



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

## مذكرة ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: الفيزياء

تخصص: فيزياء طاقة

من إعداد الطالبين: **بن تواتي عبد الوهاب، حمادي سليم**

**\*\* بعنوان \*\***

محاكاة خلية شمسية من الطبقات الرقيقة من نوع

**CIGS ( $Cu(In, Ga)Se_2$ )**

تمت المناقشة يوم: 2023/06/19 م

أمام لجنة المناقشة المتكونة من الأساتذة:

رئيسا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ التعليم العالي	لزهر بن مبروك
مناقشا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر قسم أ	محسن حسين
مشرفا	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ محاضر قسم ب	محمد جريوي

الموسم الجامعي: 2022 / 2023

الاهداء 01 :



إلى التي انتظرت بصبر ثمار تعليمها الجيد وتفانيها

**لأمي العزيزة**

لمن حول الليل إلى نهار ليضمن الظروف المناسبة إلى

**والدي العزيز**

إلى عائلتي الصغيرة التي دعمتني دائما

وأهدي هذا العمل المتواضع لجميع زملائي وأصدقائي

**بن تواتي عبد الوهاب**



## الاهداء 02 :



أهدي ثمرة هذا العمل

إلى عائلة **حمادي** الكريمة عامة وخاصة الى ملاكي في الحياة ... إلى  
معنى الحب والتفاني... إلى بسملة الحياة وسر الوجود ... إلى من كان  
دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي ... إلى أمي العزيزة أطل الله  
تعالى في عمرها وبارك الله في صحتها وجعلها تاجا فوق رؤوسنا.  
إلى إخواني وأخواتي الأعزاء الذين وجدت فيهم كل الدعم والعون في  
مشواري الدراسي والجامعي.

إلى الإخوان الذين لم تدهم أمي ... إلى من تحلوا وبالإخاء فتميزوا  
بالوفاء والعطاء

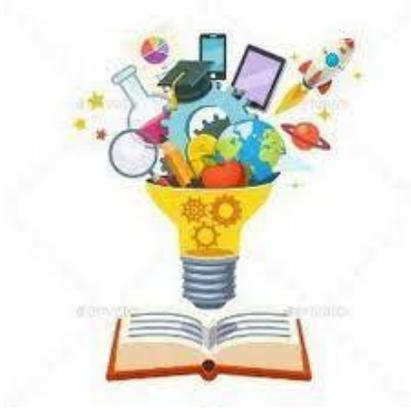
إلى ينبيع الصدق الصافي إلى من معهم سعدت وبرفقتهم في دروب  
الحياة سرت...

إلى من كانوا معي على طريق النجاح والخير...

إلى أصدقائي وأحبابي وإلى كل الزملاء

حمادي سليم





# الشكر

شكرنا أولاً إلى الله عز وجل الرحمن الرحيم على إعطائنا الإرادة  
والشجاعة لإكمال دراستنا.

ثم شكرنا إلى مشرفنا.

**" الدكتور. محمد جريوي "**

للثقة والاهتمام الذي أظهره لنا طوال تطوير هذا العمل، لمساعدته  
التمينة ونصائحه ذات الصلة أتمنى أن يجد أعضاء لجنة المناقشة  
الذين قبلوا الحكم على عملنا هنا تعبيراً عن امتناننا  
وشكرنا المنتظر.





## الفهرس

رقم الصفحة	العنوان
I	الإهداء
III	الشكر
IV	الفهرس
VIII	قائمة الجداول
VIII	قائمة الأشكال
X	قائمة الرموز والمصطلحات

رقم الصفحة	العنوان	رقم العنوان
01	مقدمة عامة	
<b>الفصل الأول: عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية</b>		
02	مقدمة	.1. I
02	الطاقة الشمسية	.2.I
02	الإشعاع الشمسي	.3.I
03	الثابت الشمسي	.1.3.I
03	طيف الإشعاع الشمسي	.2.3.I
04	أهم العمليات لطيف الإشعاع الشمسي	.4.3.I
04	أنواع الإشعاع الشمسي	.5.3.I
05	العوامل المؤثرة في توزيع الإشعاع الشمسي	6.3.I
06	تطبيقات الطاقة الشمسية	.4.I
07	أنصاف النواقل	.5.I
07	. تعريف أنصاف النواقل	.1.5.I

07	أنواع أنصاف النواقل	.2.5.I
07	أنصاف النواقل النقية	.1.2.5.I
08	أنصاف النواقل المطعمة (المشوبة)	.2.2.5.I
09	الوصلة الثنائية PN	.3.5.I
10	مفعول الكهروضوئي	.6.I
10	الخلايا الشمسية	.7.I
10	تعريف الخلايا الشمسية	.1.7.I
11	خصائص الخلية الشمسية	.2.7.I
11	الإعدادات الفيزيائية للخلايا الشمسية	.1.2.7.I
13	الدارة المكافئة للخلية الضوئية	.3.7.I
14	تركيب الخلايا الكهروضوئية	.4.7.I
14	التركيب على التسلسل	.1.4.7.I
14	التركيب على التفرع	.2.4.7.I
15	تأثير التغيرات المناخية على خاصية الخلية الكهروضوئية	.5.7.I
15	تأثير الإضاءة	.1.5.7.I
16	تأثير درجة الحرارة	.2.5.7.I
16	أنواع الخلايا الشمسية	.8.I
17	مختلف اجيلال الخلايا الشمسية	.1.8.I
17	الجيل الاول للخلايا الشمسية	.1.1.8.I
18	الجيل الثاني للخلايا الشمسية	.2.1.8.I
19	الجيل الثالث للخلايا العضوية	.3.1.8.I
<b>الخاتمة</b>		
20	الخاتمة الفصل الاول	

<b>المراجع</b>		
21	المراجع الفصل الاول	
<b>الفصل الثاني : الخلايا الشمسية القائمة على CIGS</b>		
24	مقدمة	1.II
24	مفهوم الأغشية الرقيقة	.2.II
24	تطبيقات الأغشية الرقيقة	.1.2.II
25	مميزات الأغشية الرقيقة	.2.2.II
25	طرق ترسيب الأغشية الرقيقة	.3.2.II
26	الخلايا الشمسية ذات الطبقة الرقيقة المصنوعة من CIGS	.3.II
26	خصائص السليينيد النحاس-الغاليوم-السيلينيوم (CIGS)	.1.3.II
27	تركيب CIGS	.2.3.II
28	هيكل خلية CIGS	1.2.3.II
28	الركيزة	.2.2.3.II
28	جهة التوصيل الخلفي	.3.2.3.II
29	الطبقة الماصة	.4.2.3.II
29	الطبقة العازلة	.5.2.3.II
30	الطبقة النافذة	.6.2.3.II
30	مميزات CIGS	.3.3.II
<b>الخاتمة</b>		
30	الخاتمة الفصل الثاني	
<b>المراجع</b>		
31	المراجع الفصل الثاني	

الفصل الثالث: محاكاة الخلية CIGS		
33	مقدمة	.1.III
33	لمحة عن برنامج SCAPS-1D	.2.III
33	مبدا المحاكاة الرقمية	.3.III
34	المحاكاة باستعمال برنامج SCAPS 1D	.4.III
36	تعريف الخلية الشمسية	.5.III
36	تعديل هيكل الخلية الشمسية	.1.5.III
38	هيكل الخلية الشمسية	.2.5.III
39	تأثير سماكة الطبقة الماصة CIGS	.3.5.III
40	تأثير كثافة التطعيم $N_A$ في طبقة الامتصاص (CIGS) على أداء الخلية الشمسية	.4.5.III
41	تأثير كثافة التطعيم $N_D$ في طبقة CdS	.5.5.III
42	تأثير سمك طبقة CdS على أداء الخلية الشمسية	.6.5.III
43	النتيجة	.6.III
43	نتائج محاكاة الخاصية I-V قبل و بعد المحاكاة	.1.6.III
<b>الخاتمة</b>		
44	الخاتمة الفصل الثالث	
<b>المراجع</b>		
45	المراجع الفصل الثالث	
<b>خاتمة عامة</b>		
46	خاتمة عامة	
<b>ملخص</b>		
47	ملخص	

## قائمة الجداول

الصفحة	العنوان	الجدول
38	معلومات الخلية كل من CIGS/CdS/ZnO	الجدول (01.III)
43	البيانات المستخرجة من المحاكاة	الجدول (02.III)
43	نتائج محاكاة الخاصية I-V	الجدول (03.III)

## قائمة الاشكال

الصفحة	العنوان	الشكل
<b>الفصل الأول</b>		
02	الطاقة المنبعثة من الشمس	الشكل (01.I)
03	طيف الإشعاع الشمسي الواصل للكرة الأرضية	الشكل (02.I)
06	تطور استخدام الطاقات المتجددة عالميا على مدار الاعوام السابقة	الشكل (03.I)
07	يوضح الفجوة الطاقية الممنوعة	الشكل (04.I)
08	تطعيم ذرة السيلكون من نوع n	الشكل (05.I)
09	تطعيم ذرة السيلكون من نوع p	الشكل (06.I)
09	الوصلة P-N	الشكل (07.I)
10	الخلايا الشمسية الكهروضوئية كجهاز لتحويل الطاقة الشمسية	الشكل (08.I)
11	طبقات الخلية الكهروضوئية	الشكل (09.I)
11	منحنى تغير التيار- بدلالة فرق الكمون للخلية الشمسية	الشكل (10.I)
12	منحنى I-V لخلية شمسية سيلكون مع تمثيل نقطة الاستطاعة القصوى $P_{max}$	الشكل (11.I)
13	نموذج الدارة المكافئة للخلية الشمسية	الشكل (12.I)
14	رسم تخطيطي يمثل ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التسلسل	الشكل (13.I)

15	رسم تخطيطي يمثل ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التفرع	الشكل (14.I)
15	خاصية خلية شمسية تحت تأثير الإضاءة	الشكل (15.I)
16	تأثير شدة الإضاءة على استطاعة الخلية الشمسية	الشكل (16.I)
16	تأثير درجة الحرارة على خصائص (I-V) لخلية شمسية	الشكل (17.I)
17	رسم تخطيطي يمثل أنواع الخلايا الشمسية	الشكل (18.I)
18	الخلايا السيليكون متعددة البلورات	الشكل (19.I)
20	تطور مردود الخلايا الكهروضوئية التي تم الحصول عليها في مختبرات مختلفة	الشكل (20.I)
<b>الفصل الثاني</b>		
25	مخطط يوضح بعض الطرق الفيزيائية والكيميائية	الشكل (21.II)
26	هيكل CIGS	الشكل (22.II)
27	معامل امتصاص لمختلف المواد	الشكل (23.II)
28	هيكلية قياسية لخلية تعتمد على CIGS	الشكل (24.II)
<b>الفصل الثالث</b>		
34	لوحة بدء SCAPS ، العمل أو اللوحة الرئيسية	الشكل (25.III)
35	لوحة تعريف الخلايا الشمسية	الشكل (26.III)
36	نقطة التشغيل	الشكل (27.III)
36	معلمت الإضاءة	الشكل (28.III)
37	تعريف هيكل خلية شمسية	الشكل (29.III)
37	لتعبئة معلمت الطبقات المختلفة في خلية الطاقة الشمسية	الشكل (30.III)
39	بيانات محاكاة سمك طبقة CIGS	الشكل (31.III)
40	تركيز الشحنات الإخذة لطبقة الامتصاص CIGS	الشكل (32.III)
41	بيانات محاكاة تركيز المانحات للطبقة CdS	الشكل (33.III)
42	بيانات محاكاة سمك طبقة CdS	الشكل (34.III)

44	الخاصية I-V قبل المحاكاة	الشكل (35.III)
44	الخاصية I-V بعد المحاكاة	الشكل (36.III)

## قائمة الرموز والمصطلحات

الرمز	المدلول
SCAPS-1D	برنامج المحاكاة الرقمية (تحليل البنيات الإلكترونية الدقيقة والفوتونية على بعد واحد)
CIS	سيلينيد نحاس إنديوم وهو مركب ثلاثي شبه موصل <b>CuInS</b>
CIGS	السيلند نحاس الغاليوم السيببتيوم شبه موصل Cu(In.Ga)Se
Se	السيلنيوم عنصر كيميائي عدده الذري 34 (عنصر سام)
Cd	الكادميوم عنصر كيميائي والعدد الذري 48
$P_{max}$	الاستطاعة القصوى
Cd	الكادميوم عنصر كيميائي والعدد الذري 48
$R_s$	المقاومة على التسلسل
$R_{sh}$	المقاومة على التفرع

# المقدمة العامة

### المقدمة عامة

على مر العصور، قام الإنسان بتطوير واستخدام مصادر الطاقة بأشكال وطرق مختلفة، بدأ الإنسان باستخدام الطاقة البشرية، ومع تقدم التكنولوجيا، تم اكتشاف واستخدام مصادر الطاقة النووية، حيث تم استخدام الانشطار النووي لتوليد الكهرباء في المفاعلات النووية، وفي العقود الأخيرة، اتجه العالم نحو اكتشاف مصادر الطاقة المتجددة والبديلة، تشمل هذه المصادر الطاقة الشمسية والرياح والمائية والحرارية والمائية الحركية والطاقة الحيوية والهيدروجين والطاقة النووية المتجددة مثل الانصهار النووي، تعتبر هذه المصادر مستدامة وغير ملوثة، وتحظى بمزيد من الاهتمام والتطوير لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة وللحفاظ على البيئة.

يهدف البشر اليوم إلى تطوير تكنولوجيا جديدة وابتكار مصادر طاقة مستدامة تعتمد على الموارد المتجددة وتقليل الاعتماد على المصادر غير المتجددة، تعد مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية المصادر أكثر استدامة وصديقة للبيئة، حيث تستخدم طاقة الشمس لتوليد الكهرباء. وتعتبر الطاقة الشمسية متوفرة بشكل وفير ومجانية، ويمكن توليدها في معظم المناطق، لذلك لجا الدارسون والباحثون الى العمل على تطوير الخلايا الشمسية من اجل ضمان مردود حسن و كفاءات عالية مع الحرض على انتاج هذه الخلايا باقل سعر ممكن بما يعرف باقتصاد الطاقة حيث تركز البحوث على تطوير تركيبات الخلايا الشمسية من خلال التجارب العملية بالرغم من انها مكلفة الا انها في الاخير تعطي نتائج جيدة، ومع تقدم علوم الحاسب و تكنولوجيا الاعلام الالي اصبحت اليوم لدينا وسائل بحثية تعتمد على جهاز الحاسب بدلا من التجربة و هذا يحدث من خلال محاكات التجربة في بيئة افتراضية ومحاولة تقربها قدر الامكان من الواقع وهذه الطريقة فعالة حيث تعطي نتائج قريبة من الواقع مع عدم استعمال التجربة و هذا امر جيد بالنسبة للجانب الاقتصادي للباحث.

ان محاكاة الخلايا الشمسية هي عملية دراسة وتحليل أداء الخلايا الشمسية باستخدام النمذجة الحاسوبية. تهدف هذه المحاكاة إلى فهم كيفية عمل وأداء الخلايا الشمسية وتحسين كفاءتها وأدائها اذ تساعد محاكاة الخلايا الشمسية في دراسة تأثير المعلمات المختلفة على أداء الخلية مثل التركيب المادي للخلايا، والخواص البصرية والكهربائية للمواد المستخدمة، وشكل وتصميم الخلية الشمسية. كما تمكننا هذه المحاكاة من تحليل أثر العوامل البيئية المختلفة مثل درجة حرارة البيئة وشدة الإشعاع الشمسي على أداء الخلية الشمسية.

ماذا سنعمل في هذه الفصول الثلاثة؟ سوف نقوم بمحاكاة خلية شمسية من الطبقات الرقيقة لأنصاف النواقل CIGS حيث تم تقسيم هذا العمل الى ثلاث فصول:

الفصل الاول: يهدف الى عرض مفاهيم رئيسية حول الطاقة الشمسية والخلايا الكهروضوئية من اجل فهم مبدا عمل الخلية الشمسية .

الفصل الثاني: تطرقنا في هذا الفصل الى خلايا الجيل الثاني " خلايا CIGS " حيث قمنا بشرح تركيبها ومبدأ عملها.

الفصل الثالث: و هو الفصل التجريبي الذي سنقوم فيه بمحاكاة خلية شمسية من الجيل الثاني CIGS باستخدام برنامج SCAPS 1-D و مناقشة نتائج محاكاتها.

ثم نختم هذا العمل بخاتمة عامة حول هذا الموضوع المهم جدا والذي يعتبر حديث العصر لدى الباحثين في الدول المتقدمة

---

## الفصل الأول:

عموميات على الطاقة الشمسية والخلايا

الكهروضوئية

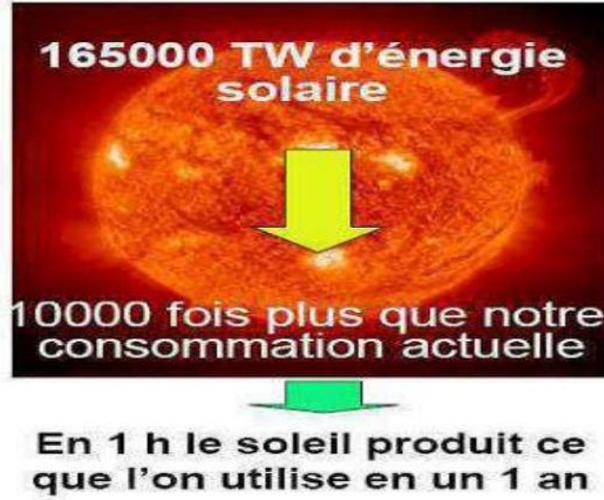
### 1.1. مقدمة :

تعتبر الأشعة الشمسية مصدر الطاقة الأساسي للحياة على الأرض، حيث يتم إطلاق طاقة هائلة من الشمس يومياً كما تعتمد تكنولوجيا الطاقة الشمسية على تحويل الضوء الشمسي المباشر إلى طاقة كهربائية باستخدام خلايا كهروضوئية التي تتكون بدورها من مواد نصف ناقلة، وهي المواد التي تمتلك القدرة على توصيل التيار الكهربائي بشكل فعال عند تعرضها للضوء.

تعتبر التكنولوجيا المستخدمة في صناعة الخلايا الشمسية متطورة بشكل مستمر، حيث يسعى الباحثون والمهندسون إلى تحسين كفاءة الخلايا وتقليل تكلفتها. بفضل التقدم في تكنولوجيا الخلايا الشمسية الخلايا الشمسية في مجموعة واسعة من التطبيقات في هذا الفصل سوف نقوم بعرض أبرز المفاهيم المتعلقة بالخلايا الشمسية وتكنولوجيا الطاقات المتجددة.

### 2.1. الطاقة الشمسية

الشمس هي نجم مركزي كبير بالنسبة للأرض نشط مغناطيسيا في النظام الشمسي، الطاقة الشمسية (الكهروضوئية) هو مصدر مثير للاهتمام للغاية للطاقات المتجددة، بقدر ما هو وفير وموجود في جميع أنحاء الكوكب ومجاني. قامت وكالة الطاقة الدولية (IEA) بدراسة مفادها أن مساحة قدرها 145000 كيلومتر مربع (4٪ من سطح الصحاري الأكثر جفافاً) ستكون كافية لتغطية جميع احتياجات الكوكب من الكهرباء.



الشكل (01.I) : الطاقة المنبعثة من الشمس [01]

أصبحت الطاقة الشمسية الآن المصدر الأول للطاقة المتجددة والأكثر أهمية نظراً لتكلفتها المتناقصة باستمرار وطول عمرها [1].

### 3.1. الإشعاع الشمسي

الإشعاع المنبعث هو من النوع الكهرومغناطيسي. حيث تشكل طيفا مستمرا من الأشعة فوق البنفسجية إلى الطيف المرئي إلى الأشعة تحت الحمراء. تستغرق الأشعة الشمسية 8.33 دقيقة للوصول إلى الأرض لأنها تنتشر بسرعة  $13 \times 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  والمسافة بين الأرض والشمس  $106 \times 150 \text{ km}$  [2]. من أجل استيعاب و فهم الإشعاع الشمسي نتطرق للمفاهيم التالية:

### 1.3.I. الثابت الشمسي

هو تدفق الإشعاع الشمسي الذي يصل الى سطح مساحته ( $1m^2$ ) مثبت في نهاية الغلاف الجوي ويكون في اتجاه عمودي على أشعة الشمس حيث تقدر قيمته المتوسطة  $I_0 = 1.336 Kw/m^2$  [3].

