعملة في هذه الدراسة، حيث سنستعرض مكوناتها في البرنامج و الثوابت الفيزيائية المستعملة في كل طبقة ، اما في القسم الأخير فسنستعرض في تحليل النتائج المتحصل عليها بعد إجراء عملية المحاكاة بواسطة برنامج SCAPS .

2.III. المعادلات الأساسية المستعملة لمحاكاة الخلايا الشمسية

تعتمد المحاكاة العددية للخلايا الشمسية على حل جملة من المعادلات الرياضية المتعلقة بالكمون الكهروستاتيكي و كثافة حاملات الشحنة و التي تلخص أهم الظواهر الفيزيائية التي تحدث داخل الخلية الشمسية. هذه المعادلات معرفة بمعادلة بواسون ، معادلة الاستمرارية و معادلة النقل.

1.2.III. معادلة بواسون

و هي أهم معادلة يركز عليها لوصف الظواهر الكهروستاتيكية داخل الخلية الشمسية و تكتب رياضيا في بعد واحد وفق المعادلة التالية [1]:

$$\nabla \psi(x,t) = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r} (p(x,t) - n(x,t) + N_{D^+} - N_{D^-} + \rho_i(x,t)) \quad (1.III)$$

حيث : ψ يمثل الحقل الكهروساكن ، ϵ_0, ϵ_r يمثل كل من السماحية النسبية و في الفراغ على التوالي ، q الشحنة العنصرية ، n, p تمثل كل من كثافة الإلكترونات و الثقوب على التوالي ، N_{D^+}, N_{D^-} تمثل تركيز الأيونات المانحة و المستقبلية ، ρ_i تمثل الفرق بين الشحن من النوع n, p .

2.2.III. معادلة الاستمرارية

تعتبر معادلات الاستمرارية عن حالة كل من الإلكترونات والثقوب إما يتم نقلها ، أو أن تتراكم ، كما يمكن أن تتولد أو تتلاشى وفقا للمعادلات التالية [2]:

- حالة الإلكترونات

$$\frac{1}{q} \nabla j_n(x,t) = R_n(x,t) + \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} - G_n(x,t) \quad (2.III)$$

- حالة الثقوب

$$\frac{1}{q} \nabla j_p(x,t) = R_p(x,t) + \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} - G_p(x,t) \quad (3.III)$$

حيث : R يمثل معدل الالتحام الكرتون - ثقب، G يمثل التوليد.

3.III. برنامج محاكاة الخلايا الشمسية SCAPS

يسمح لنا حل المعادلات الأساسية تحكم سلوك حاملات الشحنة بمعرفة الخواص تيار-جهد للخلية الشمسية بالإضافة إلى غيرها من الوسائط الفيزيائية، النتائج التي يتم الحصول عليها توفر معلومات مفيدة عن أداء الخلية الشمسية. هناك صعوبات كثيرة لحل المعادلات الأساسية بالطريقة التحليلية ، لذا يلجأ الباحثون لحلها بطرق عددية التي تتطلب عددًا كبيرًا من التكرارات ، حيث طور الباحثون عدة برامج لمحاكاة الخلايا الشمسية تعطى نتائج دقيقة من أهمها و أكثرها إنتشارا برنامج SCAPS.

برنامج SCAPS هو محاكي SCAPS-1D الذي طوره Marc Burgelman و هو برنامج مصمم ليعمل تحت نظام التشغيل Windows الذي يسمح بنمذجة السلوك الفيزيائي والكهربائي للخلية الشمسية. كما يسمح بتوفير الوقت و التكلفة قبل عملية التصنيع وبالتالي يكون قادرًا على تحسين أداء الخلايا الشمسية. يرتكز هذا البرنامج على حل المعادلات التفاضلية الأساسية بطريقة الفروق .

1.3.III. واجهة البرنامج

برنامج SCAPS هو مجاني ، بعد تحميله من المصدر نقوم بتنشيطه على نظام التشغيل Windows ، سيظهر على سطح المكتب أيقونة البرنامج كما يتضح في الشكل



