

جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم الدقيقة علوم الطبيعة والحياة
قسم علوم المادة



مذكرة ماستر

ميدان علوم المادة
الفرع فيزياء
تخصص فيزياء الطاقات والطاقات المتجددة

رقم: أدخل رقم تسلسل المذكرة

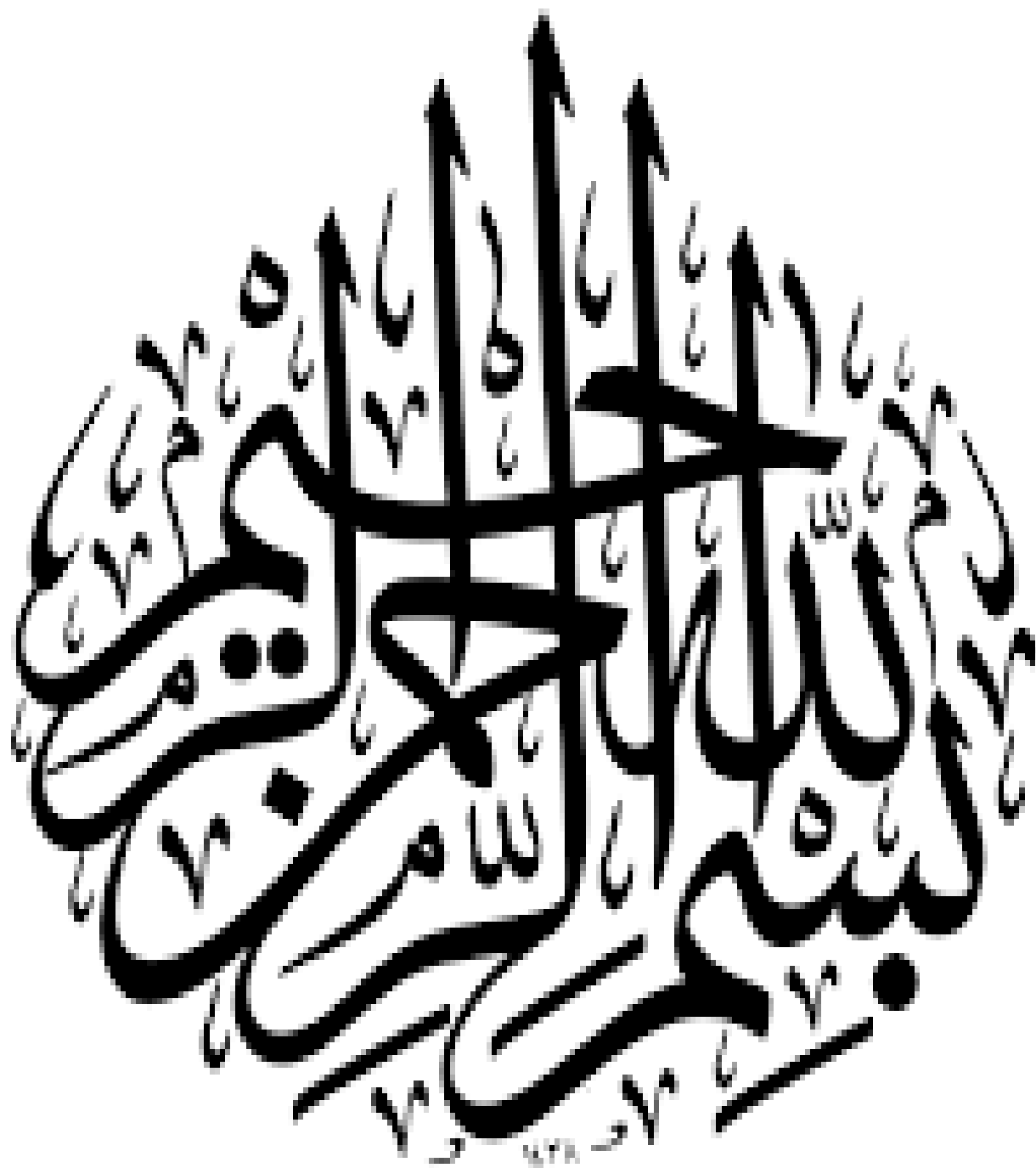
إعداد الطالب:
ز عبوبي نعيمة
يوم: //

محاكاة عددية لخلايا شمسية ثنائية الوصلة GaAs/GaSb

لجنة المناقشة:

رئيس	جامعة محمد خيضر - بسكرة	MCB	عليان أيدير
مؤطر	جامعة محمد خيضر - بسكرة	MCB	منصر منصور
مناقش	جامعة محمد خيضر - بسكرة	MCB	بن صالح نجوى

السنة الجامعية: 2025/2024



شكر وعرفان

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات و الحمد لله حمدا كثيرا مباركا طيبا على نعمه و فضله

و السلام على نبينا محمد صلى الله عليه و سلم

نتوجه بخالص الشكر و التقدير و الإمتنان العميق للأستاذة منصر

منصورة لإشرافها على هذه المذكرة و على جميل صبرها و توجيهاتها

القيمة. لدعمها و ثقتها التي شرفتني بها أثناء هذه الفترة ،لقد سعدت جدا

بالتعامل معها كانت فعلا تجربة جد رائعة.

دون أن أنسى أعضاء لجنة المناقشة

و لا يفوتنا أن نتوجه بالشكر الجزيل إلى كل أستاذ علمنا

حرفا و سعى لإنارة دربنا بالعلم منذ أول حرف تعلمناه إلى

غاية يومنا هذا.

إهداء

الحمد لله حمداً كثيراً، وشكراً يليق بجلاله، على ما منَّ به من بداية موفقة وخاتمة مباركة. ﴿وَقُلْ رَبِّ أَدْخِلْنِي مُدْخَلَ صِدْقٍ وَأَخْرِجْنِي مُخْرَجَ صِدْقٍ وَاجْعَلْ لِي مِنْ لَدُنْكَ سُلْطَانًا نَصِيرًا﴾

لم تكن الرحلة يسيرة ، لكن الحمد لله الذي سهّل البداية، وبلغ بي النهاية بفضلته وكرمه . أهدي هذا الإنجاز أولاً إلى نفسي، عرفاناً بكل لحظة صبرٍ ومثابرة، ولكل من سار معي في هذه المسيرة وساندني ، فلهم مني شكرٌ لا يُقاس، للساھر الذي لم يهنأ بنومه لأجلي، إلى من أثقلهم تعبي ، وآلمهم وأتعبهم تقصيري، واحتملوا كل ذلك حباً لي...

إلى دليلي في الحياة، **زوجي**.

وإلى زهور بستاني بناتي . طبيبة روعي **هديل** و أستاذة حياتي **هناء** ونبض قلبي هاجر

وإلى نور بيتي ابني وكتكوتي الصغير **معتز بالله** .

وإلى سبب وجودي **أمي** . وإلى طيف **أبي** الغالي، رحمه الله وإلى من كانت لي ظلًا وسندًا، إلى الصديقة **بوزيدي سميحة** ، وإلى كل الوجوه الطيبة الذين صادفتهم في دربي أستاذة الجامعة كل بإسمه، أهدي هذا النجاح .

فهرس المحتويات

الصفحة	العنوان
v	قائمة الأشكال
VII	قائمة الجداول
VIII	قائمة الرموز
1	مقدمة عامة
3	المراجع
4	الفصل الأول: مفاهيم حول الخلايا الشمسية
6	1.1 مقدمة
6	2.1 الإشعاع الشمسي
6	1.2.1 الشمس
7	2.2.1 طيف الشمس
9	3.2.1 كتلة الهواء
12	3.1 أنصاف النواقل
13	1.3.1 أنواع أنصاف النواقل
13	1.1.3.1 أنصاف النواقل الجوهريّة
13	2.1.3.1 أنصاف النواقل المطعمة
13	1.2.1.3.1 النوع n
13	2.2.1.3.1 النوع p
15	2.3.1 تفاعل الإشعاع مع أنصاف النواقل
15	1.2.3.1 التوليد
16	2.2.3.1 الإلتحام