تعطى علاقة التصحيح للثابت الشمسي بالعلاقة (1. I)

$$I = I_0 \left[ 1 + 0.33 \left[ (N_j - 2) \frac{360}{365} \right] \right] \quad (1. I)$$

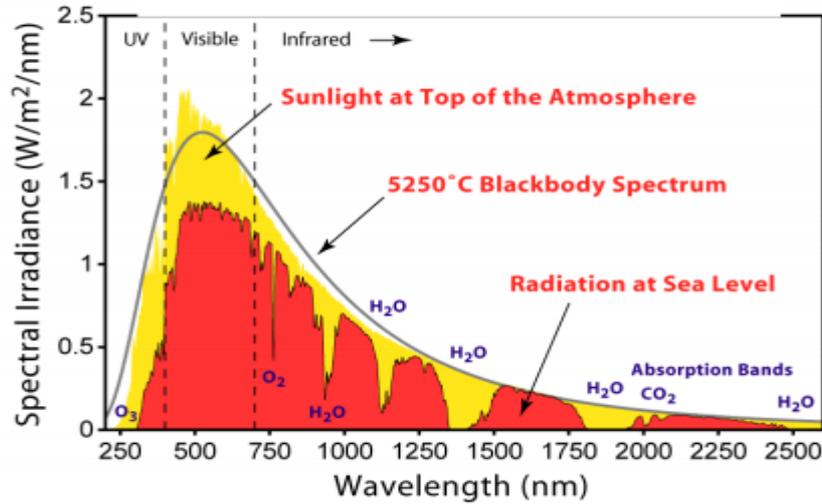
حيث  $N_j$  تمثل رقم اليوم من السنة الشمسية  $N_j = 1, 2, 3, \dots, 365$  [3].

### 2.3.I. طيف الإشعاع الشمسي :

يمكن أن نقسم الطيف الشمسي إلى ثلاثة أقسام هي:

#### ❖ الموجات الحرارية :

تُعتبر الأشعة تحت الحمراء أشعة غير مرئية ضمن الطيف الكهرومغناطيسي، وتعتبر جزءًا من مجموعة الموجات ذات المدى الطويل. تُقدر نسبة الأشعة تحت الحمراء بنحو 49% من إجمالي الإشعاع الشمسي [4]. يُساهم الجزء الأكبر من هذه الأشعة في رفع درجة حرارة الغلاف الجوي وسطح الأرض، ولذلك لها تأثير كبير في الدراسات المناخية. ويُساهم بخار الماء في امتصاص نسبة كبيرة من هذه الأشعة عند طول موجي معين كما هو موضح في الشكل (2. I).



الشكل (2. I) : طيف الإشعاع الشمسي الواصل للكرة الأرضية [2]

#### ❖ الضوء المرئي:

وهي أشعة مرئية تقدر نسبتها بنحو (43%) من مجموع الإشعاع الشمسي، ويكون من ضمنها الأشعة الحمراء والزرقاء والخضراء وتعتمد النباتات على هذه الأشعة في عملية التركيب الضوئي [5].

#### ❖ الأشعة فوق البنفسجية:

وتضم نحو (7%) من مجموع أشعة الشمس وتكون هذه الأشعة ذات طول موجي قصير وتصبح مفيدة للإنسان إذا وصلت له بكميات قليلة، إذ تساعد الإنسان على العلاج من بعض الأمراض ومثل الكساح، وذلك لقدرتها على إنتاج

فيتامين (D)، وان وصولها للأرض يكون بنسبة قليلة جدا، وذلك لأنها تمتص من قبل غاز الأوزون الذي يكون ارتفاعه عن الأرض نحو (35 km). أما بقية الإشعاع الشمسي يقدر بنحو (1%) فيكون بشكل أشعة سينية واما موجات راديوية[6].

#### 4.3.I. أهم العمليات لطيف الإشعاع الشمسي:

تأثيرات الغلاف الجوي يتعرض الإشعاع الشمسي عند انتقاله عبر الغلاف الجوي لعدة عمليات بسبب ما هو موجود من مكونات في الغلاف، ومن أهم تلك العمليات هي:

##### ❖ الامتصاص:

يمتص الأوكسجين بعض من أشعة الشمس في أعلى طبقات الجو ويمتص جانبا من الأشعة الفرق البنفسجية، وكذلك الأوزون يمتص أيضا وبكميات كبيرة جانبا من الأشعة فوق البنفسجية، أما طبقات الهواء السطحية فتقل فيها الأشعة فوق البنفسجية بصورة نسبية، وذلك لان اغلبها يمتص في أعلى طبقات الجو فلا يصح للأوكسجين أو الأوزون عمل في الامتصاص، وإنما بخار الماء الذي يقوم بهذا العمل والذي يكثر تواجده في أسفل طبقات الجو، وكذلك تقوم المواد العالقة في الجو (الغبار) وبعض غازات الجو بالامتصاص [7].

##### ❖ استطارة الأشعة :

ويترتب على تشتت الأشعة في عند مرورها في الغلاف الجوي انتشارها في جميع الاتجاهات وتقوم جزيئات الهواء وذرات الغبار بخار الماء وغيرها من الشوائب التي تكون عالقة في الغلاف الجوي بعملية الانتشار، وهناك نوعان من الاستطارة (استطارة رايلي وماي) ان استطارة رايلي هي تبعثر مرن للضوء أو أي أشعة كهرومغناطيسية أخرى تتبعثر نتيجة تأثير جسيمات أصغر من الطول الموجي للضوء ، يمكن أن تكون هذه الجسيمات إما ذرات مستقلة أو جزيئات، يمكن أن يحدث هذا التبعثر عند انتقال الضوء في وسط شفاف صلب أو سائل، لكن أغلب حالاته يحدث في الغازات [8].

##### ❖ انكسار الأشعة:

عند انتقال الشعاع من وسط إلى آخر يختلف عنه في معامل الانكسار فإنه ينحرف عن اتجاهه المستقيم، وتكون قطرات الماء الموجودة في الجو والسحب وغيرها من الشوائب عاملا كبيرا في انحراف جزء من الإشعاع الشمسي ولكن السحب تبقى هي العامل الرئيس [9].

#### 5.3.I. أنواع الإشعاع الشمسي: [10]

يصل الي سطح الأرض ثلاث أنواع من الإشعاعات والتي تمثل % 50 من الاشعة الشمسية:

##### ❖ الإشعاع الشمسي المباشر:

وهو الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض بدون تعرضه للتبعثر أو الانعكاس عند عبوره الغلاف الجوي.

##### ❖ الإشعاع الشمسي المنتشر المبعثر:

وهو ذلك الجزء من الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض بعد تعرضه لعدة عمليات منها البعثرة بواسطة الدقائق العالقة في الجو والامتصاص بواسطة بخار الماء وبعض الغازات والانعكاسات الناتجة بسبب الغيوم والعوالق الأخرى في طبقات الجو.

❖ الإشعاع الشمسي المنعكس:

يقصد به مقدار الاشعة التي تعكسها الأرض الى الفضاء مرة ثانية من غير ان يتحول أي جزء منها إلى طاقة حرارية تظل في جو الأرض، فمن المعلوم ان لسطح الأرض نفس القابلية على رد اشعة الشمس مرة ثانية فهو يعكس 2 % فقط .

6.3.I العوامل المؤثرة في توزيع الاشعاع الشمسي:

العوامل التي تؤثر في توزيع الاشعاع الشمسي والتي تؤثر بشكل كبير في قوة الاشعاع الشمسي من مدة لأخرى

وهي تتمثل في: [11]

❖ زاوية سقوط :

تؤثر هذه الزاوية في مقدار الاشعة الشمسية الواصلة لسطح الكرة الارضية، وذلك لان الاشعة الشمسية ذات السقوط العمودي او شبه العمودي عند وصولها للأرض تكون قوية وذات شدة وتركيزا عالي جدا، ولكونه هذه الاشعة مسافات التي تقطعها اقصر من الاشعة ذات السقوط المائل، لذلك تكون اقل تعرض للخسارة بفعل تأثير كل من الانكسار والانتشار والامتصاص التي تحدث في الغلاف الخارجي، وكما ان حزم الاشعة العمودية تكون متوزعة على مساحة قليلة، بينما الاشعة ذات السقوط المائل فأنها متوزعة على مساحة اوسع لذلك تصبح ضعيفة الاثر وقل شدة من الاشعة الشمسية العمودية.

❖ اختلاف فترة النهار:

إن اختلاف فترة النهار لها دور كبير في عدم تعادل كمية اشعة الشمس الواصلة الى سطح الكرة الارضية عند دوائر العرض المختلفة، فأنه لا يختلف فترة النهار والليل للمناطق المدارية طوال السنة تقريبا، اما المناطق الباردة والمعتدلة، فأن النهار فيها يزيد طوله في الصيف ويصبح أقصر في الشتاء، وكلما ازداد الفرق بين النهار والليل زادت دوائر العرض بينهما.

❖ شفافية الغلاف الغازي:

يمثل كل من الغبار والسحب وبخار الماء والرماد دورا كبيرا في عملية امتصاص وتشتت الاشعة في الجو، وعلى ذلك فان المناطق التي يكثر فيها والهواء الملوث بالأتربة والسحب تستلم كميات قليلة من الاشعاع الشمسي مقارنة بالمناطق ذات الجو الشفاف.

❖ التضاريس:

تؤدي التضاريس دورا كبيرا في تباين كميات الاشعاع الشمس الواصلة من منطقة الى منطقة اخرى فاتجاه السفوح الجبلية وانحدارها يؤثر بشكل كبير في كميات الاشعاع الشمسي التي تصل الى تلك السفوح وخاصة في المناطق المعتدلة والباردة، حيث تصله اشعة الشمس بشكل مائل، اما المناطق المدارية ويكون فيها هذا العامل محدودا حيث يكون وصول اشعة الشمس اليها بشكل عمودي او شبه عمودي طوال السنة.

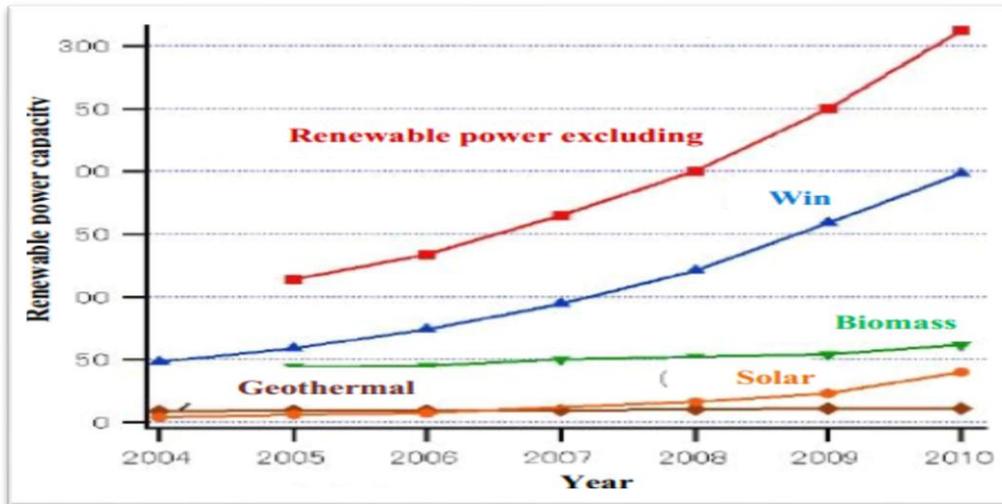
❖ الالبيدو:

وهو نسبة ما يعكس من قبل سطح الارض الى الفضاء بصورة مباشرة من الاشعاع الشمسي الصافي الواصل اليه، وتختلف نسبة الالبيدو من مكان الى مكان اخر تبعا لموقع المنطقة من دوائر العرض واختلاف طبيعة السطح من حيث التركيب واللون ووجود النبات ونوعها أو عدم وجودها وتغطية المنطقة بالثلوج وطول مدة بقائها.

**4.I. تطبيقات الطاقة الشمسية :**

تتمتع الطاقة الشمسية بتنوع تطبيقاتها، وتستخدم في مجموعة واسعة من المجالات والصناعات. و من أهم تطبيقات الطاقة الشمسية:

- توليد الكهرباء المنزلية: يمكن تثبيت أنظمة الطاقة الشمسية على أسطح المنازل لتوليد الكهرباء اللازمة للاستخدام المنزلي. تساهم هذه الأنظمة في تقليل فواتير الكهرباء وتوفير الطاقة.
- توليد الكهرباء التجارية والصناعية: يتم استخدام الأنظمة الكبيرة للطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء في المباني التجارية والمصانع. يمكن استغلال المساحات الكبيرة مثل أسطح المباني والحقول الشمسية لتثبيت أنظمة الطاقة الشمسية.
- إنارة الشوارع والمناطق النائية: تستخدم أنظمة إنارة الشوارع الشمسية لتوفير إضاءة فعالة ومستدامة في الشوارع والمناطق النائية التي لا تتوفر فيها شبكة كهربائية مركزية. تعمل هذه الأنظمة على تخزين الطاقة الشمسية في بطاريات لتوفير الإضاءة خلال الليل.
- تحلية المياه: يمكن استخدام الطاقة الشمسية لتشغيل أنظمة تحلية المياه وتحويل المياه المالحة أو الملوثة إلى مياه صالحة للشرب أو للاستخدام الزراعي.
- الاستخدامات الزراعية: يمكن استخدام الطاقة الشمسية في تشغيل أنظمة الري وتسخين المياه في الزراعة، مما يساهم في زيادة كفاءة الإنتاج الزراعي وتوفير الموارد المائية.

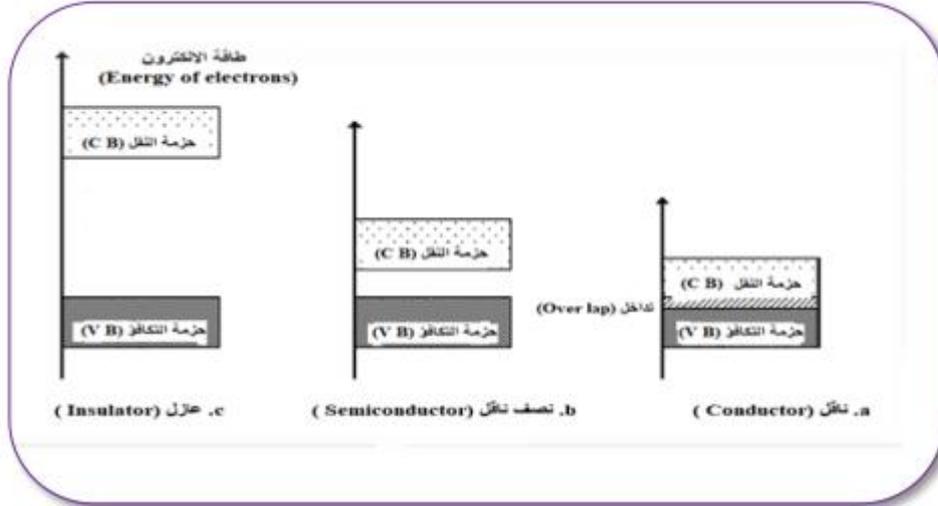


الشكل (I. 3): تطور استخدام الطاقات المتجددة عالميا على مدار الاعوام السابقة [24]

### 5.I. أنصاف النواقل:

#### 1.5.I. تعريف أنصاف النواقل:

أنصاف النواقل مادة تقع بين المواد الناقلة والعازلة، ان أنصاف النواقل في الحالة النقية (الجوهريية) ليست ناقل جيد ولا عازل جيد، والعناصر الفريدة الأكثر استخداما هي السيلكون والجرمانيوم والكربون [11.12]، أنصاف النواقل هي عناصر مفردة وتتميز بالذرات أربع إلكترونات تكافؤ [11.12]، في أنصاف النواقل تختلف المقاومة في الاتجاه يكون معكوس درجة الحرارة بشكل عام بين  $10^{-3} \Omega \cdot cm$  و  $10^8 \Omega \cdot cm$  [13] يوجد في أنصاف النواقل فجوة صغيرة إلى حد ما، مما يسمح بمرور الناقلات نطاق التوصيل ببساطة من خلال طاقة التحريك الحراري [14]. تحظى المواد النصف ناقلة في الوقت الراهن بأهمية بالغة وذلك لاستخدامها في تصنيع معظم الأجهزة الإلكترونية الحديثة. هناك عدة طرق لتحديد أنصاف النواقل، فتاريخيا تم استخدام مصطلح أنصاف النواقل للدلالة على المواد ذات الناقلية أعلى بكثير من العوازل، ولكنها أقل بكثير من المعادن مقاسه في درجة حرارة الغرفة هذا التعريف غير كامل، ما يميز حقا المعادن من أنصاف النواقل هو ارتباط الناقلية بدرجة الحرارة، في حين أن المعادن تحتفظ بناقليتها حتى في درجات بينما تتحول أنصاف النواقل إلى عوازل في درجات الحرارة المنخفضة جدا ويرتبط هذا التصنيف ارتباطا مباشرا بوجود فجوة بين الحالات المشغولة والخالية، أي فجوة الطاقة في أنصاف النواقل والعوازل [14].



الشكل 4: يوضح الفجوة الطاقية الممنوعة [18]

### 2.5.I. أنواع أنصاف النواقل:

#### 1.2.5.I. أنصاف النواقل النقية:

وهي عناصر المجموعة الرابعة (IV) من الجدول الدوري، من أهمها السيلكون والجرمانيوم، وتعرف على أنها أنصاف نواقل ذاتية وخالية من الشوائب وكذلك خالية من العيوب البلورية [16] حيث تكون فيها حزمة التكافؤ مملوءة كليا بالإلكترونات بينما تكون حزمة النقل فارغة كليا منها وذلك عند درجة الحرارة الصفر المطلق ،  $0^{\circ}K$  ولهذا تعد المواد النصف ناقلة عازلة عند هذه الدرجة [15] ، وعند رفع درجة حرارة هذه المواد فإن بعض إلكترونات حزمة التكافؤ تكتسب طاقة تنتقل بها إلى حزمة النقل مخترفة بذلك فجوة الطاقة الممنوعة تاركة ورائها فجوات مساوية إلى عدد الإلكترونات

المغادرة [15]، يقع مستوى فيرمي لهذا النوع من أنصاف النواقل في منتصف فجوة الطاقة الممنوعة عند درجة الحرارة الصفر المطلق كما هو موضح في المعادلة التالية [17] .

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (2.1)$$

حيث:

$E_f$  طاقة مستوى فيرمي :  $E_c$  , طاقة مستوى النقل و :  $E_v$  طاقة مستوى التكافؤ

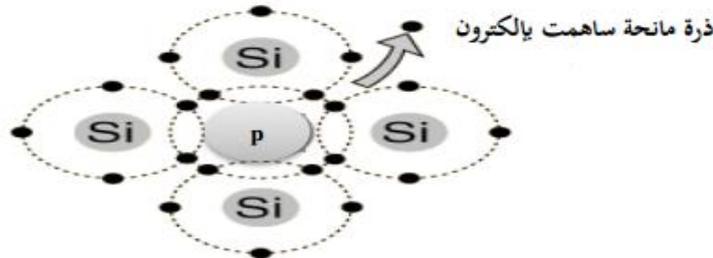
ويجدر الإشارة هنا أن مستوى فيرمي في فيزياء المواد المكثفة يمثل أعلى مستوى طاقة يشغلها الإلكترون عند درجة الصفر المطلق (أي درجة حرارة صفر كلفن)، أي استحالة وجود إلكترون فوق مستوى فيرمي ، لكن ارتفاع درجة الحرارة يعود بطاقة حرارية للإلكترون تساعد على تجاوز خط فيرمي وكلما زادت الحرارة زادت الإلكترونات المتخفية لخط فيرمي.

### 2.2.5.I. أنصاف النواقل المطعمة (المشوبة) :

وهي أنصاف نواقل لا ذاتية، حيث تنتج عند إضافة شوائب إلى المادة النصف الناقلة النقية وبنسب قليلة ومحدودة عن طريق عملية التطعيم قصد تعديل بعض خواصها الكهربائي [12] إذ تعمل هذه الشوائب على خلق مستويات طاقة موضعية جديدة في الفجوة الممنوعة لنصف الناقل النقي [18] هذه العملية تؤدي إلى زيادة نوع واحد من حاملات الشحنة" إلكترون ثقوب"، وذلك حسب نوع الشائبة [19] تنتج عن عملية التطعيم ظهور نوعين من أنصاف النواقل المطعمة.

#### ❖ أشباه الموصلات من النوع السالب N:

يمكن الحصول على أشباه الموصلات السالبة (Type n) من تطعيم السليكون (السليسيوم) بشوائب من الفوسفور أو الزرنيخ، فالسليكون يحتوي مداره الخارجي على أربعة إلكترونات بينما تحتوي المدار الخارجي لكل من الفوسفور والزرنيخ على خمسة إلكترونات وعند مزج كمية قليلة من الفوسفور أو الزرنيخ مع السليكون فإن أربعة منه ترتبط بذرة السليكون بينما الخامس حرا (غير مرتبط) لذلك تدعى بالنوع السالب [17] إن هذا النوع من الشوائب ذات التكافؤ الخماسي تدعى بالمانح أو المعطي بسبب تواجد إلكترون حر وشبه موصل من النوع n وذلك لأن الإلكترونات الحرة ذات الشحنة السالبة هي أكثر من الفجوات لذا تطلق عليه اسم حاملات الأغلبية بينما تطلق على الفجوات اسم حاملات الأقلية [21-22].