الشكل (1.III): أيقونة برنامج SCAPS

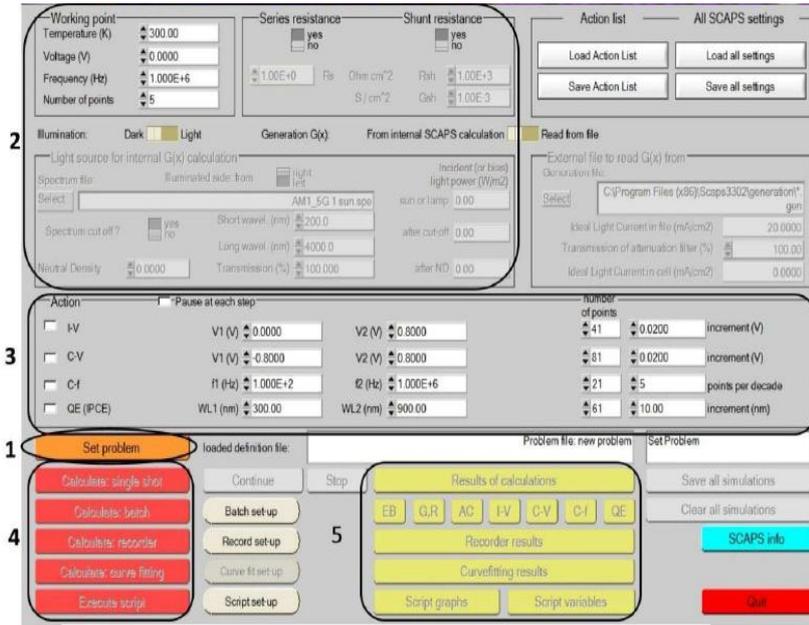
مباشرة نقوم بالنقر فوق الرمز أعلاه على سطح المكتب ، أو ننقر نقرًا مزدوجًا فوق الملف **scaps3309.EXE** .

من أجل محاكاة أداء و عمل الخلية الشمسية والتحكم فيها باستخدام برنامج SCAPS ، يجب أن نمر بثلاث نوافذ أساسية: نافذة التنفيذ (لوحة العمل) ، نافذة تصميم الخلية وتعريف الوسائط (لوحة التعريف) و نافذة النتائج.

عند فتح برنامج SCAPS كما هو موضح في الشكل تظهر نافذة "لوحة العمل" تمكننا من الوصول إلى النافذتين الأخرين ، نافذة تصميم الجهاز و نافذة النتائج ، نافذة العمل تحتوي على 5 أدوات رئيسية يتم توضيح معنى الكتل المسماة من 1 إلى 5 على النحو التالي:

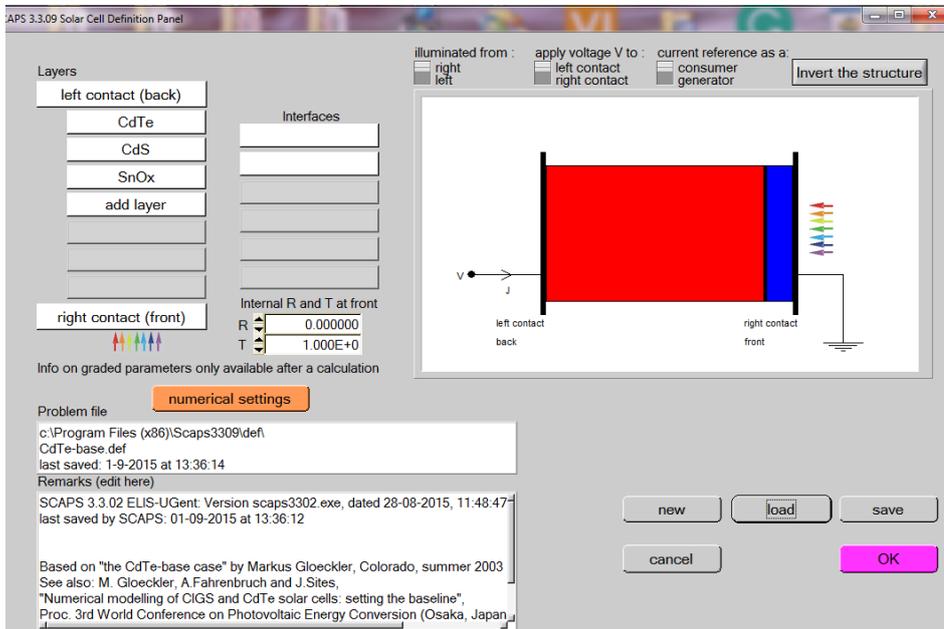
1. تحديد المشكلة وشكل الخلية بالإضافة إلى المواد المستعملة جميع الخصائص الضوئية و الكهربائية للخلية الشمسية المدروسة
2. وضع الظروف التي تجري فيها المحاكاة
3. حدد القياس (المميز) المراد محاكاته
4. بدء العمليات الحسابية

5. عرض منحنيات المحاكاة



الشكل (2.III): الواجهة الأساسية لبرنامج SCAPS

عند النقر على زر تحديد نوع المشكلة (**set problem**) مباشرة سيأخذك البرنامج إلى النافذة الأساسية الثانية المتعلقة بشكل الخلية و عدد الطبقات و الخواص الفيزيائية لكل طبقة كما هو موضح في الشكل أدناه.



