

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة محمد بوضياف - المسيلة

ميدان: علوم المادة  
فرع: الفيزياء.  
تخصص: فيزياء تطبيقية



كلية: العلوم.  
قسم: الفيزياء.  
رقم: Ph APP 10/2020

مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر أكاديمي

إعداد الطالب(ة): حشروف حنيفة

دراسة تأثير إرتفاع حاجز الوصل الأمامي ودرجة حرارة  
التشغيل على أداء الخلايا الشمسية ZnO/CdS/CZTS

تمت المناقشة يوم / 09 / 2020 أمام اللجنة المكونة من:

رئيسا	جامعة محمد بوضياف - المسيلة	إبرير ميلود
مشرفا ومقررا	جامعة محمد بوضياف - المسيلة	مقلالي عمر
مناقشا	جامعة محمد بوضياف - المسيلة	حجاب مفدي

السنة الجامعية: 2020/2019

# شكر و عرفان

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم

{ من لم يشكر الناس لم يشكره الله }

نحمد الله على إحسانه والشكر له على توفيقه و إمتنانه ونشهد أن لا إله إلا الله وحده لا شريك له تعظيماً لشأنه  
ونشهد أن سيدنا محمد عبده ورسوله الداعي إلى رضوانه

بعد شكر الله سبحانه وتعالى على توفيقه لنا في تمام هذا العمل المتواضع نتقدم بالشكر إلى الوالدين  
الكريمين الذي بفضلهم ما أنا عليه الآن

أشكر بإمتنان إستخدام جهاز المحاكاة AMPS-1D الذي طوره الدكتور Fonash ومساعديه من جامعة  
ولاية بنسلفانيا.

كما أتقدم بالشكر الجزيل للأستاذ المشرف "مقلالي عمر" بإشرافه على مذكرة بحثنا الذي لن تكفي حروفه  
هذه المذكرة حقه بصبره الكبير علينا ولتوجيهاته العلمية التي لا تقدر بثمن، والتي ساهمت بشكل كبير في  
إتمام هذا العمل

كما أتقدم بشكري وعرفاني للأساتذة الكرام الذين قبلوا مناقشة مذكرتي بصدق ورحمة وعلى مجهوداتهم  
المبذولة في تقييم هذا البحث وهم:

أ./ إبرير مولود..... ب./ حجاب مفدي

والى كل أساتذة وطلبة قسم ماستر فيزياء تطبيقية

كما أتوجه بخالص الشكر والتقدير لكل صديقات الدراسة التي أعملت معهن كل مشواري الدراسي

كما نتوجه بخلص شكرنا وتقديرنا إلى كل من ساعدنا من قريب أو من بعيد على إنجاز وإتمام هذا العمل

نشكر كذلك الأستاذ عماد جليل مهدي والأستاذ علي محمد الساعدي.

ربي أموزني أن أشكر نعمتك التي أنعمت علي

وعلى والدي وأن أعمل صالحاً ترضاه وأدخلني برحمتك في عبادك الصالحين ﴿﴾

# إهداء

رحمة للعالمين ومنار هداية ودليل رشاد للناس أجمعين

الشكر والفضل لله الذي أعانني ووفقني إلى إتمام هذه المذكرة، ثم

إلى ينبوع العطاء ومصدر فخري الذي زرع في نفسي الطموح والمثابرة والذي الغالي وإلى نبع

الحنان الذي لا ينضب أُمي الحنونة

إلى من يحملون في عيونهم ذكرياتي طفولتي وشبابي، إلى من كانوا لي العون في السراء

والضراء أخواتي، وإلى كل أفراد عائلة حشروف

كما نهدي ثمرة جهدنا للأستاذ المؤطر

إلى من سرنا سويًا ونحن نشق الطريق معًا نحو النجاح إلى من تكاتفنا يدًا بيد ونحن نقطف

زهرة تعلمنا إلى صديقاتي وزميلاتي

فاطمة، دنيا، سميرة، حنان، هاجر

إلى من علمونا حروفًا من ذهب وكلمات وعبر من أسمى وأجلى عبارات العلم

أساتذتي الكرام وبالأخص الأستاذ عماد جليل مهدي والأستاذ علي محمد الساعدي.

وإلى كل من كان له يد المساعدة من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل

## Acknowledgment

The author gratefully acknowledges the use of  
AMPS-1D simulator developed by  
Dr. S. Fonash of the Pennsylvania state  
university.

I.....	الفهرس
IV.....	قائمة الجداول
V.....	قائمة الأشكال
VII.....	قائمة الرموز
1.....	المقدمة العامة
3.....	مراجع المقدمة العامة

## الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية

### الجزء الأول

4.....	1.1.I الطاقة الشمسية
4.....	1.1.I.1 مقدمة
4.....	2.1.I مصدر الطاقة الشمسية
4.....	3.1.I الإشعاع الشمسي
5.....	4.1.I طيف الإشعاع الشمسي
6.....	5.1.I الثابت الشمسي GSC

### الجزء الثاني

7.....	2.I الخلايا الشمسية
7.....	1.2.I مقدمة
7.....	2.2.I تعريف الطاقة الكهروضوئية
8.....	3.2.I تعريف الخلية الشمسية
8.....	4.2.I تاريخها
9.....	5.2.I مبدأ عمل الخلية الشمسية
9.....	6.2.I مكونات الخلية الشمسية
9.....	1.6.2.I عصبه التكافؤ - عصبه التوصيل
10.....	2.6.2.I تطعيم أنصاف النواقل
11.....	3.6.2.I الوصلة الثنائية PN
12.....	7.2.I الإعدادات الفيزيائية للخلايا الشمسية
12.....	➤ تيار الدارة المقصورة $I_{cc}$
12.....	➤ فرق كمون الدارة المفتوحة $V_{oc}$
13.....	➤ إستطاعة الخلية $P$
13.....	➤ الإستطاعة القصوى $P_{max}$
14.....	➤ الإستطاعة المثالية $P_{idéale}$

14.....	➤ معامل الشكل FF
14.....	➤ مردود الخلية الشمسية $\eta$ (قدرة التحويل)
14.....	8.2.I. الدارة المكافئة للخلية الشمسية
15.....	9.2.I. تركيب الخلايا الكهروضوئية
15.....	1.9.2.I. التركيب على التسلسل
16.....	2.9.2.I. التركيب على التفرع
17.....	10.2.I. تأثير التغيرات المناخية على خاصية الخلية الكهروضوئية
17.....	1.10.2.I. تأثير الإضاءة
18.....	2.10.2.I. تأثير درجة الحرارة
18.....	11.2.I. أنواع الخلايا الشمسية
19.....	12.2.I. وصف الخلية الشمسية ذات الأغشية الرقيقة
20.....	13.2. I. إيجابيات وسلبيات الخلية الشمسية
20.....	3. I. خلاصة
21.....	4.I. مراجع الفصل الأول

### الفصل الثاني: عموميات على الأغشية الرقيقة وإستعمالاتها في الخلايا الكهروضوئية

#### الجزء الأول

23.....	1.II. الأغشية الرقيقة
23.....	1.1.II. مقدمة
23.....	2.1.II. تعريف الأغشية الرقيقة
23.....	3.1.II. مميزات الأغشية الرقيقة
23.....	4.1.II. آلية تشكل الطبقات الرقيقة
24.....	5.1.II. طرق ترسيب الأغشية الرقيقة
25.....	1.5.1.II. الترسيب الفيزيائي للطور البخاري (Physical Vapor Deposition) PVD
25.....	2.5.1.II. الترسيب الكيميائي للطور البخاري (Chemical Vapor Deposition) CVD

#### الجزء الثاني

26.....	2.II. عموميات على الأكاسيد الناقلة الشفافة (TCO)
27.....	1.2.II. مجالات إستعمال الأكاسيد الناقلة الشفافة
27.....	2.2.II. أكسيد الإنديوم $In_2O_3$
29.....	3.II. الخلاصة
30.....	4.II. مراجع الفصل الثاني

الفصل الثالث: برنامج ونتائج ومناقشة المحاكاة

الجزء الأول

32.....	1.III . برنامج المحاكاة AMPS-1D
32.....	1.1.III . مقدمة
33.....	2.1.III . نظرة عامة على برنامج AMPS-1D
33.....	3.1.III . تعريف برنامج AMPS-1D
34.....	4 . 1 III . مميزات برنامج AMPS-1D
34.....	5.1.III . وظيفة برنامج AMPS-1D على PC
40.....	6.1.III . مبدأ المحاكاة الرقمية

الجزء الثاني

42.....	2. III . نتائج المحاكاة والمناقشة
42.....	1.2.III . هيكل الخلية المدروسة
44.....	2.2.III . إعدادات الخلايا المدروسة
45.....	1.2.2.III . خصائص الطبقات المختلفة
46.....	2.2.2. II . إعدادات الإتصال
46.....	3.2.III . النتائج و المناقشة
47.....	1.3.2.III . دراسة تأثير عامل الحاجز الطاقى للوصل الأمامي PHIB0 على الخصائص الفيزيائية الخلايا
51.....	1.3.2.III . تأثير درجة الحرارة على الخصائص الفيزيائية للخليتين CZTS1 و CZTS2
54.....	3.III . خلاصة
55.....	4.III . مراجع الفصل الثالث
57.....	خلاصة عامة

فهرس الجداول

- الجدول (1.II): بعض الأكاسيد الناقلة الشفافة مرفقة بفجوة الطاقة. 27.....
- الجدول (2.II): بعض الخصائص الكيميائية والفيزيائية لـ  $In_2O_3$ . 28.....
- الجدول (1.III): خصائص الطبقات  $ZnO$  و  $CdS$  و  $CZTS1$  و  $CZTS2$ . 45.....
- الجدول (2.III): القيم المثالية لإعدادات الإتصال المستخدمة في AMPS-1D. 46.....
- الجدول (3.III): القيم المثالية للحاجز الطاقى للوصل الأمامى PHIB0 للخليتين  $CZTS1$  و  $CZTS2$ . 50.....
- الجدول (4.III): الخصائص الفيزيائية المثالية للخليتين  $CZTS1$  و  $CZTS2$  من أجل القيم المثالية لـ PHIB0. 51.....

## قائمة الأشكال

- الشكل (1.I): الشعاع الكلي G الناتج من مجموع الأشعة المباشرة والمنتشرة والمنعكسة ..... 5
- الشكل (2.I): كيفية إنقسام الشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض ..... 5
- الشكل (3.I): توزيع طيف الإشعاع الشمسي ..... 6
- الشكل (4.I): الخلايا الشمسية الكهروضوئية كجهاز لتحويل الطاقة الشمسية ..... 8
- الشكل (5.I): طبقات الخلية الكهروضوئية ..... 8
- الشكل (6.I): مبدأ عمل الخلية الشمسية ..... 9
- الشكل (7.I): ذرة السيليكون ..... 10
- الشكل (8.I): تطعيم السيليكون النقي بالذرة المانحة ..... 10
- الشكل (9.I): تطعيم السيليكون النقي بالذرة الآخذة ..... 11
- الشكل (10.I): رسم تخطيطي للوصلة الثنائية PN ..... 11
- الشكل (11.I): منحني تغير التيار-بدلالة فرق الكمون للخلية الشمسية ..... 12
- الشكل (12.I): منحني I-V لخلية شمسية سيلكونية مع تمثيل نقطة الإستطاعة القصوى  $P_{max}$  ..... 14
- الشكل (13.I): نموذج الدارة المكافئة لخلية شمسية ..... 15
- الشكل (14.I): رسم تخطيطي يمثل ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التسلسل ..... 16
- الشكل (15.I): رسم تخطيطي يمثل ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التفرع ..... 17
- الشكل (16.I): خاصية I(V) لخلية شمسية تحت تأثير الإضاءة ..... 17
- الشكل (17.I): تأثير شدة الإضاءة على إستطاعة الخلية الشمسية ..... 18
- الشكل (18.I): تأثير درجة الحرارة على خصائص (I-V) لخلية شمسية ..... 18
- الشكل (19.I): رسم تخطيطي يمثل أنواع الخلايا الشمسية ..... 19
- الشكل (20.I): غشاء رقيق لخلية شمسية ..... 20
- الشكل (1.II): رسم تخطيطي يوضح أنماط نمو الطبقات الرقيقة ..... 24
- الشكل (2.II): مخطط يوضح بعض الطرق الفيزيائية والكيميائية لترسيب الشرائح الرقيقة ..... 24
- الشكل (3.II): مخطط عصب الطاقة عند درجة الحرارة الصفر المطلق لكل من:  
(a) ناقل b). نصف ناقل c). عازل ..... 26
- الشكل (4.II): التركيب البلوري لمادة أكسيد الإنديوم ( $In_2O_3$ ) ..... 29
- الشكل (1.III): الرمز القابل للتنفيذ لبرنامج AMPS1-d على PC ..... 33
- الشكل (2.III): لقطة شاشة لعرض برنامج AMPS-1D ..... 34
- الشكل (3.III): واجهة مستخدم برنامج AMPS-1D ..... 35
- الشكل (4.III): نموذج زمن الحياة ونموذج كثافة الحالات ..... 35
- الشكل (5.III): ظروف تشغيل الخلية الشمسية ..... 36

- الشكل (6.III): نافذة إعدادات الإضاءة والإمتصاص ..... 36
- الشكل (7.III): هيكل الخلية الشمسية ومعلمات المواد المكونة لهما ..... 37
- الشكل (8.III): نافذة حوار للتعريف بالطبقات المكونة للخلية مع مختلف الخصائص الخاصة بكل طبقة ..... 37
- الشكل (9.III): مقطع من نافذة Layer Info Window ..... 38
- الشكل (10.III): نافذة إعدادات الوصل الأمامي ..... 38
- الشكل (11.III): نافذة إعدادات الوصل الخلفي ..... 39
- الشكل (12.III): زر إرسال الحالة إلى قائمة الإنتظار ..... 39
- الشكل (13.III): مخطط مبسط لخلية الأغشية الرقيقة المستندة على CZTS ..... 42
- الشكل (14.III): معامل الإمتصاص بدلالة طول الموجة ( $\lambda$ ) ..... 45
- الشكل (15.III): مخطط نطاق الطاقة للخلية الشمسية CZTS1 ..... 47
- الشكل (16.III): تغيير تيار الدارة المقصرة للخليتين الشمسيتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة PHIB0 ..... 48
- الشكل (17.III): تغيير جهد المسلك المفتوح  $V_{oc}$  للخليتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة PHIB0 ..... 48
- الشكل (18.III): تغيير مردود الخليتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة تغيير PHIB0 ..... 49
- الشكل (19.III): تغيير معامل الشكل للخليتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة تغيير PHIB0 ..... 50
- الشكل (20.III): تغيير  $J_{sc}$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2 ..... 52
- الشكل (21.III): تغيير  $V_{oc}$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2 ..... 53
- الشكل (22.III): تغيير معامل الشكل FF بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2 ..... 53
- الشكل (23.III): تغيير المردود  $\eta$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2 ..... 54

قائمة الرموز

- BV : عصابة التوصيل.  
BC : عصابة التكافؤ.  
TCO : الأكاسيد الناقلة الشفافة.  
PV : الخلايا الشمسية الكهروضوئية.  
PVD : الترسيب الفيزيائي للأبخرة.  
CVD : الترسيب الكيميائي للأبخرة.  
Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> : CZTS.  
CdS : كبريد الكاديوم.  
PHIB0 : عامل الحاجز الطاقى للوصل الأمامي.  
IR : الأشعة تحت الحمراء.  
AMPS-1D : برنامج المحاكاة الرقمية ( تحليل البنيات الإلكترونية الدقيقة والفوتونية على بعد واحد).  
GSC : الثابت الشمسي.  
E<sub>g</sub> : فجوة الطاقة.  
c : سرعة الضوء في الفراغ m/s.  
ν : تردد الموجة.  
e : الإلكترون.  
n : كثافة الإلكترونات.  
p : كثافة الثقوب.  
I : شدة التيار.  
V : فرق الجهد.  
V<sub>oc</sub> : فرق كمون الدارة المفتوحة.  
J<sub>sc</sub> : تيار الدارة المقصورة.  
K<sub>B</sub> : ثابت بولتزمان.  
q : شحنة الإلكترون.  
V<sub>mp</sub> : الجهد الذي ينتج أكبر قدر من الطاقة.  
I<sub>mp</sub> : التيار الذي يؤدي إلى أقصى قدر من الطاقة.  
J<sub>p</sub> : كثافة تيار الثقوب.  
J<sub>n</sub> : كثافة تيار الإلكترونات.  
P<sub>max</sub> : الإستطاعة العظمى.  
FF : معامل الشكل.  
E<sub>ff</sub> (η) : مردود الخلية.

- $P_{id\acute{e}ale}$  : الإستطاعة المثالية.  
 $n_t$  : كثافة الإلكترونات المختطفة.  
 $P_t$  : كثافة الثقوب المختطفة.  
 $G_n$  : معامل توليد الإلكترونات.  
 $G_p$  : معامل توليد الثقوب.  
 $R_p$  و  $R_n$  : معامل إلتحام الإلكترون مع الثقب.  
 $R_{Sh}$  : مقاومة تفرعية تمثل ضياع التيار في الخلية .  
 $R_S$  : مقاومة تسلسلية ممانعة لمرور التيار.  
 $h$  : ثابت بلانك.  
 $N_a$  : تركيز الذرات الآخذة.  
 $N_d$  : تركيز الذرات المانحة.  
 $N_C$  : كثافة الحالات لعصبة التوصيل.  
 $N_V$  : كثافة الحالات لعصبة التكافؤ.  
 $\lambda$  : طول الموجة.  
 $\epsilon$  : ثابت العزل الكهربائي النسبي.  
 $\epsilon_s$  : ثابت العزل الكهربائي للمادة.  
 $\Phi_{WF}$  : عمل الخروج لمعدن الإلتصال الأمامي .  
 $\Psi$  : الكهرو سلبية للطبقة .  
 $AM1.5$  : طيف ضوء الشمس.

# المقدمة العامة

## مقدمة عامة

حاليا تلعب الطاقة دورا مهما في المجتمعات المتطورة ، مما أدى إلى تزايد الطلب على الطاقة ، وقرب إستنفاد مصادر الطاقة التقليدية (البترو ، الغاز.....) ، إزداد التلوث البيئي بشكل رهيب في جميع أنحاء العالم أدى بالباحثين إلى تكثيف البحث عن مصادر بديلة للطاقة ، تعتبر الطاقات المتجددة الحل الأمثل لكل هذه المشاكل.

الطاقات المتجددة هي مصادر الطاقة التي تتجدد بسرعة ، و من بين الطاقات المتجددة الطاقة الشمسية والتي تعتبر أحد الحلول الواعدة للمستقبل الطاقى للبشرية . مبدأ هذه الطاقة يعتمد على تحويل الأشعة الشمسية إلى كهرباء بإستخدام مواد أشباه الموصلات ، فالشمس هي مصدر هذه الطاقة.

يتلقى كوكبنا 15000 ضعف الطاقة التي نستهلكها ، ففي شمال أوروبا يستقبل كل متر مربع من مساحة الأرض ( $1m^2$ ) ما بين 2 و 3 كيلواط في الساعة يوميا ، وفي جنوب أوروبا والمناطق المدارية يستقبل المتر مربع ما بين 4 و 6 كيلواط في الساعة يوميا [1] . أما الجزائر فتعتبر من أكبر بلدان العالم عرضة لأشعة الشمس. تتراوح مدة تعرض مساحة الجزائر للشمس ما بين 2650 ساعة في الشمال إلى 3500 ساعة في الجنوب سنويا ، وهي من أعلى المعدلات في العالم ، وهذه من الأسباب الرئيسية التي جعلت الجزائر تطمح إلى إنتاج حوالي 40% من الكهرباء في آفاق 2030[2].

من بين العوامل الرئيسية التي أدت إلى كبح إنتشار الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم التكلفة المرتفعة للكيلواط الواحد والتي لا تنافس حاليا سعر الكيلواط الواحد الذي تنتجه الطرق التقليدية ، من بين الحلول المقترحة لخفض السعر هو التقليل من كمية المواد المستعملة في صناعة الخلايا الشمسية ، وزيادة زمن حياتها .

حاليا ، تعتبر الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة أقل تكلفة من نظيرتها المصنوعة من السيلسيوم أحادي البلورة ومتعددة البلورات . من أهم المواد شيوعا في صناعة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة نذكر المركب الثنائي CdTe ، الثلاثي ZnO/CdS/ Cu( In·Ge)Se<sub>2</sub> حيث وصل مردود الخلية Cu( In·Ga)Se<sub>2</sub> ، والرابعي CuAlSe<sub>2</sub> ، CuInS<sub>2</sub> ، CuInSe<sub>2</sub> القياسي إلى حوالي 22% [3]. إلا أن هذا النوع من الخلايا يعاني من ندرة العناصر المكونة للطبقة فمثلا الإنديوم In والتيلوريوم Te هي عناصر نادرة وباهضة الكلفة والكاديوم Cd عنصر جد سام . هذا ما أدى بالعلماء والباحثين للبحث عن مواد بديلة أخرى تكون أكثر وفرة وغير سامة ولا مضرّة بالبيئة [4].

من بين أشباه الموصلات المقترحة الرباعي Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> والذي يرمز له بـ CZTS ومن بين مميزات هذا المركب أن جميع عناصره موجودة في الطبيعة وبوفرة ، وجميع عناصره غير ضارة بالبيئة ولا سامة بالإضافة إلى خواصه الضوئية العالية ، فمعامل إمتصاصه  $\alpha$  يصل حتى  $10^5 cm^{-1}$  في المجال المرئي ، وهو نصف ناقل مباشر وطاقة فجوته تتراوح ما بين 1 و 1.5 eV [5]. نظريًا مردود الخلايا المصنوعة بهذا المركب تصل إلى 32.2% [6] ، تجريبيا المردود الأعلى المتحصل عليه هو 11% وقد تحصل عليه فريق البحث ل Yan والآخرين [7].

ولهذا إخترتنا في عملنا هذا دراسة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة والمتكونة من CZTS كطبقة ماصة و CdS كطبقة عازلة و ZnO كطبقة نافذة بالإضافة إلى الوصل الأمامي والخلفي من المعادن والأكاسيد الشفافة .

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إستعمال البرنامج AMPS-1D

(Analysis Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional) لدراسة تأثير إرتفاع الحاجز الطاقوي

للوصل الأمامي (PHIB0) ودرجة الحرارة على الخصائص الفيزيائية على غرار  $V_{oc}$  ،  $J_{sc}$  ،  $FF$  و  $\eta$  لخليتين شمسييتين

. ZnO/CdS/CZTS1 و CZTS2 .

في هذا البرنامج إستخدمنا نموذج زمن الحياة لحاملات الشحنة (الإلكترونات والثقوب) و تم تقييم أداء الخلايا تحت تأثير

طيف الإشعاع AM1.5 .

بالإضافة إلى المقدمة العامة ، الخلاصة العامة ، الملخص باللغة العربية والفرنسية و الإنجليزية ، هذه المذكرة تحتوي على

ثلاثة فصول ، وكل فصل ينتهي بقائمة مراجع .

الفصل الأول : يتجزأ الى جزئين قدمنا في الجزء الأول عموميات على الطاقة الشمسية والإشعاع الشمسي وفي الجزء

الثاني تطرقنا إلى الخلايا الكهروضوئية بما في ذلك مبدأها وكيفية ربطها (على التفرع والتسلسل) وتطرقنا للتأثيرات المناخية على

خصائصها الفيزيائية ، كما ذكرنا بعض أنواع الخلايا الكهروضوئية بما في ذلك الخلايا الكهروضوئية ذات الأغشية الرقيقة كونها محل

بحثنا.