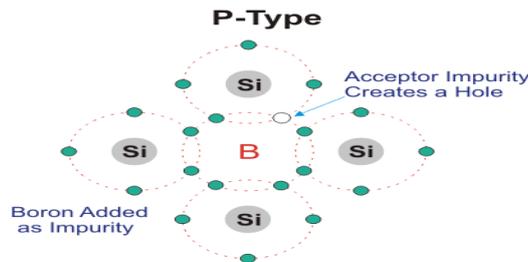
الشكل I. 5: تطعيم ذرة السليكون من نوع n [22]

#### ❖ أشباه الموصلات من النوع الموجب P:

يمكن الحصول على هذا النوع (p) من أشباه الموصلات وذلك بمزج السليكون بكميات قليلة من البورون أو الجاليوم، وهذان العنصران يحتوي المدار الخارجي لكل منهما على ثلاث إلكترونات (إلكترونات التكافؤ) ، ولذلك فإنه عند إحلال

ذرة أي منهما محل ذرة السليكون فإنه تتكون ما يشبه الثقوب الموجبة في بلورة السليكون نتيجة ارتباط الإلكترونات الثلاثة وبقاء الرابعة مكسورة دون أن ترتبط بأي من الإلكترونات التكافؤ [20].

وتعتمد التوصيل الكهربائي في مثل هذا النوع على الفجوات الموجبة وتسمى هذا النوع من الشوائب بالشوائب المتقبلة لأنها تتقبل الإلكترونات من ذرات البلورة النقية لكي تملأ الفجوات الناتجة عن الترابط التساهمي، وشبه الموصل المنشط في هذه الحالة تسمى بشبه الموصل من النوع (p) لأن الفجوات الموجبة هي حاملات الأغلبية [21-22].

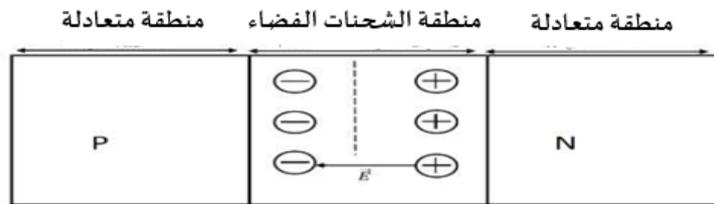


الشكل I. 6: تطعيم ذرة السليكون من نوع p [22]

### 3.5.I. الوصلة الثنائية PN:

هي عبارة عن مركب الكتروني يصنع من اثنين من أشباه الموصلات المطعمة بنوع مختلف أحدهما خضع لعملية الاشابة الإيجابية من نوع P والأخر خضع للأشابة السلبية مع النوع N.

عملياً يعرف بصمام ثنائي القطب وهو مكون يسمح فقط للتيار للمرور في الاتجاه واحد ويعيقه في الاتجاه المعاكس [23].



بنية وصلة P-N

الشكل I. 7 : الوصلة P-N [23]

تصنع الوصلة PN من المواد نصف ناقلة وهي عبارة عن مركب الكتروني وتتكون من طبقتين رقيقتين، ماذا يحدث عندما تتلامس منطقة واحدة من نوع N ومنطقة واحدة من نوع P ؟ يحدث هجرة حاملات الشحنة الموجبة والسالبة هنا بسبب اختلافات في التركيز، ينتشر ناقلات الأغلبية من جانب إلى آخر نتيجة لارتفاع تركيز الثقوب في المنطقة P وانخفاضه في المنطقة N حيث تبدأ الثقوب بالانتقال من المنطقة P إلى المنطقة N بنفس الطريقة، يكون تركيز الإلكترونات الحرة أعلى في المنطقة N وأقل في المنطقة P وبالتالي، تنتشر الإلكترونات الحرة من المنطقة N إلى المنطقة P، هذه العملية الأولية ستؤدي إلى تكوين تيار الانتشار بسبب انتقال الثقوب من المنطقة P إلى المنطقة N، وذلك بشكل خاص عندما يدخلون المنطقة N من ناحية أخرى، يحدث أيضًا انتقال الإلكترونات من المنطقة N إلى المنطقة P في لحظة دخولها المنطقة P.

### 6.I. مفعول الكهروضوئي :

- إن مبدأ عمل الخلية الكهروضوئية التي لها إمكانية تحويل الطاقة الكهرو مغناطيسية من الشمس مباشرة إلى كهرباء تعتمد على استغلال الوصلة الثنائية (p-n) [24] و لكي تتم هذا التحويل يجب أن تتحقق 3 آليات أساسية وهي:
- امتصاص الفوتونات (يجب أن تكون طاقة الفوتونات أكبر من طاقة الفجوة) من طرف المادة المكونة للخلية.
  - تحويل طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية و هذا متعلق بخلق زوج (إلكترون- ثقب) في المادة النصف ناقلة.
  - جمع الجسيمات المتولدة في الجهاز [25]

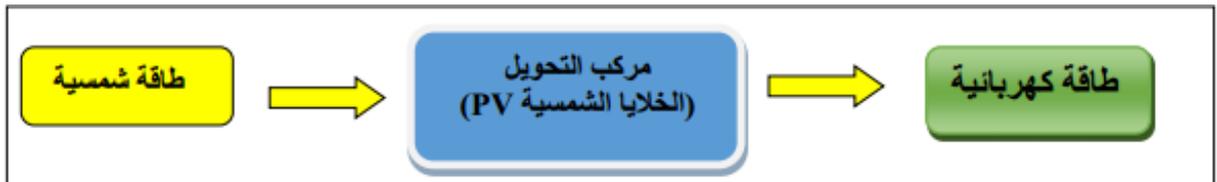
ف عند سقوط فوتونات (photons) الإشعاع الشمسي على منطقة التماس (junction p-n) ستنقل تلك الفوتونات طاقتها إلى بعض الإلكترونات في المادة مسببة رفعها إلى مستوى طاقة أعلى، ومنه فإن الإلكترونات تكون حرة لتوليد تيار كهربائي يمر خلال المادة، وعندما تتحرك الإلكترونات تترك وراءها ثقوباً (trous) تتحرك في المادة أيضاً، فعند منطقة الارتباط (junction p-n) فإن بعض الإلكترونات المجاورة لها تنجذب من جهة n لتتحد مع الثقوب في جهة p ، و بنفس الطريقة فإن الثقوب (المجاورة) الموجبة لمنطقة الارتباط تنجذب لتتحد مع الإلكترونات (السالبة) في جهة n القريبة والتأثير النهائي الناتج من هذا الحركات حول منطقة الارتباط هو وجود شحنة موجبة أكثر من السابق على جهة n و وجود شحنة سالبة أكثر من السابق على الجهة p وهذا تفسر وجود مجال كهربائي معاكس حول منطقة الارتباط يكون موجبا حول جهة n وسالبا حول جهة p والمنطقة التي تقع حول منطقة الارتباط ستكون مفرغة من الشحنات (الإلكترونات والثقوب) وتسمى بذلك منطقة التفريغ أو الاستنزاف وعندما تهيج الإلكترونات في منطقة الاتصال بواسطة فوتونات الإشعاع الشمسي ستقفز إلى منطقة التوصيل BC تاركة وراءها ثقوباً في منطقة التكافؤ BV وبذلك ستولد حوامل من الشحنة المزدوجة (زوج من إلكترون- ثقب)، وتحت تأثير المجال الكهربائي المعاكس ستتحرك الإلكترونات إلى جهة n وتتحرك الثقوب إلى جهة p.

إن سريان هذا الشحنات هو ما تسمى بالتيار الكهربائي، فإذا كان هنالك دائرة خارجية لمرور التيار فيها فإن الإلكترونات المتحركة تترك شبه الموصل إلى أحد الأسلاك الخارجية في أعلى الخلية وفي نفس الوقت تتجه الثقوب إلى اتجاه المعاكس خلال المادة إلى أن تصل إلى السلك الخارجي في قاع الخلية، وعندها ستمتلئ بواسطة الإلكترونات القادمة من نصف الدارة الخارجية الأخر، ولكي تتولد قوة كهربائية من الضروري وجود فولتية وتيار، يتولد التيار بواسطة حركة الإلكترونات أما الفولتية تتولد بواسطة تأثير المجال الكهربائي الداخلي حول منطقة الاتصال (p-n) [26; 27].

### 7.I. الخلايا الشمسية

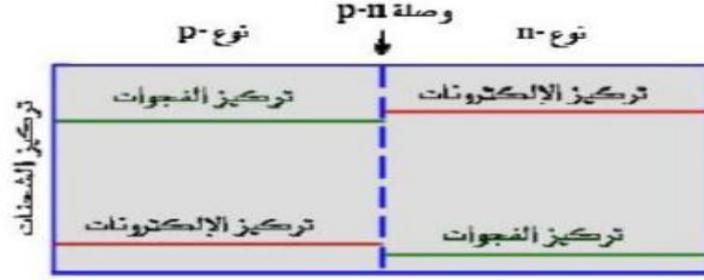
#### 1.7.I. تعريف الخلايا الشمسية :

تُعد الخلية الشمسية الكهروضوئية جهازاً يقوم بتحويل الطاقة الكهرومغناطيسية المستقبلية مباشرة من الشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية مستمرة قابلة للاستخدام المباشر، كما موضح في الشكل .



الشكل I. 8 : الخلايا الشمسية الكهروضوئية كجهاز لتحويل الطاقة الشمسية

تتألف الخلية الشمسية من طبقة سالبة وطبقة موجبة، وتشكل منطقة اتصال بينهما تشكلت نتيجة انتشار حاملات الشحنة من كلا الطبقتين، مما يؤدي إلى تكوين منطقة متعادلة تسمى منطقة الاستنزاف، وكما هو موضح في الشكل (I. 9).

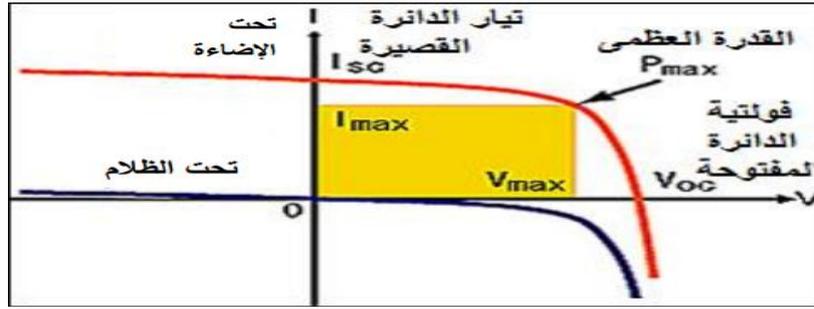


الشكل I. 9: طبقات الخلية الكهروضوئية

### 2.7.I. خصائص الخلية الشمسية :

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

الخاصية تيار-فرق كمون (J-V) للخلية الشمسية تحت الضوء أو الظلام المقدمة في الشكل (I. 10) تمثل تغير التيار الكهربائي المولد من طرف الوصلة بدلالة فرق الكمون بين طرفيها.



الشكل I. 10: منحنى تغير التيار- بدلالة فرق الكمون للخلية الشمسية [28]

#### ❖ تيار الدارة المقصورة $I_{cc}$ :

تتوافق قيمة تيار الدارة المقصورة  $I_{cc}$  مع شدة تيار الدارة المقصورة، ويتم رمزه بالرمز  $I_{cc}$ ، وهذا يعني أنه عندما يكون الجهد  $V = 0$ ، يكون تيار الدارة المقصورة  $I_{cc}$  للخلية الشمسية المثالية يساوي تيار الإضاءة الكهروضوئية  $I_{ph}$  وقيمة تيار الدارة المقصورة يمكن الحصول عليها عن طريق توصيل الخلية الشمسية بجهاز قياس التيار بالأمبير متر وتعتمد قيمة تيار الدارة المقصورة على الطاقة المشعة المستقبلية في درجة الحرارة المحيطة، وسرعة دوران الهواء المحيط، وسطح الخلية، نحصل على قيمت عن طريق توصيل الخلية الشمسية بالأمبير متر [29].

$$I_{cc} = I_{ph}$$

حيث  $I_{ph}$ : تيار فتوني

#### ❖ فرق كمون الدارة المفتوحة $V_{oc}$ :

يتم التعبير عن جهد الدارة المفتوحة  $V_{oc}$  بواسطة المعادلة عندما يكون التيار الذي يمر عبر الخلية المثالية يساوي الصفر، يتم التعبير عن جهد الدارة المفتوحة حسب المعادلة [29].

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{cc}} + 1 \right) \quad (3.1)$$

حيث:

KB : ثابت بولتزمان. q : شحنة الإلكترون  $1.6 \times 10^{-19} c$

#### ❖ استطاعة الخلية P:

في ظروف تشغيل ثابتة للخلية الشمسية، مثل الإضاءة، درجة الحرارة، سرعة دوران هواء المحيط، وما إلى ذلك، يتساوى الطاقة الكهربائية التي تُنتجها الخلية الكهروضوئية الشمسية تحت الإضاءة مع حاصل ضرب شدة التيار والجهد، علاقتها تعطى كالتالي [29]:

$$P = I \times V \quad (4.1)$$

حيث:

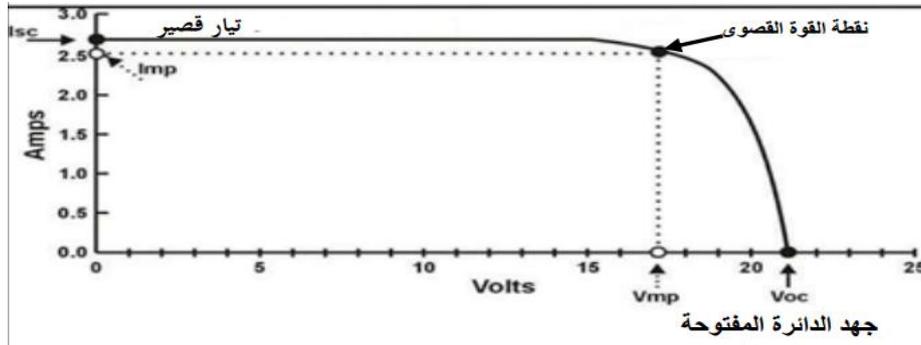
P: يتم قياس الطاقة عبر الخلية الكهروضوئية بالواط W.  
V: قياس الجهد عبر الخلية الكهروضوئية بالفولت V.  
I: قياس شدة التيار عبر الخلية الكهروضوئية بالأمبير A.

#### ❖ الاستطاعة القصوى $P_{max}$ :

تتوافق الاستطاعة القصوى ( $P_{max}$ ) للخلية الشمسية مع النقطة التي ينتج عنها جداء الجهد ( $V_{mp}$ ) وكثافة التيار القصوى ( $I_{mp}$ ) بالإضافة إلى ذلك، يتوافق الاستطاعة الحد الأقصى المثالية مع ضرب جهد الدارة المفتوحة في التيار المقصر ويمكن تعبير هذا العلاقة كالتالي:

$$P_{maxid\acute{e}ale} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (5.1)$$

$P_{maxid\acute{e}ale}$ : 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.



الشكل I. 11 : منحنى I-V لخلية شمسية سيليكون مع تمثيل نقطة الاستطاعة القصوى  $P_{max}$ .

#### ❖ الاستطاعة المثالية:

هي الجداء بين جهد الدارة المفتوحة  $V_{oc}$  وتيار الدارة المقصرة  $I_{cc}$  ويعطي وفق العلاقة التالية [22]:

$$P_{idéal} = I_{cc} \times V_{oc} \quad (6.1)$$

❖ معامل الشكل FF:

يُمكن تعريف معامل الشكل بأنه النسبة بين الاستطاعة القصوى ( $P_{max}$ ) والاستطاعة المثالية، ويتم حسابه وفقاً للعلاقة التالية [22]:

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (7.1)$$

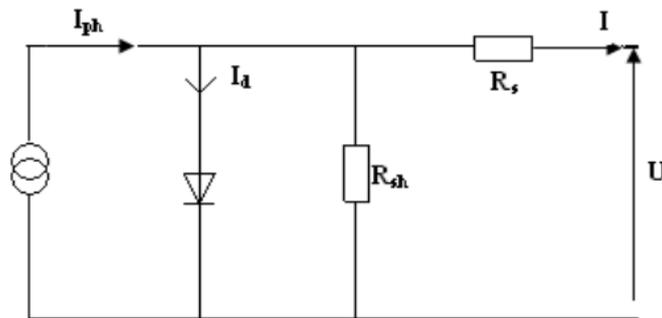
❖ مردود الخلية الشمسية  $\eta$  (قدرة التحويل):

تُعرف قدرة التحويل للخلية الشمسية ( $\eta$ ) بأنها النسبة بين الطاقة القصوى التي توفرها الخلية واستطاعة الإضاءة المسلطة على سطحها ( $P_{incident}$ )، يُمكن التعبير عن استطاعة الإضاءة بواسطة المعادلة التالية [29]:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{P_{int}} \times 100 \quad (8.1)$$

3.7.I. الدارة المكافئة للخلية الضوئية :

أبسط نموذج لتمثيل الخلية الكهروضوئية يتكون من منبع تيار متصل على التوازي مع الصمام الثنائي، كما يوضح الشكل (I. 12) نموذج الدارة المكافئة الموسع يعطي وصفاً جيداً في أغلب التطبيقات، حيث يتم إضافة تأثير المقاومة التسلسلية  $R_s$  التي تعتبر مقاومة لمرور التيار، والمقاومة التفرعية  $R_{sh}$  التي تمثل ضياع التيار في الخلية الكهروضوئية، كلما انخفضت قيمة  $R_s$  أو ازدادت قيمة  $R_{sh}$ ، زادت كفاءة الخلية الكهروضوئية، وتحقق الحالة المثالية عندما تكون  $R_s = 0$  و  $R_{sh} = \infty$  بالشكل عملي، عادةً تكون قيمة  $R_s$  للخلية الكهروضوئية في حدود بضعة ميلي أوم وتكون قيمة  $R_{sh}$  أكبر من عشرة أوم [30].



الشكل I. 12: نموذج الدارة المكافئة للخلية الشمسية [24]

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(v+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{v - R_s I}{R_{sh}} \quad (9.1)$$

حيث:

$I_{ph}$  : التيار الضوئي.

$V$  : الجهد المولد في الخلية.

$R_{Sh}$  : المقاومة التفرعية.

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

$T$  : درجة الحرارة المطلقة.

$q$ : شحنة الإلكترون.

#### 4.7.I تركيب الخلايا الكهروضوئية:

تركيب الخلايا الكهروضوئية ينقسم بشكل عام الى قسمين:

##### 1.4.7.I التركيب على التسلسل:

بالتوصيل التسلسلي للخلايا الكهروضوئية، يتغير توتر جميع الخلايا بينما يبقى التيار المتدفق عبر الخلايا هو نفسه تيار الخلية الواحدة، كما هو موضح في الشكل (I. 13) يتم الحصول على الخاصية الناتجة من التوصيل التسلسلي طريق إضافة الفولتية لكل خلية في تيار معين [31]، وبالتالي، يُمكن حساب فرق جهد الدارة المفتوحة عن طريق ضرب عدد الخلايا ( $N_S$ ) في جهد الخلية الفردي ( $V_{OC}$ )، ويتم التوصيل كالآتي:

$$V_{ocN_S} = N_S \times V_{oc} \quad (10.I)$$

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

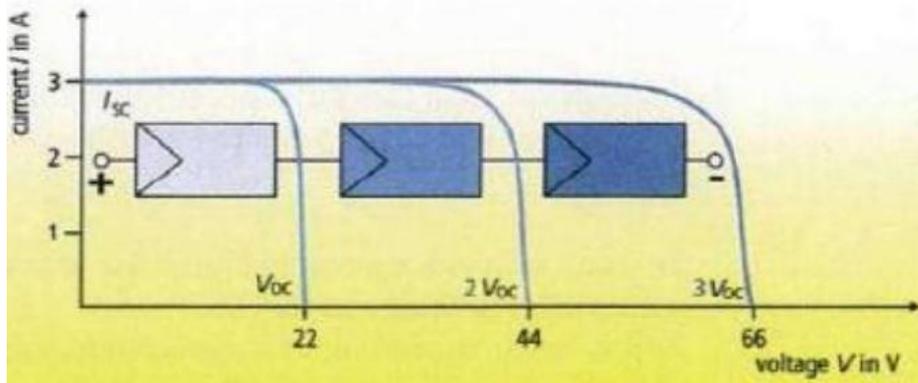
حيث:

$V_{OCNS}$  : 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 [32].