الشكل (3.III): نافذة مكونات الخلية الشمسية

تمكننا هذه النافذة من تحديد نوع و مادة كل طبقة التي تكون الخلية الشمسية بالإضافة إلى إدخال كل الخواص الضوئية و الكهربائية لكل طبقة على حدى ، بعد هذه العملية مباشرة نحفظ كل الإعدادات السابقة ثم نرجع إلى نافذة العمل الأساسية .

نقوم بعدها بتحديد بعض الوسائط الخارجية المتعلقة بعمل الخلية كتثبيت درجة حرارة الخارجية ، فرق الكمون، التردد ، و عدد النقاط التكرارية المستعملة في الحساب كما يظهر في الشكل.

الشكل (4.III): الوسائط الخارجية لعمل الخلية

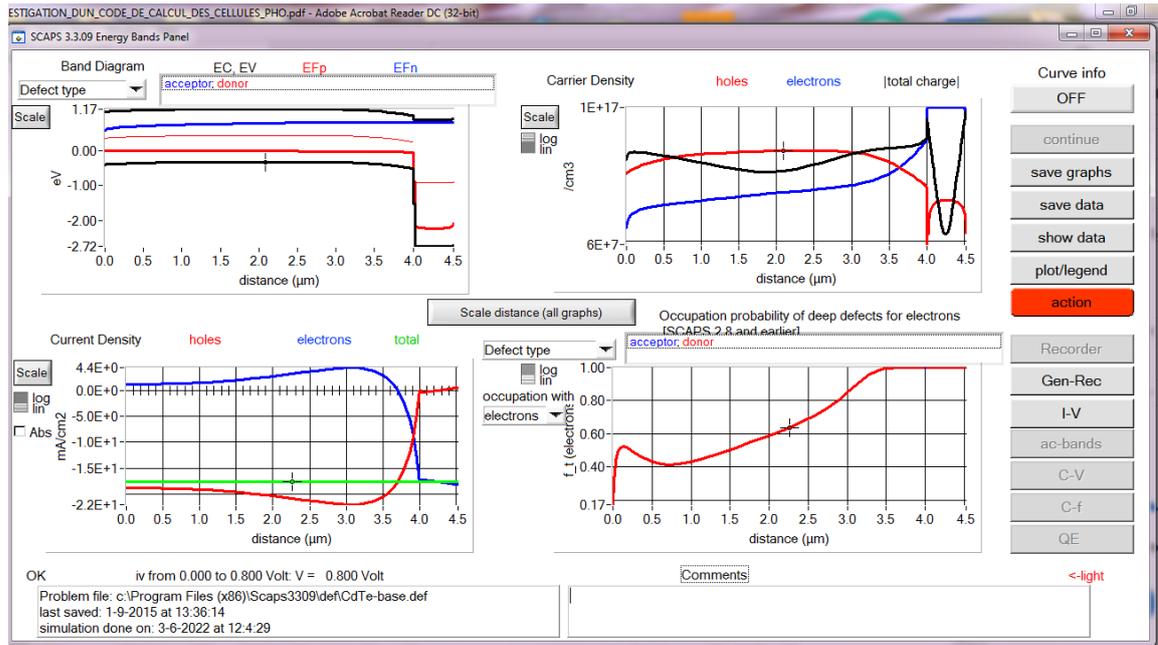
نذهب بعدها إلى نافذة تحديد القياس (المميز) المراد محاكاته ، أين نجد الخواص المراد دراستها ، كمنحنى

تيار-جهد، جهد-مكثفة، تردد-مكثفة و المردود الكمي، كما يظهر في الشكل (5.III).

الشكل (5.III): مخرجات الخلية الشمسية

بعد الإنتهاء من العملية السابقة نضغط على زر الحساب حيث يبدأ البرنامج في العمل و عند الإنتهاء

من الحساب تظهر نافذة النتائج ، كما يبينه الشكل (6.III) .