في الفصل الثاني: تطرقنا إلى عموميات حول الأغشية الرقيقة وكذلك إلى آليات تشكيل الطبقات الرقيقة وأيضا إلى بعض

طرق تحضيرها التي تعددت وتنوعت مبادئ عملها ، وفي الأخير تطرقنا للأكاسيد الموصلة الشفافة بصفة عامة وذكرنا بعض مجالات

إستعمالها وتطرقنا بصفة خاصة لأكسيد الإنديوم ( $In_2O_3$ ).

في الفصل الثالث : تطرقنا في الجزء الأول إلى برنامج المحاكاة AMPS-1D وكيفية إستعماله ، وفي الجزء الثاني إلى نتائج

المحاكاة ونفسيرها وذلك بدراسة تأثير إرتفاع الحاجز الطاقوي للوصل الأمامي ودرجة الحرارة على الخصائص الفيزيائية للخليتين

الشمسييتين ZnO/CdS/CZTS1، CZTS2 . وأخيرا ننهي هذه المذكرة بخلاصة عامة.

### مراجع المقدمة العامة

- [1] A. Malek, ''Technologie et applications de l'énergie solaire photovoltaïque'', E-newsletter des Energies Renouvelables, Art. 1447 (2011).
- [2] M. Ouled Ali, ''Propriétés optoélectroniques du semi-conducteur Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> appliquée aux cellules photovoltaïques'', Mémoire Magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran (2010).
- [3] P. Jackson, R. Wuerz, D. Hariskos, W. Witte, M. Powalla, Phys. Status Solidi RRL 10 (2016) 583-586. Doi :org/10.1002/pssr.201600199..
- [4] A. Laghouag, H. Bencheikh , "Etude et simulation d'une cellule solaire à base des éléments chalcogènes", master académique, université Mohammed Boudiaf - m'sila, 2018/2019.
- [5] R. Boudaira, O. Meglali, A. Bouraiou, N. Attaf, C. Sedrati, M.S. Aida, Surface engineering, Manuscript accepted for publication (2020). Doi.org/10.1080/02670844.2020.1758013.
- [6] C. Kim, S. Hong, Molecular Crystals and Liquid Crystal, 678 (1) (2019) 70-76. Doi.org/10.1080/15421406.2019.1597531.
- [7] C. Yan, J. Huang, K. Sun, S. Johnston, Y. Zhang, H. Sun, A. Pu, M. He, F. Liu, K. Eder, L. Yang, J. M. Cairney, N. J. Ekins-Daukes<sup>1</sup>, Z. Hameiri, J.A. Stride, S. Chen, M. A. Green, X. Hao, Nature Energy 3(9) (2018) 764-772. Doi.org/10.1038/s41560-018-0206-0

# الفصل الأول

عموميات على الطاقة الشمسية

والخلايا الكهروضوئية

## الجزء الأول

### 1.1.I. الطاقة الشمسية.

#### 1.1.I. مقدمة :

في الطبيعة ، تعتبر الطاقات المتجددة ظاهرة طبيعية تتميز بعدة أنواع من الطاقة المتجددة : طاقة الرياح والطاقة الكهرومائية والطاقة الحرارية الأرضية وطاقة الكتلة الحيوية والطاقة الشمسية . وتعود معظم مصادر الطاقة المتجددة المتوفرة على سطح الأرض إلى الإشعاعات الشمسية فجميع أنواع الطاقات بما فيها البترول والغاز والفحم تكونت بسبب أشعة الشمس وما تلي ذلك من حرارة وضغط عبر الأحقاب الزمنية.

حيث تعتبر الطاقة الشمسية المصدر الأساسي والرئيسي الذي يمد كوكب الأرض بالطاقة ، كما تعتبر مصدر واسع الانتشار في مختلف أنحاء العالم بحيث أن الطاقة التي يمكن الحصول عليها من أشعة الشمس لمدة 105 دقيقة تكفي إحتياجات وإستهلاك العالم لمدة عام ، وقد كان إستخدامها منذ آلاف السنين في المناطق الحارة لتسخين المياه وتجفيف المحاصيل الزراعية لحفظها من التلف ، أما في الوقت الحالي فإن الأبحاث والتجارب تقوم على إستغلال الطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة كهربائية وإستخدامها في التدفئة وتكييف الهواء وغيرها [2.1].

#### 2.1.I. مصدر الطاقة الشمسية:

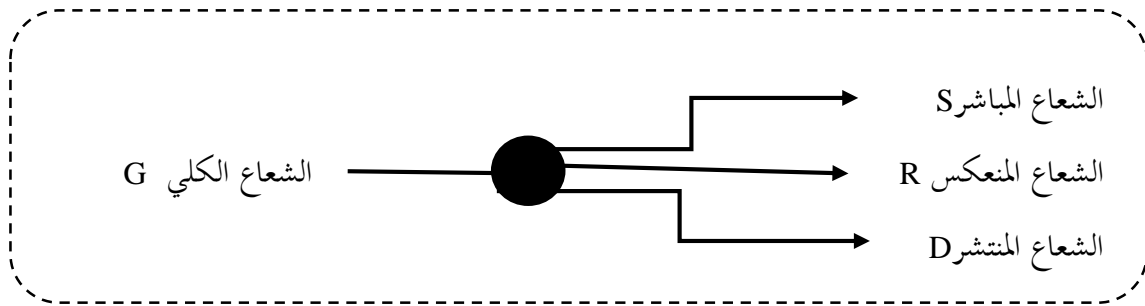
الشمس عبارة عن كرة غازية يبلغ قطرها حوالي 1.4 مليون كيلومتر وتقدر كتلتها بـ  $2 \times 10^{30}$  كيلوغرام أي أثقل من الأرض بحوالي 333 ألف مرة . تتركب كيميائيا من غاز الهيدروجين بنسبة 70% وغاز الهيليوم بنسبة 27% وبقية العناصر الأخرى بنسبة 3% وتشمل (الليثيوم ، البريليوم ، البور ، الكربون ، النيتروجين ، الأكسجين ، الفلور ، الصوديوم... إلخ.

تتولد الطاقة الشمسية في باطن الشمس حيث كثافة الغاز تكون كبيرة جدا ودرجة الحرارة عالية والتي تبلغ 16 مليون كلفن، فتحدث تفاعلات إندماجية نووية وفيه تندمج أربع نوى لذرات الهيدروجين لتكوين أيون ذرة الهيليوم ، حيث تكون كتلة النواة الناتجة أقل من كتلة المتفاعلات وفرق الكتلة يتحول إلى طاقة التي يمكن رؤيتها على كوكبنا بهيئة ضوء والإحساس بها على هيئة حرارة [3.4].

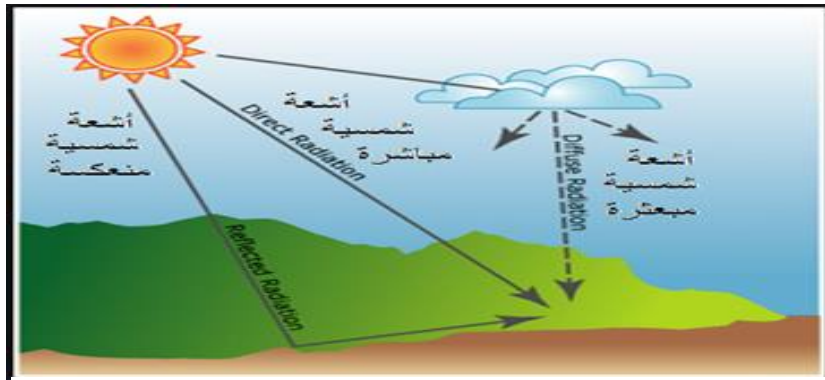
#### 3.1.I. الإشعاع الشمسي:

الإشعاع الشمسي هو موجة كهرومغناطيسية ، تأتي طاقتها على شكل إشعاع متدفق يخترق هذا الأخير الغلاف الجوي الأرضي وينعكس جزء منها في الفضاء الخارجي للغلاف الجوي ، كما يتشتت جزء داخله أما الجزء المتبقي فينفذ عبر الغلاف وبالتالي فإن الشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض يكون على ثلاث أشكال [5]:

- **الشعاع المباشر (S):** هو الشعاع الذي يعبر الغلاف الجوي دون إنعكاس ولا تشتت ؛ أي عبارة عن حزمة ضوئية مباشرة من الشمس وتبقى على حالها دون ضياع.
- **الشعاع المنعكس (R):** هو الشعاع الذي ينعكس على الأرض أو على الأجسام الموجودة على سطحها . يمكن أن يكون هذا الشعاع المنعكس مهمًا عندما تكون الأرض عاكسة بشكل خاص (الماء والثلج).
- **الشعاع المنتشر (D):** هو الشعاع الذي يتعرض إلى تشتت بواسطة مكونات الغلاف الجوي (الهواء والغيوم والهباء الجوي) لذلك فإنه يعتمد قبل كل شيء على حالة الطقس.
- **الشعاع الكلي (G):** هو الشعاع الواصل إلى نقطة من سطح الأرض، أي الناتج من مجموع الأشعة المباشرة والمنتشرة والمنعكسة ، كما هو موضح في الشكلين (1.I) و(2.I).



الشكل (1.I): الشعاع الكلي G الناتج من مجموع الأشعة المباشرة والمنتشرة والمنعكسة.



الشكل (2.I): كيفية إنقسام الشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض [5].

#### 4.1.I. طيف الإشعاع الشمسي:

المسافة بين الأرض والشمس كبيرة جدا والمقدرة بحوالي  $150 \times 10^6$  Km ، البعد الكبير بين الشمس والأرض لم يكن أبدا عائقا لتلقي سطح الكرة الأرضية كمية كبيرة من الطاقة قدرت بمقدار  $180 \times 10^6$  GW ، و لهذا السبب الطاقة الشمسية تقدم كبديل لمصادر الطاقة الأخرى [6].

ينبعث من الشمس شعاعاً كهرومغناطيسياً يتميز بنطاق طول موجي يتراوح من 0.22 إلى 10µm ، وهي مؤلفة بالفعل من مختلف الأطوال الموجية أي بطاقات مختلفة . تردد الضوء وطول الموجة يحدد طاقته ، والفوتونات هي كميات الطاقة التي يتألف منها شعاع الضوء ، ويمكن تمثيل طاقته المرتبطة بتردها (طول الموجة) بالعلاقة:

$$E = hu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.I)$$

حيث:

$v$  : تردد الموجة.

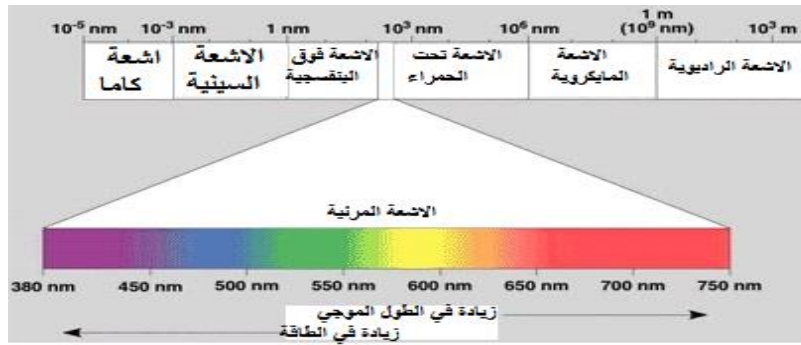
$c$  : سرعة الضوء في الفراغ  $3 \times 10^8$  m/s.

$\lambda$  : طول الموجة.

$h$  : ثابت بلانك  $6.62 \times 10^{-34}$  m<sup>2</sup> kg/s.

ويتكون الإشعاع الشمسي الواصل إلى الأرض من عدة أطوال موجية وبنسب مختلفة [7]:

- 9% في نطاق فوق البنفسجية ( $< 0.4 \mu\text{m}$ ).
  - 47% في النطاق المرئي (0.4 إلى  $0.8 \mu\text{m}$ ).
  - 44% في نطاق الأشعة تحت الحمراء ( $> 0.8 \mu\text{m}$ ).
- وكما موضح في الشكل رقم (3.I).



الشكل (3.I): توزيع طيف الإشعاع الشمسي.

### 5.1.I. الثابت الشمسي GSC:

الثابت الشمسي هو مقدار الطاقة المارة خلال زمن معين والساقطة عمودياً على وحدة المساحة من سطح الغلاف الجوي الخارجي للأرض عند قيمة متوسط المسافة بين الأرض والشمس ، تقدر قيمته على الغلاف الجوي بـ  $1370 \text{ W/m}^2$  [8].

## الجزء الثاني

### 2.1. الخلايا الشمسية.

#### 1.2.1. مقدمة:

الشمس هي مصدر طاقة غير محدود تقريبًا ، يمكنها أن تغطي عدة آلاف من مرات إستهلاكنا للطاقة بشكل عام [9]، لهذا السبب كان الإنسان يبحث لفترة طويلة من أجل الإستفادة من هذه الطاقة الهامة ، وتمكن من تحقيق هذا الهدف بواسطة المركب الإلكتروني المعروف بإسم الخلايا الكهروضوئية . الفعل الكهروضوئي هو ظاهرة فيزيائية خاصة بمواد معينة تسمى أشباه الموصلات (وأشهرها السيليكون).

بفعل هذه الخلايا أصبح من الممكن تحويل طاقة الضوء مباشرة من أشعة إلى كهرباء عن طريق إنتاج ونقل مادة شبه موصلة ذات شحنات كهربائية موجبة أو سالبة تحت تأثير الضوء ، وتسمى الطاقة الكهربائية التي تم الحصول عليها من الطاقة الضوئية بالطاقة الكهروضوئية. مصطلح الخلايا الكهروضوئية أو photovoltaic هي مشتقة من اليونانية ، وتتكون من جزئين:

• Photon : يعني الضوء.

• Volt : هي وحدة الجهد الكهربائي المشتق من إسم العالم الإيطالي Alessandro Volta.

تم إكتشاف هذه الظاهرة في القرن التاسع عشر من قبل الفيزيائي «Alexandre Edmond Becquerel»، في أوائل عام 1954 تم تطوير أول خلية كهروضوئية من أجل تشغيل الأقمار الصناعية.

منذ عام 1958 ، تقوم الخلايا الكهروضوئية بتوفير الطاقة للمركبات الفضائية فقط . يعتبر أول تطبيقاتها الأرضية في أوائل السبعينيات ، تم إستخدام الخلايا الكهروضوئية لتزويد المنازل الصغيرة المعزولة ومعدات الإتصالات بالطاقة [10]. حيث كانت الطاقة الشمسية الكهروضوئية محل إهتمام كبير في السنوات الأخيرة ، إنها طاقة غير ملوثة وتوفر حلولاً حقيقية لمختلف المشاكل المطروحة حاليًا فيما يتعلق بتغير المناخ وأزمة الطاقة.

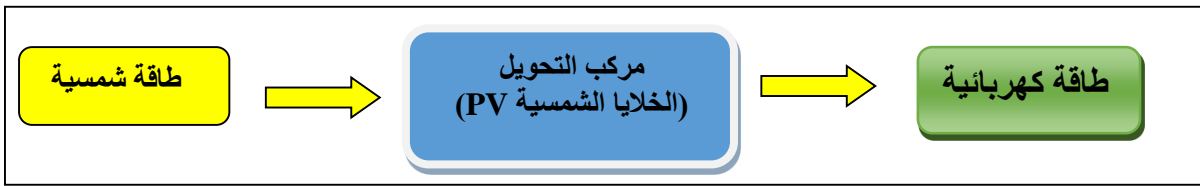
#### 2.2.1. تعريف الطاقة الكهروضوئية:

الطاقة الشمسية الكهروضوئية هي واحدة من أكثر الطاقات المتجددة إستخدامًا ، يعتمد مبدأها على تحويل الشعاع الكهرومغناطيسي (الشمسي) مباشرة إلى كهرباء بواسطة مواد أشباه الموصلات مثل السيليكون ، يتم تحويلها إلى مكونات إلكترونية، تعرف بجهاز تحويل يسمى "الخلايا الشمسية" ، هذه المواد الحساسة للضوء لها خاصية تحرير إلكتروناتها تحت تأثير الطاقة الخارجية ، إنه التأثير الكهروضوئي . يتم توفير الطاقة بواسطة الفوتونات (مكونات الضوء) التي تصطدم بالإلكترونات وتحركها ، مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي ، يمكن تحويل هذا التيار المباشر من القدرة الصغيرة المحسوبة في ذروة واط (Wp) إلى تيار متناوب بفضل العاكس الكهربائي.

تخضع الخلايا الشمسية حاليًا للعديد من الأبحاث بهدف تحقيق أفضل علاقة بين نسبة مردود الطاقة وسعر التكلفة [11]. يتكون المولد الشمسي الكهروضوئي من وحدات كهروضوئية تتكون من خلايا كهروضوئية متصلة ببعضها البعض . يعتمد أداء التركيب الكهروضوئي على اتجاه الألواح الشمسية ومناطق أشعة الشمس التي تكون فيها.

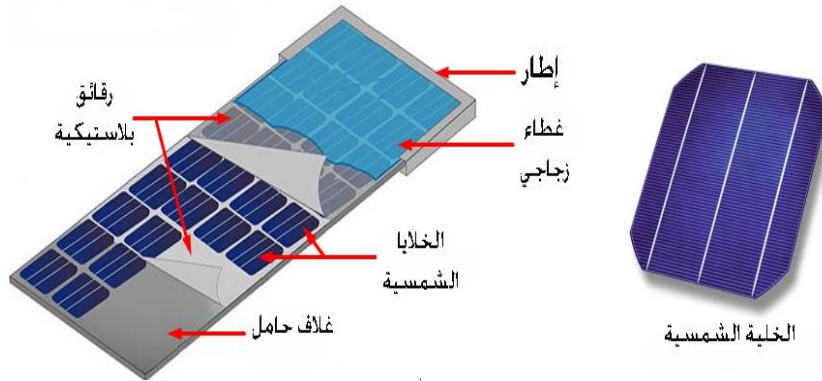
### 3.2.I. تعريف الخلية الشمسية:

الخلية الشمسية الكهروضوئية هي جهاز يقوم بتحويل مباشرة الطاقة الكهرومغناطيسية (الشعاع الشمسي) إلى طاقة كهربائية مستمرة قابلة للإستخدام مباشرة ، كما موضح في الشكل (4.I).



الشكل (4.I): الخلايا الشمسية الكهروضوئية كجهاز لتحويل الطاقة الشمسية [12].

تتكون الخلية الشمسية من طبقة سالبة وطبقة موجبة ومنطقة إلتحام التي تكونت نتيجة إنتشار حاملات الشحنة من كلا الطبقتين لتكون منطقة متعادلة تسمى منطقة الإستنزاف ، وكما هو موضح في الشكل (5.I).



الشكل (5.I): طبقات الخلية الكهروضوئية.

### 4.2.I. تاريخها:

1839: تم إكتشاف تحويل الضوء إلى كهرباء ويسمى التأثير الكهروضوئي ، بواسطة أنطوان بيكريل [13].

1873 : إكتشاف الموصلية الضوئية للسيليكون بواسطة ويلويسميث.

1954 : قام ثلاثة باحثين أمريكيين ، تشاين دارلين ، جيرالد بيرسون وكالفن فيولر بصناعة خلية كهروضوئية تقوم بتحويل

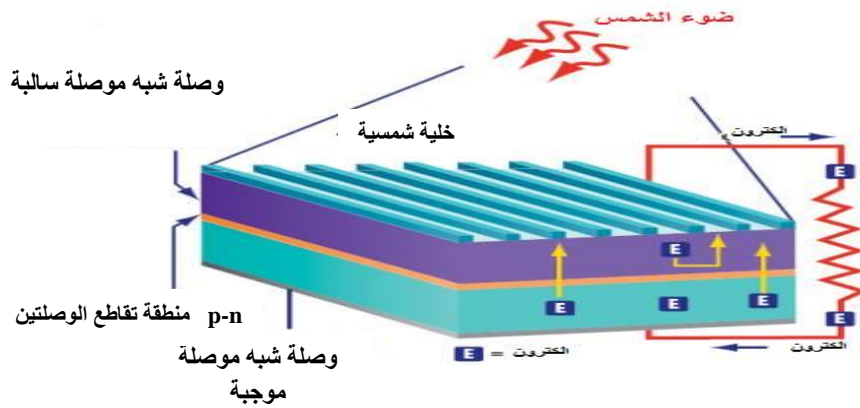
الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية قادرة على تشغيل جهاز كهربائي لبضع ساعات خلال النهار [14].

1958 : تم تطوير خلية ذات مردود 9% ، الأقمار الصناعية الأولى يتم إرسالها بواسطة الخلايا الشمسية إلى الفضاء [15].

- 1973 : تم بناء أول منزل مزود بالخلايا الضوئية في جامعة ديلاوير [16].  
 1983: أول سيارة تعمل بالطاقة الضوئية تمشي مسافة 4000 كم في أستراليا [17].  
 2002: تصل الطاقة الكهروضوئية المركبة التراكمية إلى 2000 MW [17].

### 5.2.I. مبدأ عمل الخلية الشمسية:

- الخلية الشمسية هي مركب إلكتروني يحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية ويرتكز هذا التحويل على ثلاث مراحل هي [20]:
1. إمتصاص الفوتونات الساقطة على الخلايا الكهروضوئية (في حالة ما إذا كانت طاقة الفوتون الوارد أكبر من طاقة فجوة (énergie de gap) للطبقة الماصة).
  2. تحويل طاقة الفوتون إلى طاقة كهربائية بإنشاء الأزواج (إلكترون-ثقب) في أشباه الموصلات.
  3. جمع الإلكترونات المتحررة في الخلية.
- كما موضح في الشكل (6.I).

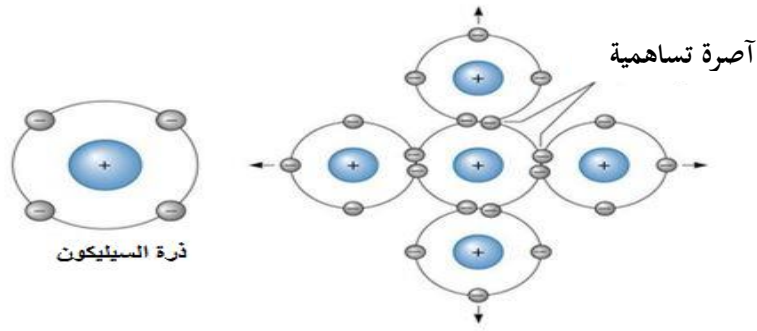


الشكل (6.I): مبدأ عمل الخلية الشمسية.

### 6.2.I. مكونات الخلية الشمسية :

#### 1.6.2. I. عصابة التكافؤ - عصابة التوصيل :

تصنع الخلية الشمسية عادة من مادة بلورية سميكة كالسيليكون البلوري (Silicon Crystalline) ، أو مادة لابلورية رقيقة (Amorphous Silicon a-Si) ، هذه المواد هي إحدى مواد أشباه الموصلات المعروفة . تمتلك ذرة السيليكون أربعة إلكترونات تكافؤية وتشارك مع أربع ذرات السيليكون المجاورة في رابطة تساهمية [19] . كما هو موضح في الشكل (7.I).



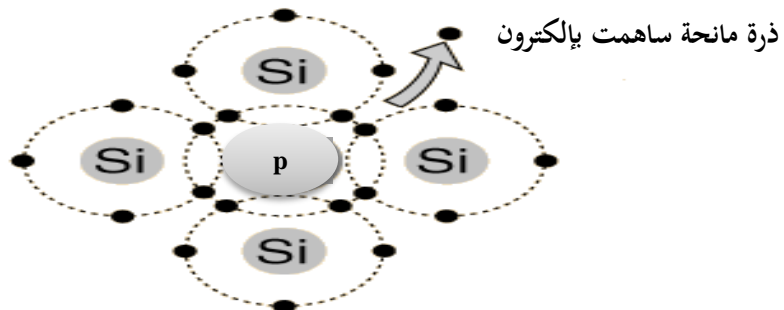
الشكل (7.I): ذرة السيليكون.