الشكل I. 13 : رسم تخطيطي يمثل ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التسلسل [31]

### 2.4.7.I. التركيب على التفرع:

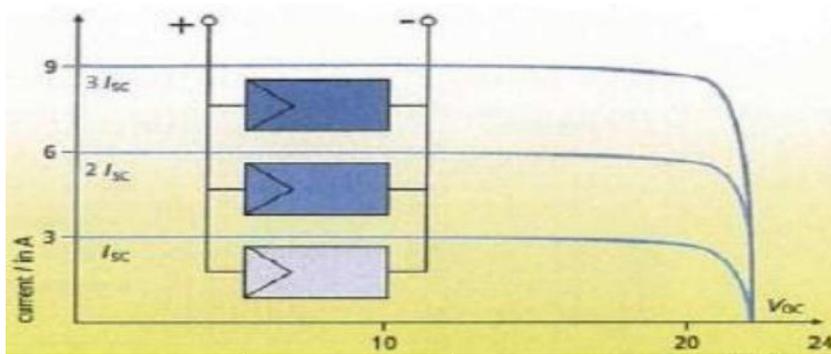
عند توصيل مجموعة من الخلايا الشمسية على التفرع، يسمح ذلك بزيادة التيار، وبالتالي يكون الجهد مساويًا لجهد الخلية الواحدة، في حين يكون التيار مساويًا لمجموع الخلايا المتصلة على التفرع، بمعنى آخر، يحدث زيادة في شدة التيار، ويكون التوصيل كالتالي: [32]

$$I_{ccNp} = Np \times I_{sc} \quad (12.I)$$

$$V_{oc} = V_{ocNp} \quad (13.I)$$

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

$Np$ : عدد الخلايا المربوطة على التفرع.



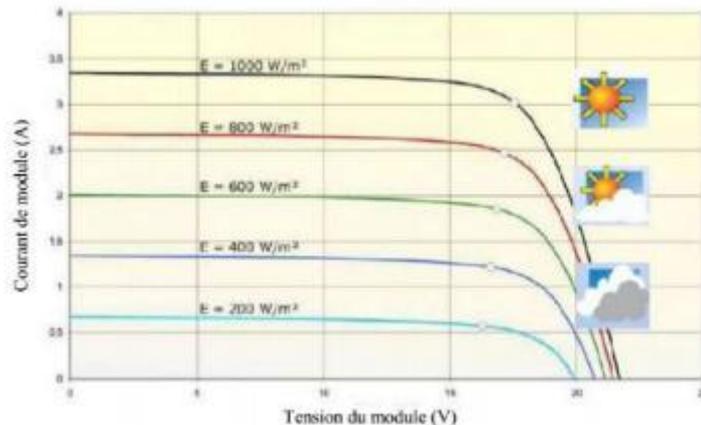
الشكل I. 14: رسم تخطيطي يمثل ربط مجموعة من الخلايا الشمسية على التفرع [31]

### 5.7.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.

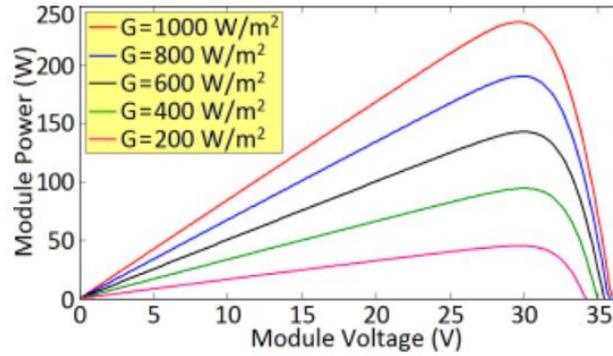
#### 1.5.7.I. تأثير الإضاءة:

تتأثر شدة التيار  $I_{cc}$  بتأثير الإضاءة، عندما يزداد سطوع الإضاءة المسلطة على الخلية الشمسية، يزداد تدفق التيار في الدائرة المغلقة  $I_{cc}$  وبالمقابل، عندما يقل سطوع الإضاءة، يقل تدفق التيار في الدائرة المغلقة أيضًا، وهذا يعني أن شدة التيار  $I_{cc}$  تتأثر بشكل مباشر بكمية الضوء المتسلط على الخلية الشمسية [35].



الشكل I. 15: خاصية خلية شمسية تحت تأثير الإضاءة [35]

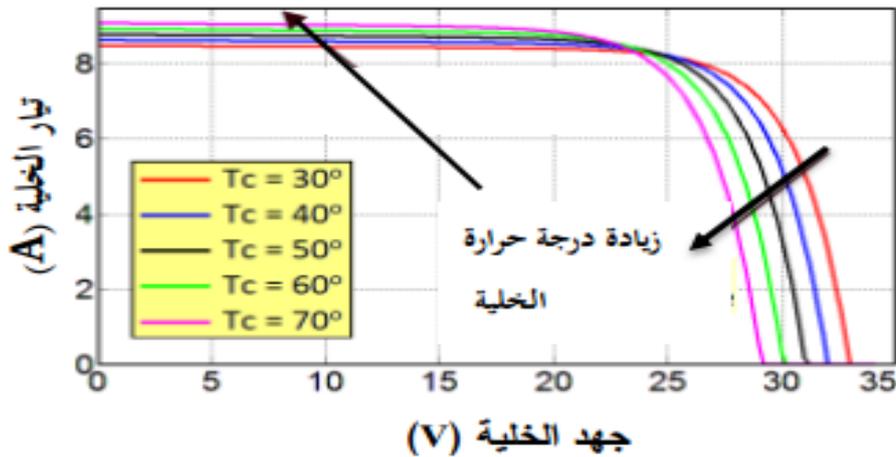
الزيادة في شدة الشعاع يؤدي إلى زيادة الاستطاعة P كما هو مبين في الشكل I. 15



الشكل I.16: تأثير شدة الإضاءة على استطاعة الخلية الشمسية [35]

### 2.5.7.I. تأثير درجة الحرارة:

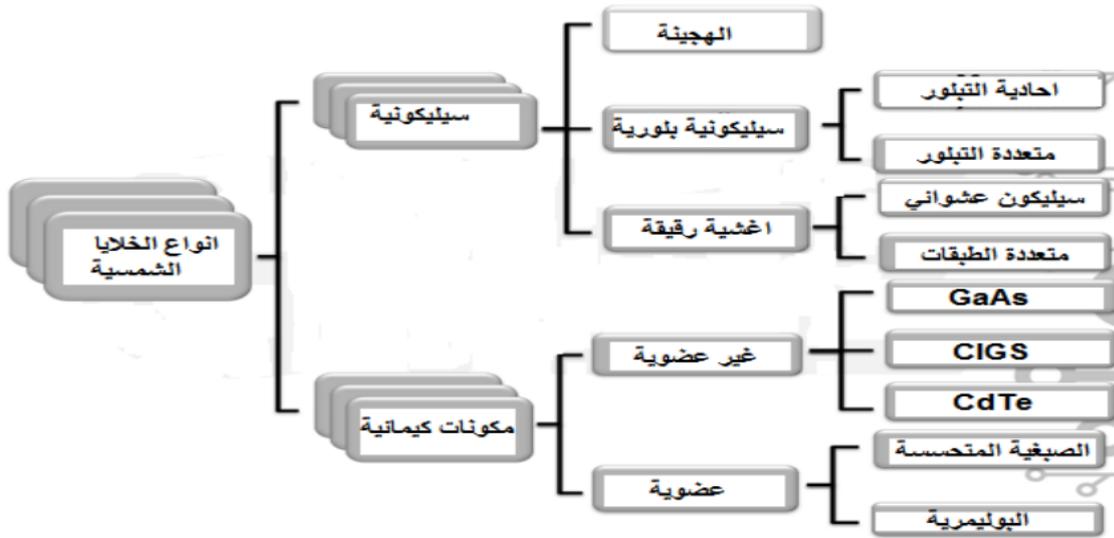
درجة الحرارة لها تأثير ملحوظ على كفاءة الخلية الشمسية حيث يتسبب التغير في درجة الحرارة في انخفاض الطاقة المنتجة وجهد الدارة المفتوحة للخلية الكهروضوئية، نلاحظ أيضا ارتفاع طفيف في تيار المقصيرة للخلية الشمسية كما هو موضح في الشكل التالي [34]:



الشكل I.17: تأثير درجة الحرارة على خصائص (I-V) لخلية شمسية

### 8.I. أنواع الخلايا الشمسية:

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



الشكل I. 18: رسم تخطيطي يمثل أنواع الخلايا الشمسية [36]

### 1.8.I. مختلف اجيال الخلايا الشمسية:

تصنف الخلايا الشمسية إلى ثلاثة أجيال بناء على ترتيب أهميتها، حيث أصبحت محل اهتمام للعديد من الدراسات والبحوث على جميع الأجيال الثلاثة لتحسين كفاءتها [36].

#### 1.1.8.I. الجيل الأول للخلايا الشمسية:

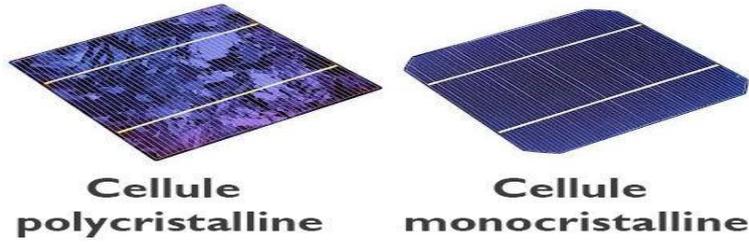
الجيل الأول من الخلايا الشمسية هي أجهزة تتكون من مجموعة وصلات ذات مساحة كبيرة وذات جودة عالية. يعتبر السيليكون من المواد الأساسية المستخدمة في صنع الخلايا من هذا الجيل ويعود السبب في ذلك الى:

- أنه مستقر وغير سام.
- متوفر بكثرة في الطبيعة.
- ثمنه المعقول.

ويشمل الجيل الأول من الخلايا الشمسية؛ الخلايا السيليكون بنوعيهما:

#### ❖ الخلايا السيليكون أحادية التبلور:

- تعتبر من أقدم الأنظمة وأكثرها تطورا حتى الآن.
- تصنع من بلورة واحدة من السيليكون النقي.
- شكلها الموحد: متجانسة المظهر الخارجي.
- تصل كفاءة هذا النوع من الخلايا من: (12% - 20%) اعلى من الخلايا المتعددة بقليل .
- تتطلب اقل مساحة مقارنة بالواح المتعددة .
- عمر طويل بضمنان لمدة 20 عاما على الالواح الشمسية.
- تكلفة اعلى بقليل.
- مرتفعة نسبيا بإنتاج الطاقة خلال المراحل الأولى من التشغيل.
- توليد الطاقة الكهربائية من ضوء الشمس ذات الاطوال الموجية القصيرة [37].



الشكل I. 19: الخلايا السيليكون متعددة البلورات [37]

- تصنع من بلورات متعددة موحدة الشكل الخارجي.
- تكنولوجيا التصنيع أكثر بساطة وبالتالي فهي أقل تكلفة.
- معامل الحرارة أقل من الخلايا احادية البلورة .
- نقاوة السيليكون أقل من الخلايا الأحادية، أي أقل كفاءة من نظيراتها الأحادية.
- يتم تصنيف كفاءتها عادة حوالي (15-18%).
- تحتاج مساحة أكبر للحصول على نفس القدرة من الواح المونو (الأحادية) .
- الفرق الرئيسي بين الخلايا الأحادية والمتعددة في: طريقة التصنيع .
- تشكل الخلايا الشمسية الجيل الأول من (86-89%) من الإنتاج التجاري في سوق الخلايا الشمسية [37].

#### 2.1.8.I. الجيل الثاني الخلايا الشمسية:

لحل هذه المشكلة من احتياجات الطاقة وتكاليف الانتاج تظهر الخلايا الشمسية جيلا ثانيا انخفاض كبير في التكاليف المواد ممكنة في هذه التكنولوجيا مع مرور الوقت من المتوقع أن يسد الجيل الثاني الفجوة بينهما وبين الجيل الأول فيما يتعلق بكفاءة تحويل الطاقة مع زيادة هيمنة هذه التكنولوجيا، فإن تكلفة المواد تزداد المكونات أيضا للغطاء العلوي والأغلفة الأخرى بل منحها عمرا أطول، المواد المستخدمة بشكل عام في تكنولوجيا الأغشية الرقيقة هي أساسا السيليكون غير المتبلور (A-Si)، وتيلوريد الكاديوم / كبريتيد الكاديوم (CdTe / CdS) والقائم على الكالكوبيرايت على النحاس [38].

#### ❖ صناعة السيليكون غير المتبلور:

تتكون هذه الخلايا من دعامة زجاجية أو مادية عليه اترسب طبقة رقيقة من السيليكون، وهي عملية تتطلب القليل جدا طاقة. على الرغم من أن غلة هذه الخلايا أقل من إنتاجية الخلايا بلوري، والذي يرجع إلى انخفاض حركة ناقلات الشحن داخل هذه المواد، تم إعادة تكوين الخلايا غير المتبلورة ذات الغلة التي تتجاوز 8% يجد هذا النوع من الخلايا تطبيقاته الرئيسية في الأجهزة الصغيرة مثل الآلات الحاسبة والساعات، إلخ [38].

❖ الاغشية الرقيقة CdS / CdTe:

بسبب خصائصه البصرية المثلى، وهذا هو، فجوة النطاق المباشر من أجل 1.5 فولت وامتصاص عالي في جميع أنحاء الطيف الشمسي، يحتوي هذا الدفق على كانت واحدة من أولى الدراسات (1960) التقاطعات الغيرية الأول يظهر CdTe CdS / SnO2 // زجاج الأغشية الرقيقة في عام 1964 والوحدة الأولى CdS / CdTe في عام 1972. على الرغم من تجاوز الغلة 15٪، هناك مشاكل وهي:

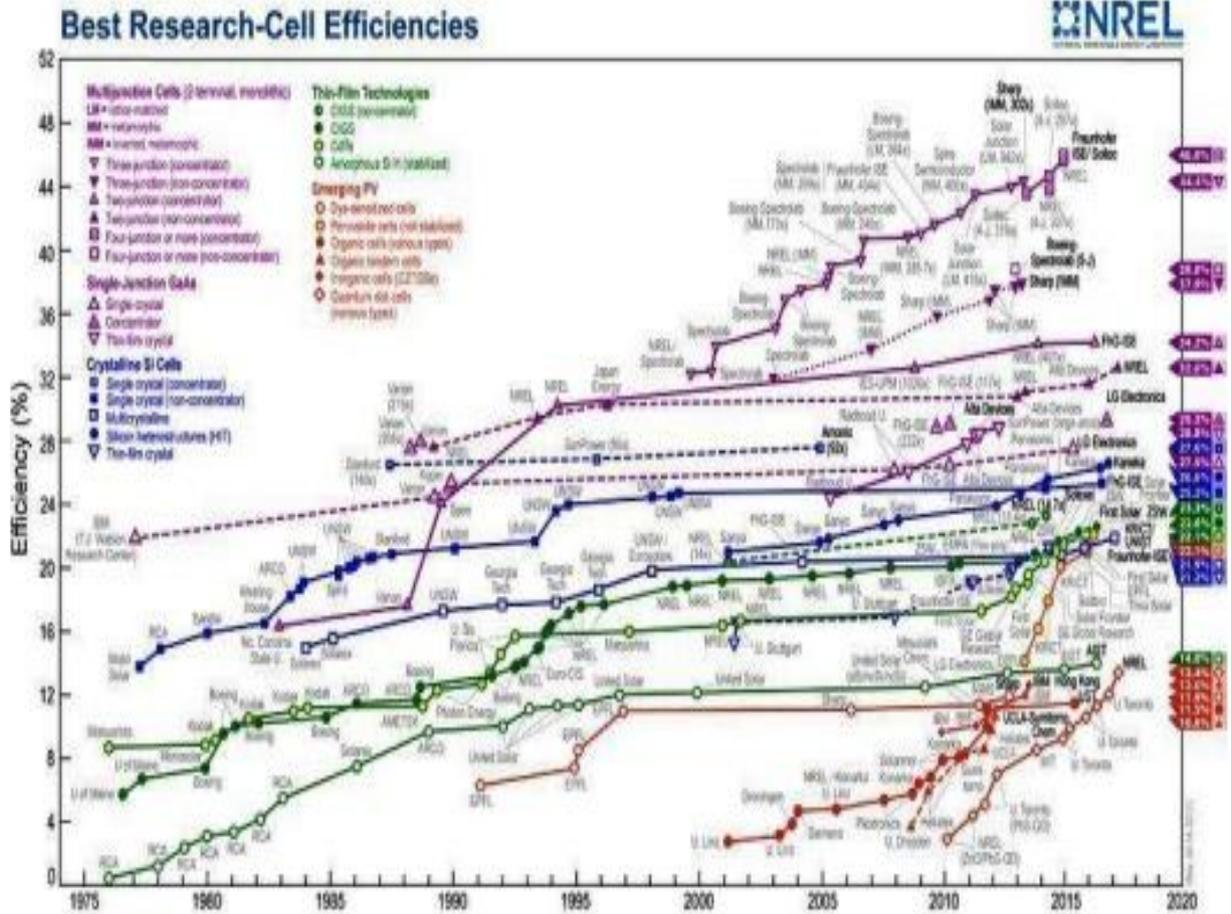
- صعوبة إجراء اتصالات كهربائية أومي مستقرة.
- تم الحصول على أفضل الغلة على الخلايا باستخدام سيليكات البورون الركيزة. الركيزة مكلفة للغاية.
- لا يبدو أن انتشار الصوديوم الزجاجي يفيد CdTe، وله تأثير سلبي على عمر حاملات الأقلية في خلايا CdTe.
- حساسية هذه الخلية لبخار الماء.
- العدوانية على البيئة، بسبب وجود الكاديوم، وهو سامة وملوثة [39].

❖ سلسلة الكالكوبيرايت على أساس Cu-III-VI2:

ظهرت الخلايا الشمسية، على أساس المواد الإنشائية تبعت الكالكوبيرايت تحقيق كاشفات CdS / CuInSe2 الكهروضوئية بواسطة S. Wagner et al. de bell phone في 1974-1975 [39].

3.1.8.I الجيل الثالث الخلايا العضوية:

لقد تم ملاحظة ظاهرة التحويل الضوئي في المواد العضوية منذ أكثر من 40 عامًا، وكانت كفاءة الخلايا الأولى منخفضة جدًا تتراوح حوالي 10<sup>-5</sup>% في عام 1978، لم يحدث ذلك إلا منذ بداية القرن الحادي والعشرين، حيث بدأت الكفاءة في الارتفاع مرة أخرى، لقد شهدت خلايا الطاقة الشمسية العضوية أعلى معدل نمو بين مختلف تقنيات الطاقة الشمسية خلال الـ 12 سنة الماضية [40].



الشكل I. 20: تطور مردود الخلايا الكهروضوئية التي تم الحصول عليها في مختبرات مختلفة. المصدر: المختبر الوطني للطاقة المتجددة (NREL)

**الخاتمة:**

في هذا الفصل الأول قمنا بتقديم نظرة عامة على الخلايا الشمسية، والتي تتضمن مفاهيم حول الإشعاع الشمسي والطاقة الشمسية وكذلك الخلايا الشمسية والتي تطرقنا من خلالها على تكنولوجيا أنصاف النواقل وخصوصا الوصلة pn مبدأ عملها الفيزيائي ودورها الهام في إنتاج وتوليد الطاقة الكهربائية بتفاعلها مع الإشعاع الشمسي في إطار التفاعل الإشعاع مادة وخصوصا بما يعرف بالمفعول الكهروضوئي الذي تطرقنا إليه أيضا في هذه الدراسة وهذا سوف يساعدنا على فهم الجزء التالي من عملنا.

## المراجع

- [1] A. Labouret, M. Viloz, " Energie solaire photovoltaïque", livre 3e édition Dunod, Paris, 2006.
- [2] ح.أولاد سالم-تقدير الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة وتأثير طرق التتبع الشمسي وزوايا التوجيه اللاقط على شدة الإشعاع-مذكرة ماستر أكاديمي-جامعة قاصدي مرياح ورقلة (2009).
- [3] C. Bernard « station solaire autonome pour l'alimentation station pompage » l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006.
- [4] 3TC. Kandilli and K. Ulgen, "Solar Illumination and Estimating Daylight Availability of Global Solar Irradiance", *Energy Sources*, **23**(9), 24-33 (2009).
- [5] 11TR. Willson and A. Mordvinov, "Secular total solar irradiance trend during solar cycles", *Geophys. Res. Lett.*, **30**(5), 21-23 (2003).
- [6] M. J. O'Neill , A . J. McDaniel , P. J. George , M . F. Piszczor , D. L. Edwards, D. T. Hoppe, M. L. Eskenazi, M. M. Botke, P. A. Jaster, H. W. Brandhorst, " Development of The Ultra-Light Stretched Lens Array" , 29PthP IEEE PVSC , New Orleans,( 2002).
- [7] B. Galiana, C. Algora, I. Stolle and G. Vara, "A 3-D model for concentrator solar cells based on distributed circuit units" *IEEE*. **52**, 2552-2558(2005).
- [8] R. Stevens and N. Davies, "Lens Arrays and Photography", *the Journal of Photographic Science*. **39**, 199-208 (1991).
- [9] B. Besold and N. Lindlein, "Fractional Talbot effect for periodic microlens array", *Opt. Eng.* **36**(4) 1099-1105 (1997).
- [10] C.Randilli and K.ulgen "Solar illumination and Estimattng daylight".
- [11] ف.ك. تقلا، "مقدمة في فيزياء أشباه الموصلات"، ديوان المطبوعات الجامعية، الأردن، ص. 8، 14 (1992).
- [12] م. قعقع، "الإلكترونيات الأساسية"، جامعة دمشق، دمشق، ص. 201.
- [13] S. S. AL-RAWI, S. J. SHAKIR and Y. N. HUSAN, "Solid state physics", publishing of Mousal University Arabic Version, Mousal, (1990).
- [14] H. T. GRAHN, "Introduction to semiconductor physics", World scietific publishing, London, P.1-10, (2001).