17	1.2.2.3.1 إلتحام مباشر
18	2.2.2.3.1 إلتحام غير مباشر
19	3.2.2.3.1 إلتحام Auger
21	4.2.2.3.1 إلتحام سطحي
21	4.1 الوصلة PN
22	5.1 الخلايا الشمسية
22	1.5.1 مبدأ عمل الخلايا الشمسية
24	2.5.1 الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية
24	1.2.5.1 خصائص التيار التيار الكهربائي والمخطط المكافئ للخلية الشمسية
28	2.2.5.1 قيم الخلية الشمسية
28	1.2.2.5.1 جهد الدارة المفتوحة Voc
29	2.2.2.5.1 تيار الدارة القصيرة Isc
29	3.2.2.5.1 الإستطاعة الأعظمية Pmax
30	4.2.2.5.1 عامل الشكل FF
30	5.2.2.5.1 مردود التحويل η
31	6.2.2.5.1 الإستجابة الطيفية للخلية الكهروضوئية RC
32	6.1 الخلية ثنائية الوصلة
33	المراجع
36	الفصل الثاني: التعرف على برنامج سيلفاكو أطلس (SILVACO-ATLAS)
37	1.1 مقدمة
37	2.1 تعريف SILVACO
38	3.1 المداخل و المخرج في SILVACO-ATLAS

38	1.3.11 مدخلات برنامج ATLAS
38	2.3.11 مخرجات برنامج ATLAS
40	DeckBuild 4.11
41	Tonyplot.5.11
41	6.11 بنية الإدخال في SILVACO-ATLAS
42	7.11 مخطط محاكاة الخلية الشمسية بـ SILVACO-ATLAS
42	1.7.11 تحديد البنية
42	1.1.7.11 الشبكة (Mesh)
43	11.7.2.1 المناطق والمواد (ATERIALM and REGIONS)
44	11.7.3.1 القطب الكهربائي (ELECTRODE)
45	11.7.4.1 التطعيم (DOPAGE)
46	11.7.2.2 المواد و النماذج المستعملة
46	1.2.7.11 خصائص المواد
47	2.2.7.11 الاتصال
47	3.2.7.11 الواجهة
47	4.2.7.11 الضوء
48	5.2.7.11 النماذج
48	3.7.11 الطرق الرقمية للحل
49	GUMMEL 1.3.7.11
49	NEWTON 2.3.7.11
49	BLOCK 3.3.7.11
49	4.7.11 الطرق الرقمية للحل

الصفحة	العنوان
50	4.7.11 عرض النتائج
51	المراجع
53	الفصل الثالث: المحاكاة والنتائج
54	1.111 المقدمة
54	2.111 أنصاف نواقل $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ و GaSb
54	2.111 1. أنصاف نواقل $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
55	2.111 2. نصف ناقل GaSb
56	2.111 3. خصائص المواد المستخدمة في المحاكاة
57	3.111 3. الخلية الشمسية GaAs
60	4.111 4. الخلية الشمسية GaSb
63	4.111 4. الخلية الشمسية ثنائية الوصلة $\text{GaAs} / \text{GaSb}$
66	المراجع
67	الخاتمة

قائمة الاشكال

الصفحة

الشكل

6	الشكل 1.1: أبعاد الشمس و الأرض و المسافة بينهما
8	الشكل 2.1: الطيف الكهرومغناطيسي
9	الشكل 3.1: الطيف الكهرومغناطيسي للشمس
10	الشكل 4.1: تعريف كتلة الهواء
12	الشكل 5.1: نطاقات الطاقة التوصيلية والتكافؤية في المواد العوازل وأنصاف النواقل والنواقل .
14	الشكل 2.1: أنصاف النواقل من النوع n
14	الشكل 7.1: أنصاف النواقل من النوع p
16	الشكل 8.1: أنواع الالتحام
18	الشكل 9.1: مخطط وصفي لعملية إعادة الالتحام من النوع الإشعاعي
19	الشكل 10.1: مراكز الالتحام.
19	الشكل 11.1: إعادة الالتحام من نوع SRH
20	الشكل 12.1: مخطط وصفي لعملية إعادة الالتحام من نوع Auger.
22	الشكل 13.1: الوصلة PN
23	الشكل 14.1: يمينا مخطط الحزم ،يسارا بنية الخلية الشمسية
24	الشكل 15.1: مخطط مبسط لمبدأ عمل خلية شمسية
25	الشكل 16.1: خصائص التيار الكهربائي في حالة الظلام وفي حالة الضوء لخلية كهروضوئية
26	الشكل 17.1: المنحنى المميز للجهد - التيار للخلية الشمسية
27	الشكل 18.1: مخطط كهربائي حقيقي لخلية كهروضوئية
32	الشكل 19.1: مخطط توضيحي لمبدأ تشغيل خلية متعددة الوصلات