- عصبية التكافؤ: عصبية الطاقة ذات مستويات الطاقة الدنيا في الذرة ، حيث تكون ممتلئة بالإلكترونات مرتبطة بالبلورة.
- عصبية التوصيل: عصبية الطاقة ذات المستويات العليا في الذرة ويكون فيها متاحا للإلكترونات الإنتقال من ذرة لأخرى ، حيث يفصل بين عصبتي التكافؤ والتوصيل منطقة يمنع على الإلكترون التواجد بها ولذلك تسمى مناطق الطاقة الممنوعة أو المحضورة.

### 2.6.2.I. تطعيم أنصاف النواقل:

أشبه النواقل المطعمة هي أشباه نواقل غير نقية أي غير ذاتية وذلك بإضافة شوائب للشبه الموصل النقي ، حسب نوع الشوائب المضافة له يصنف إلى نوعان :

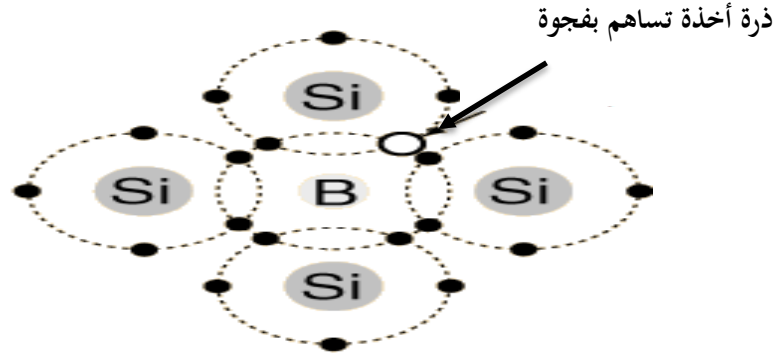
- تطعيم نوع n : لتوليد الشحنة السالبة في شبه ناقل نقي مثل السيليكون نقوم بإضافة ذرة فوسفور داخل التركيب البلوري للسيليكون ، يرتبط الفوسفور الذي يحتوي على 5 إلكترونات في الطبقة الإلكترونية الخارجية بـ 4 إلكترونات لأربع ذرات السيليكون ، مما يترك إلكترون حر وبالتالي أغلبية حاملات الشحنة هي الإلكترونات ذات الشحنة السالبة وحاملات الشحنة الأقلية هي الثغوب ، تسمى ذرة الفوسفور بالذرة المانحة Nd لأنها منحت إلكترونات لشبه موصل النقي وهو المسؤول عن عملية التوصيل ، يطلق على هذا النوع من التطعيم تطعيم من نوع n.



الشكل (8.I): تطعيم السيليكون النقي بالذرة المانحة.

- تطعيم نوع p : لتوليد الشحنة الموجبة في أنصاف النواقل مثل السيليكون ، نقوم بإضافة ذرة البور داخل التركيب البلوري للسيليكون ، يرتبط البور الذي يحتوي على 3 إلكترونات تكافؤ في الطبقة الإلكترونية الخارجية مع ثلاث إلكترونات لذرات

سيليكون مما يؤدي إلى خلق ثقب حر ، وبالتالي أغلبية حاملات الشحنة هي الثقوب ذات الشحنة الموجبة وحاملات الشحنة الأقلية هي الإلكترونات ، لذلك تسمى ذرة البور بالذرة الآخذة  $N_a$  ، والمسؤول عن عملية التوصيل الكهربائي في هذا النوع هي الثقوب ، يطلق على هذا النوع من التطعيم تطعيم من نوع p.

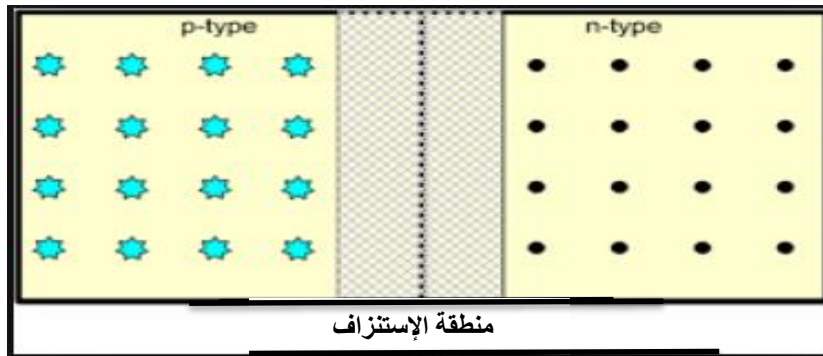


الشكل (9.I): تطعيم السيليكون النقي بالذرة الآخذة.

### 3.6.2.I. الوصلة الثنائية PN:

الوصلة PN هي عبارة عن مركب إلكتروني يصنع من المواد الشبه الناقلة ، تتكون من طبقتين رقيقتين "بلورتين" تصنع من مادة موصلية ، حيث تتكون الوصلة من جزئين ، الجزء الأول عبارة عن شبه ناقل مطعم بالذرات المانحة أي أن بها إلكترونات حرة بمعنى آخر من نوع n ، أما الجزء الثاني فهو شبه ناقل مطعم بذرات آخذة أي من نوع p كما تحتوي الوصلة على حاجز (Barrier) يكون موجود بين سطحي الالتصاق للبلورة من نوع n مع البلورة من نوع p للعلم أن حاملات الشحنة في الجزء n هي الإلكترونات وحاملات الشحنة في الجزء p هي الثقوب.

ما إن يتم إلتصاق البلورتين أثناء عملية التصنيع حتى تنتقل الإلكترونات القريبة من سطح الإلتصاق من البلورة n خلال الحاجز لتمازج الفجوات الإلكترونية القريبة من نوع p.

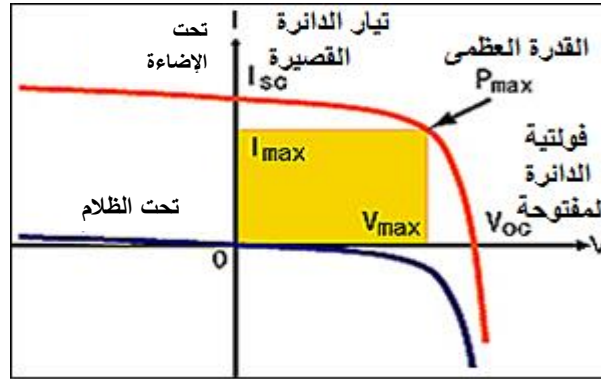


الشكل (10.I): رسم تخطيطي للوصلة الثنائية PN [20].

تتماز هذه الوصلة بقدرتها على تمرير التيار الكهربائي في الاتجاه الأمامي (إحياز أمامي) ، ومنعه من المرور في الاتجاه

### 7.2.I. الإعدادات الفيزيائية للخلايا الشمسية:

الخاصية تيار-فرق كمون (J-V) للخلية الشمسية تحت الضوء أو الظلام المقدمة في الشكل (11.I) تمثل تغير التيار الكهربائي المولد من طرف الوصلة بدلالة فرق الكمون بين طرفيها.



الشكل (11.I): منحنى تغير التيار-بدلالة فرق الكمون للخلية الشمسية [21].

#### ➤ تيار الدارة المقصورة $I_{CC}$ .

تيار الدارة المقصورة يرمز له بالرمز  $I_{CC}$  ، تتوافق قيمة  $I_{CC}$  مع شدة تيار الدارة المقصورة ؛ هذا يعني أن  $V=0$  ما  $I= I_{CC}$  ، لخلية شمسية مثالية تيار الدارة المقصورة يساوي التيار الكهروضوئي  $I_{ph}$  .  $I_{ph}$  يتناسب طرديا مع الطاقة المشعة المستقبلية في درجة الحرارة المحيطة وسرعة دوران الهواء المحيط و سطح الخلية . نحصل على قيمته عن طريق توصيل الخلية الشمسية بالأمبير متر [22] .

$$I_{CC} = I_{ph} \quad (2.I)$$

#### ➤ فرق كمون الدارة المفتوحة $V_{OC}$ .

جهد الدارة المفتوحة  $V_{OC}$  هو جهد الدارة لما يكون التيار المار في الخلية يساوي صفر ( $I = 0$ ) . يتم التعبير عن جهد الدارة المفتوحة حسب المعادلة التالية [22]:

$$V_{OC} = \frac{K_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{CC}} + 1 \right) \quad (3.I)$$

حيث:

$K_B$  : ثابت بولتزمان .

q : شحنة الإلكترون  $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$  .

➤ إستطاعة الخلية P.

في ظروف تشغيل ثابتة للخلية الشمسية ؛ الإضاءة ، درجة الحرارة ، سرعة دور هواء المحيط... إلخ ، الطاقة الكهربائية التي تنتجها الخلية الكهروضوئية الشمسية تحت الإضاءة يساوي إلى ناتج جداء شدة التيار والجهد . علاقتها تعطى كالآتي [22]:

$$P = I \times V \quad (4.I)$$

حيث:

P : يتم قياس الطاقة عبر الخلية الكهروضوئية بالواط (W).

V : قياس الجهد عبر الخلية الكهروضوئية بالفولت (V).

I : قياس شدة التيار عبر الخلية الكهروضوئية بالأمبير (A).

➤ الإستطاعة القصوى  $P_{\max}$ .

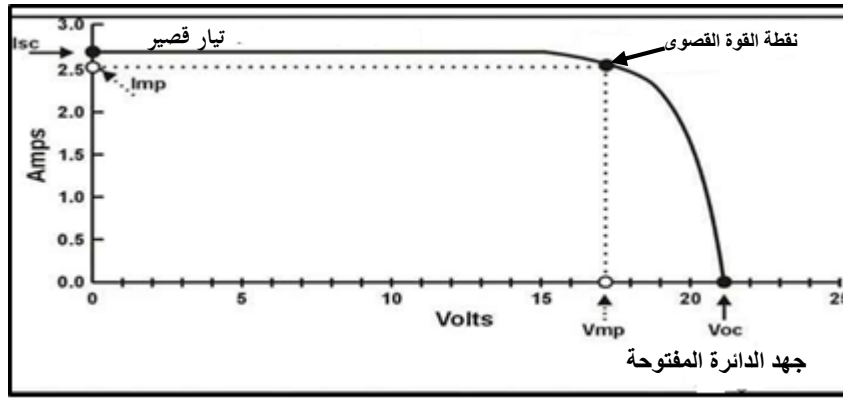
الإستطاعة القصوى للخلية الشمسية  $P_{\max}$  ، يتوافق مع النقطة التي ينتج عنها جداء الجهد وكثافة التيار القصوى . إستطاعة الحد الأقصى المثالية يتوافق مع جهد الدارة المفتوحة  $V_{mp}$  مضروبًا في التيار المقصر  $I_{mp}$  وعلاقته تعطى كالآتي:

$$P_{\max \text{ idéale}} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (5.I)$$

$P_{\max \text{ idéale}}$  : الطاقة المثالية المقاسة في أطراف الخلية الكهروضوئية بالواط (W).

$V_{mp}$  : الجهد الذي ينتج أكبر قدر من الطاقة ، ويسمى أيضا معدل الجهد الناتج من الخلية يقاس بالفولت (V).

$I_{mp}$  : هو التيار الذي يؤدي إلى أقصى قدر من الطاقة ، ويسمى أيضا معدل التيار الناتج من الخلية ويقاس بالأمبير (A).



الشكل (12.I): منحني I-V لخلية شمسية سيليكونية مع تمثيل نقطة الإستطاعة

القصوى  $P_{max}$ .

➤ الإستطاعة المثالية  $P_{idéale}$ .

هي الجداء بين جهد الدائرة المفتوحة  $V_{OC}$  والتيار الدائرة المقصرة  $I_{CC}$  ويعطي وفق العلاقة التالية [22]:

$$P_{idéale} = I_{cc} \times V_{oc} \quad (6.I)$$

➤ معامل الشكل  $FF$ .

معامل الشكل هو النسبة بين الإستطاعة القصوى  $P_{max}$  والإستطاعة المثالية ويعطى وفق العلاقة التالية [22]:

$$FF = \frac{P_m}{V_{OC} \times I_{CC}} = \frac{I_{pm} \times V_{pm}}{V_{OC} \times I_{CC}} \quad (7.I)$$

➤ مردود الخلية الشمسية  $\eta$  (قدرة التحويل).

قدرة التحويل للخلية الشمسية  $\eta$  هي نسبة الطاقة القصوى التي توفرها الخلية على إستطاعة الإضاءة المسلطة على

سطحها  $P_{incident}$ ، يتم التعبير عنها وفقاً للمعادلة التالية [22]:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{I_{pm} \times V_{pm}}{P_{inc}} = FF = \frac{V_{OC} \times I_{CC}}{P_{inc}} \quad (8.I)$$

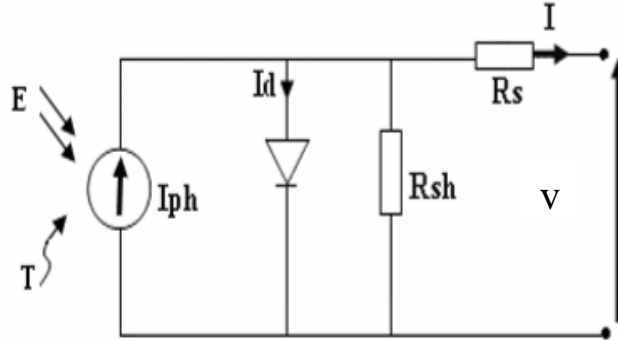
### 8.2.I. الدارة المكافئة للخلية الشمسية:

يتكون أبسط نموذج لتمثيل الخلية الكهروضوئية من منبع تيار موصول على التوازي مع الصمام الثنائي، يوضح الشكل

(13.I) نموذج الدارة المكافئة الموسعة الذي يعطي توصيفاً جيداً في أغلب التطبيقات حيث يضاف تأثير مقاومة تسلسلية  $R_S$

الممانعة لمرور التيار، ومقاومة تفرعية  $R_{SH}$  تمثل ضياع التيار في الخلية الكهروضوئية. كلما انخفضت قيمة  $R_S$  أو إزدادت قيمة

$R_{Sh}$  كلما كانت الخلية الكهروضوئية ذات كفاءة كبيرة ، والحالة المثالية تتحقق عندما تكون  $R_S=0$  و  $R_{Sh}=\infty$  ، وبشكل عملي فإن  $R_S$  للخلية الكهروضوئية عبارة عن بضع ميلي أوم و  $R_{Sh}$  أكبر من عشرة أوم [23].



الشكل (13.I): نموذج الدارة المكافئة للخلية الشمسية [24].

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_S I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V - R_S I}{R_{Sh}} \quad (9.I)$$

حيث :

$I_{ph}$  : التيار الضوئي .

$V$  : الجهد المولد في الخلية .

$R_{Sh}$  : المقاومة التفرعية .

$K$  : ثابت بولتزمان  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  .

$T$  : درجة الحرارة المطلقة .

$q$  : شحنة الإلكترون .

## I. 9.2 تركيب الخلايا الكهروضوئية :

### I. 9.2.1 التركيب على التسلسل:

يمكن توصيل الخلايا الكهروضوئية على التسلسل ، حيث توترات جميع الخلايا تتغير بينما التيار المتدفق من خلال الخلايا هو نفس تيار خلية واحدة كما هو موضح في الشكل (14.I) . يتم الحصول على الخاصية الناتجة من التجميع في السلسلة عن طريق إضافة الفولتية لكل خلية في تيار معين [25] . وبالتالي فرق جهد الدارة المفتوحة هو عدد الخلايا  $N_S$  مضروب في جهد الخلية الواحدة  $V_{OC}$  ويكون التوصيل كالأتي :

$$V_{OCN_S} = N_S \times V_{OC} \quad (10.I)$$

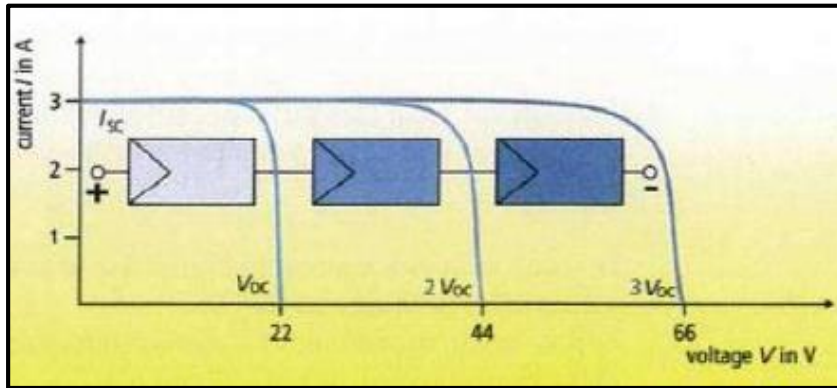
$$I_{CC} = I_S \quad (11.I)$$

حيث:

$V_{OCN_S}$ : مجموع الجهد في دارة مفتوحة لعدد من الخلايا المتسلسلة .

$N_S$ : عدد الخلايا المربوطة على التسلسل.

$I_{CC}$  : التيار في دارة مغلقة لعدد من الخلايا المتسلسلة [26].



الشكل (14.I): رسم تخطيطي يمثل ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التسلسل [25].

### 2.9.2.I التركيب على التفرع:

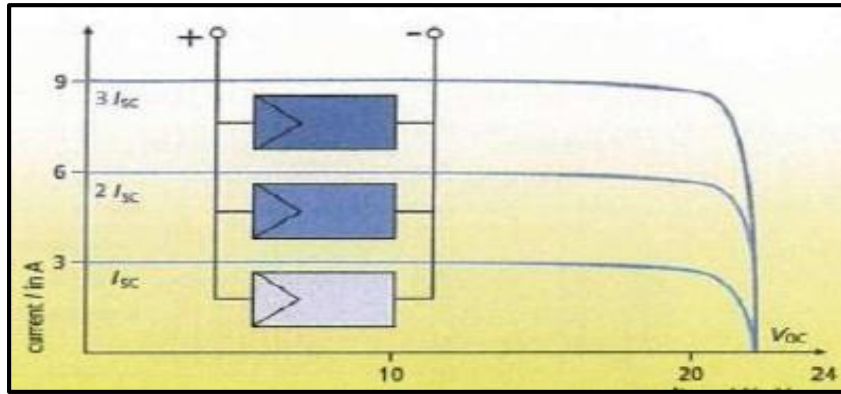
عند ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التفرع يسمح بزيادة التيار ، وبالتالي يكون الجهد مساوي لجهد الخلية الواحدة بينما يكون التيار يساوي إلى مجموع الخلايا الموصولة على التفرع ، أي زيادة في شدة التيار ، ويكون التوصيل كالأتي [26]:

$$I_{CCN_P} = N_P \times I_{SC} \quad (12.I)$$

$$V_{OC} = V_{OCN_P} \quad (13.I)$$

$V_{OCN_P}$ : جهد دارة مفتوحة لخلايا مربوطة على التفرع .

$N_P$  : عدد الخلايا المربوطة على التفرع .



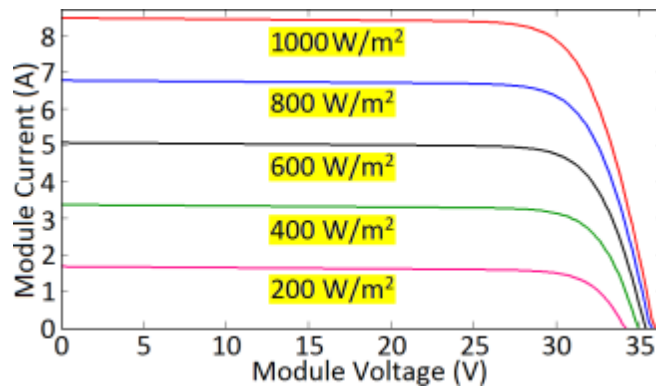
الشكل (15.I): رسم تخطيطي يمثل ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التفرع [25].

### 10.2.I. تأثير التغيرات المناخية على خاصية الخلية الكهروضوئية:

درجة الحرارة والإضاءة عاملان يؤثران على خاصية الجهد الحالي للخلية الكهروضوئية ، تغير هذه العوامل يؤدي إلى تغيير في هذه الخاصية.

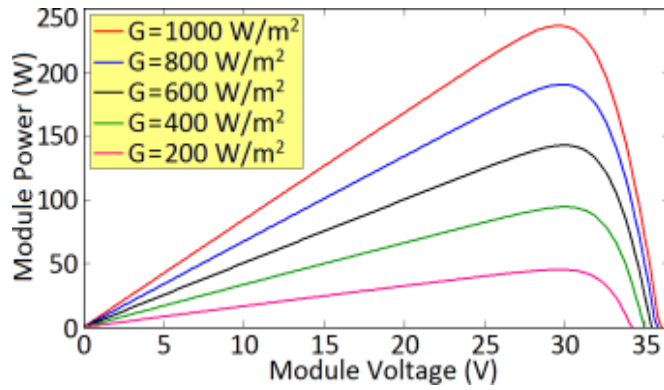
#### 1.10.2.I. تأثير الإضاءة:

التغير في شدة الإضاءة له تأثير على التيار  $I_{cc}$  ، التيار  $I_{cc}$  يتناسب تناسباً طردياً مع شدة الإضاءة في حين ليس لها تأثير كبير على  $V_{oc}$  [27].



الشكل (16.I): خاصية  $I(V)$  لخلية شمسية تحت تأثير الإضاءة [27].

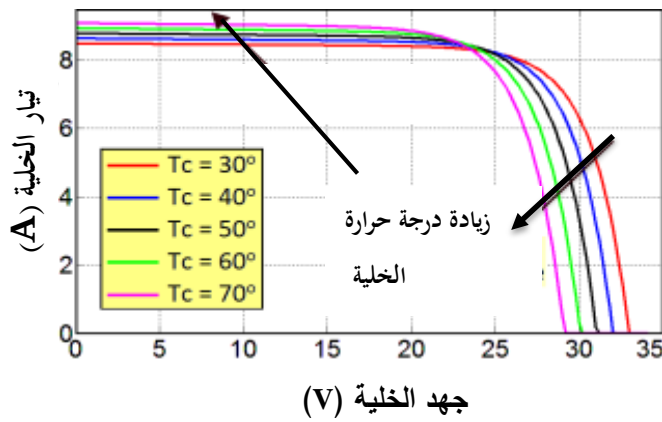
الزيادة في شدة الشعاع يؤدي إلى زيادة الإستطاعة  $P$  كما هو مبين في الشكل (17.I).



الشكل (17.I): تأثير شدة الإضاءة على إستطاعة الخلية الشمسية.

### 2.10.2.I. تأثير درجة الحرارة:

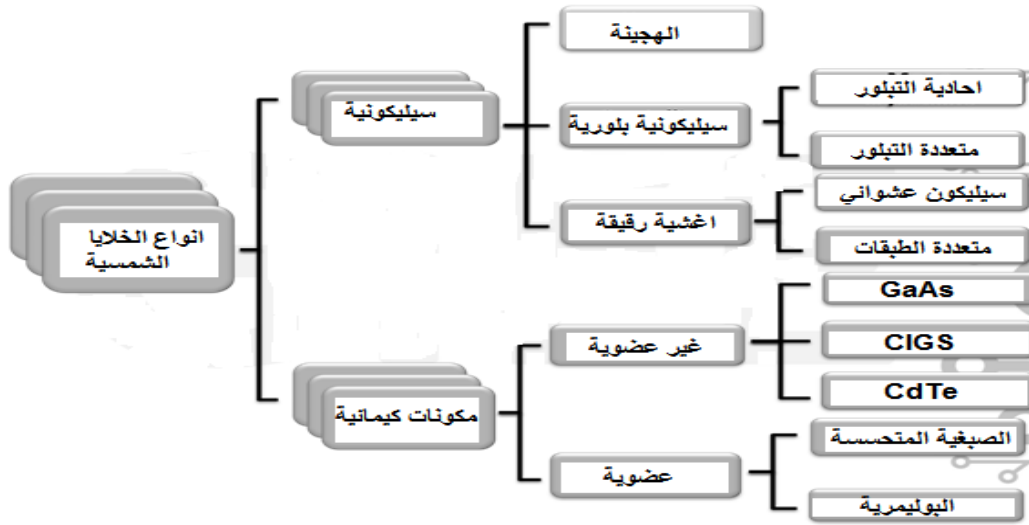
يؤدي إرتفاع درجة حرارة الطقس إلى إرتفاع درجة حرارة الخلية الشمسية والذي بدوره يؤدي إلى إنخفاض في الطاقة المنتجة وجهد الدارة المفتوحة للخلية الكهروضوئية ، وينتج عنه أيضا إرتفاع طفيف في تيار المقصر للخلية الشمسية كما هو موضح في الشكل (18.I).