- [15] B. G. STREETMAN and S. BANERJEE, "Solid state electronic devices",  
Prentice hall, New Jersey, (2000).
- [16] م. ج. يوسف، "فيزياء الحالة الصلبة"، مطبعة جامعة بغداد، بغداد (1989).
- [17] م. م. شاكر و م. ش. مجيد، "أساسيات الإلكترونيات"، المعهد الفني، الموصل (1978).
- [18] P. S. KIREEV, "Semiconductor physics", Publishers Moscow, Moscow,  
P.16-331, (1978).
- [19] A. G. NILENS, "Deep impurity in Semiconductor", Wiley inter science  
publication, New Jersey, (1973).
- [20] ناصر بن عبد الله الرشيد، الترانزستور، مجلة العلوم والتقنية "كيف تعمل الأشياء"، العدد السادس والستون،  
1424(هـ).
- [21] نجيب صالح نصر، علي مصباح أشطبية، فوزي محمد عون، تجارب معملية في مبادئ الهندسة الكهربائية  
والإلكترونية، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، (2).
- [22] فوزي غالب عوض، خضر محمد عبد الرحمن الشيباني، عادل مجذوب علي حسيب، تطبيقات  
فيزياء الجوامد، الطبعة الأولى جامعة الملك سعود، (1992).
- [23] عاهد علي الخطيب، مبادئ تحويل الطاقة، دار الشروق للنشر والتوزيع، الطبعة الأولى، (1989).
- [24] محمد فيصل سعيد، نحو استخدام أمثل للطاقة الشمسية في اليمن، مؤسسة قرار الإعلام والتنمية المستدامة،  
(2014).
- [25] Nichiporuk Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à  
contacts arrières interdigités, thèse de doctorat, université France, (2005).
- [26] عبد الباسط علي صالح كرمان، توليد القدرة الكهربائية من الطاقة الشمسية "أنظمة الطاقة الفولتضوئية"، مركز  
الدراسات الوحدة العربية، (2011).
- [27] بشير صبحي أحمد ألبياتي، الخلايا الشمسية الفولطاضوئية، من: الطاقة المتجددة، برعاية  
موسوعة الإبداع (2016).
- [28] S. Krou, « optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les  
algorithmes génétiques », Mémoire de Magister, université de Ferhat Abbes stif1, 2014.
- [29] 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.
- [30] ايمن ادريس، جبر الراين، مد منذر القادري، نمذجة و اكاة لاقط كهروضوئي في بيئة الحزمة البرمجية  
LABVIEW مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد الثامن والعشرون، العدد الثاني (2012).

- [31] I. Bendjamaa , " Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque", mémoire de magister Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, 2011/2012.
- [32] م. تاتي . ر بيسلمة، " تأثير الغبار على الالواح الشمسية الكهروضوئية"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2019 )
- [33] E. Kechar, E. Azzag et I. Touaibia : Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques. Thèse de doctorat, Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.
- [34] A. Labouret, M. Viloz, " Energie solaire photovoltaïque", livre 3e édition Dunod, Paris, 2006.
- [35] A.Tchapo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat.
- [36] A. Luque, *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)*-2012.
- [37] D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson. *Journal Applied Physics*, 25, 676-677 (1954).
- [38] [www.futurasciences.com/magazines/environnement/infos/dossiers/d/developpement-durablecellules-photovoltaïques-cœur-panneaux-solaires-1688/](http://www.futurasciences.com/magazines/environnement/infos/dossiers/d/developpement-durablecellules-photovoltaïques-cœur-panneaux-solaires-1688/).
- [39] M. A. Green, K. Emery, Y.Hishikawa, W. Warta. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 16, 435-440 (2008).
- [40] <http://www.solar-frontier.com/eng/news/2015/C051171.html>.

---

## الفصل الثاني:

الخلايا الشمسية القائمة على CIGS

## 1.II. مقدمة:

تُمثل التقنيات الجديدة للأغشية الرقيقة بديلاً واعداً جداً لتكنولوجيا البلورات، فهي تتمتع بميزة تكلفة أقل مقارنةً بتكنولوجيا السيليكون البلوري نظراً لعدة عوامل، مثل استهلاك المواد والطاقة المنخفضة أثناء صناعتها. تعمل العديد من مختبرات البحث حول العالم على دراسة مواد شبيهة الموصلات من الكالكوبيريت لفهم الخصائص الإلكترونية والبنائية والمرونة والميكانيكية والبصرية لهذه المواد، ويرجع الاهتمام بهذه المواد إلى خصائصها البصرية والإلكترونية المثيرة للفضول وتطبيقاتها المتنوعة في خلايا الطاقة الشمسية وأجهزة الكشف الضوئية والإلكترونيات، يكون الهدف الرئيسي للبحث في هذا المجال دائماً تحسين الكفاءة الكهربائية والكمية لخلايا الطاقة الشمسية على أساس الأغشية الرقيقة.

يتمتع مركب  $Cu(In,Ga)Se_2$  (CIGS) بخصائص إلكترونية وكهربائية وبصرية مثيرة للاهتمام في هيكله الكالكوبيريت يُعتبر مركب CIGS مادة شبيهة موصلة هامة للتطبيقات البصرية والإلكترونية والطاقة الشمسية.

في هذا الفصل، سنقدم الخصائص الفيزيائية للشبه الموصلات في CIGS التي تشكل الخلية الشمسية وعمليات التصنيع. سنصف أيضاً هيكل الخلية الشمسية على أساس CIGS ، ودور وخصائص الطبقات المختلفة التي تشكل الخلية. بعد ذلك، سنقدم نظرة عامة على الخصائص الأساسية للمادة  $CuInSe_2$ ، بما في ذلك الهيكل البلوري والخصائص الكهربائية والبصرية. يتطلب التحكم في الخصائص البصرية والإلكترونية للشبه الموصل بناءً على تركيز العناصر Cu وIn و Ga و Se السيطرة الدقيقة على المواد لزيادة الأداء. وأخيراً، سنعرض نظرة عامة على طرق ترسيب الأغشية الرقيقة المختلفة لخلايا الطاقة الشمسية على أساس CIGS.

## 2.II. مفهوم الأغشية الرقيقة:

الأغشية الرقيقة هي عبارة عن طبقة أو عدة طبقات من ذرات مادة ما ذات سماكة في حدود [ميكرو متر [1] ومن حيث المبدأ فهي ترتيب لعناصر مادة في بعدين (مستوى) بحيث يكون البعد الثالث صغير جداً في الحالة الصلبة المادة عموماً نهمل دور حدود (السطوح) في الخصائص ولكن في حالة التطبيقات الرقيقة يكون العكس تأثير السطوح على الخصائص يكون هو الغالب حيث كلما زاد نقصان السمك زاد تأثير السطوح في الخصائص الفيزيائية [2].

ترسب هذه الذرات على سطح الركيزة أو قاعدة ما تسمى (substrat) لتشكل

ل طبقة رقيقة وهذا القاعدة يمكن ان تكون من المعادن أو الزجاج أو السيلكون أو الألمنيوم أو الكوارتز وغيرها وذلك حسب طبيعة الدراسة أو الحاجة العلمية [3] لهذا يجب اخذ بعين الاعتبار أهمية الركيزة أثناء تصميم الغشاء حيث أن طبيعة الركيزة لها اثر كبير على خصائص البنيوية للأغشية الرقيقة المترسبة عليها [2].

أما استعمالات هذه الأغشية فكثيرة ومتنوعة فلا يخلو جهاز أو منظومة إلكترونية منها بمختلف استعمالاتها وتطبيقاتها المختلفة في المعادن وأشياء النواقل وحتى العوازل وفيها فوائد كثيرة منها تقليل التكلفة والحجم والوزن وتحسين المواصفات .

## 1.2.II. تطبيقات الأغشية الرقيقة:

للشرائح الرقيقة عدة استعمالات في مجالات العلمية والتقنية المختلفة [4] إذ استعملها في الدوائر المتكاملة وفي دوائر الغلق والفتح وفي صناعة الترانزستورات والوصلة (PN) وكذلك في صناعة الخلايا الشمسية والصمامات الضوئية

والمرشحات الضوئية [5] وفي المجال المغناطيسي نجدها أيضا في أجهزة الذاكرة المغناطيسية والمضخات والكواشف [6] واستعملت كذلك في الكيمياء في مواد الطلاء لمقاومة التآكل وكذلك أجهزة استشعار الغاز والدهانات الواقية .

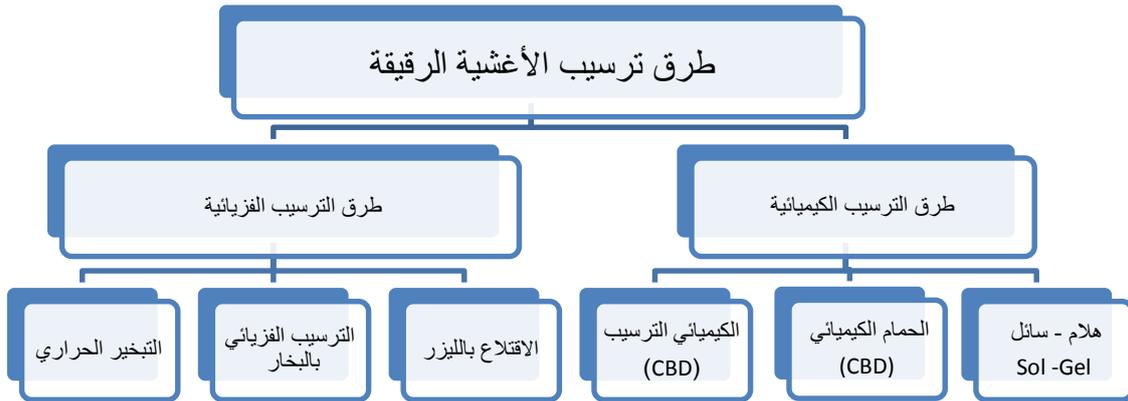
### 2.2.II. مميزات الأغشية الرقيقة:

مزايا الطبقات الرقيقة تأتي من الاستعمال الاقتصادي لطبقة رقيقة من مادة لها خصائص فيزيائية مرغوبة باستعمال تقنية سهلة من تقنيات توضع الطبقات الرقيقة، إن الطبقة الرقيقة مهما كانت الطريقة المستعملة لصناعتها تكون مرتكزة على الركيزة فهي تعتبر كجزء لا يتجزأ منها لهذا يجب أن نأخذ بعين الاعتبار بأن الركيزة لها تأثير قوي على الطبقة المتموضعة [9].

### 3.2.II. طرق ترسيب الأغشية الرقيقة:

إن التطبيقات الواسعة والمهمة في مجال الاغشية الرقيقة دفعت الباحثين الى استحداث طرق مختلفة لتحضير هذه الأغشية، ونتيجة للتطور العلمي فقد تطورت طرائق تحضير الأغشية وأصبحت على درجة عالية من الدقة في تحديد سمك وتجانس الغشاء، وان استخدام طريقة دون غيرها يعتمد على عوامل عدة من اهمها طبيعة التطبيق، نوعه، كلفة التحضير، سهولته وسرعته بالإضافة الى نوع المواد المستخدمة في التحضير [7]، اذ تكون بعض الطرق مناسبة لمواد معينة وغير مناسبة لمواد أخرى وبعضها تكون سهلة الاستعمال وبعضها الأخر تكون معقدة.

تنوعت الاساليب المستخدمة في عملية تحضير الأغشية الرقيقة، وهذا راجع إلى الاستعمالات المميزة والكثيرة لهذه الطبقات، وتصنف هذه التقنيات إلى صنفين أساسيين حسب طريقة الترسيب، سواء كانت فيزيائية أو كيميائية [8] .



الشكل 21.II : مخطط يوضح بعض الطرق الفيزيائية والكيميائية.

### 3.II. الخلايا الشمسية ذات الطبقة الرقيقة المصنوعة من CIGS :

كفاءة خلية الطاقة الشمسية معتمدة بشكل كبير على خصائص المادة الممتصة. في هذه الحالة، نهتم بشكل خاص بالمركبات  $\text{CuInSe}_2$  و  $\text{CuGaSe}_2$  و  $\text{CuInS}_2$  و  $\text{CuGaS}_2$  وسبائكها، المجمعة تحت مصطلح  $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$  المعروف بـ CIGS. يعتمد الأداء البصري والإلكتروني لـ CIGS بشكل كبير على هيكله البلوري وتركيبه الكيميائي. لذلك، فإن الفهم الجيد لهيكل هذه المادة ضروري لتحسين كفاءة خلية الطاقة الشمسية المبنية على CIGS [10].

في عام 1876، تم تصنيع المكون الخلايا الكهروضوئية الأول بناءً على نصف الموصل بتكوين طبقة من السيلينيوم بين القطبين. ولكن لم يتم إدخال النحاس والإنديوم إلا بعد قرن من الزمان، في عام 1973، بواسطة واغنر وفريقه الذين حققوا كفاءات تصل إلى 12٪ باستخدام  $\text{CuInSe}_2$  أحادي البلورة [11].

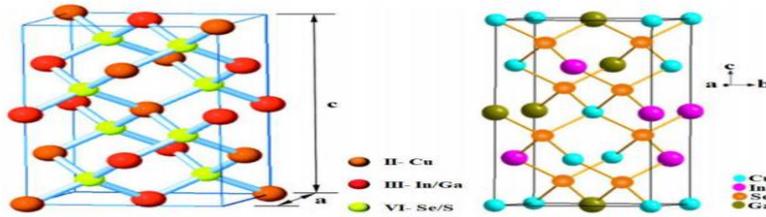
Cuivre Indium Galium Sélénium (CIGS) هو نصف موصل صلب في حالة الذوبان. يمكن أن تتغير تركيز الإنديوم والغالسيوم من سيلينيد النحاس والإنديوم النقي ( $x=1$ )، إلى سيلينيد النحاس والغالسيوم النقي ( $x=0$ )، CGS، وبالتالي تتغير الفجوة المطيافية لـ CIGS تدريجياً مع قيمة  $x$  من 1.0 إلكترون فولت لـ CIS إلى حوالي 1.7 إلكترون فولت لـ CGS [12].

### 1.3.II. خصائص السيلينيد النحاس-الغالسيوم-السيلينيوم (CIGS) :

#### (a) الخصائص الهيكلية:

المادة الأساسية (CIGS) و CIS هي عبارة عن نصف ناقل من الفئة III-VI2 ويتمتع ببنية بلورية تشالكوبيريت [13] كما هو موضح في الشكل 22.II. يمكن وصف هذه البنية التتراجونية كاقتران لهيكلين من نوع زينك بليند حيث تحتل المواقع التتراهدرية ذرات المجموعة الثالثة (Se) (أنيونات) وتحتل الأماكن الأخرى بشكل مرتب ذرات المجموعات الأولى (Cu) والثانية (In) ككاتيونات [14]. نسبة المعاملات الشبكية  $c/a$  مختلفة قليلاً عن (انحراف تتراهدري)، وذلك بسبب الاختلافات في الطاقة بين روابط Cu-Se و In-Se.

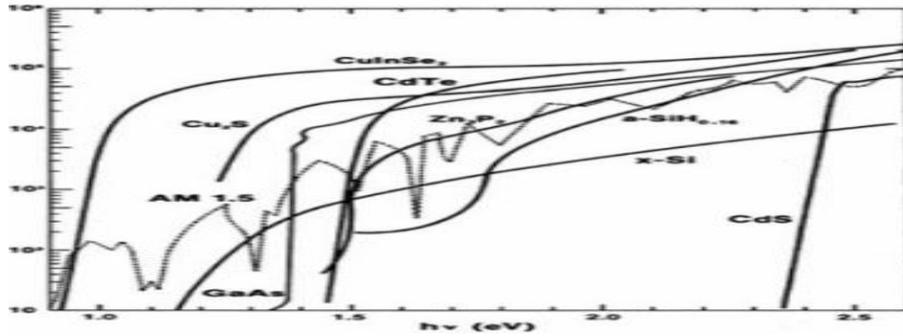
في حالة السيلينيد النحاس-الغالسيوم-السيلينيوم (CIGS)، تحتل ذرات المجموعة الثالثة مواقعها بذرات In أو Ga، وذلك بنسب تعتمد على تركيبة السبيكة. بعبارة أخرى، يعتبر CIGS محلول صلب من  $\text{CuGaSe}_2$  و  $\text{CuInSe}_2$ .



الشكل 22.II. هيكل CIGS

(b) خصائص البصرية لـ  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  :

كفاءة الخلايا الشمسية تعتمد بشكل رئيسي على الضوء الممتص من قبل الطبقة الامتصاصية، من الناحية التكنولوجية، يجب أن تكون الطبقة الماصة لها فجوة بصرية مثالية لامتناس أوسع نطاق من طول الموجات في الطيف الشمسي مع معامل امتصاص عالي تم دراسة الخواص البصرية لطبقات بشكل واسع من قبل العديد من مجموعات البحث يتميز  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  عن المواد الفوتوفولتائية الأخرى ( $\text{CdS}$ ،  $\text{GaAs}$ ،  $\text{CdTe}$ )، إلخ) بمعامل امتصاص عالٍ جدًا، أكبر من  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  في نطاق الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء القريبة. بالإضافة إلى ذلك، لدى  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  تسمح بامتصاص الفوتونات التي لها طول موجي أقل من 1192 نانومتر، مما يشير إلى أن نطاق الامتناس لهذا المركب يقع في المنطقة المثلى من الطيف الشمسي [15].



الشكل 23.II : معامل امتصاص لمختلف المواد

في تصنيع الخلايا الشمسية الرقيقة في العديد من الدراسات، لوحظ أن العلاقة بين الفجوة البصرية  $E_g$  ومعامل الامتناس  $\alpha$  لشبه الموصل التقليدي هي كما يلي [16]

$$\alpha = B(h\nu - E_g) \quad (14. II)$$

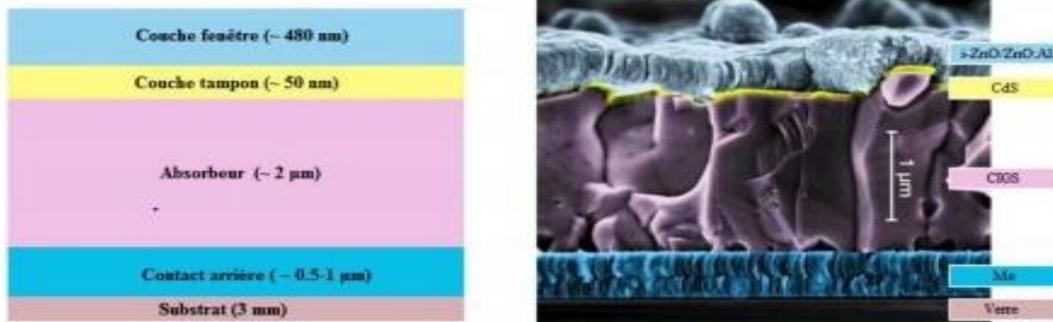
و  $B$  ثابت الاحتمال، والتي تعتمد على مجموع كثافة الحالات المرتبطة بامتصاص الفوتون و  $E$  هي طاقة الإشعاع. توضح هذه العلاقة بوضوح تأثير الفجوة على نطاق الطاقة الذي يمتص فيه CIGS، يمكن الحصول على فجوة بصرية بقيمة:  $E_g = 1.02 \pm 0.02 \text{ eV}$ . يقارن الشكل 23.II معامل الامتناس البصري لـ CIS وهو يعتبر أصغر فجوة ممكنة لـ CIGS وبالتالي نطاق الامتناس الأقصى بمعامل الامتناس للمواد الكهروضوئية الأخرى  $\text{CdTe}$ ،  $\text{Si}$ ،  $\text{GaAs}$ ،  $\text{CdS}$  إلخ، نلاحظ وجود فجوة بين المواد الكهروضوئية، وبالتالي يوضح ذلك الاهتمام بمادة CIS للاستخدام في الأغشية الرقيقة. بالتالي، يكفي طبقة CIGS بسُمك 1 ميكرومتر لامتناس 95% من طيف الشمس للفوتونات التي تكون طاقتها أعلى من  $E_g$  فجوة  $\text{CuInSe}_2$  البصرية هي أيضًا دالة لدرجة الحرارة.