- 38 الشكل 1.ii: بيئة تصنيع الرقاقة الافتراضي
- 39 الشكل 2.ii: مداخل ومخارج ATLA
- 40 الشكل 3.ii: يوضح واجهة Deckbuild
- 41 الشكل 4.ii: النافذة الأساسية TonyPlot
- 42 الشكل 5.ii: مخطط إنسيابي لمراحل بناء ATLAS.
- 43 الشكل 6.ii: شبكة لبنة خلية بواسطة ATLAS.
- 44 الشكل 7.ii: تعريف المناطق بواسطة ATLAS.
- 45 الشكل 8.ii: تعريف الأقطاب الكهربائية بواسطة ATLAS.
- 46 الشكل 2.ii: توزيع التطعيم في بنية بواسطة ATLAS.
- 54 الشكل 1.iii: قرينة انكسار n و معامل انطفاء k ل $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
- 55 الشكل 2.iii: البنية البلورية ل GaSb
- 56 الشكل 3.iii: قرينة انكسار n و معامل انطفاء k ل GaSb
- 58 الشكل 4.iii: بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS
- 58 الشكل 5.iii: بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS
- 59 الشكل 6.iii: منحنى الخاصية جهد تيار ($I-V$) للخلية تحت إضاءة AMO
- 61 الشكل 7.iii: بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS
- 61 الشكل 8.iii: بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS
- 62 الشكل 9.iii: منحنى الخاصية جهد تيار ($J-V$) للخلية تحت إضاءة AMO
- 63 الشكل 10.iii: بنية الخلية ثنائية الوصلة
- 64 الشكل 11.iii: بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS
- 64 الشكل 12.iii: بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS
- 65 الشكل 13.iii: منحنى الخاصية جهد تيار ($J-V$) للخلية تحت إضاءة AMO

قائمة الجداول

الصفحة

الجدول

8	الجدول 1.1: طول الموجات التقريبي لمختلف الألوان في الفراغ
11	الجدول 2.1: مختلف قيم كتلة الهواء مع تغير موضع الشمس
56	الجدول 1.III: خواص المواد المدروسة
57	الجدول 2.III: سمك وتطعيم مختلف طبقات الخلية GaAs
59	الجدول 3.III: قيم وسائط الخروج الخلية GaAs
60	الجدول 4.III: سمك وتطعيم مختلف طبقات الخلية GaSb
62	الجدول 5.III: قيم وسائط الخروج الخلية GaSb
65	الجدول 6.III: قيم وسائط الخروج الخلية GaAs/GaSb

قائمة الرموز

الرمز	المعنى
RC	الأشعة الكونية
$R\gamma$	الأشعة غاما
RX	الأشعة الالسينية
UV	الأشعة فوق البنفسجية
LV	الأشعة المرئية
IR	الأشعة تحت الحمراء
Λ	طول الموجة
C	سرعة الضوء
H	ثابت بلانك
E	الطاقة
I_0	الثبت الشمسي
I	تصحیح الثابت الشمسي
I_{ph}	تيار كهروضوئي
I_d	تيار مار في ديود
I_{sh}	تيار مار في المقاومة على التوازي
R_s	مقاومة المواد التسلسلية
R_{sh}	مقاومة المواد التفرعية
R	معامل الإنعكاس
G_x	معدل توليد الشحنات
n_i	التركيز الذاتي
E_g	نطاق الطاقة
I_s	تيار الإشباع
α	معامل الإمتصاص
ν	تردد الموجة
N	تركيز العلكترونات
P	تركيز الثقوب
C_n	معامل إرتباط أوجي للإلكترونات
C_p	معامل إرتباط أوجي للثقوب
DC	تيار مستمر
AC	تيار متناوب