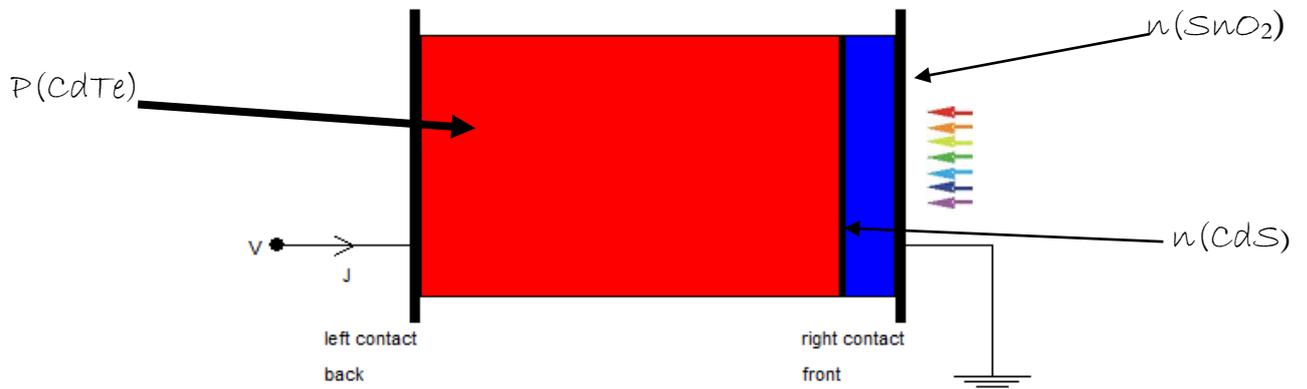


الشكل (6.III): نافذة المنحنيات و النتائج

4.III. تحليل النتائج و مناقشتها:

1.4.III. بنية الخلية الشمسية $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$

تتكون الخلية الشمسية المراد دراستها في هذا العمل من خلية تحتوي على ثلاثة طبقات الطبقة الأولى من مادة أكسيد القصدير SnO_2 و هي تمثل الطبقة الشفافة ، الطبقة الثانية من مادة كبريتات الكاديوم CdS و هي تمثل الطبقة من نوع n ، أما الطبقة الأخيرة فهي من مادة CdTe و هي تمثل الطبقة p كما يظهر في الشكل .



الشكل (7.III): بنية الخلية الشمسية $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$

2.4.III. تحديد الثوابت و الشروط الأولية لمحاكاة الخلية الشمسية

قمنا بتحديد كل الثوابت الفيزيائية المتعلقة بكل طبقة التي تكون الخلية الشمسية وهي موضحة في جدول التالي:

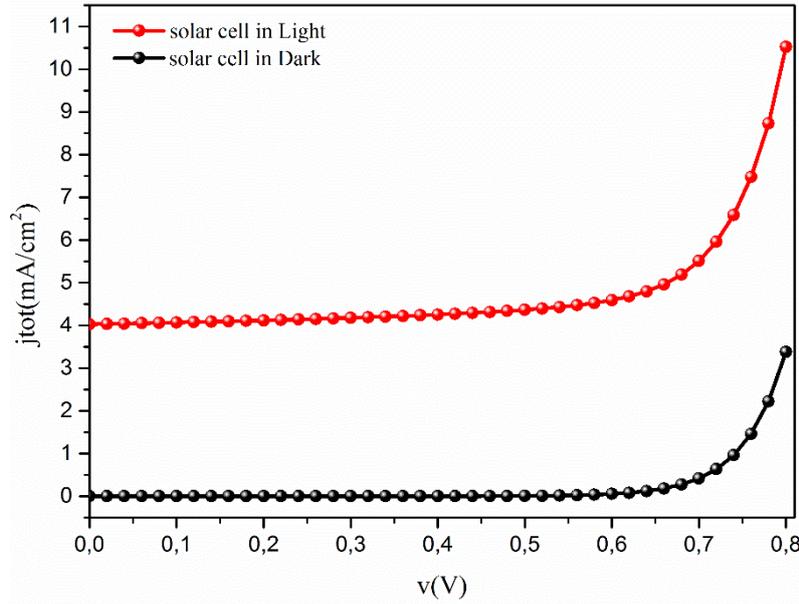
الجدول (1-III) الثوابت الفيزيائية المستعملة لمحاكاة الخلية الشمسية