2.3.II. تركيب CIGS :

هناك العديد من طرق الترسيب المطورة لـ (CIGS كبريتيد النحاس والأنديموم والغالسيوم). تسمح بعض الطرق بتحقيق كفاءة عالية جدًا في المختبر، ولكن تكلفة العملية وتنفيذها قد يكون صعبًا للتطوير على نطاق واسع، بينما تكون طرق أخرى أقل فعالية ولكنها اقتصادية ويمكن تنفيذها بسهولة في الصناعة. يُعتبر اختيار الطريقة مهمًا لتحقيق توازن بين سهولة التنفيذ وجودة المادة. في هذا الجزء، يتم وصف أهم الطرق:

### 1.2.3.II هيكل خلية CIGS:

تتكون الخلية CIGS من تراكم لعدة مواد بطبقات رقيقة يتم ترسيبها تباغاً على قاعدة، تكون القاعدة عادةً لوحة زجاجية من الزجاج الصودا الكالسيوم (Soda-Lime Glass, SLG) يعرض الشكل (24.II) هيكل الخلية القياسي للخلايا التي تعتمد على CIGS [17-18] وتتالف هذه الخلية من تكديس عدة طبقات رقيقة توضع على الركيزة .



الشكل 24.II: هيكلية قياسية لخلية تعتمد على CIGS

### 2.2.3.II. الركيزة:

هي القاعدة التي تسمح بتوضع مختلف الطبقات، حيث سمك التراص لا يتجاوز عدة ميكرومترات (من 1 إلى 3 ميكرومترات)، والتي يجب أن تتوفر فيها معايير كيميائية وميكانيكية مختلفة تجعلها قادرة على متابعة جميع مراحل تصنيع الخلية دون التأثير على الجودة وبتكلفة محدودة، يمكن ذكرها كما يلي:

- الصلابة.
- معامل التمدد (يجب أن يكون معامل التمدد للركيزة قريب لمعامل التمدد الحراري لـ CIGS )
- درجة حرارة الاستخدام القصوى: يجب أن يكون للمادة الأولية حدًا للحرارة يتناسب مع عملية التصنيع.
- العزلة الكيميائية

يوجد ثلاث فئات رئيسية للركيزة المستخدمة: الزجاج والمعادن والبوليمرات. يعتبر الزجاج الصودا كالسيوم مناسباً أيضاً بسبب معامل تمدد حراري يتناسب مع نمو طبقات CIGS و بسبب خشونته الضعيفة و مقاومته الميكانيكية الجيدة في درجات الحرارة العالية لعملية التصنيع [ 19 ] .

### 3.2.3.II. جهة التوصيل الخلفي:

المادة المستخدمة في الاتصال الخلفي للخلية هي معدن يتم وضعه على قاعدة الماصة، ودوره الرئيسي هو جمع حاملتي الشحنات في الامتصاصية وتوصيلها إلى الحمل الخارجي، يجب أن يكون الاتصال المعدني الخلفي موصلًا جيدًا للتيار الكهربائي، وألا يتفاعل مع المركب CIGS أو ينتشر فيه، وأن يتحمل درجات الحرارة العالية التي يتعرض لها خلال عملية تصنيع (CIGS حوالي 550 إلى 600 درجة مئوية)، تم دراسة العديد من المعادن مثل التنغستن W والموليبدنوم Mo والكروم Cr والتنتالوم Ta والنيوبيوم Nb والفاناديوم V والمنجنيز [20] Mn والذهب Au والألومنيوم Al والفضة

Ag والنحاس [21] Cu الموليبيدينوم هو المادة الأكثر استخدامًا لأنه يتحمل درجات الحرارة العالية ولا ينتشر في المركب CIGS بالإضافة إلى ذلك، لديه القدرة على تكوين اتصال أومي مع المركب. CIGS في الواقع، يمكن للموليبيدينوم أن يتفاعل مع السيلينيوم أثناء وضع CIGS لتشكيل MOSe<sub>2</sub> وبالتالي، يتشكل صمام تشونكي بين الموليبيدينوم وCIGS حيث يعمل هذا الأخير كحاجز لحركة حامي الشحنة ويسبب خسائر مقاومة داخل الخلية الشمسية. يعتبر الموليبيدينوم ذو مقاومة كهربائية منخفضة، وهو المادة الأكثر استخدامًا للاتصال الخلفي في خلايا CIGS لهذه الأسباب.

سمك الاتصال الخلفي للموليبيدينوم عادة ما يكون 1 ميكرومتر ويتم ترسيبه بشكل عام باستخدام تقنيات التردد اللاسلكي [22] (RF) أو المغناطيس (DC) خصائص الطبقة الرقيقة مثل المقاومة الكهربائية والتصاقها بالمادة الأساسية تعتمد على شروط عملية الترسيب. تتمتع الطبقة الرقيقة التي تم ترسيبها بضغط أعلى بمقاومة كهربائية أعلى، ولكنها تتمتع بالتصاق جيد بالمادة الأساسية. من ناحية أخرى، تتمتع الطبقات الرقيقة التي تم ترسيبها بضغط منخفض بمقاومة كهربائية منخفضة ولكن التصاق ضعيف بالمادة الأساسية.

#### 4.2.3.II. الطبقة الماصة:

الطبقة الموجودة مباشرة فوق الاتصال الخلفي مكونة من المادة الماصة للضوء وتسمى CIGS إنها نصف موصل من النوع p ينتمي إلى عائلة I-III-VI ويتشكل الجزء الأول من الوصلة p-n وهي أيضًا المادة التي يتم فيها امتصاص غالبية الفوتونات لتشكيل أزواج الإلكترون - ثقب، يبلغ سمكها حوالي 1 إلى 3 ميكرومتر، يجب أن تكون مصنوعة من مادة ذات معامل امتصاص عالي في نطاق الضوء المرئي، ومن الأفضل أن تكون لديها فجوة مباشرة بقيمة تتراوح بين 0.95 إلى 1.05 إلكترون فولت، يجب أن تكون موصليتها من النوع P وتكون حوالي  $10^{-2} \Omega \cdot cm^{-1}$ .  
تتنوع طرق وضع طبقة CIGS، وأكثر الطرق شيوعًا هي التبخير المشترك والتسخين الأولي لمادة معدنية سابقة في وجود بخار السيلينيوم [25].

#### 5.2.3.II. الطبقة العازلة :

الطبقة العازلة هي طبقة تقع بين الطبقة الماصة والطبقة النافذة، وهي نصف موصل من النوع N ويجب أن تكون فجوته أكبر من فجوة الامتصاص، يبلغ سمكها حوالي 50 نانومتر، حيث يتم تعيين دورين رئيسيين لها: دور كهربائي ودور كطبقة واقية. من الناحية الكهربائية، تسمح الطبقة العازلة بتحسين توافق الفجوات بين CIGS والطبقة النافذة وتقليل إعادة التكوين لحاملات الشحن عند الحدود بين هاتين الطبقتين. كما تحمي سطح الامتصاص أثناء ترسيب الطبقة النافذة بواسطة الترشيح الكاثودي، والتي يمكن أن تؤدي إلى تكوين عيوب على سطح CIGS، تم استخدام العديد من أنصاف الموصلات من النوع N كطبقة عازلة، ولكن الأكثر استخدامًا هو كبريتيد الكاديوم (CdS) المرسب بواسطة الحمام الكيميائي (CBD)، والذي حقق حتى الآن أفضل الكفاءات. ومع ذلك، يتسبب انخفاض عرض الفجوة، والتي تساوي 2.4 إلكترون فولت، في خسائر بصرية لأطوال موجة أقل من 500 نانومتر. لهذا السبب، وبالإضافة إلى القيود المرتبطة باستخدامه (الكاديوم هو فلز ثقيل وملوث للغاية)، يتم إجراء العديد من الدراسات لاستبدال كبريتيد الكاديوم بمواد أخرى. من بين هذه المواد، يمكن ذكر كبريتيد الإنديوم (In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) ، وأوكسيد الزنك والهيدروكسيد ((Zn(O,OH)) ، وهيدروكسيد الإنديوم والكبريت ((In(OH,S)) ، وكبريتيد الزنك ((ZnS) ، وأوكسيد الزنك والكبريت ((Zn(O,S)) ، أو سيلينيد الزنك ((ZnSe) [26].

## 6.2.3.II. الطبقة النافذة:

الطبقة النافذة يجب أن تكون شفافة وموصلة في الوقت نفسه، بحيث تستطيع تجميع الإلكترونات وتسمح بمرور الضوء، في نطاق طيف الضوء تتطلب الطبقة النافذة في الخلايا الشمسية أن تكون نسبة انتقالها أعلى من 80 % في نطاق طيف الضوء الشمسي، تتكون هذه الطبقة من أكسيد شفاف موصل (TCO)، وعلى هذا الأكسيد يتم ترسيب شبكة معدنية رقيقة، أيضاً يتم استخدام أكسيد الزنك (ZnO) عموماً بهدف تقليل المقاومة التسلسلية للطبقة النافذة، TCO أكسيد الزنك له فجوة عرضية كبيرة تبلغ 3.3 إلكترون فولت وله خصائص كهربائية وبصرية جيدة (نسبة انتقال تبلغ 90% في نطاق 400-1000 نانومتر ومقاومية تبلغ 9.10-4 أوم. سم).

الطبقة النافذة مكونة من طبقتين، الأولى رقيقة (50 إلى 100 نانومتر) وذات مقاومة عالية، والثانية سميكة (100 إلى 1500 نانومتر) وذات مقاومة منخفضة.

تتكون الطبقة الأولى عادة من أكسيد الزنك غير الموصل (i-ZnO)، والتي تمنع أي تسرب للتيار بين الطبقة الامتصاصية والاتصال العلوي [26]. أما الطبقة الموصلة فغالباً ما تتكون من أكسيد الزنك المشوب بالألومنيوم (ZnO: Al)، ولكن هناك أيضاً عناصر أخرى كالبيورون (ZnO: B) أو الغاليوم [26]، يتم ضبط سمك والشوائب المضافة لهذه الطبقة بطريقة تجمع بين الشفافية والتوصيلية.

## 3.3.II. مميزات CIGS :

من أهم مزايا المادة شبه الموصلة في هيكل الكالكوبيريت هي كالتالي:

- فجوتها المباشرة بقيمة 1.2 إلكترون فولت، مما يسمح لها بامتصاص نطاق واسع من الطيف الشمسي.
- مقاومة ممتازة للإشعاعات.
- مرونة خلايا CIGS المصنوعة على قاعدة معدنية رقيقة هي أيضاً ميزة هائلة، تعطي هذه المرونة لـ CIGS ميزة على الخلايا الشمسية السيليكونية التقليدية فيما يتعلق بالتركيب، تمتلك الخلية الشمسية السيليكونية القياسية خصائص متوافقة مع لوح زجاجي مما يجعلها صلبة ولكن هشّة، وهذا يقيد خيارات تنفيذ الألواح الشمسية.
- الوزن الخفيف: كونه رقيقاً ومرناً أيضاً سبباً لخفة الوزن، ويعتبر الوزن الخفيف ميزة للأشخاص الذين يرغبون في اصطحاب خلاياهم الشمسية معهم أثناء السفر. بالنسبة للخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون.

## الخاتمة:

في هذا الفصل، تم التركيز على دراسة الأغشية الرقيقة وبعض الخصائص الخاصة بمادة CIGS المستخدمة في تصميم الخلية الشمسية المدروسة في هذا العمل، تشمل هذه الخصائص الخواص الهيكلية والإلكترونية والكهربائية.

## المراجع

- [1] J. R. SON, "Thin film Technologies ", 2nded, (1986)
- [2] F. J. Yusta, M. L. Hitchman and S. H. Shamlin, "CVD preparation and characterization of tin dioxide films for electro-chemical applications", *Master.chem, Vo17, P. 1421, (1997).*
- [3] JN. S. Kozhevnikova, A. S. Vorokh, A. A. Uritskaya, *Russian Chemical Reviews* 84 (3) 225 - 250 (2015).
- [4] L. Eckortova, "Physics of Thin Film", Plenum press, (1977)
- [5] S. Harietch, " Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD)", thèse de magister, Université Mentouri Constantine, Algeria, (2009)
- [6] K. L. CHOPRA, "Thin Film phenomena", McGraw-Hill Book Co, New York, (1969).
- [7] J.Hiie, T.Dedova, V.Valdna, k.Muska, *Thin Solid Films*, 511-512, P.443-447(2006)
- [8] L. Baghriche, "Elaboration et caractérisation de couches minces d'oxyde de Zinc et sulfure de zinc préparées par Spray Ultrasonique", Thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri, (2015).
- [9] B. Sang, K. Kushiya, D. Okumura, O. Yamase "Performance improvement of CIGS-based modules by depositing high-quality Ga-doped ZnO windows with magnetron sputtering". *Solar energy materials and solar cells*, vol. 67, no 1-4, p. 237- 245. (2001)
- [10] Charles Roger « Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques » Thèse de doctorat, Université de GRENOBLE, 2013.
- [11] Mohammed Ouled Ali, « propriétés optoélectroniques du semi-conducteur Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> appliquée aux cellules photovoltaïques ». Mémoire de magister à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran, 2010.
- [12] ATEK Mourad « Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS ». Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de – SÉTIF, 2013.
- [13] J. Parkes, R.D. Tomlinson, M.J. Hampshire "Crystal data for CuInSe<sub>2</sub>" *Journal of Applied Crystallography*, vol. 6, no 5, p. 414-416. (1973)
- [14] L. Kazmerski, S. Wagner "Current topics in photovoltaics" Eds, TJ Coutts, JD Meakin, Academic Press, London, (1985).

- [15] A. Luque, S. Hegedus “Handbook of photovoltaic science and engineering” John Wiley & Sons, (2011).
- [16] B. Eguer “ Energie solaire photovoltaïque. Physique et technologie de la conversion photovoltaïque ”, (Ellipses, UNESCO, 1993), p. 66-137, (1993)
- [17] N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bücheler, A. Ennaoui, C.- H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R. Menner, T. Nakada, C. Platzer-Björkman, S. Spiering, A.N. Tiwari, and T. Törndahl. “Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> based thin film photovoltaics : present status and current developments” *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, vol 18, No 6 :411–433, September 2010.
- [18] U. Rau, P.O. Grabitz, J.H. Werner “Resistive limitations to spatially inhomogeneous electronic losses in solar cells” *Applied Physics Letters*, vol. 85, No 24, p. 6010-6012. (2004)
- [19] Marie BUFFIERE « Synthèse et caractérisation de couches minces de Zn(O,S) pour application au sein des cellules solaires à base de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> ». Thèse de doctorat, Université de NANTES 2011.
- [20] K. Orgassa, H. W. Schock and J. H. Werner, « Alternative back contact materials for thin film Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells », *Thin Solid Films*, Vol. 431–432, 2003, pp. 387.
- [21] R. J. Matson, O. Jamjoum, A. D. Buonaquisti, P. E. Russell, L. L. Kazmerski, P. Sheldon and R. K. Ahrenkiel, « Metal contacts to CuInSe<sub>2</sub> », *Solar cells*, Vol. 11, 1984, pp. 301.
- [22] N. Kohara, S. Nishiwaki, Y. Hashimoto, T. Negami and T. Wada, « Electrical properties of the Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>/ MoSe<sub>2</sub>/Mo structure », *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 67, 2001, pp. 209.
- [23] M. Kemell, M. Ritala and M. Leskelä, « Thin Film Deposition Methods for CuInSe<sub>2</sub> Solar Cells », *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Vol. 30, 2005, pp. 1
- [24] BOUAFIA MOUNIR « Modélisation et simulation d’une cellule solaire en couche mince à base de di-séléniure de Cuivre, d’Indium et de Gallium CIGS » Diplôme de Master professionnel, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2012
- [25] Souici Fatma-Zohra « Modélisation d’une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe<sub>2</sub>). Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009.
- [26] Aurélien DUCHATELET « Synthèse de couches minces de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> pour cellules solaires par Electrodeposition d’oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium. ». Thèse de doctorat, Université LILLE 1, 2012.

---

## الفصل الثالث:

# محاكاة الخلية CIGS

## 1.III. مقدمة :

أصبحت محاكاة الخلايا ذات الطبقات الرقيقة مستخدمة بشكل متزايد في السنوات الأخيرة ، و مع هذا التقدم الكبير و الأفق الجديد في تكنولوجيا الطاقات المتجددة أصبحت المحاكاة الرقمية و النمذجة الحاسوبية أداة فعالة جدا في دراسة و تمثيل و التنبؤ بنتائج التجارب و الأنظمة الفيزيائية و الالكترونية حيث تم تطوير مجموعة متنوعة من الخوارزميات و البرامج المختلفة التي تستخدم لمحاكاة و فهم و توقع و تحسين أداء أجهزة الشبه موصلات و التي يمكن تحديدها من خلال حل مجموعة معادلات تفاضلية معروفة جيدا في الدراسات النظرية المتعلقة بالشبه الموصلات، و تشمل هذه المعادلات معادلة بواسون و معادلتها استمرارية للإلكترونات و الثقوب تعكس هذه المعادلات ظواهر التوصيل في حجم الشبه موصل و أيضا في مناطق تجمع الشحنات. نظرا للطابع غير الخطي لهذه المعادلات، فمن المستحيل حل النظام المعادلاتي تحليليا عاديا، وبالتالي فإن استخدام الطرق العددية يصبح أمرا ضروريا.

هناك العديد من البرامج و الأدوات المختلفة المستخدمة في هذا المجال، و من بينها يمكن ذكر AMPS-1D و PC-1D و ASA و SCAPS-1D و SILVACO... و التي تستخدم بشكل واسع من قبل الباحثين.

بعد تقديم المفاهيم الأساسية الضرورية لدراسة خلايا الطاقة الشمسية ذات الطبقات الرقيقة، سنقوم في هذا الفصل بمحاكاة خلية شمسية من الجيل الثاني CIGS و ذلك باستخدام برنامج SCAPS-1D حيث سنقوم في هذه الدراسة بتحديد خصائص هذه الخلايا بناء على نوع الهيكل المختار.

## 2.III. لمحة عن برنامج SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) SCAPS-1D

هو برنامج محاكاة رقمي للخلايا الشمسية ذات الأبعاد الواحدة، تم تطويره بواسطة قسم الأنظمة الإلكترونية و الحاسوب في جامعة جيننت في بلجيكا. ساهم العديد من الباحثين في تطوير هذا البرنامج: Alex Niemegeers, Marc Burgelman Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve [1] يتوفر هذا البرنامج بشكل مجاني لمجتمع البحث الشمسي (المعاهد و المؤسسات البحثية) يعمل على أجهزة الكمبيوتر بنظام التشغيل Windows 95 و Windows 98 و NT و 2000 و XP و Vista و 7 و Windows 8 .

تم تطوير SCAPS أصلا لهياكل خلايا CuInSe<sub>2</sub> و CdTe و مع ذلك، تم تحسين قدراته من خلال العديد من التطويرات ليصبح قابلا للاستخدام في الخلايا الشمسية بلورية (مثل السيليكون و الجاليوم أرسنيد)، بالإضافة إلى الخلايا الشمسية غير المتبلورة (مثل السيليكون التي تكون عشوائية الترتيب و السيليكون ذو الترتيب الدقيق الدقيق).

من خلال برنامج SCAPS-1D، يمكننا محاكاة هياكل تتألف من عدد محدد من الطبقات تصل إلى 7 طبقات و سيطرة بالإضافة إلى جهات الاتصال الأمامية و الخلفية.

## 3.III. مبدا المحاكاة الرقمية :

تعتمد دراسة معظم أجهزة أشباه الموصلات على الدقة :

- معادلة بواسون.

معادلة الاستمرارية.

تحتسب معادلة بواسون في كل لحظة و في كل نقطة في الفضاء في سلسلة من العناصر المحدودة ، تتعلق معادلة بواسون بالاختلافات في الجهد الكهروستاتيكي بكثافة الشحنة المحلية.

❖ معادلة بواسون :

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{e}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} (p(x) - n(x) + N_D - N_A + \rho_p - \rho_n) \quad (15. III)$$

❖ معادلة الاستمرارية :

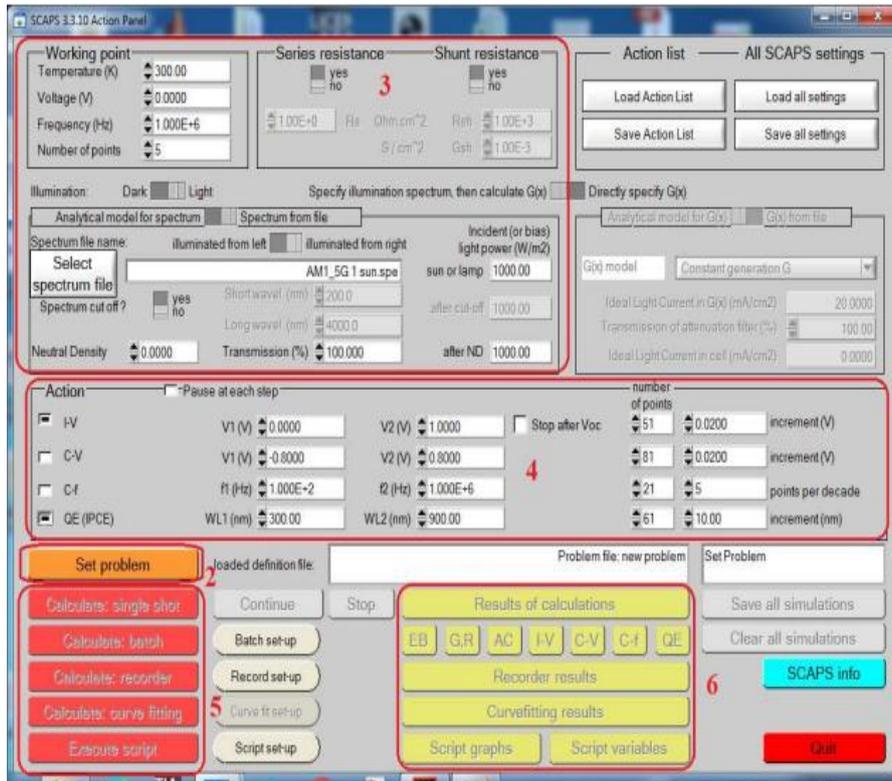
$$\frac{dJ_n}{dx} = G_n - R_n \text{ و } \frac{dJ_p}{dx} = G_p - R_p \quad (16. III)$$

حيث:

- $\psi(x)$  هي جهد كهرو ستاتيكي،  $e$ : شحنة كهربائية،  $\epsilon_0$  و  $\epsilon_r$ : السماحية في الفراغ والسماحية النسبية.
- $n$  و  $p$ : عبارة عن تركيز الثقوب والالكترونات.
- $N_D$ : عبارة عن تركيز الشوائب المانحة و  $N_A$ : تركيز الشوائب الآخذة.
- $\rho_n, \rho_p$  هي توزيع الثقوب والإلكترونات.
- $G$ : هو معامل التوليد و  $R$ : معامل الالتحام.
- $J_p$  و  $J_n$ : هما الكثافات الحالية للإلكترونات والثقوب على التوالي.