الشكل (18.I): تأثير درجة الحرارة على خصائص (I-V) لخلية شمسية.

### 11.2.I. أنواع الخلايا الشمسية:

تصنف الخلايا الشمسية إلى عدة أنواع تبعا للمادة المستخدمة في التصنيع والكفاءة المستخلصة منها وهي كالآتي:



الشكل (19.I): رسم تخطيطي يمثل أنواع الخلايا الشمسية [28].

### 12.2.I. وصف الخلية الشمسية ذات الأغشية الرقيقة:

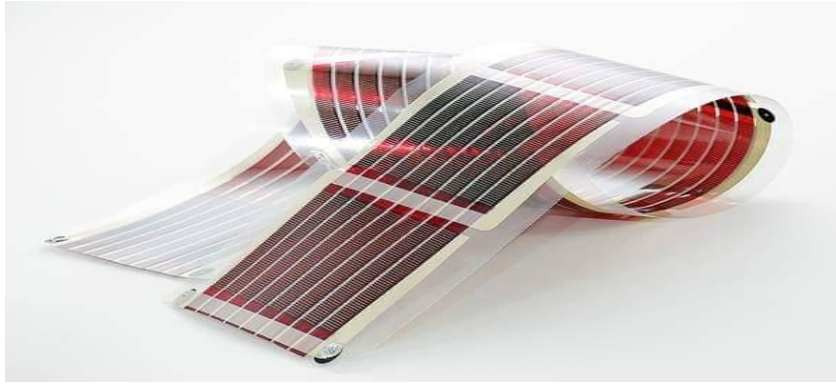
الخلية الشمسية ذات الأغشية الرقيقة مختلفة عن خلايا السيليكون البلورية ، حيث يتم ترسيب طبقات رقيقة من أشباه الموصلات على دعامة ، هذه الدعامة ممكن أن تكون معدن ، بلاستيك ، أو زجاج . وتتراوح مجموع سمك طبقات أشباه الموصلات هذه بين نانومتر إلى 20 ميكرومتر .

ويصنف هذا النوع في ثلاثة أقسام رئيسية هي:

- صنف السيليكون غير المتبلور (a-Si).
- صنف تيليلور الكادميوم CdTe .
- صنف الكالكوبيرات (عائلة أنصاف النواقل  $Cu_2IV_2VI$ ).

هذا النوع من الخلايا الكهروضوئية لها مستقبل واعد لأنها أقل تكلفة من الخلايا البلورية أسهل من ناحية التصنيع لكن

مردودها مازال ضعيفا مقارنة بالخلايا الشمسية للجيل الأول [27].



الشكل (20.I): غشاء رقيق لخلاية شمسية.

### I. 13.2. إيجابيات وسلبيات الطاقة الشمسية:

إن إستعمال الخلايا الشمسية له العديد من اللامات الإيجابية منها:

- تعتبر الطاقة الشمسية مصدراً آمناً بيئياً ، كما أنّها طاقة صديقة للبيئة فلا تُحدث أي شكل من أشكال تلوث الجو.
- تعتبر مصدراً دائماً للطاقة ، فلا تفتى إلا عند فناء الكون.
- تشتغل في صمت ولا تصدر أي ضوضاء.

وهناك أيضاً بعض العيوب نذكر منها:

- عدم توفر الشمس لطوال اليوم ، كما أنّ وجودها أو عدم وجودها يتغير بتغير فصول السنة مما يجعل هذا المصدر غير ثابت بالنسبة للكثيرين.
- لا يمكنها إنتاج طاقة في الليل.
- يجب الحرص على تنظيف ألواح الطاقة الشمسية باستمرار ، ويجب إزالة الأتربة أو الأشياء التي تحجب اللوح الزجاجي عن أشعة الشمس.

### I. 3. خلاصة:

في هذا الفصل ، قدمنا جزئين أساسيين ، الجزء الأول ذكرنا فيه المفاهيم الأساسية لفهم الطاقة الشمسية ، حيث ذكرنا بعض الأفكار حول الإشعاع الشمسي ، ثم شرحنا مبدأ تشغيل الخلايا الكهروضوئية وكيفية تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الكهروضوئية وخصائصها الرئيسية وكذلك العوامل الخارجية التي تؤثر على خصائصها.

## 4.I. مراجع الفصل الأول

- [1] ر.بودرجة ، الطاقات المتجددة كمدخل لتحقيق التنمية المستدامة في الجزائر، دراسة لواقع مشروع تطبيق الطاقة الشمسية في الجنوب الكبير بالجزائر، مجلة الباحث، العدد 11, (2005).
- [2] نبأ برهان علي، استخدام نظرية دوال الكثافة في تقييم كفاءة الصبغات العضوية كمتحسسات للخلايا الشمسية، أطروحة ماجستير، جامعة العراق، (2007).
- [3] شايب احمد، اسرار الكون "مجموعة الكوكب الذري الفضائية"، دار شريف للطباعة والنشر والتوزيع، الطبعة الأولى، (2009).
- [4] عبد الله محمد خطايبية، عبد الرؤوف محمد الديري، حكم عبد الجبار صوالحة، بركات البطانية العلوم الطبيعية، دار المسيرة للنشر والتوزيع والطباعة، الطبعة الأولى، (2009).
- [5] ح.أولاد سالم –تقدير الاشعاع الشمسي في منطقة ورقلة وتأثير طرق التتبع الشمسي وزوايا التوجيه اللاقط على شدة الاشعاع –مذكرة ماستر أكاديمي –جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2018/2017.
- [6] C. Bernard « station solaire autonome pour l'alimentation station pompage » l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006.
- [7] L. Louglaib , " Simulation d'une cellule photovoltaïque ZnO/CdS/Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> par AMPSID" ، université Ziane Achour Djelfa (2017/2018).
- [8] إ. ميموني ، "مساهمة في دراسة الطبقات الرقيقة a-Si<sub>0.8</sub>a-Si:H المرسبة بتقنية PECVD" ، مذكرة ماستر أكاديمي – جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2016).
- [9] <http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>. consulté le 09/09/2020.
- [10] B. Dendib, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des application photovoltaïque: étude comparative", Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [11] [http://www.energiesrenouvelables.org/solaire\\_photovoltaique.asp](http://www.energiesrenouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp). consulté le 09/09/2020
- [12] Fabien TSIN «Développement d'un procédé sur grande surface d'électrodépôt d'oxyde de zinc comme contact avant transparent et conducteur de cellules solaires à base de Cu(In,Ga) Se<sub>2</sub>» Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie SORBONE – 2016
- [13] D.M. Trung, ''Elaboration de cellules solaires photovoltaïque à base de polymeres conjugués, études des systèmes reticulables'', Thèse Doct, Univ. Bordeaux 1 (2009).
- [14] D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson, J. Appl. Phys., 25 (1954) 676.
- [15] A. Bouraiou, 'Elaboration et caractérisation des couches minces CuInSe<sub>2</sub> par électrodéposition'', Thèse Doct., Univ. Mentouri, Constantine (2009).
- [16] D.M. Trung, ''Elaboration de cellules solaires photovoltaïque à base de polymeres conjugués, études des systèmes reticulables'', Thèse Doct., Univ. Bordeaux 1 (2009).
- [17] B. Equer « le pompage photovoltaïque manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [18] O. Meglali, '' Etude de l'influence des conditions de dépôt sur les propriétés physicochimiques des couches minces CuXY<sub>2</sub> (X : Al, In ; Y : Se, Te'', Thèse Doct., Univ. Constantine 1 (2014).
- [19] Anne Kaminski, Mathieu Monville2, " Energie photovoltaïque Filière Physique des Composants Nanostructurés Phelma ", Septembre (2010).

[20] البهلول يعقوبي، "الكتاب حول العناصر الإلكترونية تنائي شبه موصل. (book of Semiconductor Diode). سنة 1987.

[21] S. Krour, « *optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétiques* », Mémoire de Magister, université de Ferhat Abbas stif1, 2014.

[22] G. Ben Abderrazak, « *Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS* », Mémoire de master, Université Med Khider Biskra, 2014.

[23] ايمن ادريس, جبر الرحمين, محمد منذر القادري, نموذج ومحاكاة لاقط كهروضوئي في بيئة الخزمة البرمجية LABVIEW, مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية, المجلد الثامن والعشرون, العدد الثاني, (2012).

[24] F. Ghaleb, K. Bendjbar, S. Haouari, polycopie des travaux pratiques, "*lumière et cellule solaire*", université d'Oran des sciences et de la technologie, (2016).

[25] I. Bendjamaa, "*Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque*", mémoire de magister Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, 2011/2012.

[26] م. تاتي . ر. بسملة، "تأثير الغبار على الألواح الشمسية الكهروضوئية"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2019).

[27] E. Kechar, E. Azzag et I. Touaïbia : *Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques*. Thèse de doctorat, Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.

[28] E.Jaleel. Mahdi, "*Assessment of Solar Energy Potential for Photovoltaic Systems Applications in Iraq*", Doctor of Philosophy in Physics, University of Baghdad College of Science 2018.

# الفصل الثاني

عموميات على الأغشية الرقيقة

وإستعمالاتها في الخلايا الكهروضوئية

## الجزء الأول

### 1.II. الأغشية الرقيقة:

#### 1.1.II. مقدمة:

تتميز الأغشية الرقيقة بخصائص ومميزات قد لا تمتلكها مواد مركبة أخرى ، مما دفع بالباحثين إلى إيجاد عدة طرق لتحضير هذه الطبقات ، وبعد تطور البحث العلمي تطورت طرق تحضير الأغشية الرقيقة بدرجة عالية من الدقة في تحديد سماك الطبقة وتجانسها ، وقد تكون بعض الطرق تتناسب مع مواد معينة وغير ملائمة لمواد أخرى وقد نستطيع تحضير الأغشية بسهولة لبعض المواد ويمكن أن تكون صعبة الحصول ومعقدة لمواد أخرى [1].

في هذا الفصل نقدم عموميات حول الطبقات الرقيقة وطرق ترسيبها وإستخداماتها في مختلف المجالات خصوصا الخلايا الشمسية كون الأغشية الرقيقة لأشبه الموصلات تحظى في الوقت الحاضر بأهمية كبيرة لتعدد إستخداماتها وكفاءتها على نقل الكهرباء، في هذا الفصل سنتعرف أيضا على الطبقات الرقيقة المستعملة في الخلايا الشمسية ونبين كيفية تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية.

#### 2.1.II. تعريف الأغشية الرقيقة:

من حيث المبدأ ، طبقة رقيقة من مادة معينة هي عنصر من هذه المواد [2.3] ، وتم الحصول عليها بعد تكثيف ذرات معينة أو جزيئات على الركيزة [4] ، بهدف إضافة خصائص للمواد لم تكن بها من قبل [5] [6] [7] ، بحيث أحد أبعادها الخطية صغير جدا بالنسبة للبعدين الآخرين والذي يعرف بالسماك ، وعادة ما تكون هذه الطبقات سمكها من عشرة إلى ألف نانو متر ، هذه المسافة الصغيرة بين السطوح الحديدية تسبب تعطيل للخصائص الفيزيائية [3].

#### 3.1. II. مميزات الاغشية الرقيقة:

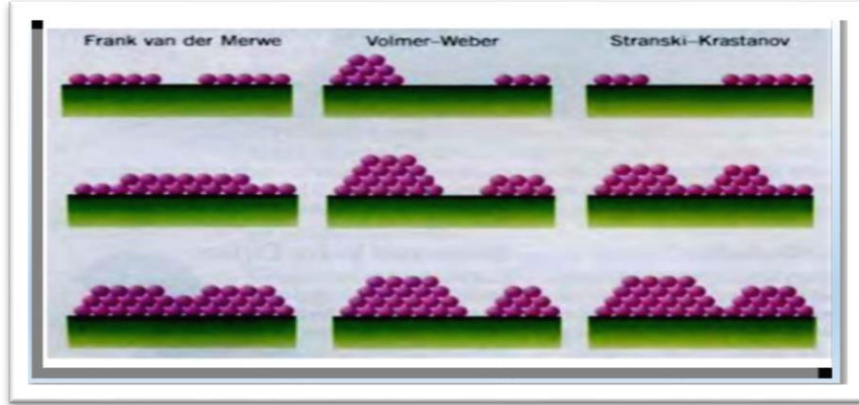
إن مزايا الطبقات الرقيقة تأتي من الإستعمال الإقتصادي لطبقة رقيقة من مادة لها خصائص فيزيائية مرغوبة بإستعمال تقنية سهلة من تقنيات توضع الطبقات الرقيقة (تجهيز سهل ومواد غير مكلفة) . إن الطبقة الرقيقة مهما كانت الطريقة المستعملة لصناعتها تكون مركزة على الركيزة فهي تعتبر كجزء لا يتجزأ منها لهذا يجب أن نأخذ بعين الاعتبار بأن الركيزة لها تأثير قوي على الطبقة المتوضعة [8].

#### 4.1.II. آلية تشكل الطبقات الرقيقة:

هناك دائما ثلاث خطوات في تشكيل ترسب طبقة رقيقة وهي :

✓ تحضير أو إنشاء الأنواع المراد ترسيبها على شكل أيونات أو جزيئات أو ذرات.

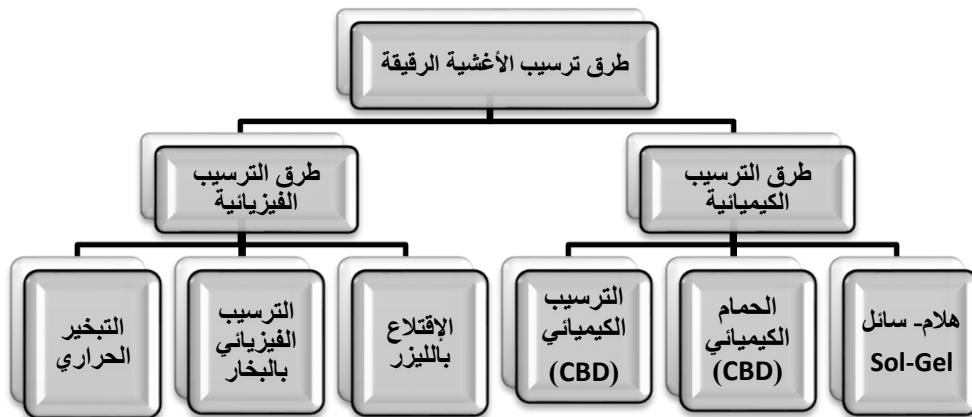
- ✓ نقل هذه المواد المترسبة إلى الركيزة.
  - ✓ تكثيف الجزئيات ونمو طبقة على الركيزة التي تكون في الغالب زجاج ، إما بطريقة مباشرة أو عن طريق التفاعل الكيميائي لتشكيل ترسبات صلبة وفي أثناء الخطوة الأخيرة تحدث المراحل التالية : التوضع ، الإلتحام والنمو [9].
- كما هو موضح في الشكل (2.II).



الشكل (1.II): رسم تخطيطي يوضح أنماط نمو الطبقات الرقيقة [10].

## 5.1.II. طرق ترسيب الأغشية الرقيقة:

إن لطريقة تحضير الأغشية الرقيقة أهمية كبيرة ، وذلك لما تمتلكه من تأثير كبير على الصفات الفيزيائية للغشاء ، بحيث تنوعت طرق ترسيب الأغشية الرقيقة مع تطور البحث العلمي وعادة نحصل على الطبقات الرقيقة عن طريق صنفين أساسيين وهما طرق فيزيائية ، وطرق كيميائية ، يوضح الشكل (1.II) مخططا لبعض تقنيات تحضير الأغشية الرقيقة.



الشكل (2.II) : مخطط يوضح بعض الطرق الفيزيائية والكيميائية .

### 1.4.1.II. الترسيب الفيزيائي للطور البخاري (Physical Vapor Deposition) PVD:

تعتمد تقنية الترسيب الفيزيائي للأبخر على التبخر الحراري للمواد تحت ضغط منخفض من  $10^{-2}$  إلى  $10^{-4}$  (mbar) [11].

المواد المراد ترسيبها تكون صلبة ولا يوجد أي تفاعل كيميائي ، لدينا الذرات تتبخر وتتكتف على الركيزة لتشكل لنا طبقة رقيقة يزيد سمكها مع الوقت . تقنية الترسيب الفيزيائي تملك مميزات مقارنة بتقنية الترسيب الكيميائي ، فهي غير ملوثة وكذلك الطبقات تكون كثيفة وسهلة المراقبة ، وغالبا ما تعتمد إستعمال تقنية الترسيب الفيزيائي للأبخر وهي الأكثر شيوعا على التبخر في الفراغ والرش المهبطي كذلك الإستعمال الليزري . يمكننا تمييز ثلاث تقنيات:

- ✓ الترسيب عن طريق التبخر في الفراغ.
- ✓ الترسيب عن طريق الرش المهبطي.
- ✓ الترسيب عن طريق الإستعمال الليزري.

### 2.4.1.II. الترسيب الكيميائي للطور البخاري (Chemical Vapor Deposition) CVD:

في تقنيات الترسيب الكيميائي ، لا نستعمل مصدر صلب وإنما متفاعلات غازية . يتم الحصول على الطبقات الرقيقة التي تنتجها تقنيات ترسيب البخار الكيميائي عن طريق التفاعلات الكيميائية بين المتفاعلات الغازية في طور البخار والركيزة. التقنيات الرئيسية لهذا الوضع هي كما يلي :

- ✓ تقنية سائل هلام (Sol-Gel) .
- ✓ تقنية الطلاء الكهربائي (Electrodéposition).
- ✓ تقنية الرش الكيميائي الحراري (Spray Pyrolyse).

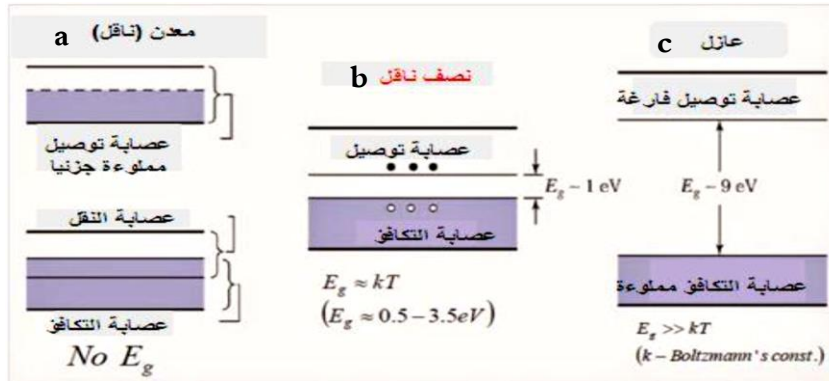
## الجزء الثاني

## 2.II. عموميات على الأكاسيد الناقلة الشفافة (TCO):

الأكاسيد الناقلة الشفافة هي عبارة عن أشباه نواقل مكونة من معدن مركب مع الأكسجين ، أي أنها أشباه نواقل أكسيدية مثل ( $\text{In}_2\text{O}_3$  ،  $\text{SnO}_2$  .....  $\text{ZnO}$  إلخ) [12] . أكتشفت من طرف العالم Badeker في أوائل القرن العشرين سنة 1907 م ، حين قام بتشكيل طبقة رقيقة من أكسيد الكاديوم ( $\text{CdO}$ ) والتي تمتاز بكونها موصلة شفافة [13] ، هذه الملاحظة كانت هي الأولى التي ساهمت في ظهور العديد من مواد TCO ، حيث أصبح الحصول على هذه المواد تحدي صناعي مهم ، بالنسبة للطبقات الرقيقة لأكسيد الإنديوم ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) فقد تم إكتشافها عام 1950 م عن طريق تقنية الرش الكيميائي [14] ، هذه الأكاسيد الناقلة الشفافة تتميز بنفاذية بصرية (شفافية) وتوصيلية مرتفعة فيمتد طيف النفاذية فيها ما بين (400-1500 nm) .

الإنتقال من عصابة التكافؤ إلى عصابة الطاقة يعتمد على المادة وفجوة الطاقة للمادة ، كلما كانت طاقة الفوتون مساوي لقيمة فجوة الطاقة كان الإنتقال وكلما قلت لا يوجد إنتقال للإلكترونات .

حيث تصنف المواد في الطبيعة بالإعتماد على مقدار فجوة الطاقة إلى ثلاث أنواع (الموصلات ، العوازل ، أشباه الموصلات) [15] ، كما هو موضح في الشكل (3.II).



الشكل (3.II): مخطط عصب الطاقة عند درجة الحرارة الصفر المطلق لكل من:

a. (ناقل) . b. (نصف ناقل) - c. (عازل).

في حالة المعادن ، تكون عصابة النقل (BC) وعصابة التكافؤ (BV) متداخلتان وهذا يسمح بحرية حركة الإلكترونات ، بينما في أشباه النواقل يوجد شريط ممنوع يفصل عصابة النقل والتكافؤ يسمى بفجوة الطاقة ويرمز له بـ  $E_g$  ، في حالة ما إذا فاقت فجوة الطاقة قيمة 5eV تصبح المادة عازلة .

وتعتبر الأكاسيد الناقلة الشفافة من المركبات الثنائية أو الثلاثية تحتوي على واحد أو إثنان من العناصر المعدنية وهي عبارة عن أشباه نواقل متوالدة ( مستوى فارمي يقع في عصابة النقل أو عصابة التكافؤ) فجوة طاقة تساوي أو أكثر من 3eV [16].

ظهر الإهتمام بخصائصها الكهربائية في عام 1970 [17] ، حيث تصنف الأكاسيد على حسب الخواص الكهربائية على أنها أنصاف ناقل بفجوة طاقة كبيرة ، فهي تتميز بشرط عريض ممنوع (فجوة طاقة) تتغير من 3eV إلى 5eV يعتمد هذا العرض على عدة عوامل نذكر منها : نوع مركبات المحلول وكذلك طريقة الترسيب والشروط التحريمية للترسيب ، الجدول (1.II) التالي يعرض بعض أنواع قيم للأكاسيد الموصلة والشفافة مرفقة بقيمة الفاصل الطاقي [18].

TCO الأكسيد الشفاف الناقل	قيمة الفاصل الطاقي Eg (eV)
SnO <sub>2</sub>	( 4.2- 3.6)
ZnO	( 3.3- 3.2)
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.2
Zn-Sn-O(ZTO)	3
TiO <sub>2</sub>	( 3.2-3 )

الجدول (1.II): بعض الأكاسيد الناقلة الشفافة مرفقة بفجوة الطاقة.