الرمز	المعنى
D	السمك
I_{sc}	تيار الدارة القصيرة
V_{oc}	جهد الدارة المفتوحة
V_{th}	التوتر الحراري
I_{obc}	تيار الإظلام
I_{max}	التيار الأعظمي
V_{max}	الجهد الأعظمي
P_{max}	الإستطاعة الأعظمية
FF	معامل الشكل
P_{in}	الإستطاعة الواردة
η	مردود التحويل الطاقوي
RS	الإستجابة الطيفية
EQE	المردود الكمي الخارجي
σ_n	المقطع الفعال لإقتناص الإلكترونات
σ_p	المقطع الفعال لإقتناص الثقوب
E_t	الإستجابة الطيفية
N_t	المردود الكمي الخارجي

المقدمة العامة

المقدمة العامة

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم الطاقات المتجددة ، و تعتبر من أفضل الطاقات المستخدمة و أكثرها شيوعا حيث تتضمن تقنية الخلايا الفولطو ضوئية والتي تقوم بتوليد الطاقة الكهربائية بشكل مباشر من الإشعاع الشمسي و تحويلها إلى تيار عن طريق استخدام مواد شبه موصلة مصنوعة من السيليكون أحادي أو متعدد البلورات. يتم في العادة القيام بعملية نمذجة للخلايا الفولطوضوئية ،أي تمثيل سلوكها من خلال معادلات رياضية والتي تعطي تيار الخلية بدلالة جهدها وتُعرف بالخاصية تيار جهد أو الخاصية المميزة للخلية[1].

إن أول من اكتشف ظاهرة تحويل الضوء إلى كهرباء هو العالم الفرنسي Becherel Edmonde عام 1839 [2.1] ، وذلك عند تسليط الضوء على أقطاب من البلاتين المغطاة بكلوريد الفضة والمغموسة في محلول حمضي.

إن التوجه نحو تطوير تصنيع هذا النوع من الخلايا من شأنه ان يساهم وبشكل كبير في تخفيض تكاليف إنتاج الكهرباء ، وذلك من خلال الجمع بين تكنولوجيا الطبقات الرقيقة والمردود العالي. لقد أصبحت المحاكاة الرقمية الآن أداة أساسية للتنبؤ وتحديد الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد. بفضل قدرتها على معالجة المشاكل التي كان من الصعب حلها في كثير من الأحيان، وقدرتها على التنبؤ بخصائص المواد الجديدة وحتى المواد الجديدة التي تم تأكيدها لاحقاً من خلال القياسات التجريبية،تمكنت المحاكاة من استبدال التجربة عندما أصبحت الأخيرة مكلفة للغاية أو حتى غير عملية في المختبرات .[3] الهدف من هذا العمل هو استخدام برنامج SILVACO-ATLAS للمقارنة بين خصائص خلية شمسية من نوع GaAs و خلية شمسية مزدوجة الوصلة (GaAs / GaSb)

تنقسم هذه الرسالة إلى ثلاثة فصول رئيسية، بالإضافة إلى مقدمة عامة وخاتمة عامة.

• يقدم الفصل الأول المفاهيم الأساسية حول الخلايا الشمسية.

• ويقدم الفصل الثاني المحاكاة العددية للخلية الشمسية بواسطة SILVACO-ATLAS.

• ويعرض الفصل الثالث مناقشة وتحليل نتائج المحاكاة .