#### 4.III. المحاكاة باستعمال برنامج SCAPS 1D :

يتضمن برنامج SCAPS 1D عدة لوحات، اللوحة الرئيسية (لوحة العمل) يصرح بوضع المشكلة، ويسمح باختيار الحسابات المطلوبة، وإجراء العمليات الحسابية، والتنقل إلى اللوحات الأخرى، والحفظ والرسم البياني النتائج والعديد من الميزات الأخرى، أكثر تفصيلاً في دليل البرنامج [ 2 ] .



الشكل 25.III.: لوحة بدء SCAPS ، العمل أو اللوحة الرئيسية.

يتم شرح معنى الكتل المسماة من 1 إلى 6 على النحو التالي:

1. ابداء SCAPS.
2. تحديد المشكلة وكذلك الهندسة والمواد وجميع خواصها الخلية الشمسية المدروسة.
3. وضع الظروف التي تجري فيها المحاكاة (حدد نقطة العمل).
4. أشر إلى القياس (المميز) المراد محاكاته.
5. ابدأ العمليات الحسابية.
6. منحنيات محاكاة العرض. هذه الخطوات مفصلة أدناه.

### 1. ابداء SCAPS:



SCAPS بلوحة العمل.

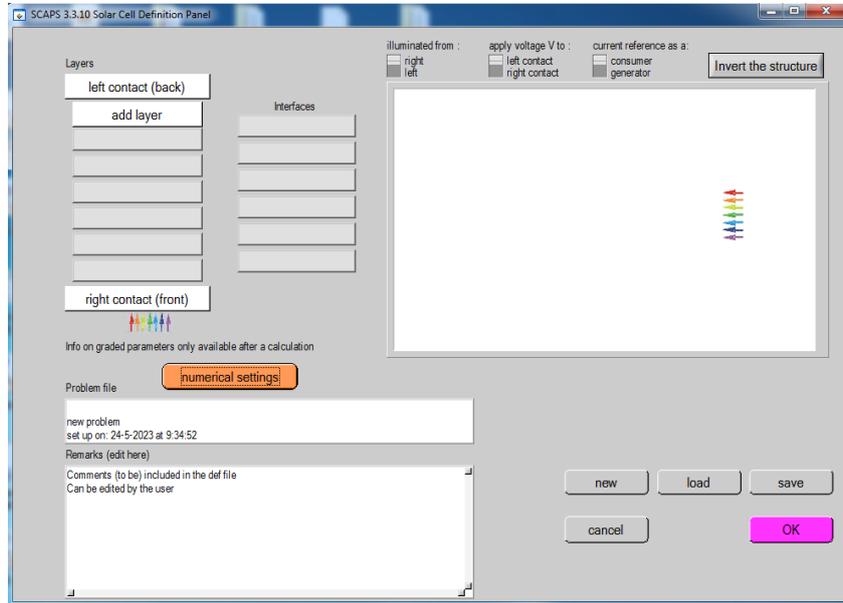
انقر فوق الرمز أعلاه على سطح المكتب، أو انقر نقرًا مزدوجًا فوق الملف

SCAPS3310.EXE يفتح

Set problem

### 2. عرف المشكلة :

انقر فوق الأداة (Set problem) في لوحة الإجراءات لفتح نافذة المشكلة. تعريف المشكلة (Solar cell definition panel). يمكننا إنشاء نموذجنا الجديد، احفظ باستخدام الأداة (save)، أو يمكنك النقر فوق الأداة (Load) لفتح نموذج تم حفظه بالفعل. نفتح على سبيل المثال (NUMOS CIGS Baseline.def)، هذا مثال على الملف لخلية شمسية CIGS. بعد ذلك، من الممكن تعديل جميع خصائص ملف الخلية بالنقر فوق "Set problem" في لوحة العمل.



### الشكل III.26. : لوحة تعريف الخلايا الشمسية.

**New**: من أجل إنشاء جهاز جديد لتحويل الضوء إلى طاقة كهربائية،

**Add layer**: تفتح نافذة تحتوي على خانات يتعين ملؤها بالمعلومات التي تميز الطبقة المراد دراستها، وتتضمن: اسم الطبقة، والسلك، وطاقة الفجوة المحظورة، والتقارب الإلكتروني، والثبات الكهربائي، والتنقل، ونوع الشحنة... وفي النهاية، يتم النقر على "إضافة.(Add)".

**Save**: لحفظ الخلية المراد دراستها.

**Louad**: لتحديد خلية تم حفظها بالفعل.

**Ok**: قم بالموافقة على الخلية المنشأة والعودة إلى لوحة الإجراء لإنهاء العمل.

**Right et left contact**: لتعديل معلمات الأسطح الخارجية اليسرى واليمنى للخلية

**Cancel**: أغلق لوحة التعريف وعد إلى لوحة الإجراء.

### 3- حدد نقطة التشغيل :

نقطة التشغيل تحدد العوامل التي لا تتغير في قياسات المحاكاة وتتعلق بعملية القياس. يشمل ذلك

Working point	
Temperature (K)	300.00
Voltage (V)	0.0000
Frequency (Hz)	1.000E+6
Number of points	5

الشكل.III.27 : نقطة التشغيل

### 4- الإضاءة :

Illumination: Dark <input type="checkbox"/> Light <input type="checkbox"/>		Specify illumination spectrum, then calculate G(x)	
Analytical model for spectrum <input type="checkbox"/>		Spectrum from file <input type="checkbox"/>	
Spectrum file name:	illuminated from left <input type="checkbox"/> illuminated from right <input type="checkbox"/>	Incident (or bias) light power (W/m <sup>2</sup> )	sun or lamp 1000.00
Select spectrum file	AM1_5G 1 sun.spe	after cut-off	1000.00
Spectrum cut off ?	yes <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/>	Short wavel. (nm)	200.0
Neutral Density	0.0000	Long wavel. (nm)	4000.0
Transmission (%)	100.000	after ND	1000.00

الشكل.III.28 : معلمات الإضاءة

### III.5. تعريف الخلية الشمسية :

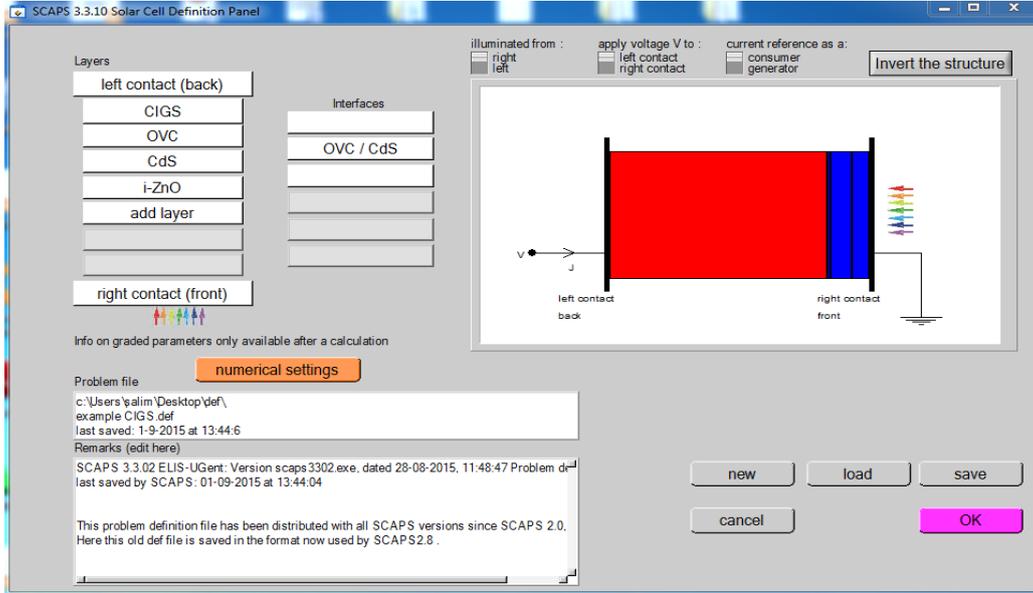
يمكن إدخال خلية شمسية باستخدام واجهة المستخدم الرسومية للبرنامج. من خلال ذلك، يمكننا إدخال جميع المعلمات التي سنتم مراقبتها بواسطة SCAPS-1D لضمان عدم الحصول على قيم غير صالحة أو غير متناسقة.

### III.5.1. تعديل هيكل الخلية الشمسية:

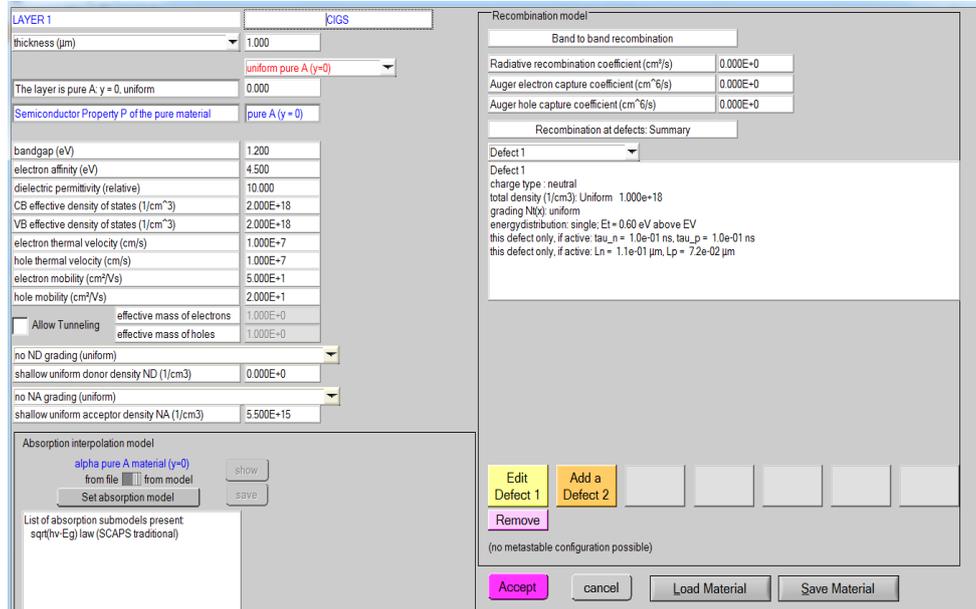
عند النقر على الأداة 'SET PROBLEM' في لوحة الإجراءات، سيتم عرض لوحة 'SOLAR CELL DEFINITION'. يتيح هذا الأخير إنشاء أو تعديل هيكل الخلايا الشمسية وحفظها، أو تحميلها من ملفات أخرى. تلك

الملفات هي ملفات ASCII ذات امتداد .def. ويمكن فتحها باستخدام Notepad.exe أو Wordbad.exe يُنصح بعدم تعديلها لتجنب جعلها غير قابلة للاستخدام فيما بعد.

يمكن تعديل خصائص الطبقات والاتصالات والواجهة عن طريق النقر على الزر المناسب كما يُظهره الشكل بنفس الطريقة، يمكن إضافة طبقات إضافية عن طريق النقر على 'ADD LAYER'.



الشكل III.29.: تعريف هيكل خلية شمسية



الشكل III.30.: لتعبئة معاملات الطبقات المختلفة في خلية الطاقة الشمسية

2.5.III. هيكل الخلية الشمسية :

سوف نقوم في عملنا هذا بدراسة الخلايا الشمسية للجيل الثاني التي تعتمد على CIGS المركبة مع الطبقات الرقيقة ل Cds و ZnO والتي بدورها مطعمة من نوع n، الجدول ( 01.III ) يمثل مختلف المعلمات التي تميز الخلية الشمسية مجال الدراسة CIGS/Cds/ZnO (هذه المعلمات موجودة في ملفات SCQPS).

الجدول ( 01.III ) : معلومات الخلية كل من CIGS/Cds/ZnO

معلومات الخلية	CIGS	Cds	Zno
السلك (um)	1.000	0.1	0.080
فجوة النطاق (eV)	1.200	2.45	3.400
الالفة الالكترونية (eV)	4.500	4.45	4.550
العازلة النسبية	10.000	10.000	10.000
كثافة التوصيل ذات النطاق الفعال للحالات (cm <sup>-3</sup> ) <sup>3</sup>	2.000E+18	2.000E+18	4.000E+18
كثافة التكافؤ الفعالة للحالات (cm <sup>-3</sup> )	2.000E+18	1.500E+19	9.000E+18
السرعة الحرارية للإلكترون (cm/s)	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
السرعة الحرارية للثقب (cm/s)	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
تحركية الإلكترون (cm/s)	5.000E+1	5.000E+1	5.000E+1
تحركية (تنقلية) الثقب (cm/s)	2.000E+1	2.000E+1	2.000E+1
كثافة حاملات المانحة (cm <sup>-3</sup> )	0.000E+0	1.000E+15	5.000E+17
كثافة حاملات الأخذة (cm <sup>-3</sup> )	5.500E+15	0.000E+0	0.000E+0

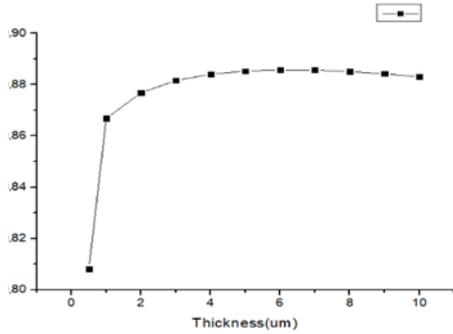
سوف نعتد في دراسة هذه الخلية على المراحل التالية :

- دراسة تأثير سمك الطبقة الامتصاصية .
- دراسة تركيز الطبقة الاخذة N<sub>A</sub> في طبقة الامتصاص .
- دراسة تأثير سمك الطبقة المخزنة .

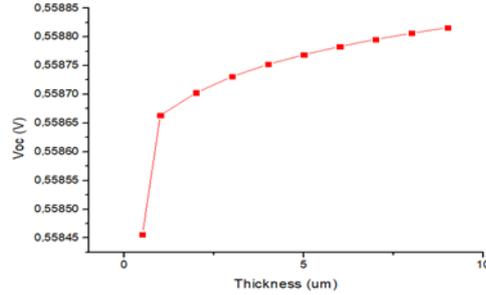
- دراسة تركيز الطبقة المانحة  $N_D$ .

### 3.5.III. تأثير سماكة الطبقة الماصة CIGS:

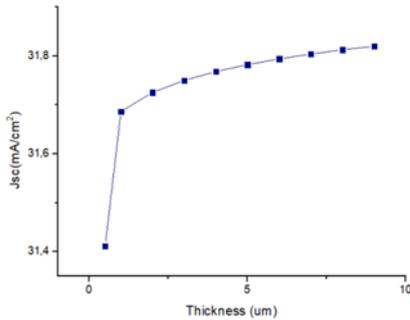
من أجل الحصول على أفضل كفاءة ممكنة من الخلية الشمسية، من المستحسن تحسين السماكة. لهذا الغرض، يختلف سمك طبقة الامتصاص بناءً على مادة CIGS من 500 نانومتر إلى 10000 نانومتر. مع إشعاع AM 1.5G القياسي. تبقى معاملات المواد الأخرى للطبقات المختلفة دون تغيير.



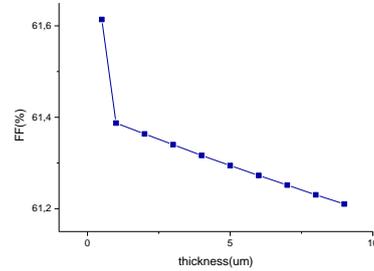
مردود الخلية بدلالة السمك



جهد الدارة المفتوحة بدلالة السمك



تيار الدارة القصيرة بدلالة السمك



معامل الشكل بدلالة السمك

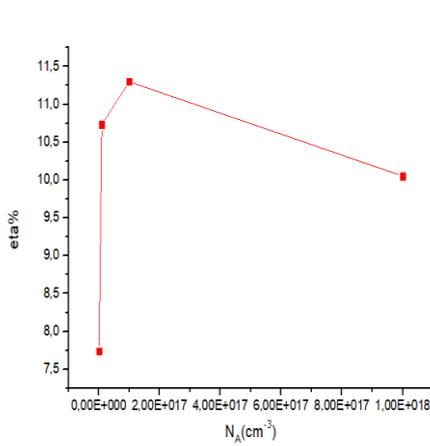
### الشكل 31.III . بيانات محاكاة سمك طبقة CIGS

بعد القيام بتغيير سمك الطبقة الماصة كما هو موضح في البيان وقمنا بإجراء المحاكاة وتحصلنا على النتائج الموضحة في البيانات أعلاه يمكننا ملاحظة زيادة سريعة في مردود الخلية عند سمك من 0,5 إلى 1 ميكرومتر، ثم تتباطئ هذه الزيادة تدريجياً مع إستمرار زيادة السمك حيث تبلغ قيمة أعظمية بمقدار 10,8857 عند سمك (um) 6. كذلك بالنسبة لبقية منحنيات  $V_{oc}$ ،  $J_{sc}$  حيث يبلغ قيمة عظمى عند سمك (um) 10 مقدارها (V) 0.558824 و ( $mA/cm^2$ ) 31.8270362 على الترتيب.

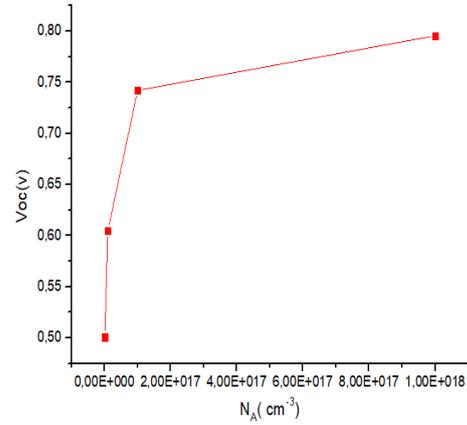
أما بالنسبة لمعامل التشكل FF نلاحظ تناقص سريع في نسبته كلما زاد السمك حسب ما هو موضح في البيان أعلاه.

### 4.5.III. تأثير كثافة التطعيم $N_A$ في طبقة الامتصاص (CIGS) على أداء الخلية الشمسية :

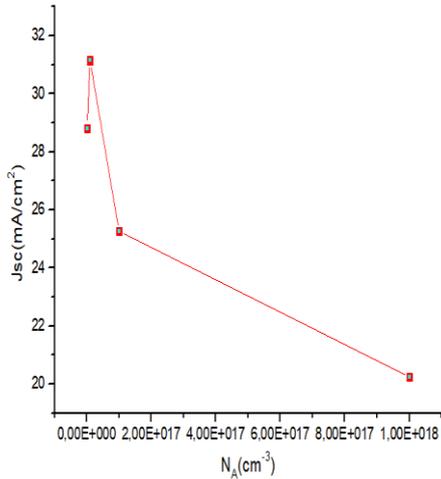
في هذا الجزء قمنا بتثبيت كامل المعلمات المرفقة في الجدول أعلاه واقتصرت دراستنا فقط على تغيير كثافة تركيز الشحنات الاخذة لطبقة الامتصاص CIGS حيث تم تغيير القيم من ( $10^{15}$  الى  $10^{18}$ ) وقمنا بالمحاكاة حيث أظهرت لنا النتائج المرفقة في البيانات أدناه:



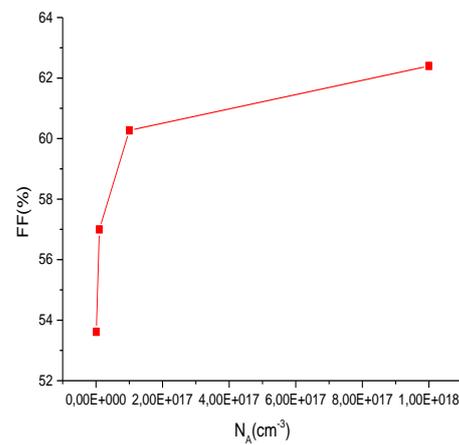
المردود بدلالة  $N_A$



جهد الدارة المفتوحة بدلالة  $N_A$



تيار الدارة القصيرة بدلالة  $N_A$



معامل الشكل بدلالة  $N_A$

### الشكل 32.III : تركيز الشحنات الاخذة لطبقة الامتصاص CIGS

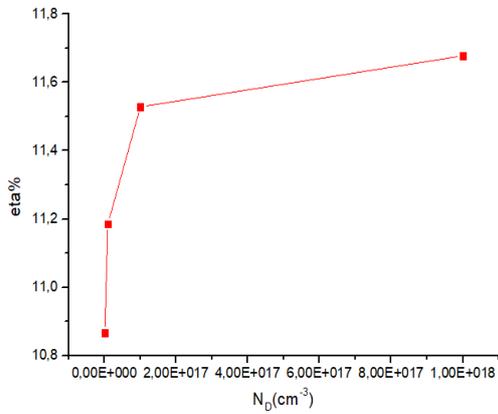
من خلال تحليل البيانات، يمكننا ملاحظة بعض الاتجاهات والمعلومات المهمة حول أداء الخلية الشمسية [بناءً على معلمات  $V_{oc}$  و  $FF$  و  $\eta$  و  $J_{sc}$  وتركيز  $N_A$ ].