## 1.2.II. مجالات إستعمال الأكاسيد الناقلة الشفافة:

يتم إستعمال الأكاسيد الناقلة الشفافة على نطاق واسع في التطبيقات الكهروضوئية ، بإعتبارها من مواد أشباه الموصلات التي لها فجوة طاقة بصرية معينة ، كما لديها إنتقال عالي في المناطق القريبة من الأشعة تحت الحمراء والمرئية من الطيف الكهرومغناطيسي ، ونظرا لشفافيتها الضوئية العالية ، والتوصيل الكهربائي الجيد ، والحمول الكيميائي ، والصلابة ، وثبوتيتها على الركيزة الممتازة ، يتم تطبيق الأغشية الرقيقة في شاشات العرض المسطحة والطلاء المضاد للكهرباء الساكنة والخلايا الشمسية وعدسات الكاميرا .... إلخ ، بالإضافة إلى ذلك تم إستخدام أفلام الأكاسيد المسطحة عالية السطح كمستشعرات للغازات السامة والخطيرة، علاوة على ذلك يتم إستخدامها كأنودات كهروضوئية في كل من الخلايا الشمسية الحساسة الصبغية وأجهزة أكسدة الماء. ويمكن أن يكون إختلاف أو إنخفاض الأداء بين الخلايا الشمسية الحساسة للضوء إلى عدم وجود أشباه الموصلات المناسبة من النوع الذي يحتوي على فجوة طاقة واسعة ، وإمتصاص منخفض لضوء الشمس وخصائص نقل شحن مناسبة [19].

## 2.2.II. أكسيد الإنديوم (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):

أكسيد الإنديوم هو أحد مركبات الإنديوم الكيميائية ذو الصيغة الكيميائية In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ، فهو أكسيد موصل شفاف (TCO) ، هو مادة شبه موصلة من نوع n يمتاز بفجوة مباشرة واسعة النطاق تقدر بـ 3.6 eV وفجوة غير مباشرة 5.2 eV ، ينتمي للمجموعة (III) ، لديه نفاذية عالية حوالي 80% للأطوال الموجية في المنطقة المرئية (0.4-0.9μm) ، ذو إنعكاسية عالية في منطقة IR لهذا يستعمل كنوافذ عاكسة للحرارة [20] ، كذلك يملك خصائص جيدة مثل شفافية عالية للضوء المرئي [21] ، عند تفاعل الضوء ( موجة كهرومغناطيسية) مع طبقات In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (إلكترونات من شريط التكافؤ) سيفسر لنا بوضوح هذه الخصائص

البصرية ، موجة التفاعل الكهرومغناطيسي مع هذه الطبقات سوف يمتصها تماما في حالة إذا كانت الطاقة المرتبطة بالموجة الكهرومغناطيسية قادرة على نقل الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل.

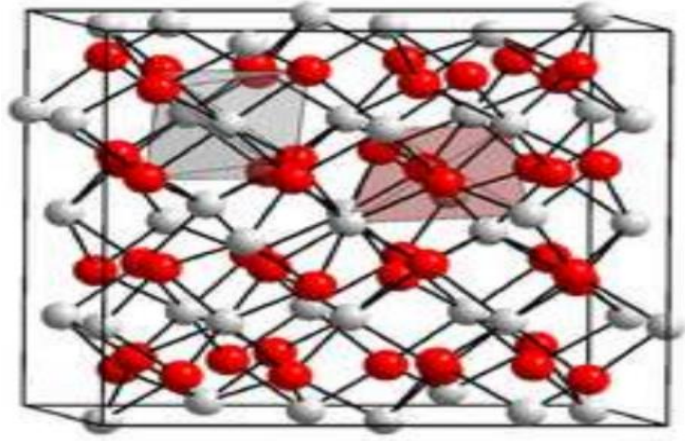
وأیضا قابلية الالتصاق ممتازة بالركيزة [22] ، ومستقر كيميائيا [23] ، كما تعتبر أغشية أكسيد الإنديوم من صنف أشباه الموصلات النفاذة (Transparent) والتي لها مدى واسع من التطبيقات منها لإنتاج الأغشية النفاذة العاكسة للحرارة (Transparent heatreflecting films) كما تدخل هذه الأغشية في صناعة الخلايا الشمسية المتعددة الطبقات وبوجود طبقة موصلة نفاذة أمكن تصنيع خلايا شمسية بكلفة قليلة وبأداء مناسب حيث أن هذه الأغشية تسمح بنفاذ الشعاع الشمسي مباشرة إلى المنطقة الفعالة مع توهين قليل للطاقة الإشعاعية كما هو الحال مع خلايا  $In_2O_3/Si$  كما تستعمل الأغشية كمتحسسات غازية (Gassensor) ومن التطبيقات الأخرى إستخدامها كعناصر حرارية نفاذة على زجاج السيارات والطائرات لإزالة الجليد (Deicing) والضباب المتكون عليها (Defoging) . الجدول التالي (2.II) يلخص بعض الخصائص الكيميائية و الفيزيائية ل  $In_2O_3$ .

الخصائص	
درجة حرارة الإنصهار (k)	2273
اللون	أصفر مخضر
الكثافة ( $g/cm^3$ )	6.99
الكتلة المولية (g/mol)	227.638
البنية البلورية	cubique

الجدول (2.II): بعض الخصائص الكيميائية والفيزيائية ل  $In_2O_3$  [24].

يتم إستخدامه كمشبع في بعض الأكاسيد لتحسين أداء الخلية حيث يساعد على زيادة جهد الدارة المفتوحة  $V_{OC}$  عن طريق رفع مستوى الطاقة للأكسيد [25].

ويمكن أن يتبلور في بنيتين بلوريتين مختلفتين [27.26] ، بنية مكعبة مركزية مطابقة لبنية  $Mn_2O_3$  ، وبنية سداسية مطابقة لبنية  $\alpha$  l'alumine (الياقوت) ، نستطيع الحصول على البنية السداسية بإضافة تطعيم أو عن طريق وضع البلورة تحت ضغط مرتفع. معاملات الشبكة :  $a = 5.484 \text{ \AA}$  و  $c = 14.508 \text{ \AA}$  [28].



الشكل (4.II): التركيب البلوري لمادة أكسيد الإنديوم ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) [24].

### 3.II. الخلاصة:

لقد تطرقنا في هذا الفصل إلى تعريف الأغشية الرقيقة و لآليات نموها وكذلك طرق ترسيبها ، حيث إتضح لنا أن طرق الترسيب عديدة ومختلفة بحيث لا يمكن تفضيل طريقة على أخرى و لكل طريقة محاسن وسلبيات . كما تطرقنا للأكاسيد الشفافة الموصلة بصفة عامة ولأكسيد الإنديوم بصفة خاصة لأننا إستعملناه كطبقة شفافة لزيادة شدة إمتصاص الضوء .

## 4.II. مراجع الفصل الثاني

- [1] F. Kermiche, "Elaboration De Couches Minces ZnO Par Ablation Laser Et Caractérisation Physique ", Thèse Doctorat En Sciences En Physique, Université Frères Mentouri Constantine, (2015).
- [2] Site web : [www.wikipedia.org/wiki/couche\\_mince](http://www.wikipedia.org/wiki/couche_mince), consulté le 09/09/2020.
- [3] T. Ait Achène « *Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de zinc*, Thèse de magister, Université de Constantine, 1992.
- [4] K.L, Chopra, S, Major and D. K. Pandya, "Thin Solid Films ", Vol (1), (1983).
- [5] Hanaor, D; Triani G; Sorrell C.C; (2011). "Morphologie and photocatalytic activity of highly oriented mixed phase titanium dioxide thin films". Surface and Coatings Technology, 205 (12): 3658–3664. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.01.007.
- [6] Frank, F. C.؛ van der Merwe, J. H. (1949). "One-Dimensional Dislocations. III. Influence of the Second Harmonic Term in the Potential Representation, on the Properties of the Model", Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 200 (1060) : 125–134.
- [7] Site web: [https://ar.wikipedia.org/wiki/غشاء\\_رقيق](https://ar.wikipedia.org/wiki/غشاء_رقيق) , consulté le 09/09/2020.
- [8] S. Hadjadj, " calcul par la méthode de Monte Carlo des probabilités de la réactivité à la surface lors de la déposition d'une couche mince a-Si:H :H :H par le procédé PECVD", Mémoire de master, Université de ouargla (2015).
- [9] T. Minami, S. Ida, T. Miyata, Y. Minamino, Thin Solid Films .445 (2003) 268.
- [10] A. NecmeddinYazici, O. Mustafa, ztas- MetinBed'ir, Journal of Luminescence 104(2003) 115.
- [11] S. H. Jeong, J. W. Lee, S. B. Lee, J. H. Boo, "Deposition of aluminum doped zinc oxide films by RF magnetron sputtering and study of their structural, electrical and optical properties", Thin solid films, 435, (2003) 78-82.
- [12] ع. دقة، مصباحي، " تحديد بعض خصائص أغشية أكسيد النيكل (NiO) المطعم بالحديد (Fe) ", مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة الوادي 2017.
- [13] K. Benlarbi , "Optimisation Floue, neuronale et neuro-floue d'un système de pompage photovoltaïque entraînées par différents machines électrique " ,These de Magister Université de Batna 2003
- [14] A. El Hajj, " Elaboration Et Caractérisation D'électrodes Tri-Couches Sans Indium Appliquées Aux Dispositifs Photovoltaïques Organiques ", These Doctort, Université De Limoges, (2013).
- [15] ص. ردينة، "دراسة الخصائص التركيبية والبصرية لأغشية  $Ni_{(1-x)}Zn_xO$  المحضرة بطريقة التحلل الكيميائي"، شهادة ماجستير، جامعة ديالى العراق، ص 22، (2011).
- [16] C. G. Fonstad, R. H. Rediker, *Electrical properties of high-quality stannic*, Journal of Applied Physics, Volume 42, Issue 7, p.2911-2918, June 1971, DOI:10.1063/1.1660648 .
- [17] K. Murali, T. Saravanan, T. Poovarasan, R. Karttikeya, *Li-SnO<sub>2</sub> anodes for lithium rechargeable batteries*, Procédions of the 197th meeting of the Electrochemical Society, Toronto (2000).

- [18] K. Lagha-Menouer, « *Etude et réalisation d'une cellule solaire multicouches du type Si-SiO<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>-ZnO par APCVD* » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [19] S. Mahalingam, H. Abdullah, S. Shaari, A. Muchtar, and I. Asshari, *Structural, Morphological, and Electron Transport Studies of Annealing Dependent In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Dye-Sensitized Solar Cell*, 04 Jun 2015, doi.org/10.1155/2015/403848
- [20] ل. رشيد مجيد، "تأثيري مسك غشاء أوكسيد الإنديوم على الخصائص البصرية"، الجامعة التكنولوجية - قسم العلوم التطبيقية محمد عودة داود الجامعة المستنصرية - كلية العلوم، العدد الثامن والخمسون / 2009 .
- [21] P. Prathap, Y.P.V. Subbaiah, *Materials Chemistry and Physics* 100 (2006).
- [22] M. Girtan, H. Cachet, *Thin Solid Films* 427(2003).
- [23] Hsin-Lun Su, Wei-Hsu Chi, Abstract, 1446, 218th ECS Meeting.
- [24] ENCYCLOPIDEIA. (2012). "physical properties of (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ". 456
- [25] *Scientific World Journal*. 2015; 2015: 403848. Published online 2015 Jun 4. doi: 10.1155/2015/40384-8.
- [26] A. Chennoufi, "*l'effet de la molarité et de la température du substrat sur les propriétés des couches minces d'Oxyde d'Indium déposées par spray Ultrasonique*", mémoire de magister", Université de Biskra, (2012).
- [27] F. Ynineb, "*Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO)*", mémoire de magister, Université de Constantine, (2010).
- [28] K. Daoudi, "*Elaboration et caractérisation de films minces d'oxyde d'indium dope a l'étain obtenus par voie Sol-Gel*", thèse doctorat, université Claude Bernard-Lyon1, (2003).

# الفصل الثالث

برنامج ونتائج

ومناقشة المحاكاة

## الجزء الأول

## III. 1. برنامج المحاكاة AMPS-1D:

في هذا الفصل ، نقدم وصفا مفصلا لبرنامج AMPS-1D ، ويتم تنفيذ دراستنا من خلال تطبيق برنامج المحاكاة الرقمي AMPS-1D لدراسة خلية شمسية . يتضمن هذا البرنامج مجموعة واسعة من الدراسات المتكاملة في تطوير وتوصيف الخلايا الشمسية . سنقوم بتطبيق AMPS-1D لدراسة تأثير إرتفاع الحاجز الطاقوي للوصل الأمامي وكذلك درجة الحرارة على الخصائص الفيزيائية لخلية شمسية من نوع CZTS/CdS/ZnO لتوليد نتائج الخصائص الفيزيائية للخلية الشمسية المدروسة.

## III.1.1. مقدمة:

في الآونة الأخيرة ، بسبب إرتفاع تكاليف التجارب (التقنية ، التطوير ، والتوصيف) ، تحول الباحثون إلى المحاكاة [1]. أصبحت المحاكاة الرقمية ضرورية لجميع مجالات البحث وخاصة بالنسبة للمكونات الإلكترونية أو الضوئية وبالأخص الخلايا الشمسية [2] . برنامج المحاكاة الرقمية يسمح لنا بدراسة تأثير مختلف العوامل الخارجية مثل درجة الحرارة وشدة الإضاءة والإستقطاب .... إلخ ، والمعطيات المختلفة لمختلف الطبقات المكونة للخلية على غرار السمك ، تركيز حوامل الشحنة ، معامل الإمتصاص ..... إلخ على مختلف الخصائص الفيزيائية والكهربائية للخلية الشمسية (المدود ، توزيع الحقل الكهربائي .... إلخ).

من أجل تحسين أداء الخلايا الشمسية ، نستخدم بشكل عام المحاكاة الرقمية . إن محاكاة الأجهزة الكهروضوئية هي أداة أساسية لتحسين كفاءة الخلايا الشمسية ، تسمح هذه المحاكاة برؤية تأثير المعلمات الفيزيائية المختلفة على الأداء الكهروضوئي، لتصميم وتحسين أنواع مختلفة من الخلايا ، لتقييم إمكانات البنية وأقصى عائد نظري لها.

حيث تم تطوير العديد من البرامج الرقمية بهدف محدد لمحاكاة الخلايا الشمسية ، لديهم إمكانيات وقيود مختلفة ، ولكن المبادئ الأساسية هي نفسها ، من حيث المبدأ ، يمكن إستخدام أي برنامج رقمي قادر على حل المعادلات الأساسية لأشباه الموصلات ؛ معادلة بواسون ومعادلات الإنتقال الكهربائي لحوامل الشحنة . لمحاكاة الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة . تم تطوير بعض برامج الرقمية في الجامعات أو معاهد البحث ، وهي متاحة بشكل عام مجاناً وبدون دعم.

من بين هذه البرامج نذكر الآتية :

1. AMPS-1D.
2. SCAPS-1D.
3. Sim Windows.
4. PC-1D.
5. ADEPT-F.
6. ASA.
7. ASPIN.
8. AFORS-HET.
9. Silvaco.

كل هذه البرامج (أحادية البعد) تقوم بحل المعادلات في إتجاه واحد فقط (الإتجاه X) ويمكن إستخدامها لتقييم أداء الخلايا الشمسية بشكل مباشر أو غير مباشر . من أجل تحسين الهيكل وتحسين أداء مكونات الخلايا المختلفة ، ذهب إختيارنا لـ AMPS-1D [2].

### 2.1.III. نظرة عامة على برنامج AMPS-1D:

مصطلح AMPS-1D هو إختصار للعبارة الإنجليزية:

"Analysis Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional". أي تحليل البنيات

الإلكترونية الدقيقة والفوتونية على بعد واحد (تحليل أحادي البعد الإلكتروني الدقيقة والفوتونية) [3.4].

AMPS-1D هو برنامج رقمي يستخدم في تحليل وتصميم عمليات النقل في الهياكل الإلكترونية الدقيقة والضوئية ، وقد تم تطويره عام 1997 من قبل الدكتور Dr. S. Fonash و المتعاونين معه من جامعة بنسلفانيا-الولايات المتحدة الأمريكية ، بدعم من معهد بحوث الطاقة الكهربائية ودعم المعدات من قبل شركة IBM (The Electric Power Research Institute) وقد تم تطوير هذا البرنامج في عدة إصدارات في UNIX أو Windows . بالنسبة لنا إختارنا إستخدام الطبعة الأولى للبرنامج إصدار (1997) على Windows 7 [5.6].

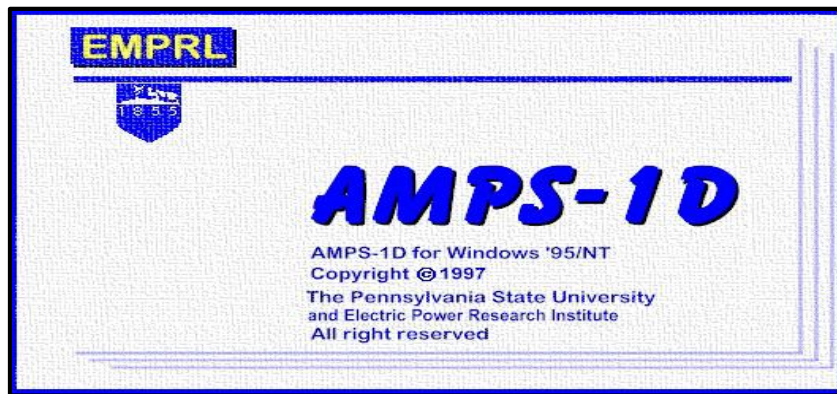
### 3.1.III. تعريف برنامج AMPS-1D:

برنامج AMPS 1-D هو أداة محاكاة أحادية البعد تُستخدم لمحاكاة فيزياء النقل في أجهزة الحالة الصلبة بطريقة بسيطة ومرنة للغاية ، وهي مصممة لتحليل وتحسين الهياكل المخصصة للتطبيقات التكنولوجية في الإلكترونيات الدقيقة أو الإلكترونيات الضوئية وخاصة في الخلايا الكهروضوئية [7.8].

في الآونة الأخيرة ، يتم إستخدامه على نطاق واسع لتحليل و نمذجة الخلايا الكهروضوئية الرقيقة [5].



الشكل (1.III): الرمز القابل للتنفيذ لبرنامج AMPS1-D على PC.



الشكل (2.III): لقطة شاشة لعرض برنامج AMPS-1D.

### III. 1. 4. مميزات برنامج AMPS-1D:

- قدرة على معالجة أي خلل في فجوة الطاقة والتطعيم والتوزيع الخاص.
- إحصاءات بولتزمان و فيرمي ديراك.
- خصائص المواد المختلفة.
- القدرة على التعامل مع النقل في الأجهزة تحت إستقطاب الجهد والإستقطاب الخفيف ، أو كليهما.

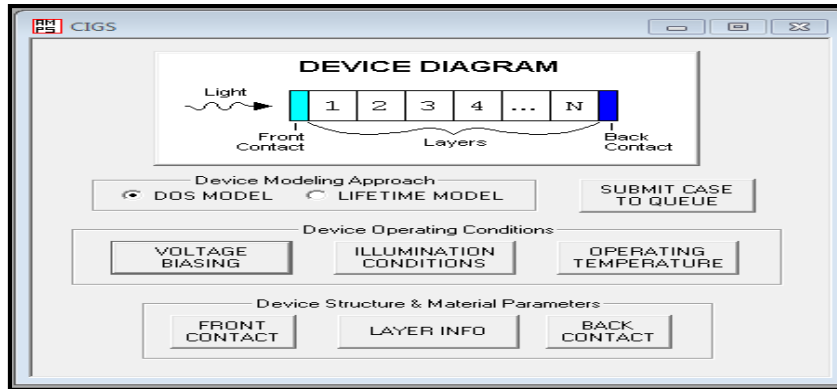
### III. 1. 5. وظيفة برنامج AMPS-1D على PC:

يسمح لنا AMPS-1D بتعريف خصائص كل طبقة على حدى (طاقة الفجوة ، حركية الثقوب والإلكترونات ، كثافة حالات لعصبة التوصيل والتكافؤ ... إلخ) ، وتصميم الجهاز ؛ هيكل يتحكم في فيزياء الجهاز بأكمله إستجابة للضوء والجهد ودرجة الحرارة المطبقة [3].

ينقسم برنامج AMPS-1D إلى أربعة أجزاء ، كل جزء يتميز بخصائص لها وظيفة خاصة بها ، الثلاثة الأولى مخصصة للبرمجة حيث يجب إدخال المعطيات الفيزيائية والكهربائية لكل جزء من الخلية ، معطيات تخص الإتصالات الأمامية والخلفية بالإضافة إلى شروط الإضاءة.

أما الجزء الرابع من البرنامج فيتعلق بملف قراءة النتائج المتحصل عليها من المحاكاة مثل تغير تيار الإلكترونات  $J_n$  والثقوب  $J_p$  ، خاصية الخلية  $J(V)$  ، كثافة حوامل الشحنة ..... إلخ [9].

بعد الضغط على أيقونة AMPS-1D تظهر على الشاشة النافذة المبينة في الشكل (III. 3) ، هذه النافذة بمثابة ملف لإدخال جميع المعطيات الخاصة بالخلية ؛ الإتصالات الأمامية والخلفية و شروط الإضاءة.



الشكل (3.III): واجهة مستخدم برنامج AMPS-1D [10].

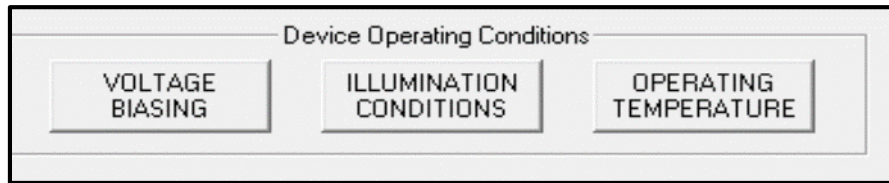
- تتكون واجهة برنامج AMPS-1D حسب ما في الشكل (3.III) من ثلاثة مربعات حوار . تقدم كل منها المعلومات الضرورية قبل تشغيل المحاكاة بواسطة AMPS-1D ، وتعطي مربعات الحوار الثلاثة ما يلي :
- الإعدادات التي تنطبق على الخلية كلها (طبقات الخلية مع الإتصال الأمامي والخلفي) ( Device Structure & Material Parameters ) .
  - الإعدادات التي تنطبق على منطقة معينة من المركب .
  - الإعدادات التي تحدد طيف الإضاءة ( Illumination conditions ) [10] .
- النافذة الرئيسية لبرنامج AMPS-1D ، توفر للمستخدم خيارات مختلفة الغرض من تخصيص المحاكاة . حيث تقدم هذه النافذة أزرارًا مختلفة مجمعة بشكل أساسي في أربعة مناطق .
- المنطقة الأولى: تحتوي على أزرار كما يوضحه في الأسفل الشكل (4. III) .



الشكل (4. III): نموذج زمن الحياة ونموذج كثافة الحالات.

- يسمح هذا البرنامج باستخدام نموذجين لحل المعادلات السابقة الذكر، معادلة بواسون ومعادلات الإنتقال بالنسبة للإلكترونات والثقوب ، وهما نموذج زمن حياة حوامل الشحنة (Life time model) ونموذج كثافة الحالات (DOS) ، ونحن في عملنا هذا سنقوم باستعمال النموذج الأول .