المراجع

- [1] عائشة عويدات احمودة، هدى عبد الحميد، نمذجة و محاكاة الخلايا الفولتوضوئية باستخدام ما طلاب، قسم الفيزياء، خريف: (2016-2017).
- [2] M. Lee and G. Hwang, Prospect and strategic implications of global solar industry, Korea Development Bank (KDB) Research Institute (2011).
- [3] Y.Marouf."Modélisation des cellules solaires inG_a N en utilisant atlas silvaco "Mémoire magistère .université Mohamed kheider– Biskra 2013.

الفصل الأول

مفاهيم حول الخلايا الشمسية

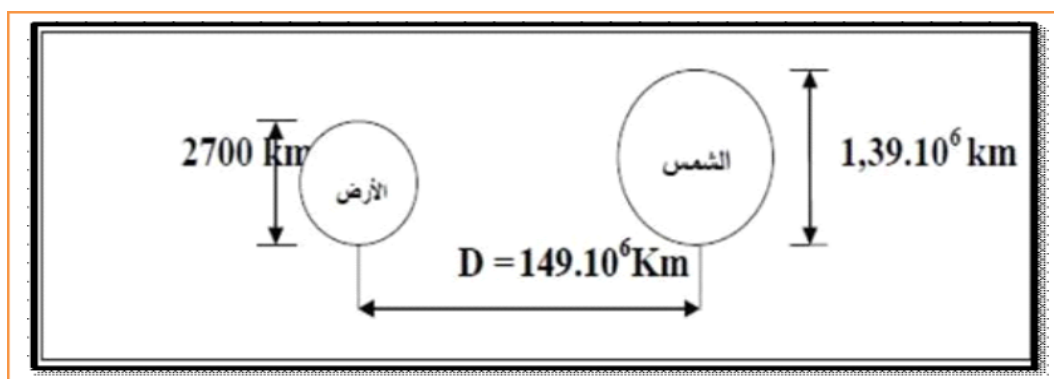
1.1 مقدمة:

في هذا الفصل ، سوف نقدم بعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بالخلايا الشمسية و مبدأ عملها ، كما سنتطرق إلى ذكر . ارتباطها في المواد النصف ناقلة، ثم نتطرق إلى شرح مبدأ عمل الخلايا الكهروضوئية وخصائصها بشكل عام خصائص الإشعاع الشمسي، ووصف التحويل الكهروضوئي أثناء دراسة الظواهر الفيزيائية مثل: توليد حاملات الشحنة وإعادة.

1.2 الإشعاع الشمسي:

1.2.1 الشمس:

تعتبر الشمس نجم بعيد من بين العديد من النجوم الأخرى، يبلغ قطرها : 13900000 كلم، أي حوالي 50مرة مقارنة مع قطر الأرض ،وهي تتكون من 80 ٪ من الهيدروجين، 19 ٪ من الهيليوم و 1 ٪ خليط من 100عنصر آخر، وهي مليئة بالغازات الحارقة التي تمثل أكثر من 99.8 % من الكتلة الكلية في النظام الشمسي، وتبلغ درجة الحرارة حوالي 10 آلاف درجة فهرنهايت (5500 درجة مئوية)على السطح وأكثر من 28 مليون درجة فهرنهايت (15.5 مليون درجة مئوية) في مركز الشمس، حيث يحدث في مركز الشمس تفاعلات الاندماج النووي، التي تعمل على تحويل الهيدروجين إلى الهليوم، الذي يولد الطاقة، وتحمل جسيمات الضوء التي تدعى الفوتونات هذه الطاقة من خلال الغلاف الكروي للشمس، إلى الطبقة العليا من الجزء الداخلي للطاقة الشمسية، وهي منطقة الحمل الحراري، وهناك تنقل الطاقة إلى السطح، وفي كل ثانية تضيئ الشمس ما يقدر ب 4 ملايين طن موزعة في شكل اشعاع، وتبلغ سرعة الضوء 3000000 كلم / ثا ،حيث يستغرق وصوله الى الأرض حوالي 8 دقائق [1]



الشكل (1.1): أبعاد الشمس و الأرض و المسافة بينهما [3]

1. 2.2 طيف الإشعاع الشمسي:

تصدر الشمس إشعاعات كهرومغناطيسية تتجزأ إلى أطوال موجية مختلفة، مما ينتج ما يعرف بالطيف الكهرومغناطيسي. يتألف هذا الطيف من إشعاعات متنوعة ذات ألوان متعددة، حيث يحدد تردد الضوء لونه. تتكون هذه الإشعاعات من فوتونات، وهي جسيمات ضوئية تحمل الطاقة، وترتبط طاقتها بتردد الموجة (أو طولها الموجي) وفقاً للعلاقة الفيزيائية التالية [3]:

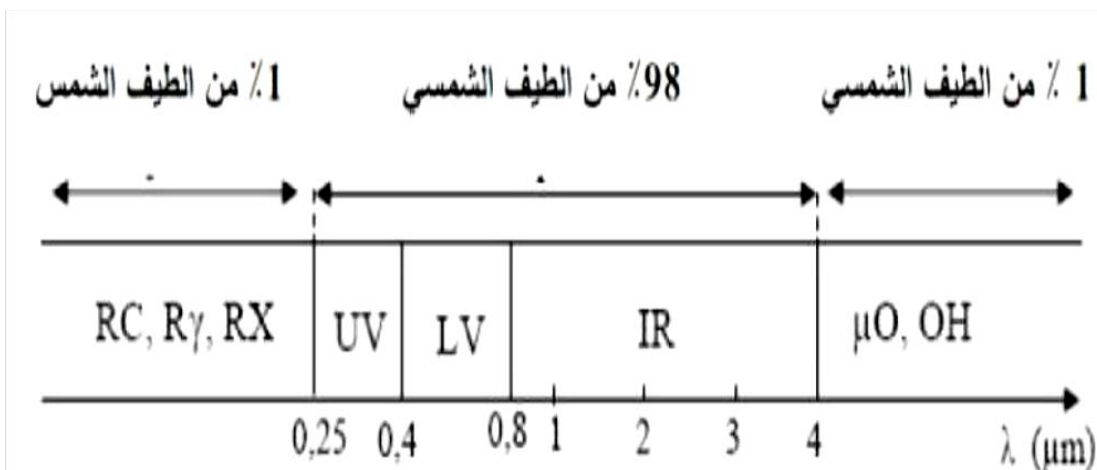
$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-1)$$

حيث:

- E: طاقة الفوتون (جول أو إلكترون فولت)،
- h : ثابت بلانك ($h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$).
- ν : تردد الموجة بوحدة هرتز Hz.
- c : سرعة الضوء في الفراغ بقيمة $3 \times 10^8 \text{ m/s}$,
- λ : طول الموجة بوحدة متر m

توضح هذه المعادلة كيف أن الطاقة تزداد مع التردد وتتناقص مع طول الموجة. وهذا يفسر لماذا تمتلك الأشعة فوق البنفسجية طاقة أعلى مقارنةً بالأشعة تحت الحمراء، فالأولى لها تردد أكبر وطول موجي أقصر.

قدمت هذه العلاقة من قبل العالم لويس دي برولي Brogli عام 1924، حيث افترض أن الضوء يتصرف كجسيمات (فوتونات) تسلك سلوكاً موجياً، يتميز بتردد، اهتزاز، وطول موجة. يوضح الشكل 2.1 الجزء المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي المتعلق بهذه الظاهرة، حيث يتراوح مجال طول الأطوال الموجية ما بين 390 نانومتر (البنفسجي) و 780 نانومتر (الأحمر) [2]



الشكل (2.1): الطيف الكهرومغناطيسي [4]

الجدول 1.1 يبين مجال الاطوال الموجية التقريبي للألوان المرئية[2]

جدول 1.1 طول الموجات التقريبي لمختلف الألوان في الفراغ.