مادة كل طبقة و خصائصها	معلومات الخلية	SnO_2	CdS	CdTe
e (μm)	السمك	0.5	0.025	4
E_g (eV)	فجوة النطاق	3.6	2.4	1.5
X (eV)	الألفة الإلكترونية	4	4	3.9
ϵ/ϵ_0	السماحية العازلة (النسبية)	9	10	9.4
N_C (cm^{-3})	كثافة التوصيل ذات النطاق الفعال للحالات	$2.2 \times 10^{+18}$	$2.2 \times 10^{+18}$	$8.0 \times 10^{+17}$
N_V (cm^{-3})	كثافة التكافؤ الفعالة للحالات	$1.8 \times 10^{+19}$	$1.8 \times 10^{+19}$	$1.8 \times 10^{+19}$
V_e (cm/s)	السرعة الحرارية للإلكترون	$1.0 \times 10^{+7}$	$1.0 \times 10^{+7}$	$1.0 \times 10^{+7}$
V_h (cm/s)	السرعة الحرارية للثقب	$1.0 \times 10^{+7}$	$1.0 \times 10^{+7}$	$1.0 \times 10^{+7}$
μ_e (cm^2/Vs)	تحركية (تنقلية) الإلكترون	$1.0 \times 10^{+2}$	$1.0 \times 10^{+2}$	$3.2 \times 10^{+2}$
μ_h (cm^2/Vs)	تحركية (تنقلية) الثقب	$2.5 \times 10^{+1}$	$2.5 \times 10^{+1}$	$4.0 \times 10^{+1}$
N_a/N_d (cm^{-1})	النسبة بين N_a/N_d	$0/1.0 \times 10^{+7}$	$0/1.0 \times 10^{+18}$	$2.0 \times 10^{+14}/0$

سندرس في هذا العمل تأثير كل من الإضاءة و الإظلام على الخواص تيار-جهد ، أيضا سنقوم بتغيير درجة الحرارة الخارجية و معرفة أثرها على مخرجات الخلية المتمثلة في جهد الدارة المفتوح ، تيار الدارة القصير ، عامل الملئ و الكفاءة .

3.4.III. تأثير الإضاءة و الإظلام على الخواص تيار-جهد للخلية الشمسية:

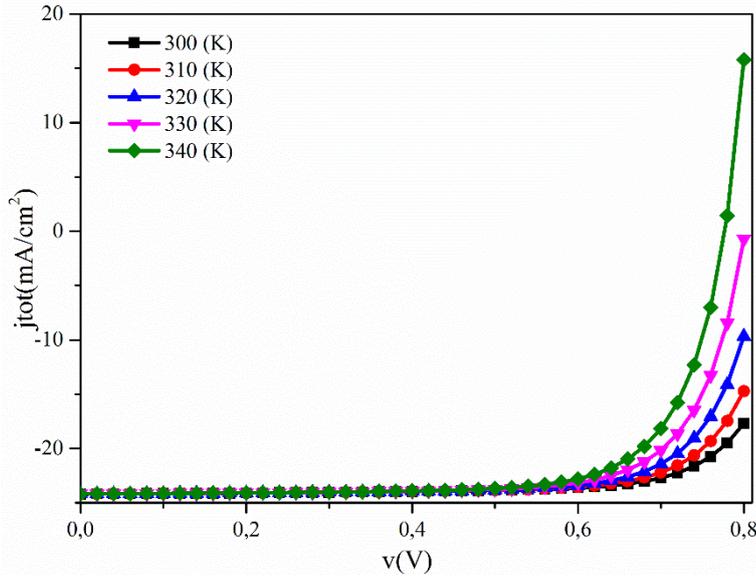
يبين الشكل (8.III) منحنى تغيرات كثافة التيار المتولد بدلالة جهد الخلية الشمسية من نوع تيلوريد الكاديوم و هذا تحت الشروط التالية تثبيت سمك الطبقة عند $4\mu\text{m}$ و درجة حرارة الغرفة 300 K و بالاستعانة ببرنامج **SCAPS-1D**، يظهر المنحنى أن تغيرات كثافة التيار مطابقة تماما لسلوك الخلية الشمسية و هي في حالتها المثالية سواءا عند الإظلام أو عند تعريضه للإضاءة بشدة ثابتة، من هنا نستخلص أن هذا النوع يمكن إستغلاله تجريبيا في تصنيع خلايا شمسية. كما لاحظنا وجود إزاحة منحنى الإضاءة بحيث يبدئ تقريبا عند القيمة $4\text{mA}/\text{cm}^2$ تعبر هذه الإزاحة عن التيار الضوئي الناتج عن تعريض الخلية للإضاءة و ينتج عنه توليد أزواج من (إلكترون-ثقب) بوساطة الضوء المسلط على الخلية [3,4].