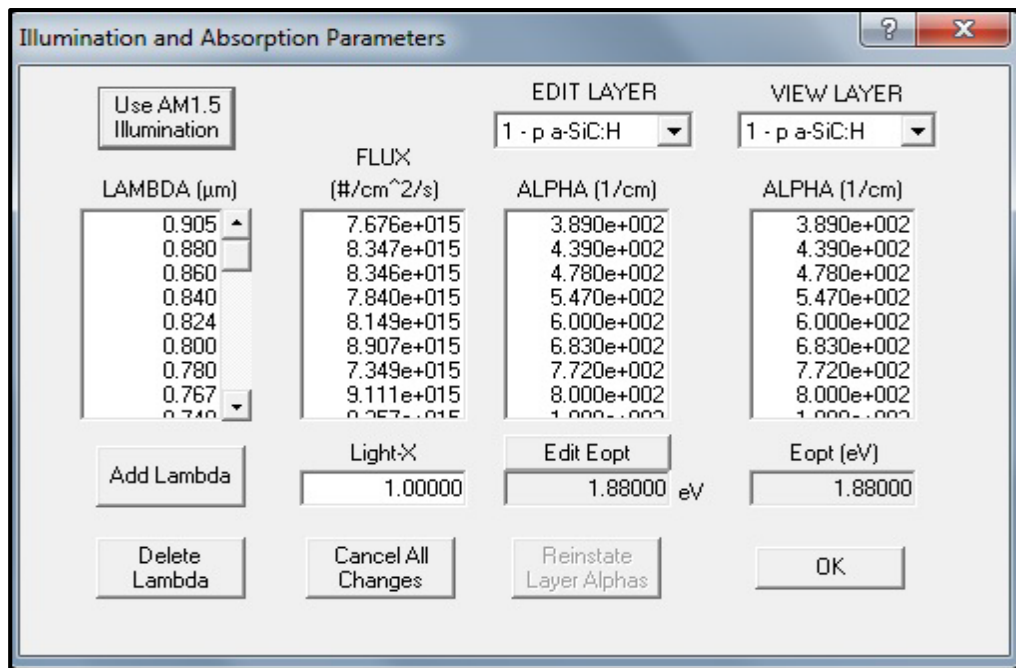
- المنطقة الثانية: تحتوي المنطقة الثانية على ثلاثة أزرار ، وهي كما في الشكل (5.III):



الشكل (5.III): ظروف تشغيل الخلية الشمسية.

✓ الزر الأول: " voltage biasing " تمثل إستقطاب الخلية الشمسية بواسطة مولد فرق كمون .

✓ الزر الثاني: " Illumination conditions " بعد الضغط على هذا الزر سوف تظهر هذه النافذة حسب ما في الشكل (6.III).



الشكل (6.III): نافذة إعدادات الإضاءة و الإمتصاص.

هذه النافذة تسمح بإجراء المحاكاة في ظروف الظلام أو الضوء مع أو بدون استجابة طيفية ، حيث العمود الأول يمثل

الأطوال الموجية يقابل قيمتها في العمود الثاني التدفق الضوئي للظلام أو الضوء مع أو بدون استجابة طيفية ، أما العمود الثالث فهو يمثل معامل

الإمتصاص  $\alpha$  للطبقات ، أما زر "Edit Eopt" الموجود أسفل العمود الثالث يمثل طاقة الفجوة الخاصة بكل طبقة محددة .

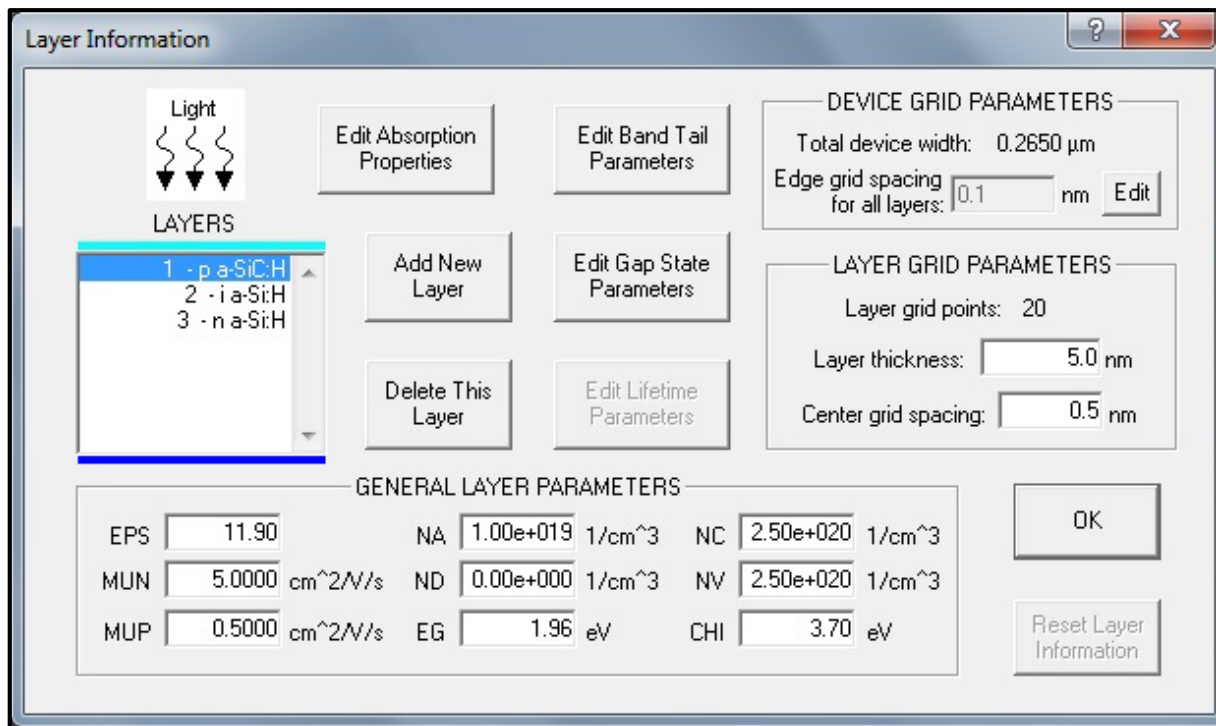
✓ الزر الثالث "operating temperature" يسمح بتحديد درجة حرارة إشتغال الخلية الشمسية بـ °K.

- المنطقة الثالثة: في أسفل نافذة الإنطلاق تحت عنوان "Device Structure & Material Parameters" توجد ثلاثة أزرار وهي: Front Contact ، Layer Info ، Back Contact .



الشكل (7.III): هيكل الخلية الشمسية ومعلومات المواد المكونة لهما.

✓ زر "Layer Info" يسمح للمستخدم بتحديد عدد الطبقات المكونة للخلية وإدخال المعطيات الكهربائية والفيزيائية الخاصة بكل طبقة ويمكن تعريف طبقة المواد حيث في زر "Layer Info" الشكل (8.III).



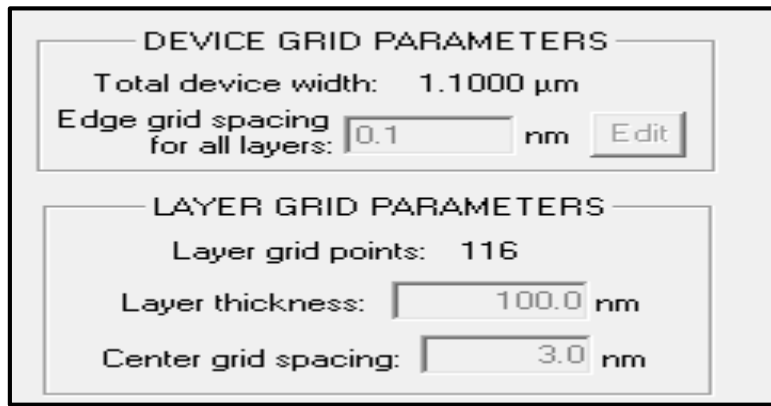
الشكل (8.III): نافذة حوار للتعريف بالطبقات المكونة للخلية مع مختلف الخصائص الخاصة بكل طبقة.

يمكن للمستخدم تحديد إعدادات كل طبقة كما يلي:

- EPS: السماحية النسبية للمادة بدون وحدة.
- MUN: حركة الإلكترون.
- MUP: حركة الثقوب.

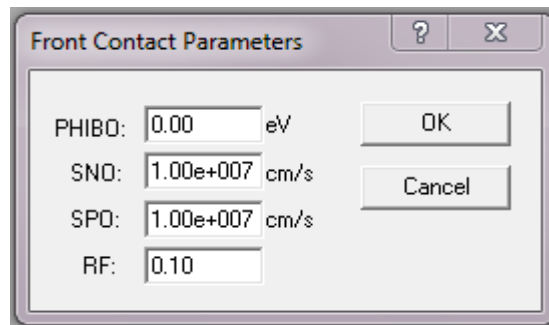
- $N_a$ : تركيز الذرات الآخذة.
- $N_d$ : تركيز الذرات المانحة.
- $E_g$ : طاقة الفجوة.
- $N_C$ : كثافة الحالات لعصبة التوصيل.
- $N_V$ : كثافة الحالات لعصبة التكافؤ.
- $CHI$ : الكهرو سلبية للطبقة.

على الجانب الأيمن من النافذة الشكل (9.III) ، يمكن للمستخدم تحديد سمك الطبقات وكذلك عدد الشبكات (خطوات الحساب).



الشكل (9.III): مقطع من نافذة Layer Info Window.

✓ زر "Front Contact" يقصد به جهة الوصل الأمامي بعد الضغط عليه تظهر هذه النافذة حسب ما في الشكل (10.III).

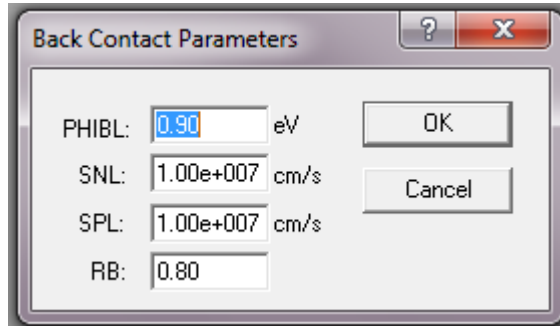


الشكل (10.III): نافذة إعدادات الوصل الأمامي.

حيث تمثل كل من هذه الأزرار ما يلي:

- PHIB0: عامل الحاجز الطاقي للوصل الأمامي.
- SNO: سرعة إلتحام الإلكترون للوصل الأمامي.

- SP0: سرعة إلتحام الثقوب للوصل الأمامي.
- RF: معامل الإنعكاس الضوئي للوصل الأمامي ، بحيث يكون معامل الإنعكاس الضوئي للوصل الأمامي ضعيفا وذلك من أجل سهولة نفوذ الضوء.
- ✓ زر " Back Contact " ويقصد بها الوصل الخلفي ، بعد الضغط على الزر سوف تظهر هذه النافذة حسب ما في الشكل (11.III).



الشكل (11.III): نافذة إعدادات الوصل الخلفي.

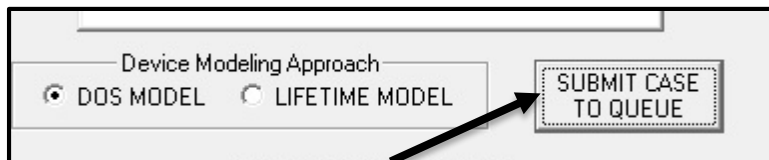
حيث تمثل كل من هذه الأزرار ما يلي:

- PHIBL: عامل الحاجز الطاقي للوصل الخلفي.
- SNL: سرعة إلتحام الإلكترون للوصل الخلفي.
- SPL: سرعة إلتحام الثقوب للوصل الخلفي.
- RB: معامل الإنعكاس الضوئي في جهة الوصل الخلفي "Back contact" ، حيث يجب أن يكون معامل الإنعكاس الضوئي في هذه الجهة كبير وذلك من أجل إعادة إنعكاس الضوء في الخلية.

- المنطقة الرابعة : تحتوي المنطقة الرابعة على زر " Submit case to queue " ويقصد بها "إرسال الحالة إلى قائمة الإنتظار" ، حيث يسمح بتشغيل المحاكاة وذلك بعد حفظ الملف مسبقاً.

يجب على المستخدم أيضاً الرد على رسالة التحذير التي تعرض عليه إنشاء أو عدم إنشاء ملفات الإخراج في نهاية

المحاكاة.



الشكل (12.III) : زر إرسال الحالة إلى قائمة الإنتظار.

## 6.1.III. مبدأ المحاكاة الرقمية:

تعتمد محاكاة أجهزة أشباه الموصلات على الدقة المتزامنة لمعادلة بواسون ومعادلة الإستمرارية ، وتحسب في كل لحظة وفي أي نقطة في الفضاء ، تركيز الإلكترونات والثقوب و قيمة الجهد الكهروستاتيكي..... إلخ.  
تحدد معادلة بواسون العلاقة بين الكمون وكثافة حوامل الشحن بـ [10]:

$$\Delta V = \frac{-q}{\epsilon} (N_d - N_a + P - n) \quad (1.III)$$

حيث :

$\epsilon$ : ثابت العزل الكهربائي لأشباه الموصلات.

$V$ : الكمون.

$q$ : الشحنة العنصرية للإلكترون.

$N_d$  و  $N_a$ : هما كثافات الذرات على التوالي الآخذة والمأنحة.

$n$  و  $p$ : هما كثافات الإلكترونات الحرة.

لتحليل طرق النقل الكهربائي في أشباه النواقل والإلكترونات الضوئية ، يجل برنامج AMPS-1D معادلة بواسون Eq.(2.III) ومعادلة الإستمرارية للإلكترونات الحرة Eq.(3.III) ومعادلة الإستمرارية للثقوب الحرة Eq.(4.III) من خلال توظيف نظرية التزيدات المنتهية وطريقة نيوتن-رافسون وكذلك الشروط الحدوية المرتبطة بها.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{-q}{\epsilon_s} \rho(x) = \frac{-q}{\epsilon_s} (-n(x) + p(x) - n_t(x) + p_t(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x)) \quad (2.III)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x,t)}{\partial x} + G_n(x) - R_n(x) \quad (3.III)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x,t)}{\partial x} + G_p(x) - R_p(x) \quad (4.III)$$

حيث:

$q$ : القيمة المطلقة للشحنة الأولية للإلكترون.

$\epsilon_s$ : ثابت العزل الكهربائي للمادة.

$n$  و  $p$ : هي كثافة الإلكترونات والثقوب الحرة.

$N_A^-$  و  $N_D^+$ : هي كثافة الذرات المأنحة والآخذة على التوالي.

$J_n$  و  $J_p$ : هي كثافة تيار الإلكترونات والثقوب.

$p_t$  و  $n_t$ : هي كثافة الإلكترونات والثقوب المختطفة.

$G_n$  و  $G_p$ : هو معامل توليد الإلكترونات والثقوب.

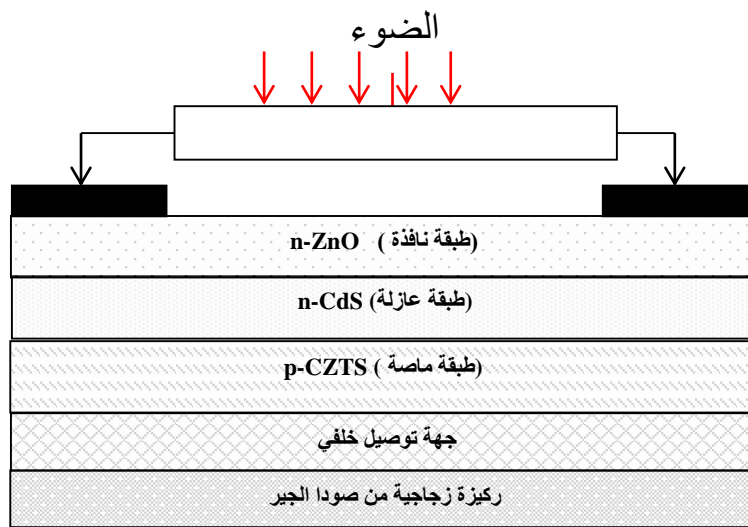
$R_n$  و  $R_p$ : معامل إلتحام الإلكترون مع الثقب

## الجزء الثاني

## 2.III. نتائج المحاكاة والمناقشة.

## 1.2.III. هيكل الخلية المدروسة.

لإجراء محاكاة تحت برنامج AMPS-1D ، من الضروري أن نقوم بتحديد البنية للمحاكاة . تتكون الخلية الشمسية من مجموعة أغشية رقيقة شبه موصلة ، في دراستنا الخلية المدروسة تتكون من الطبقات : (n-ZnO/n-CdS/p-CZTS) . الشكل (13.III) يمثل مخطط مبسط لهذه الخلية .



الشكل (13.III): مخطط مبسط لخلية الأغشية الرقيقة المستندة على CZTS.

في هذه البنية غير المتجانسة (n-ZnO/n-CdS/p-CZTS) الذي رأيناها في الشكل (13.III) ، تشكل طبقات رقيقة نذكرها : الركيزة ، الوصل الخلفي ، الطبقة الماصة p-CZTS ، الطبقة العازلة n-CdS ، الطبقة النافذة n-ZnO ، والوصل الأمامي . فيما يلي سنقوم بتعريف موجز لكل طبقة .

## 1. الطبقة الماصة:

يجب أن تكون الطبقة الماصة مصنوعة من مادة ذات معامل امتصاص عالي في المنطقة المرئية ، لذلك يفضل أن يكون لها فجوة مباشرة ممنوعة ، قيمتها من 1.1 eV إلى 1.7eV يجب أن ناقلتها الكهربائية لها من نوع p بقيمة  $1 \times 10^{-2} (\Omega \text{cm})^{-1}$  [7].

**2. الطبقة العازلة:**

تكون من أشباه موصلات من نوع n تقع بين الطبقة الماصة والطبقة النافذة [11] ، تطبيقيا تم إستخدام مواد مختلفة كطبقات عازلة (CdS ، ZnO ، ZnS ، InS ، SnO ، ZnSe) ، ومن بين تلك المواد قمنا بإختيار CdS كونها تملك أفضل فجوة طاقة [12].

إذا كان هناك إتصال مباشر بين الطبقة الماصة والطبقة النافذة قد يوجد تقاطع كهروضوئي ، لكن أداءه سيكون محدودًا من خلال:

✓ سوء ضبط العصابات المحظورة.

✓ تيارات التسرب بسبب وجود مناطق مضطربة عند حدود الإتصال.

لذلك ، يفضل إدخال طبقة رقيقة ، تسمى طبقة عازلة ، بين هذين المركبين من أجل تحسين أداء الخلية ، يجب أن تحتوي هذه الطبقة على الخصائص التالية:

✓ فجوة طاقة وسيطة بين 2.4 و 3.2 eV تسمح بانتقال مرن بين الطبقة الماصة والطبقة النافذة.

✓ الموصلية من نوع n لتشكيل الوصلة مع الطبقة الماصة التي هي من النوع p . لتجنب آثار التسريبات الحالية ، يجب أن تكون الموصلية أقل من الطبقة الماصة ، أي من رتبة  $10^{-3} (\Omega\text{cm})^{-1}$ .

✓ من الناحية الشكلية ، يجب أن يكون متجانسًا جدًا لتجنب أي تأثير الدارة المقصرة في مستوى حدود الإتصال [13].

**3. الطبقة النافذة:**

يجب أن تكون الطبقة النافذة ناقلة وشفافة ، بحيث تجمع الإلكترونات مع السماح بمرور الضوء [15.14] ، تتكون هذه الطبقة من أكاسيد ناقلة شفافة (TCO) حيث الأكثر إستخداما هو أكسيد الزنك ZnO [11] ، تتكون الطبقة النافذة هذه من طبقتين ، رقيقة من (20 nm إلى 100nm) وأكثر مقاومة ، والأخرى سمكها (100nm إلى 1500 nm) وأقل مقاومة [16].

**4. الركيزة:**

الركائز هي دعائم تسمح بالمقاومة الميكانيكية لمختلف الطبقات [11]. عموما يستخدم الزجاج ، وفي الغالب يتم إستخدام ركائز مرنة أو معدنية [13].

**5. الإتصال الخلفي:**

يكون من المعادن وهو توصيل أومي ، المواد المستعملة لجهة الوصل الخلفي غالبا ما تكون من مواد Mo أو TiO.

## III. 2.2. إعدادات الخلايا المدروسة:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير إرتفاع حاجز الوصل الأمامي (PHIB0) ودرجة الحرارة على الخواص الفيزيائية لخليتين شمسييتين CZTS2 و CZTS1/CdS/ZnO. يُعرف إرتفاع حاجز الوصل الأمامي بالمعادلة التالية [17]:

$$PHIB0 = \Phi_{WF} - \Psi_{(ZnO)} \quad (5.III)$$

حيث :

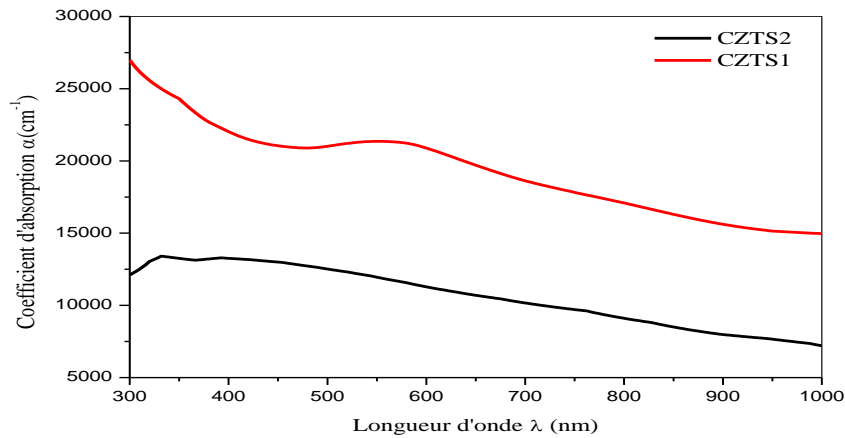
$\Phi_{WF}$  : عمل الخروج لمعدن الإتصال الأمامي بـ (eV).

$\Psi_{(ZnO)}$  : الكهروسلبية لطبقة ZnO (الطبقة المتصلة مباشرة مع الوصل الأمامي) بـ (eV).

الخصائص الفيزيائية لـ ZnO، CdS و CZTS1 و CZTS2 المستخدمة في هذه المحاكاة تم الحصول عليها من المراجع [19.18] وتم إدراجها في الجدول أسفله (1.III).

في عملنا هذا ، يتم الحفاظ على جميع خصائص الطبقة النافذة (ZnO) والطبقة العازلة (CdS) ثابتة دون تغيير ، في حين معامل الإمتصاص بدلالة طول الموجة ( $\lambda$ ) (الشكل 14.III)، سمك وطاقة فجوة النطاق ( $E_g$ ) للطبقتين الماصتين CZTS1 و CZTS2 المستخدمة في هذا العمل تم إستخراجها من العمل التجريبي لـ Boudairaetai [18].  
علما أن الطبقتين CZTS1 و CZTS2 تم تحضيرها بطريقة التحليل الكهربائي لمحاليل تحتوي على الأيونات Cu، Zn، Sn، S متبوعة بمعالجة حرارية تحت تأثير غاز الكبريت (S). الخصائص مدرجة في الجدول (2.III).

للتذكير ، في هذه المحاكاة إستخدمنا نموذج زمن الحياة لحاملات الشحنة ، وتم تسجيل الخاصية الكهربائية للخلايا تحت تأثير أطيف الإضاءة AM 1.5 مع إستطاعة  $P=1000 \text{ w/m}^2$  ، ودرجة حرارة تشغيل الخلية هي درجة حرارة الغرفة.  
تم حساب الخصائص الفيزيائية للخلايا المدروسة وهي فرق كمون المسلك المفتوح  $V_{oc}$ ، شدة تيار الدارة المقصورة  $J_{sc}$ ، معامل الشكل FF والمردود  $\eta$  إنطلاقا من الخاصية الكهربائية  $J(V)$  للخلية الشمسية والإعتماد على العلاقات الرياضية المعطاة  
في الفصل I



الشكل (14.III): معامل الإمتصاص بدلالة طول الموجة (λ).

تم إستخدام الإعدادات المدرجة في الجدول (1.III) و (2.III) لمحاكاة الخلية بـ AMPS-1D . يتم إستخدام 300°K كإعداد افتراضي.

### 1.2.2.III. خصائص الطبقات المختلفة:

طبقات مختلفة من الخصائص الإلكترونية المستخدمة في المحاكاة بـ AMPS-1D.