أولاً، نجد أن قيم معاملات  $V_{co}$  و  $FF$  و  $\eta$  تزداد مع زيادة تركيز  $N_A$ . هذا يشير إلى أن زيادة تركيز المادة الاخذة ( $N_A$ ) في الخلية الشمسية يسهم في زيادة جهد الدارة المفتوحة ( $V_{co}$ ) ومعامل الشكل ( $FF$ ) وكفاءة الخلية ( $\eta$ ) وهذا يعني أنه بزيادة تركيز  $N_A$  ، يمكن تحقيق أداء أفضل للخلية الشمسية وزيادة كفاءتها.

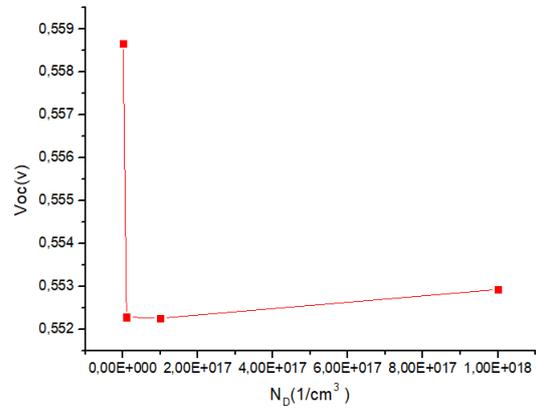
على الجانب الآخر، نرى أن تيار الدارة القصيرة ( $J_{sc}$ ) ينخفض عندما يزداد تركيز  $N_A$ . هذا يعني أن زيادة تركيز المادة الاخذة قد يؤدي إلى تقليل كمية التيار الناتج عن الخلية الشمسية في حالة الدارة القصيرة.

### 5.5.III. تأثير كثافة التطعيم $N_D$ في طبقة CdS :

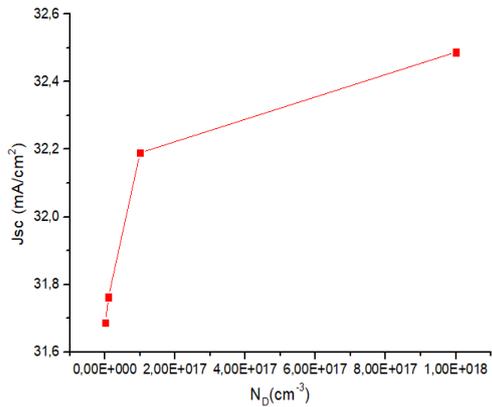
في هذا الجزء قمنا بتثبيت كامل المعلمات المرفقة في الجدول أعلاه و اقتصرنا دراستنا فقط على تغيير كثافة تركيز الشحنات المانحة لطبقة CdS حيث تم تغيير القيم من ( $10^{17}$  الى  $10^{18}$ ) بعد المحاكاة تحصلنا على البيانات التالية :



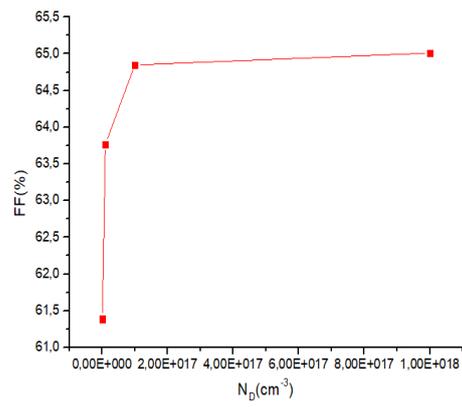
المردود بدلالة  $N_D$



جهد الدارة المفتوحة بدلالة  $N_D$



تيار الدارة القصيرة بدلالة  $N_D$



معامل الشكل بدلالة  $N_D$

### الشكل 33.III. بيانات محاكاة تركيز المانحات للطبقة CdS

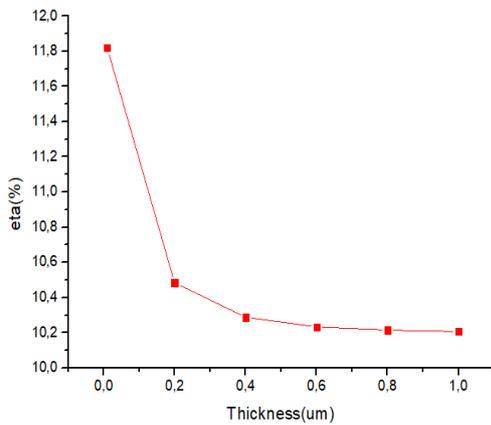
نلاحظ أن قيم الخواص  $V_{sc}$  و  $FF$  و  $\eta$  تزداد كلما زاد التركيز  $N_D$  هذا يشير إلى أن زيادة تركيز المادة المانحة ( $N_D$ ) في الخلية الشمسية يساهم في زيادة جهد الدارة المقصورة ( $V_{sc}$ ) ومعامل الشكل ( $FF$ ) وكفاءة الخلية ( $\eta$ ) وهذا يعني أنه بزيادة تركيز  $N_A$ ، يمكن تحقيق أداء أفضل للخلية الشمسية وزيادة كفاءتها، على الجانب الآخر، نرى أن جهد

الدارة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) ينخفض عندما يزداد تركيز  $N_D$  هذا يعني أن زيادة تركيز المادة الأخذة قد يؤدي إلى تقليل جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية.

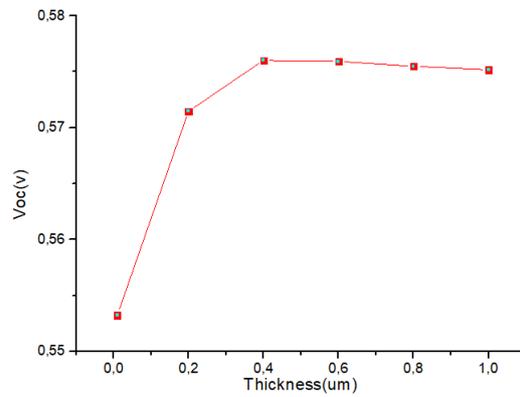
بناءً على البيانات المقدمة، يمكن اعتبار زيادة تركيز  $N_D$  كوسيلة لتحسين جهد الدارة المقصورة ومعامل الشكل وكفاءة الخلية الشمسية، ولكنه قد يترافق مع انخفاض في جهد الدارة المفتوحة. لذا، ينبغي توازن هذه العوامل واختيار التركيز المثالي لتحقيق أداء مثالي للخلية الشمسية.

### 6.5.III. تأثير سمك طبقة CdS على أداء الخلية الشمسية: على النحو التالي:

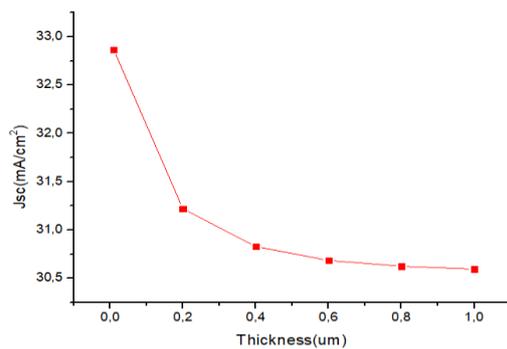
في هذا الجزء قمنا بتثبيت كامل المعلمات المرفقة في الجدول أعلاه و اقتصرنا على تغيير كثافة تركيز الشحنات المانحة لطبقة CdS حيث تم تغيير القيم من ( $10^{17}$  الى  $10^{18}$ ) بعد المحاكاة تحصلنا على البيانات التالية :



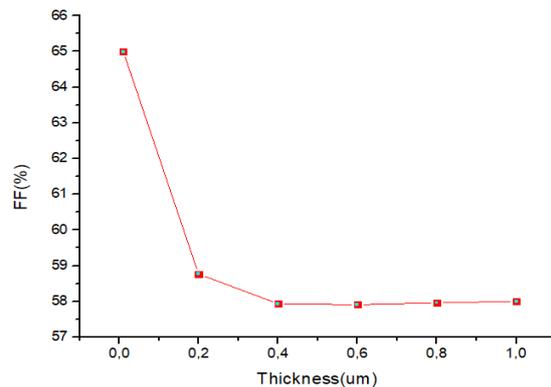
المردود بدلالة السمك



جهد الدارة المفتوحة بدلالة السمك



تيار الدارة القصيرة بدلالة السمك



معامل الشكل بدلالة السمك

### الشكل 34.III. بيانات محاكاة سمك طبقة CdS

تشير تحليلات منحنيات الكفاءة ومعامل الشكل والتيار الدارة القصير إلى أنه عند زيادة سمك الطبقة الوسيطة، يتغير أداء الخلية بشكل تدريجي وينخفض تدريجيًا، بينما جهد الدائرة المفتوحة يتناسب طرديًا مع سمك الطبقة الوسيطة.

بشكل عام، يمكن أن تحقق قيم مثيرة للاهتمام عند استخدام سمك طبقة الوسيطة في نطاق معين. ووفقاً للتحليلات، تم حصرها في نطاق سمك الوسيطة المتراوح بين 10 و1000 نانومتر.

بالتالي يمكننا استنتاج أن سمك طبقة CdS يلعب دوراً هاماً في تحسين أداء الخلية الشمسية، لذلك، ينبغي دراسة واختيار سمك الوسيطة المثلى لتحقيق الأداء المطلوب في الخلية الشمسية.

### 6.III. النتيجة :

من خلال دراستنا لخلية (CIGS/CdS/ZnO) حيث قمنا بمحاكاة بعض الخصائص و المتمثلة في سمك الطبقة الماصة CIGS وتركيز الطبقة المانحة  $N_A$  وكذلك سمك الطبقة CdS وتركيزها  $N_D$  يمكننا الحصول على القيم التالية و التي تتوافق مع أعلى قيم للمردود في شروط هذه الدراسة و التي تحصلنا عليها من خلال قراءة البيانات المستخرجة من المحاكاة .

#### الجدول ( 02.III ) : البيانات المستخرجة من المحاكاة

بعد المحاكاة		قبل المحاكاة		
CdS	CIGS	CdS	CIGS	الطبقة
0.1	6	0.1	1	السمك (um)
$N_D=10^{18}$	$N_A=10^{16}$	$N_D=10^{15}$	$N_A=5.5 \times 10^{15}$	التركيز ( $cm^{-3}$ )

كما هو موضح في الجدول فان قيم السمك و التركيز الناتجة بعد المحاكاة هي القيم التي توافق المردود الاعلى لذلك سوف نقوم بإعادة محاكاة الخاصية I-V في برنامج scaps 1-D بالقيم الجديدة و استخراج قيم المردود .

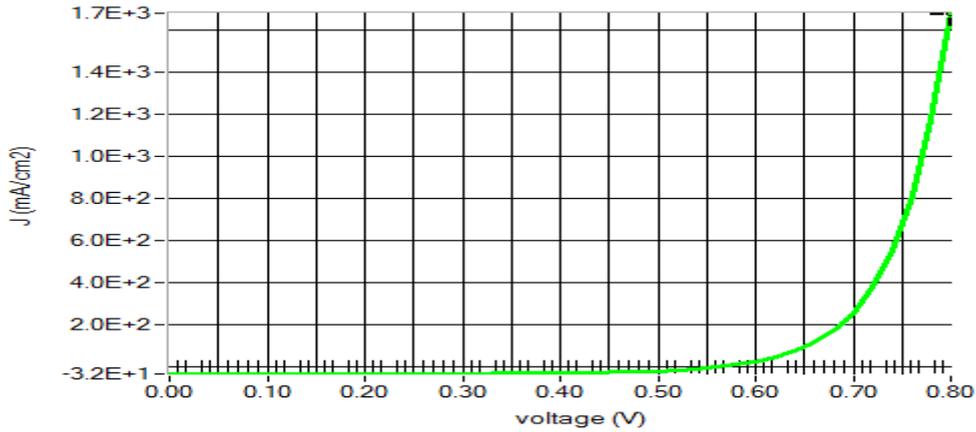
#### 1.6.III. نتائج محاكاة الخاصية I-V قبل و بعد المحاكاة :

يمكن تلخيص النتائج في الجدول التالي :

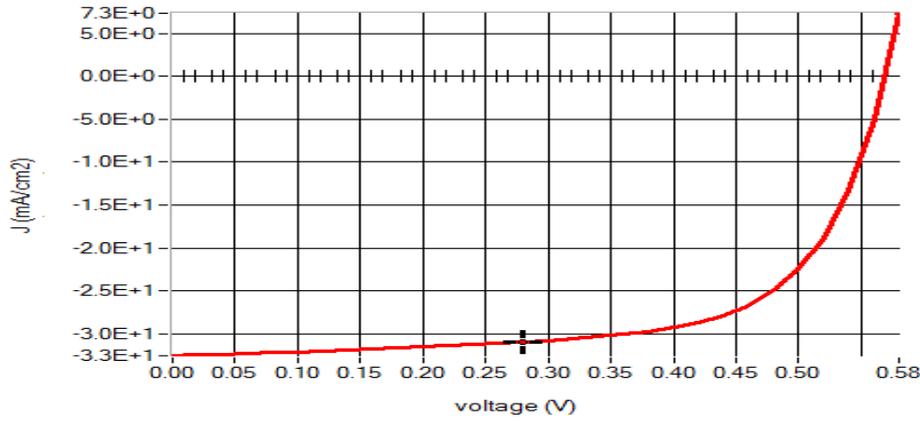
#### الجدول ( 03.III ) : نتائج محاكاة الخاصية I-V

قبل المحاكاة			
Voc = 0.5587 V	Jsc= 31.686491 (mA/cm <sup>2</sup> )	FF= 61.39%	المردود % 10.87
بعد المحاكاة			
Voc =0.5690 V	Jsc= 32.554571(mA/cm <sup>2</sup> )	FF= 66.49%	المردود = 12.32 %

بعد الحصول على هذه النتائج نقوم برسم منحنيات الخاصية I-V قبل و بعد المحاكاة :



الشكل 35.III : الخاصية I-V قبل المحاكاة



الشكل 36.III : الخاصية I-V بعد المحاكاة

ومن خلال هذه القيم في الجدول و البيانات نلاحظ أن كفاءة الخلية تمت زيادتها من 10.87 % إلى 12.32 % مما يؤدي في النهاية إلى أن المحاكاة التي قمنا بها أعطت نتيجة في تطوير المردود و بهذا نكون قد قمنا بدراسة فعالة ذات نتائج مقبولة .

#### الخاتمة :

هذا الفصل مخصص لدراسة ومحاكاة خلية شمسية بنية CIGS، حيث يتم محاكاة الهيكل باستخدام مادة CdS و ZnO كطبقة حاجز. بعد جمع المعلومات والبحث في المصادر الثانوية، قمنا بمحاكاة هيكل الخلية الشمسية CIGS باستخدام برنامج SCAPS للمحاكاة.

هدف هذا الفصل هو دراسة ومحاكاة أداء خلية شمسية CIGS بهدف تحسينها قدر الإمكان، لقد توصلنا إلى أن الهيكل المثلى يجب أن يحتوي على طبقة نافذة سمكها 0.100  $\mu\text{m}$  من و (CdS) وتركيز  $N_D=10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ، وطبقة امتصاص تحتوي على CIGS سمكها 6  $\mu\text{m}$  و تركيز  $N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$  .

## المراجع

- [1] *Burgelman, M., Decock, K., Niemegeers, A., Verschraegen, J., & Degrave, S. SCAPS manual. (2016).*
- [2] *Joseph Mebelso, Elampari Krishnamoorthy ; “Numerical Simulation for Optimal Thickness Combination of CdS/ZnS Dual Buffer Layer CuInGaSe2 Solar Cell Using SCAPS 1D”, Article in Indian Journal of Science and Technology. February 2020*

---

# الخاتمة العامة

## الخاتمة عامة

في هذا العمل، قمنا بمحاكاة خلية شمسية من الطبقات الرقيقة CIGS حيث قدمنا في الجانب الأول مفاهيم عامة على الطاقة الشمسية والإشعاع الشمسي مرورا بالخلايا الشمسية ونبدأ العمل مع إلقاء نظرة حول أنصاف النواقل وكذلك مختلف الأجيال من الجيل الأول إلى الثاني والثالث، حيث خصصنا دراستها حول الجيل الثاني، الذي يتكون من الطبقات الرقيقة CIGS وهذه الأخيرة هي محور دراستنا حيث تطرقنا لها باستفاضة على تعريفها ومميزات وأهميتها في مجال لطاقات الشمسية المتجددة.

أما في الجانب الثاني من هذا العمل الذي يمثل الجانب التطبيقي قمنا بمحاكاة، خلية CIGS CdS/ZnO بواسطة برنامج SCAPS\_1D الذي يتيح لنا إمكانية التحكم في خصائص طبقات هذه الخلية وإعطاء نتائج قريبة من الواقع حيث اعتمدنا في محاكاة الخلية على مراقبة تطور المردود بدلالة سمك الطبقة الماصة (CIGS)، تركيز الأخذات ( $N_A$ )، سمك طبقة CdS وكذلك تركيز المانحات  $N_D$  حيث أظهرت نتائج هذه المحاكاة أنه بزيادة سمك طبقة CIGS يزداد المردود وبزيادة تركيز  $N_D$  يزداد المردود حيث لاحظنا تطور سمك (من 1 um إلى 6) وتطور  $N_D$  من  $10^{15}$  إلى  $10^{18}$  زاد في تحسين كفاءة الخلية فعند إدخال القيم الأولى للخلية، أعطت المحاكاة 10,87% وبعد إدخال نتائج المحاكاة، في البرنامج وحساب المردود لاحظنا أن قيمته زادت وارتفعت إلى 12,32% وهذا يثبت فعالية برنامج SCAPS\_1D في محاكاة، الخلايا الضوئية وما يؤكد أيضا نجاح عملنا هذا والمتمثل في تحصيل كفاءة الخلية كما ذكرنا سابقا.

وفي الأخير تبقى هذه الدراسة مجرد جزء صغير جدا من مجال كبير وواسع ومحل اهتمام الباحثين في عصرنا هذا الذي يتجه إلى استخدام الطاقات المتجددة ومصادر الطاقة الصديقة للبيئة.

---

## الملخص

في السياق العام للاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية ، الرجوع إلى الطاقة المتجددة وبشكل خاص الطاقة الشمسية الكهروضوئية أصبح أقوى، ولهذا تطوير جديد من الخلايا الضوئية القائمة على أساس  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  تبدو واعدة في الواقع حيث فاق أداء هذه الخلايا 12% في السنوات الأخيرة ، وبالتالي فإن عملنا يتكون من نمذجة خلية شمسية القائمة على  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  والهدف هو تحسين المعلمات الفيزيائية (سمك والشوائب) من أجل تحقيق أفضل مردود ممكن.

يعد برنامج SCAPS-1D أداة عملية ويوصى به لهذه الدراسة.

**الكلمات المفتاحية:** الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة، الطبقة الماصة CIGS، محاكاة، SCAPS-1d

## Résumé

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  semble prometteur. En effet, le rendement de ces cellules a dépassé les 12% ces dernières années. Ainsi notre travail consiste à la modélisation d'une cellule solaire à base de  $\text{Cu(In, Ga)Se}_2$  (CIGS) Le but est d'optimiser les paramètres physiques (dopage et épaisseur) afin d'aboutir au meilleur rendement de conversion photovoltaïque possible.

Le logiciel SCAPS-1D est un outil très pratique et il est recommandé pour cette étude.

**Key Word:** Thin-film solar cells, CIGS absorbent layer, simulated, SCAPS-1d.