الشكل (8.III): منحنى تغيرات كثافة التيار بدلالة جهد خلية شمسية في الظلام وتحت الإضاءة

4.4.III. تأثير تغيير درجة الحرارة على الخواص تيار-جهد لخلية شمسية

تتفاوت كفاءة أداء الخلية الكهروضوئية عادة عكسيا بدرجة حرارة التشغيل بمعنى آخر ينخفض أداء الخلية بارتفاع درجة حرارة الجو المحيط للخلية ، هذا يعني أن الطاقة الكهربائية الناتجة من الخلية تنخفض بارتفاع درجة الحرارة . يوضح الشكل (9.III) منحنى تغيرات كثافة التيار بدلالة الجهد لخلية شمسية من نوع CdTe و هذا بعد تغيير درجة الحرارة الخارجية في كل مرة من 300 إلى 340K باستعمال برنامج **SCAPS-1D** يظهر المنحنى تغيرات واضحة لكثافة تيار عند تغيير درجة الحرارة ، عموما درجة الحرارة من العوامل المؤثرة في الخرج و هناك عوامل أخرى تلعب دور في انخفاض أداء هذه الخلية من هذه العوامل سرعة الهواء و الغبار و كثافة الضوء الساقط على الخلية . حيث نسجل أقصى قيمة كثافة التيار عند السمك $4\mu\text{m}$ كما يظهر في الجدول (2.III). هذه التغيرات لكثافة التيار مرتبطة أساسا بتغيير في عرض منطقة النضوب و التي تؤثر بصورة واضحة على ناقلات الشحنة. أثير درجة الحرارة على منحنيات خواص الجهد و التيار للخلية [4-3] .



الشكل (9.III): منحني تغيرات كثافة التيار بدلالة جهد الخلية الشمسية من أجل قيم مختلفة لدرجة الحرارة

الجدول (2.III): نتائج محاكاة الخلية الشمسية

T(K)	Voc(v)	Isc(mA/cm ²)	FF(%)	η(%)
300	0,99789	24,18457	66,4466	16,0358
310	0,90762	24,18303	70,8804	15,5576
320	0,84342	24,18135	73,7642	15,0443
330	0,80185	24,17952	74,8114	14,5048
340	0,77707	24,17756	13,9465	13,9465

III.4.5. تأثير تغيير درجة الحرارة على جهد الدارة المفتوحة و تيار الدارة القصير:

يظهر الشكل (10.III) منحني تغيرات كل من تيار الدارة القصير وجهد الدارة المفتوح للخلية الشمسية من نوع CdTe و هذا بعد تغيير درجة الحرارة الخارجية في كل مرة من 300 إلى 340K باستعمال برنامج SCAPS، المنحى يبين أن جهد الدارة المفتوح Voc يتناسب عكسيا مع درجة الحرارة ، لأن ارتفاع درجة الحرارة تزيد من حاملات الشحنة الأقلية مما يزيد من قيمة تيار التشبع العكسي و نقصان قيمة فجوة الطاقة و بذلك يقل مقدار Voc حسب المعادلة التالية [5]:

$$J_{drif} = nq(\mu_n + \mu_p)E$$

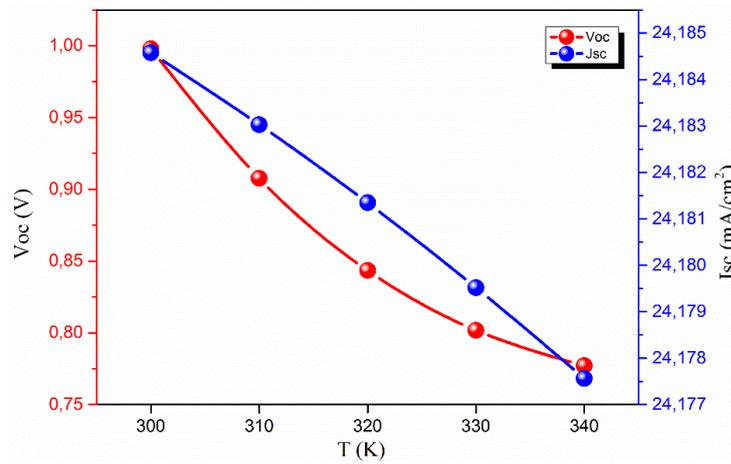
بالمقابل نلاحظ تناقص مستمر لقيم تيار الدارة القصير Isc مع زيادة درجة الحرارة من 300 إلى 340K حيث تبلغ أقصى قيمة له عند 24.184 mA/cm² كما يظهر في الجدول (2.III)، يعود سبب هذا التناقص إلى