CZTS2	p- CZTS1	n- CdS	n-ZnO	الطبقة الخصائص
4660	3000	60	80	سمك الطبقة (nm)
10	10	10	9	السماحية النسبية لكل مادة ε <sub>r</sub>
100	100	25	25	حركية الإلكترونات μ <sub>n</sub> (cm <sup>2</sup> /v/s)
20	20	100	100	حركية الثقوب μ <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> /v/s)
1.52	1.42	2.4	3.35	فجوة الطاقة E <sub>g</sub> (eV)
2.2×10 <sup>18</sup>	2.2×10 <sup>18</sup>	2.2×10 <sup>18</sup>	2.2×10 <sup>18</sup>	N <sub>c</sub> (cm <sup>-3</sup> )
1.8×10 <sup>19</sup>	1.8×10 <sup>19</sup>	1.8×10 <sup>19</sup>	1.8×10 <sup>19</sup>	N <sub>v</sub> (cm <sup>-3</sup> )
4.21	4.21	4	4.35	كهرسلبية للطبقة χ <sub>e</sub> (eV)
4×10 <sup>16</sup>	4×10 <sup>16</sup>	0	0	تركيز الذرات الأخذة p (cm <sup>-3</sup> )
		1×10 <sup>18</sup>	1×10 <sup>18</sup>	تركيز الذرات المانحة n (cm <sup>-3</sup> )

الجدول(1.III): خصائص الطبقات ZnO و CdS و CZTS1، CZTS2.

## 2.2.2.III. إعدادات الإتصال:

PHIBL	1.55 eV
SNL	$1 \times 10^7$ cm/s
SPL	$1 \times 10^7$ cm/s
RB	0.9
PHIBO	متغير
SNO	$1 \times 10^7$ cm/s
SPO	$1 \times 10^7$ cm/s
RF	0.1

الجدول (2.III): القيم المثالية لإعدادات الإتصال المستخدمة في AMPS-1D.

## 3.2.III. النتائج والمناقشة:

يوضح الشكل (15.III) رسم تخطيطي لمخطط نطاق الطاقة للخلية ZnO/CdS/CZTS1 تحت تأثير التوازن الترموديناميكي (درجة حرارة ثابتة) ، ترجع الحواجز التي تم إنشاؤها في عصابة التوصيل بين الطبقة CZTS1/CdS وبين الطبقة CdS/ZnO إلى الاختلاف في طاقة العصابة الممنوعة  $E_g$  بين أنصاف النواقل ( CZTS1(1.4eV) ، CdS(2.4 eV) ، ZnO(3.35 eV) والاختلاف كذلك في الكهروسلبية  $\Psi$  بين هذه المواد. إن إزاحة نطاق التوصيل  $\Delta E_C$  بين CZTS/CdS وبين CdS/ZnO تعطي بالعلاقتين التاليتين [20]:

$$\Delta E_C(\text{CZTS/CdS}) = E_g(\text{CZTS}) - E_g(\text{CdS}) \quad (6.III)$$

$$\Delta E_C(\text{CdS/ZnO}) = E_g(\text{CdS}) - E_g(\text{ZnO}) \quad (7.III)$$

وإزاحة نطاق التكافؤ  $\Delta E_V$  بين CZTS/CdS وبين CdS/ZnO تعطي كذلك بالعلاقتين التاليتين [22]:

$$\Delta E_V(\text{CZTS/CdS}) = (\Psi(\text{CZTS}) + E_g(\text{CZTS})) - (\Psi(\text{CdS}) + E_g(\text{CdS})) \quad (8.III)$$

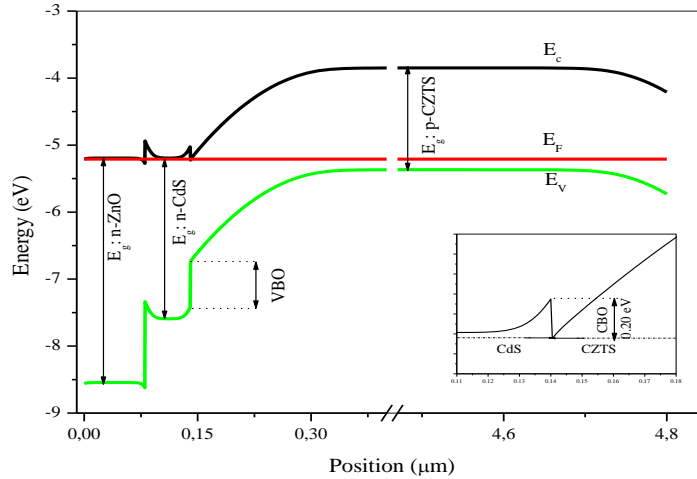
$$\Delta E_V(\text{CdS/ZnO}) = (\Psi(\text{CdS}) + E_g(\text{CdS})) - (\Psi(\text{ZnO}) + E_g(\text{ZnO})) \quad (9.III)$$

قمنا بحساب هذه المقادير فتحصلنا على النتائج التالية :

إزاحة نطاق التوصيل  $\Delta E_C$  بين CZTS/CdS وبين CdS/ZnO هي على التوالي 0.21 و -0.35 eV ، بينما إزاحة

نطاق التكافؤ  $\Delta E_V$  بين نفس الطبقات هي على التوالي 0.85 و -1.3eV . هذه القيم مطابقة للقيم الموصى بها وتوافق القيم

الموجودة في المراجع ، فهي لا تمنع تجميع حاملات الشحنة ( الثقوب و الإلكترونات) المتولدة بفعل الأشعة الضوئية وتسمح لها بالمرور إلى المسلك الخارجي [21].



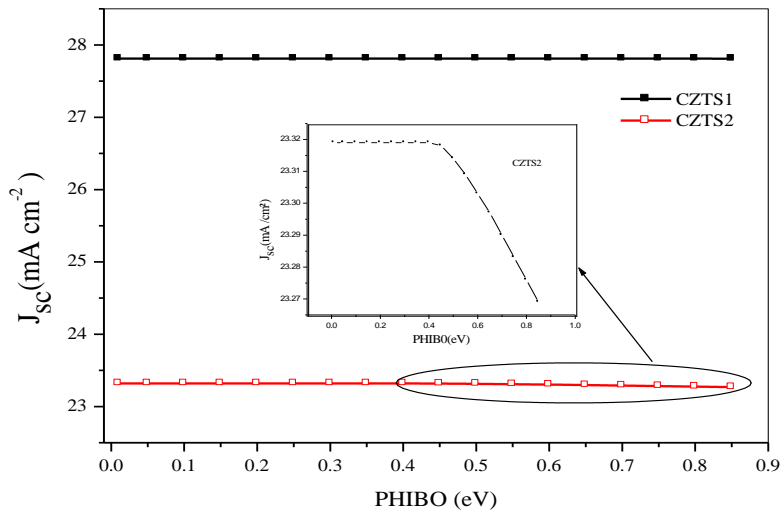
الشكل (15.III) : مخطط نطاق الطاقة للخلية الشمسية CZTS1.

### III.1.3.2.1. دراسة تأثير عامل الحاجز الطاقى للوصل الأمامي PHIB0 على الخصائص الفيزيائية للخلايا:

في هذا الجزء من المذكرة قمنا بدراسة تأثير عامل الحاجز الطاقى للوصل الأمامي PHIB0 على الخصائص الفيزيائية  $J_{sc}$  ،  $V_{oc}$  ،  $FF$  ،  $\eta$  ، من أجل هذا قمنا بتغيير قيمة PHIB0 من 0.01eV إلى 0.85 eV مع الحفاظ على قيمة عامل الحاجز الطاقى للوصل الخلفي PHIBL ثابتة وتساوي 1.55 eV. فيما يلي سنقوم بعرض النتائج المتحصل عليها من المحاكاة على شكل رسوم بيانية ، وسنقوم بشرحها ، وتفسيرها ومقارنتها مع أعمال أخرى .

#### ➤ تيار الدارة المقصرة $J_{sc}$ .

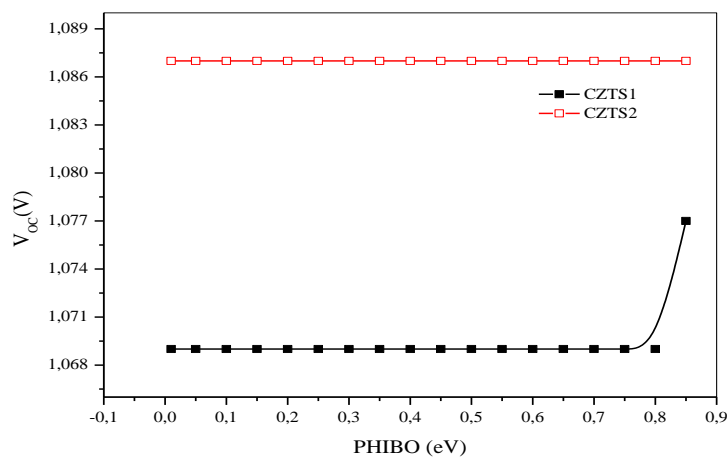
يمثل الشكل (16.III) تغير تيار الدارة المقصرة للخليتين الشمسيتين CZTS1 /CdS/ZnO و CZTS2/CdS/ZnO بدلالة الحاجز الطاقى للوصل الأمامي PHIB0. نلاحظ من خلال المنحنى الممثل في الشكل (16.III) أن تيار الدارة المقصرة للخليتين لا يتأثر بـ PHIB0 ويبقى ثابتا لكلا الخليتين ، فمن أجل PHIB0 الذي يتغير من 0.01 eV إلى 0.85 eV ،  $J_{sc}$  يساوي إلى 27.812 mA /cm<sup>2</sup> و 23.319 mA /cm<sup>2</sup> بالنسبة لـ CZTS1 و CZTS2 على التوالي . كما نلاحظ من أجل قيم PHIB0 أكبر من 0.4 eV (من 0.4eV إلى 0.85 eV) هناك إنخفاض طفيف جدا لـ  $J_{sc}$  للخلية CZTS2 ، حيث تيار  $J_{sc}$  للخلية CZTS2 يساوي من 23.319 mA /cm<sup>2</sup> إلى 23.269 mA/cm<sup>2</sup> . ومن جهة أخرى نلاحظ أن  $J_{sc}$  يتأثر بنوع الطبقة الماصة CZTS1 و CZTS2 أي بسمك الطبقة الماصة ، طاقة فجوتها ومعامل إمتصاصها ، فـ  $J_{sc}$  للخلية CZTS1 أعلى من  $J_{sc}$  للخلية CZTS2.



الشكل (III. 16): تغير تيار الدارة المقصورة للخليتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة PHIBO.

➤ فرق كمون المسلك المفتوح Voc.

يمثل الشكل (III. 17) تغير جهد المسلك المفتوح Voc بدلالة إرتفاع الحاجز الطاقي للوصل الأمامي PHIBO للخليتين CZTS1 و CZTS2. نلاحظ بأن PHIBO ليس لها تأثير على جهد المسلك المفتوح Voc بالنسبة للخليتين المدروستين فهو يساوي إلى 1.069 eV بالنسبة للخلية CZTS1 و 1.087 eV بالنسبة للخلية CZTS2 ، ومهما تكون قيمة PHIBO فإن Voc للخلية CZTS2 أعلى من Voc للخلية CZTS1 .

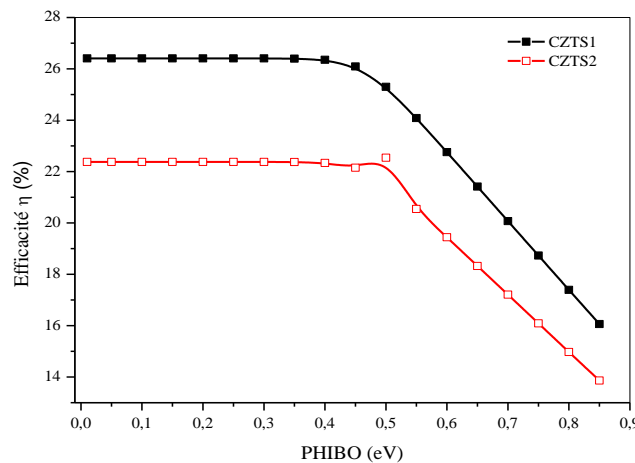


الشكل (III. 17): تغير جهد المسلك المفتوح Voc للخليتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة PHIBO.

➤ المردود  $\eta$  .

يمثل الشكل (18.III) تغير مردود الخلية الكهروضوئية CZTS1 و CZTS2 بدلالة تغير PHIB0. من خلال هذا الشكل ، نلاحظ أن تغير مردود الخلية CZTS1 و CZTS2 بدلالة عامل الحاجز الطاقى للوصل الأمامي لهما نفس المنحنى ، لأنه مهما تكون قيمة PHIB0 فإن مردود الخلية CZTS1 أكبر من مردود الخلية CZTS2 أو بالأحرى فإن مردود الخلية يتعلق بنوع الطبقة الماصة .

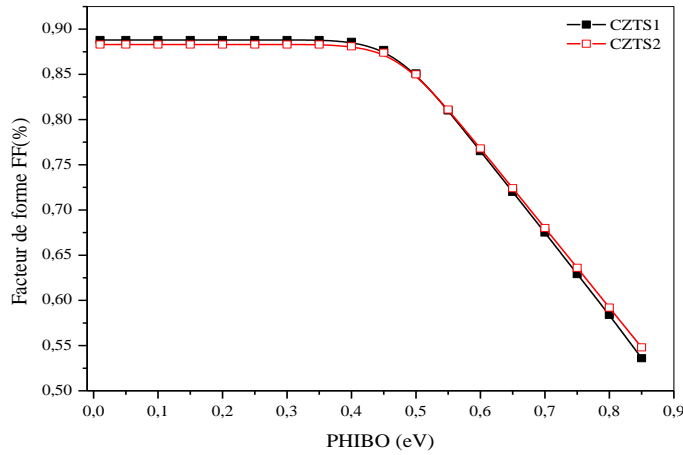
من جهة أخرى يمكن تقسيم مجال تغير PHIB0 إلى منطقتين ، الأولى من أجل قيمة PHIB0 أقل من 0.40 eV ، ففي هذه الحالة مردود الخليتين لا يتأثر بالحاجز الطاقى للوصل الأمامي فهو يساوي إلى 26.33% و 22.37% للخليتين CZTS1 و CZTS2 على التوالي. أما المنطقة الثانية ، من أجل قيم PHIB0 أكبر من 0.40 eV ، مردود الخليتين يتناقص بطريقة خطية حتى يصل إلى 16% و 14% بالنسبة CZTS1 و CZTS2 على التوالي . مع الإشارة أن سرعة إنخفاض CZTS2 أكبر من CZTS1.



الشكل (18.III): تغير مردود الخليتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة تغير PHIB0.

## ➤ معامل الشكل FF .

يمثل الشكل (19.III) تغير معامل الشكل للخليتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة تغير PHIB0 . نلاحظ بأن معامل الشكل FF لا يتأثر بنوع الطبقة الماصة ، فهو متساوي بالنسبة للخليتين CZTS1 و CZTS2 مهما تكن قيم PHIB0. من جهة أخرى نلاحظ أنه من أجل قيم PHIB0 التي تتغير من 0.01 إلى 0.35 eV معامل الشكل يبقى ثابت ولا يتأثر — PHIB0 وقيمه تساوي إلى 0.88% . ومن أجل قيم PHIB0 أكبر من 0.35 eV نلاحظ أن معامل الشكل للخليتين يتناقص خطياً بدلالة PHIB0 حين يصل إلى 0.55% . من أجل PHIB0 يساوي 0.8 eV . نلاحظ كذلك بأن تغير المردود  $\eta$  ومعامل الشكل FF بدلالة PHIB0 لها نفس المنحنى.



الشكل (19.III): تغير معامل الشكل للخليتين CZTS1 و CZTS2 بدلالة تغير PHIBO.

هذه التغيرات بدلالة الحاجز الطاقي للوصل الأمامي توافقت النتائج المتحصل عليها في الأعمال المنشورة سابقا نذكر عمل Qui et al [22]، Feldman et al [23] و [24] Zhong et al و [25] AGueda et al ، حيث قامو بدراسة تأثير سمك الطبقات وطاقة الفجوة للطبقة الماصة على الخواص الفيزيائية لخلية شمسية هيكليتها ZnO/CdS/CZTS ، تم تحديد القيم المثلى للسمك وهي 0.1 ، 0.02 ، و 1μm للطبقة ZnO ، CdS و CZTS على التوالي . وكانت قيم مردود التحويل ، شدة تيار الدارة المقصورة وفرق كمون الدارة المفتوحة الموافقة لهذه السماكة على التوالي 23.56% ، 28.5 mA/cm<sup>2</sup> ، 0.99V .

في الجدول (3.III) تم إعطاء قيم الحاجز الطاقي للوصل الأمامي PHIBO التي من أجلها تم الحصول على الخصائص المثالية للخليتين CZTS1 و CZTS2 .

CZTS2	CZTS1	
0.25	0.2	PHIB0(eV)

الجدول (3.III): القيم المثالية للحاجز الطاقي للوصل الأمامي PHIBO للخليتين CZTS1 و CZTS2.

وفي الجدول (4.III) تم إعطاء الخصائص الفيزيائية ( $\eta$ ، FF، J<sub>sc</sub>، V<sub>oc</sub>) المثالية للخليتين CZTS1 و CZTS2 من أجل PHIBO المذكور أعلاه .

$\eta$ (%)	FF (%)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (volt)	
26.409	0.888	27.812	1.069	CZTS1
22.378	0.883	23.319	1.087	CZTS2

الجدول (4.III): الخصائص الفيزيائية المثالية للخليتين CZTS1 و CZTS2 من أجل القيم المثالية ل PHIB0.

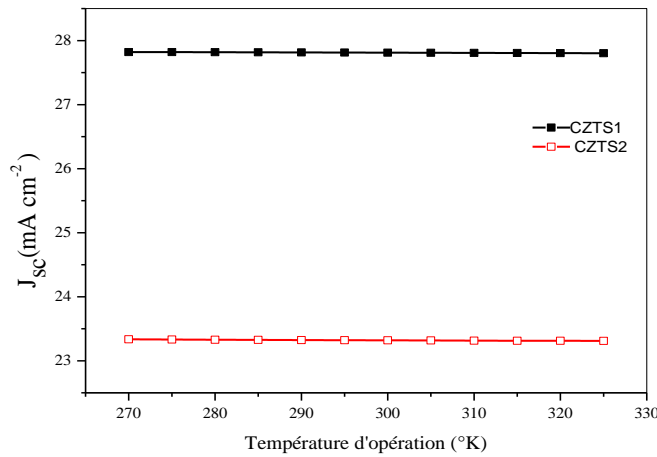
في الجزء الثاني من هذه المذكرة سنقوم بدراسة تأثير درجة الحرارة على الخصائص الفيزيائية للخليتين الشمسييتين CZTS1 و CZTS2 وهذا من أجل الحاجز الطاقي للوصل الأمامي PHIB0 المثالي أي 0.20 eV بالنسبة لـ CZTS1 و 0.25 eV بالنسبة للخلية CZTS2. مجال تغير درجة الحرارة هو من 270° K إلى 325° K.

### 1.3.2.III. تأثير درجة الحرارة على الخصائص الفيزيائية للخليتين CZTS1 و CZTS2.

في هذا الجزء من المذكرة ، سنقوم بدراسة فعل درجة الحرارة على الأداء الكهروضوئي للخليتين CZTS1 و CZTS2 وهذا من أجل قيمة الحاجز الطاقي للوصل الأمامي PHIB0 الموافقة للأداء العالي (أحسن مردود). إنطلاقاً من النتائج المتحصل عليها خلال دراسة تأثير PHIB0 فإن قيمة هذا الأخير الموافق لأعلى مردود هو 0.20eV و 0.25 eV بالنسبة للخليتين CZTS1 و CZTS2 على التوالي . في هذه الدراسة ، قمنا بتغيير درجة الحرارة من 270 °K إلى 325° K بخطوة 05 °K . و إنطلاقاً من الخاصية الكهربائية  $J(V)$  لكلا الخليتين ومن أجل مختلف درجات الحرارة ، نستخرج الخصائص الفيزيائية  $V_{oc}$  ، FF ،  $J_{sc}$  ،  $\eta$  ونقوم بتمثيل تغيرها بدلالة درجة الحرارة .

#### ➤ تيار الدارة المقصورة $J_{sc}$ .

الشكل (20.III) يمثل تغير  $J_{sc}$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2 . نلاحظ أن  $J_{sc}$  لا يتأثر بدرجة الحرارة فهو ثابت بالنسبة للخليتين CZTS1 و CZTS2 ويساوي 27.7mA/cm<sup>2</sup> و 23.4mA/cm<sup>2</sup> على التوالي. من جهة أخرى  $J_{sc}$  يتأثر بنوع الطبقة الماصة للخلية الشمسية أو بالأحرى بسمكها ، وطاقة فجوتها ومعامل إمتصاصها ، وهو أعلى بالنسبة لـ CZTS1 .



الشكل (20.III) : تغير  $J_{sc}$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2.

### ➤ كمون المسلك المفتوح $V_{oc}$ ، معامل الشكل $FF$ والمردود $\eta$ .

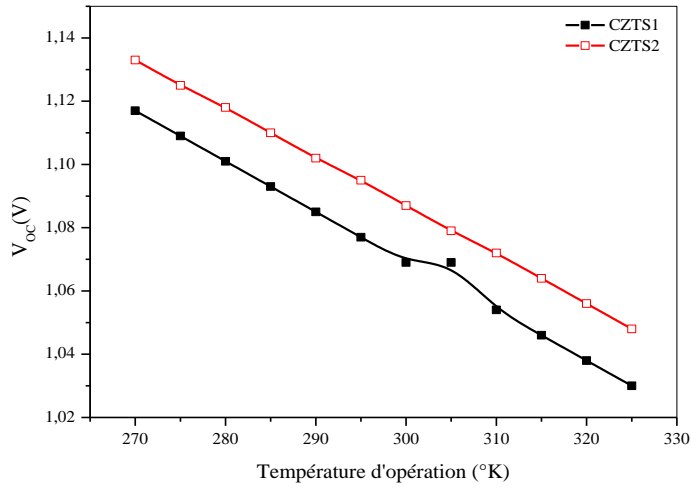
الأشكال (21.III)، (22.III)، (23.III) تمثل على التوالي منحنيات تغيرات  $V_{oc}$ ،  $FF$ ،  $\eta$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2. نلاحظ بأن تغير هذه العوامل الثلاثة مع درجة الحرارة لها نفس المنحنى ، فهي تتناقص خطياً مع إزدياد درجة الحرارة ، بالنسبة لـ  $V_{oc}$  و  $FF$  الشكلان (22.III) و (21.III) يتناقصان من 1.133V إلى 1.048 V و من 0.894% إلى 0.877% على التوالي من أجل تغير درجة الحرارة من 270°K إلى 325°K ولا يتأثر تقريباً بنوع الخلية أو بالأحرى بنوع الطبقة الماصة.

أما فيما يخص المردود حسب ما في الشكل (23.III) ، فهو يتناقص من 27.978 % إلى 25.112% بالنسبة لـ CZTS1 ومن 23.645 % إلى 21.336 % بالنسبة لـ CZTS2 من أجل تغير درجة الحرارة من 270°K إلى 325°K.