امتصاص المزيد من الفوتونات وبالتالي توليد المزيد من ناقلات الشحنة [4]. حيث كلما ارتفعت درجة الحرارة تناقصت فجوة النطاق E_g كما يوضحها نموذج فارشني Varshni model (المعادلة 6.III) كما أن زيادة درجة حرارة الخلية تؤثر على موصلية المادة التي تؤدي إلى التدهور من أداء الخلايا الشمسية η [6]:

$$E_G(eV) = E_{g0} - \frac{\alpha \cdot T^2}{(T + \beta)} \quad 6.III$$

حيث:

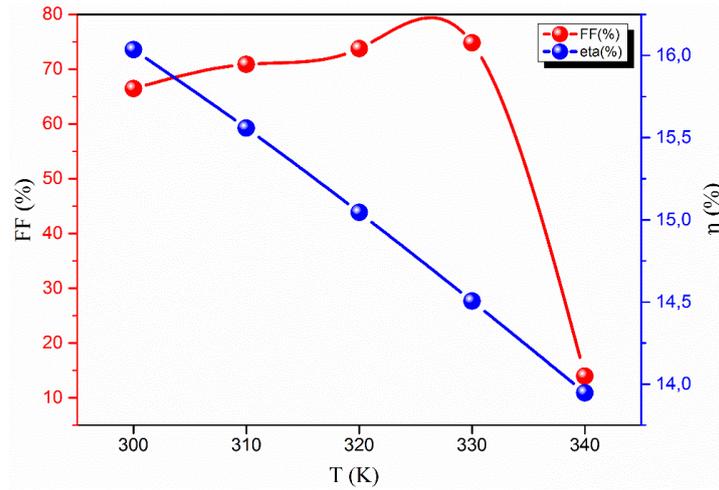
α و β : معاملات درجة حرارة فجوة النطاق تعتمد على المادة المدروسة و T درجة الحرارة بـ $^\circ\text{K}$
 E_{g0} : هي طاقة فجوة النطاق عند $T=0\text{ K}$.



الشكل (10.III): منحنى تغيرات كل من تيار الدارة القصير وجهد الدارة المفتوح لخلية الشمسية من أجل قيم مختلفة لدرجة الحرارة

6.4.III. تأثير تغيير درجة الحرارة على عامل الملىء والكفاءة للخلية الشمسية

يبين الشكل (11.III) منحنى تغيرات كل من عامل الملىء و الكفاءة للخلية الشمسية و هذا بعد تغيير درجة الحرارة من 300 إلى 340K باستعمال برنامج SCAPS، من المنحنى نلاحظ عامل الملىء يزيد في الوهلة الأولى مع زيادة درجة الحرارة ثم يبدأ بالإنخفاض السريع ابتداءً من 330K. كما يظهر أنه بزيادة درجة الحرارة تتناقص كفاءة الخلية ، يرجع هذا إلى ارتفاع تيار التشبع العكسي من جهة و انخفاض في مقدار جهد الدارة المفتوح ، كما هو مبين في الجدول (2.III) [6].



الشكل (11.III): منحنى تغيرات كل من عامل الملىء و الكفاءة لخلية شمسية من أجل قيم مختلفة لدرجة الحرارة

مراجع الفصل الثالث

[1] A. A. Benhabireche abdelhak, etude numerique des cellules photovoltaïques heterojonction, mémoire de magister, universite des sciences et de la technologie houari boumediene, (2016).

[2] H. Chahrazed, Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellules solaire p/n en silicium cristallin par SCAPS, Université Med Khider Biskra, (2014).

[3] <https://hasaya.own0.com/t133-topic>

[4] خنوفه محمد العيد، قزي صالح، تحسين أداء متحكم ضبابي للملحقة مسار نقطة الستطاعة العظمية في الخلايا الشمسية باستخدام الخوارزمية الجينية، مذكرة ماستر ، جامعة الوادي ، 2021 .

[5] W. Ben Ali, "Preparation and study of cadmium sulfite (CdS) thin films deposited by the chemical bath method (CBD ,University of Martyr Hama Lakhdar, El Oued,2018.

[6] Awad Khudair Mahmoud1, Raad Ahmed Rasoul, Studying the effect of temperature and resistances of series (R_s) and parallel (R_{sh}) on the performance of the solar cell (FTO/ Zn_2SnO_4 /CdS:O/CdTe/ Cu_2Te) using the SCAPS-1D program, Journal of Education and Science (ISSN 1812-125X), Vol: 31, No: 04, 2022 (49-66).

الخاتمة العامة

الخلية الشمسية ذات الأغشية الرقيقة هي خلية شمسية من الجيل الثاني يتم تصنيعها عن طريق ترسيب طبقة رقيقة واحدة أو أكثر، أو غشاء رقيق من مادة كهروضوئية على ركيزة، مثل الزجاج أو البلاستيك أو المعدن. تعتبر الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة بديلاً للسيليكون البلوري، مما يوفر ميزة انخفاض تكاليف الإنتاج والقدرة على الترسب على مجموعة متنوعة من الركائز. تُستخدم مواد مثل السيليكون غير المتبلور وتيلوريد الكاديوم (CdTe) وسيلينيد غالسيوم الإنديوم والنحاس (CIGS) لإنشاء هذه الخلايا الشمسية خفيفة الوزن والمرنة. يهدف هذه العمل إلى دراسة عددية ومحاكاة لخصائص الخلية الشمسية ذات الطبقات الرقيقة والمتكونة من $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ ومدى تأثير أداء وكفاءة الخلية بالظروف الخارجية مثل الحرارة وأشعة الشمس وهذا من أجل زيادة كفاءة الخلية الشمسية المراد دراستها. قمنا في هذا العمل باستخدام برنامج محاكاة عددية أحادي البعد المعروف باسم SCAPS-1D حيث يعتمد عليه الكثير من الباحثين في نمذجة ومحاكاة الخلايا الشمسية وهذا بهدف تطوير والتنبؤ بالنتائج قبل تجسيدها على أرض الواقع نظرا للتكاليف الباهظة في تصنيعها.

قمنا في هذا العمل بدراسة تأثير الإضاءة والإظلام على هذه الخلية وأظهرت النتائج أن الخلية الشمسية المدروسة أعطت سلوكاً منطبقاً لوصلة ذات النوع **p-n** وهذا ما يدل أن الخلية الشمسية يمكن استغلالها في مجال الألواح الشمسية. كما قمنا بدراسة تأثير تأثير درجة الحرارة الخارجية على أداء وكفاءة الخلية الشمسية المتمثلة في الوسائط؛ كثافة تيار الدائرة القصيرة (J_{sc})، جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc}) وعامل الشكل (FF) حيث أظهرت النتائج أن تغيير درجة الحرارة الخارجية في كل مرة له تأثير واضح على عمل الخلية الشمسية.

من خلال ما سبق، تبين أن الخلايا الشمسية ذات الطبقات $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ أعطت نتائج حسنة من ناحية الأداء والكفاءة، كما يمكن دراسة وسائط أخرى في المستقبل مثل دراسة تأثير سمك الطبقة، تأثير تغيير قيمة فجوة الطاقة الممنوعة، دراسة أثر التطعيم إلخ.

الملخص :

يتناول هذا العمل دراسة محاكاة عددية لأداء و كفاءة خلية شمسية مكونة من ثلاث طبقات رقيقة $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ بالاستعانة ببرنامج محاكاة الخلايا الشمسية SCAPS-1D . حيث قمنا بدراسة أثر الإضاءة و الإظلام و كذا تأثير الحرارة الخارجية على أداء وكفاءة الخلية الشمسية من خلال دراسة الوسائط المتعلقة بمخرجات الخلية الشمسية ككثافة تيار الدائرة القصيرة (J_{sc})، جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc})، معامل الملئ (FF) والكفاءة (η) . بينت نتائج المحاكاة العددية بواسطة البرنامج ان الخلية الشمسية $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ تسلك نفس سلوك وصلة p-n. كما بينت النتائج أن تغيير درجة الحرارة له أثر واضح على قيم الوسائط المتعلقة بمخرجات الخلية الشمسية

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية ذات الاغشية الرقيقة، خلية $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ ، محاكاة، SCAPS-1d.

Abstract :

This work deals with a numerical simulation study of the performance and efficiency of a solar cell composed of three thin layers of $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ using the SCAPS-1D solar cell simulation program. We studied the effect of lighting and darkness, as well as the effect of external temperature on the performance and efficiency of the solar cell by studying the media related to the solar cell outputs such as short circuit current density (J_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), fill factor (FF) and efficiency (η). The results of numerical simulation using the program showed that the $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ solar cell behaves the same as the p-n junction. The results also showed that changing the temperature has a clear effect on the media values related to the solar cell outputs

Key Word : Thin-film solar cells, $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ cell, simulation, SCAPS-1d.