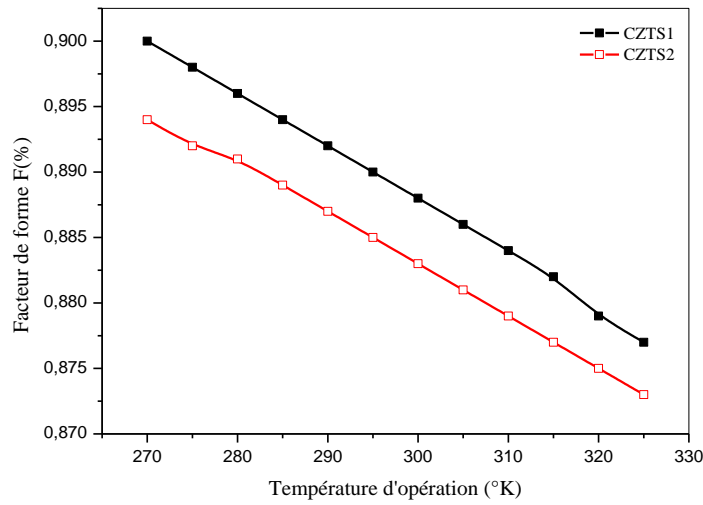
إنخفاض مردود الخليتين بدلالة درجة الحرارة يمكن تفسيره بإرتفاع معامل الإلتحام  $R$  بين حاملات الشحنة مقارنة مع معامل التوالد  $G$ . الإلتحام بين حاملات الشحنة هو إنتقال الإلكترونات المتولدة بالفعل الكهروضوئي من عصابة التوصيل  $BC$  للإلتقاء بالثقوب في عصابة التكافؤ  $BV$  على عكس معامل التوالد الذي يمثل إنتقال الإلكترونات من عصابة التكافؤ إلى عصابة التوصيل وهذا يامتصاص طاقة الأشعة الشمسية.

إن إرتفاع معامل الإلتحام مقارنة مع معامل التوالد يؤدي إلى إنخفاض في تركيز عدد الإلكترونات والثقوب ، مما يؤدي إلى إنخفاض في التيار المولد من طرف الخلية وبالتالي إنخفاض المردود.

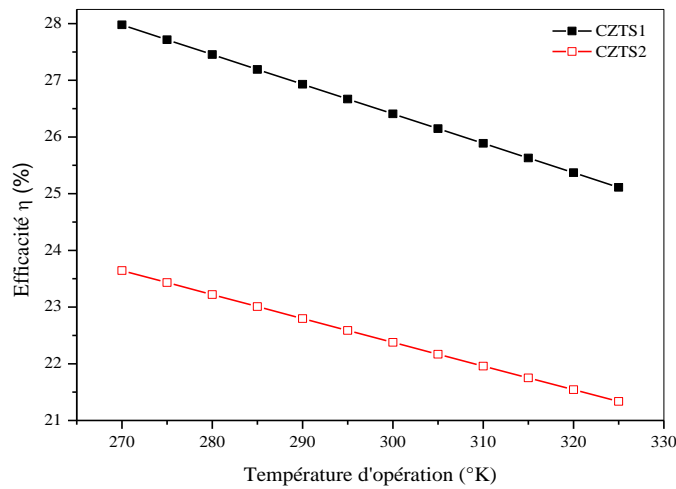
المردود القياسي لكلا الخليتين كان عند درجة الحرارة 270 °K ، ويساوي 27.97 % بالنسبة لـ CZTS1 و 23.645% لـ CZTS2 .



الشكل (21.III) : تغير  $V_{oc}$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2.



الشكل (22.III) : تغير معامل الشكل FF بدلالة درجة الحرارة للخليتين CZTS1 و CZTS2.



الشكل (23.III) : تغير المردود  $\eta$  بدلالة درجة الحرارة للخليتين

.CZTS2 و CZTS1

P.Singh et al [26] قامو بدراسة تأثير درجة الحرارة على ثلاث خلايا شمسية وهي  $\text{CuGaSe}_2/\text{CdS}/\text{ZnS}/\text{Zn}$

،  $\text{CuGaSe}_2/\text{CdS}/\text{ZnS}/\text{ZnO}/\text{Al}$  و  $\text{CuGaSe}_2/\text{CdS}/\text{ZnS}_2/\text{ZnO}/\text{Al}$ . و تحصلو على نتائج مطابقة للنتائج التي

تحصلنا عليها في عملنا هذا ، وفسرنا إنخفاض مردود الخلايا بدلالة درجة الحرارة كما يلي : إرتفاع درجة حرارة الجو يؤدي إلى

إرتفاع الإهتزازات الحرارية للشبكات البلورية المشكلة لمختلف طبقات الخلية ، وهذا يؤدي حتما إلى إنخفاض زمن حياة حاملات

الشحنة و إنخفاض حركيتها الكهربائية ، مما يعزز إرتفاع معامل الإلتحام الإلكترونيات مع الشوب مقارنة مع معامل التوالد وهذا

عكس ما تحدث عند درجات الحرارة المنخفضة أين يكون هناك شبه توازن بين معامل التوالد ومعامل الإلتحام . من جهة أخرى

إرتفاع الحرارة يؤدي إلى إنخفاض طول المسار الحر لحاملات الشحنة وبالتالي إنخفاض المردود .

### 3.III. خلاصة :

في هذا الفصل ، درسنا خليتين شمسيتين  $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CZTS1}$  و  $\text{CZTS2}$  بواسطة برنامج المحاكاة AMPS-1D

. هدفنا كان تصميم البنية المثالية  $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CZTS}$  التي تعطينا أحسن مردود . قمنا بدراسة تأثير إرتفاع الحاجز الطاقي

للوصل الأمامي على أداء الخلية الكهروضوئية CZTS1 ذات فجوة طاقة تقدر بـ  $1.42 \text{ eV}$  فوجدنا أن  $\text{PHIB0}=0.2\text{eV}$

كقيمة مثالية من أجل تحقيق خصائص فيزيائية جيدة للخلية ، أما الخلية الكهروضوئية CZTS2 ذات فجوة طاقة تقدر بـ  $\text{eV}$

$1.5$  فوجدنا أن  $\text{PHIB0}=0.25\text{eV}$  كقيمة مثالية من أجل تحقيق خصائص فيزيائية جيدة للخلية ، ثم قمنا بدراسة تأثير درجة

الحرارة على هذا الأداء الكهربائي للخلية فلاحظنا أن درجة الحرارة لها تأثير عكسي على معاملات الخلية الكهروضوئية.

## III.4. مراجع الفصل الثالث

- [1] S. Oussidhoum, « *Etude comparative des performances des cellules solaires à Jonctions simple et multiple* », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [2] W. Guanoune, « *Simulation des performances des cellules solaires à base de matériaux organiques* », mémoire de magister, université des frères Mentouri de Constantine, 2015.
- [3] S.J. Fonash et al, A manual for AMPS-1D for Windows 95/ NT; A one-dimensional device simulation program for the analysis of microelectronic and photonic structures, Pennsy Ivania State University, 1997. Seealso <http://www.ampsmodeling.org>.
- [4] M. Djemai, « *Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS)* », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [5] L. Yiming, H. Daniel, R. Angus : « *A Revised Version Of the AMPS Simulation code* », Bourses d'Etat, Université de Nankai, à Tianjin, Chine et l'Université de l'Illinois, Urbana, Etats-Unis.
- [6] A. Djeghbala, « *Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs sur les Caractéristiques électriques d'une Cellule solaire (p/n) en Silicium* », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Med Khider Biskra, 2013.
- [7] A. Bouraiou, « *Elaboration et Caractérisation des couches minces CuInSe<sub>2</sub> par Electrodeposition* », Thèse de doctorat en physique énergétique, université de Mentouri Constantine, 2009.
- [8] H. Amar, « *Propriétés électriques de cellule solaire à base dediSélénium de Cuivre Indium Galium CuIn(1-x) GaxSe<sub>2</sub> (CIGS)* », Mémoire de Magister en : Electronique, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [9] N. Touafek, « *Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn1-xGaxSe<sub>2</sub>* », thèse de doctorat, université de Mentouri de Constantine, 2015.
- [10] L. Louglaib, " *Simulation d'une cellule photovoltaïque ZnO/CdS/Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> par AMPS1D*", mémoire de master, université Ziane Achour Djelfa (2018).
- [11] S.Alphousseyni, « *Etude et élaboration par Close-Spaced Vapor Transport (CSVT), d'absorbeurs Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût.* », thèse de doctorat, université de perpignan via Domitien, 2016.
- [12] A. Belalem, W. Sandi, « *Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Cu<sub>2</sub> Zn Sn (S, S)<sub>4</sub>* », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2017.
- [13] M. Djemai, « *Effet de la température sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> (CIGS)* », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [14] T. Nakada, Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori, and T. Mise, « *Novel device structure for Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> thin film solar cells using transparent conducting oxide back and front contacts* », Solar Energy, vol. 77, no. 6, pp. 739–747, décembre 2004.
- [15] A. Chadel, « *Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS* », Thèse de Doctorat, Université de abou-bekr belkaid – Tlemcen.
- [16] O. Daranféd, « *Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>* », Thèse de Doctorat, université de Mentouri de Constantine 1, 2013.
- [17] Manuel du simulateur AMPS-1D, site internet:<http://www.ampsmodeling.org/>, consulté le 10/06/2020.

- [18] R. Boudaira, O. Meglali, A. Bouraiou, N. Attaf, C. Sedrati, M.S. Aida, *Optimization of sulphurization temperature for the production of single-phase CZTS kesterite layers synthesized by electrodeposition*, Surface Engineerin Manuscript accepted for publication (2020). Doi.org/10.1080/02670844.2020.1758013.
- [19] R. Chandrasekharan, *Numerical Modeling of Tin-Based Absorber Devices for Cost-Effective Solar Photovoltaic*, Doctor of Philosophy. The Pennsylvania State University, May 2012.
- [20] S. Boudour, I. Bouchama, N.Bouarissa, M. Hadjab, *A study of CdTe solar cell using Ga-doped Mg<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O buffer/TCO layers: Simulation and performance analysis*, Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 4(20019) 111-115.
- [21] J. Li, M. Wei, Q. Du, W. Liu, G. Jiang, C. Zhu, Surf. Interface Anal.45 (2) (2012) 682-684.
- [22] D. Qiu, W. Duan, A. Lambertz, K. Bittkau, P. Steuter, Y. Liu, A. Gad, M. Pomaska, U. Rau, K. Ding, Solar Energy Materials and Solar Cells, 209 (2020) 110471. Doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110471.
- [23] F. Feldmann, M. Bivour, C. Reichel, M. Hermle, S.W. Glunz, Solar energy materials and solar cells, 120 (A) (2014) 270-274. Doi.org/10.1016/j.solmat.2013.09.017.
- [24] L. Zhao, C. L. Zhou, H. L. Li, H. W. Diao, W. J. Wang, Role of the work function of transparent conductive oxide on the performance of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells studied by computer simulation, phys. stat. sol. (a) 205 ( 5) (2008) 1215-1221. Doi.org/10.1002/pssa.200723276.
- [25] A. Gueddim, N. Bouarissa, A. Naas, F. Daoudi, N. Messikine, Applied Physics A, 124 (2018)199.Doi.org/10.1007/s00339-018-1626-1.
- [26] P.Singh, R.Gautam, S. Sharma, S. Kumari, A.S. Verma, Simulated solar cell device of CuGaSe<sub>2</sub> by using CdS, ZnS and ZnSe buffer layers, Materials Science in Semiconductor Processing42(3)(2016)288-302. Doi.org/10.1016/j.mssp.2015.10.030

# الخلاصة العامة

## الخلاصة العامة

الهدف الرئيسي من العمل المنجز في هذه المذكرة كان دراسة تأثير درجة الحرارة وإرتفاع الحاجز الطاقي للوصل الأمامي (PHIB0) على الأداء الكهروضوئي لخليتين شمسييتين ZnO/CdS/CZTS1 و ZnO/CdS/CZTS2 . وهذا بإستعمال البرنامج

(Analysis Microelectronic and Photonic Structures-One Dimensional) AMPS-1D.

إرتفاع الحاجز الطاقي للوصل الأمامي هو الفرق بين عمل الخرج لمعدن الإتصال الأمامي والكهر وسلبية للطبقة ZnO . إن الطبقة الماصة في الخلية الشمسية تلعب دورا أساسيا في تحديد مردود الخلية ، وذلك لأن الفعل الكهروضوئي يحدث في الوصلة التي تشكلها الطبقة الماصة مع الطبقة العازلة.

وقع إختيارنا على المركب  $Cu_2ZnSnS_4$  و الذي يرمز له بالرمز CZTS لإستعماله كطبقة ماصة في دراستنا هذه . مقارنة مع المواد الموجودة حاليا ، المركب CZTS له خصائص جعلت منه مرشحا بقوة لكي يكون رائداً في صناعة الخلايا الشمسية في السنوات القادمة . من بين خواصه ، أن جميع عناصره (Cu ، Zn ، Sn ، S) موجودة في الطبيعة بوفرة ، وجميع عناصره غير ضارة بالبيئة ولا سامة ، يملك معامل إمتصاص عالي جداً خاصة في المجال المرئي ، يتميز بإستقرار عال جداً ومقاوم للإشعاعات الضوئية بالإضافة أنه يملك خواص بلورية ملائمة للإتصال مع الطبقة العازلة CdS والوصل الخلفي للخلية والذي يكون عادة من الموليبدات Mo.

في هذه المحاكاة إستخدمنا نموذج زمن الحياة لحاملات الشحنة وتم تقييم أداء الخلية تحت تأثير طيف الإشعاع AM1.5 من جهة ، ومن جهة أخرى تم الحفاظ على جميع خصائص الطبقة النافذة (ZnO) والطبقة العازلة (CdS) ثابتة ، في حين أن خواص الطبقتين الماصتين CZTS1 و CZTS2 فتم إستخراجها من عمل تجريبي تم نشره مؤخراً (2020).

قمنا بتغيير قيمة الحاجز الطاقي للوصل الأمامي (PHIB0) ما بين 0.01 و 0.85eV في حين غيرنا درجة الحرارة من 270 °K إلى 325 °K.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن إرتفاع الحاجز الطاقي للوصل الأمامي له تأثير كبير على الأداء الكهروضوئي للخلايا المدروسة. فمهما تكن قيمة PHIB0 فإن مردود الخلية CZTS1 أكبر من CZTS2 . ومن أجل قيمة PHIB0 أقل من 0.41eV فإن مردود الخليتين ثابت ولا يتأثر ب PHIB0 (26.40 % و 23.3 % ل CZTS1 و CZTS2 على التوالي) . ومن أجل قيم PHIB0 أكبر من 0.41 eV فإن مردود الخليتين يتناقص خطياً مع PHIB0 .

تيار الدارة المقصرة  $J_{SC}$  وفرق الكمون للدارة المفتوحة  $V_{OC}$  لا يتأثران بتغير PHIB0 فهما يساويان  $27.812 \text{ mA/cm}^2$  و  $23.319 \text{ mA/cm}^2$  و  $1.069\text{V}$  و  $1.087\text{V}$  للخليتين CZTS1 و CZTS2 على التوالي .

بالنسبة للخلية CZTS1 قيمة PHIB0 الموافقة للأداء العالي هي  $0.20 \text{ eV}$  وكانت قيمة خصائصها كما يلي:

قيمة  $V_{OC} = 1.069 \text{ V}$  ،  $J_{SC} = 27.812 \text{ mA/cm}^2$  ،  $FF = 0.888 \%$  ،  $\eta = 26.409\%$  . أما بالنسبة لـ CZTS2 ، قيمة PHIB0 الموافقة للأداء العالي هي  $0.25 \text{ eV}$  وكانت قيم خصائص هذه الخلية كالتالي :  $V_{OC} = 1.087 \text{ V}$  ،  $FF = 0.883 \%$

$$J_{SC} = 23.31 \text{ mA/cm}^2 ، \eta = 23.378 \%$$

قيمة إزاحة نطاق التوصيل  $\Delta E_C$  بين CZTS1/CdS و بين CdS/ZnO هي على التوالي  $0.21\text{eV}$  و  $-0.35\text{eV}$  ، هذه القيم مطابقة للقيم الموجودة في المراجع وهي لا تمنع تجميع حاملات الشحنة المتولدة بفعل الفعل الكهروضوئي .

أما فيما يخص تأثير درجة الحرارة ؛ فمردود الخليتين له نفس المنحنى ، يتناقص خطياً . من أجل تغيير درجة الحرارة من

$270 \text{ }^\circ\text{k}$  إلى  $325 \text{ }^\circ\text{k}$  ، مردود الخليتين يتناقص من  $27.978\%$  إلى  $25.112 \%$  ومن  $23.654 \%$  إلى  $21.336 \%$  لـ CZTS1 و CZTS2 على التوالي.

# دراسة تأثير إرتفاع حاجز الوصل الأمامي ودرجة حرارة التشغيل على أداء الخلايا الشمسية ZnO/CdS/CZTS

## الملخص

في هذه المذكرة ، هدفنا الرئيسي من هذا العمل المنجز هو دراسة تأثير درجة الحرارة وإرتفاع الحاجز الطاقي للوصل الأمامي (PHIB0) على الأداء الكهروضوئي لخليتين شمسيتين ZnO/CdS/CZTS1 و ZnO/CdS/CZTS2 . وذلك بإستخدام البرنامج AMPS-1D ، الذي قمنا بإدراج من خلاله خواص الطبقة النافذة ZnO والطبقة العازلة CdS بإستخلاصها من المراجع ، أما خواص الطبقتين الماضيتين CZTS1 و CZTS2 فتم إستخلاصها من عمل تجريبي نشر مؤخرًا (2020).  
في هذه المحاكاة إستخدمنا نموذج زمن الحياة لحاملات الشحنة (الإلكترون والثقب) ، و تم تقييم أداء الخلية تحت تأثير طيف الإشعاع AM1.5 أي  $P=1000 \text{ W/m}^2$  .

بعد تأثير إرتفاع الحاجز الطاقي للوصل الأمامي PHIB0 على خصائص الخليتين وذلك بتغيير قيمة PHIB0 من

0.01 eV إلى 0.85 eV . لاحظنا من خلال النتائج أن قيمة PHIB0 المثالية لـ CZTS1 الموافقة للأداء العالي

0.2eV وكانت قيم خصائصها كما يلي :  $V_{oc} = 1.069 \text{ V}$  ،  $J_{sc} = 27.812 \text{ mA/cm}^2$  ،  $F = 0.888 \%$  ،

$\eta = 26.409\%$  . أما بالنسبة للخلية CZTS2 ، قيمة PHIB0 الموافقة للأداء العالي هي 0.25eV وكانت قيم خصائص

هذه الخلية كالتالي :  $V_{oc} = 1.087 \text{ V}$  ،  $J_{sc} = 23.319 \text{ mA/cm}^2$  ،  $FF = 0.883 \%$  ،  $\eta = 23.378 \%$  .

قيمة إزاحة نطاق التوصيل  $\Delta E_c$  بين CZTS1/CdS و بين CdS/ZnO هي على التوالي 0.21eV و -0.35eV ، هذه

القيم مطابقة للقيم الموجودة في المراجع وهي لا تمنع تجميع حاملات الشحنة المتولدة بفعل الفعل الكهروضوئي .

أما بعد تأثير درجة الحرارة ؛ فمردود الخليتين له نفس المنحنى ، يتناقص خطيًا . من أجل تغيير درجة الحرارة من 270 °k إلى

325 °k ، مردود الخليتين يتناقص من 27.978% إلى 25.112% ومن 23.654% إلى 21.336% لـ CZTS1 و CZTS2

على التوالي .

الكلمات المفتاحية: خلية شمسية، AMPS-1D ، ZnO/CdS/CZTS ، الوصل الأمامي.

# **Etude de l'effet de la hauteur de la barrière du contact avant et de la température de fonctionnement sur les performances des cellules solaires ZnO/CdS/CZTS.**

## **Résumé**

Dans ce mémoire, nous avons utilisé la simulation numérique pour étudier les effets de la hauteur de la barrière du contact avant sur les caractéristiques électriques de deux cellules solaires à savoir ZnO / CdS / CZTS1 et ZnO/CdS/CZTS2 en utilisant le simulateur appelé analyse de la structure microélectronique et photonique- unidimensionnel (AMPS-1D).

Les propriétés de la couche fenêtrant ZnO et de la couche tampon CdS ont été extraites de la bibliographie, mais les propriétés des couches absorbantes CZTS1 et CZTS2 sont obtenues à partir d'un travail expérimental publié récemment.

Dans cette simulation, nous avons utilisé le modèle de la durée de vie et les performances des cellules ont été évaluées sous le spectre d'irradiation standard AM1.5, avec  $P = 1000 \text{ W /m}^2$ .

La hauteur de la barrière du contact avant a été variée dans la plage de 0.1 à 0.85 eV pour obtenir les performances optimales de la cellule comme le rendement  $\eta$ , le facteur de forme FF, la tension du circuit ouvert  $V_{OC}$  et la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  de ces deux cellules solaires ZnO/CdS / CZTS1 et CZTS2. L'effet de la température d'opération sur les performances des cellules est également étudié.

Les résultats obtenus montrent que la hauteur de la barrière du contact avant a un effet important sur les performances photovoltaïques des cellules solaires. Les performances optimales pour CZTS1 sont  $J_{SC} = 27.812 \text{ mA / cm}^2$ ,  $V_{OC} = 1.069\text{V}$ ,  $FF = 0.888\%$  et  $\eta = 26.409\%$  obtenues pour  $PHIB0 = 0.20 \text{ eV}$ , et pour CZTS2 :  $J_{sc} = 23.319 \text{ mA / cm}^2$ ,  $V_{oc} = 1.087\text{V}$ ,  $FF = 0.883\%$  et  $\eta = 22.378 \%$  obtenues pour  $PHIB0 = 0.25 \text{ eV}$ .

Le décalage de la bande de conduction  $\Delta E_c$  à l'interface CZTS1/CdS et entre CdS/ZnO est égal à 0.21 et -0.35 eV, ces valeurs n'empêchent pas la collecte de porteurs photogénérés.

Le rendement des deux cellules diminue linéairement avec la température d'opération ; pour une température qui passe de 270 °K à 325° K, le rendement diminue de 27.978 à 25.112% et de 23.645% à 21.336% respectivement pour CZTS1 et CZTS2.

**Mots clés : Cellule solaire, AMPS-1D, ZnO/CdS/CZTS, contact avant.**

# **Study of the effect of front contact barrier height and operating temperature on the performance of ZnO/CdS/CZTS solar cells.**

## **Abstract**

In this work, we have used numerical simulation to study the effects of the front contact barrier height (PHIB0) on the electrical characteristics of two solar cells namely ZnO/CdS/CZTS1 and ZnO/CdS/CZTS2 using the simulator called Analysis of Microelectronic and Photonic Structure - one-dimensional (AMPS-1D).

In this simulation, we used the life times model and cell performance was evaluated under the standard AM1.5 irradiation spectrum, with  $P = 1000 \text{ W/m}^2$ . The barrier height of the front contact (PHIB0) was varied in the range of 0. to 0.85 eV to obtain the optimum cell performance; such as the efficiency  $\eta$ , the fill factor FF, the open circuit voltage  $V_{oc}$  and the short-circuit current density  $J_{sc}$  of these two solar cells ZnO/CdS / CZTS1 and CZTS2. The operating temperature effect on the cell performance is also studied.

The results obtained show that the front contact barrier height has a significant effect on the photovoltaic cell performance. The optimal performance for CZTS1 is  $J_{sc} = 27.812 \text{ mA / cm}^2$ ,  $V_{oc} = 1.069 \text{ V}$ ,  $FF = 0.88\%$  and  $\eta = 26.409\%$  obtained for PHIB0 = 0.20 eV, and for CZTS2 :  $J_{sc} = 23.319 \text{ mA / cm}^2$ ,  $V_{oc} = 1.087 \text{ V}$ ,  $FF = 0.883\%$  and  $\eta = 22.378\%$  obtained for PHIB0 = 0.25 eV.

The shift of the conduction band  $\Delta E_c$  at the CZTS1/CdS interface and between CdS/ZnO is equal to 0.21 and -0.35 eV, these values do not prevent the collection of the photogenerated carriers. The efficiency of the two cells decreases linearly with the operating temperature ; for a temperature which goes from 270 K ° to 325 °K, the efficiency decreases from 27.978% to 25.112% and from 23.645% to 21.336% respectively for CZTS1 and CZTS2.

**Key words: Solar cell, AMPS-1D, ZnO/CdS/CZTS, front contact.**