طيف الضوء المرئي	
اللون	طول الموجة (nm)
أحمر	622–780
برتقالي	597–622
أصفر	577–597
أخضر	492–577
أزرق	455–492
بنفسجي	390–455

تنبعث من الشمس الأشعة فوق بنفسجية، والأشعة تحت الحمراء والذي يتخللهما المجال الضوئي المرئي. أكبر

سعة للإشعاع الشمسي توافق طول موجات الضوء المرئي، وقمته توافق طول موجات الضوء الأزرق -الأخضر

[0.25μm–0.4μm] مجال فوق البنفسجي (UV) . تمتلك الفوتونات في هذا المجال طاقة كبيرة تتراوح بين

$$E \in [4.96 \text{ eV} - 3.10 \text{ eV}]$$

[0.4μm-0.8μm] المجال المرئي (LV) تمتلك الفوتونات في هذا المجال طاقة أقل تتراوح بين.

$$E \in [3.11\text{eV} - 1.55\text{eV}]$$

[0.8μm-4μm] المجال تحت الأحمر (IR) تتناقص طاقة الفوتونات في هذا المجال فتكون بين

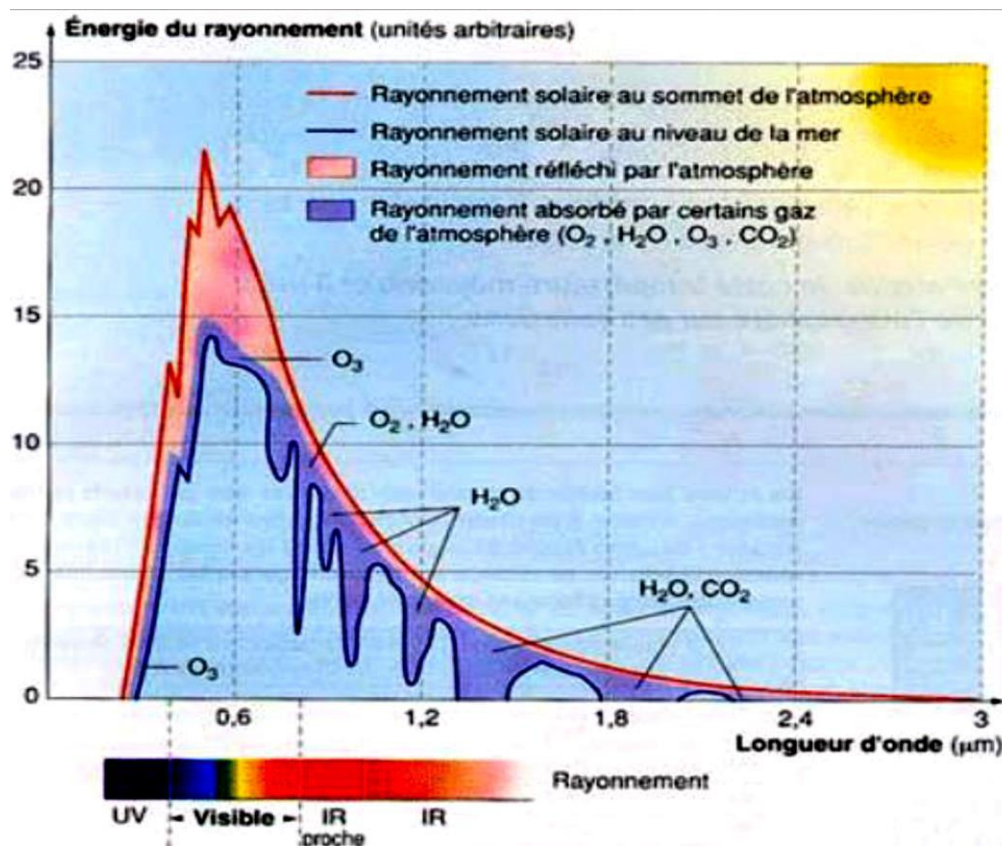
$$E \in [1.55\text{ eV} - 1.31\text{eV}]$$

RX الأشعة السينية $R\gamma$ الأشعة غاما RC. الأشعة الكونية. μO أشعة لميكروويف OH أشعة الراديو [4]

3.2.1 كتلة الهواء:

ان مجال الطيف الكهرومغناطيسي للشمس يتكون من العديد من اطوال الموجات المختلفة، ابتداء من الموجات اللاسلكية موجات الراديو ووصولاً الى موجات الأشعة السينية،

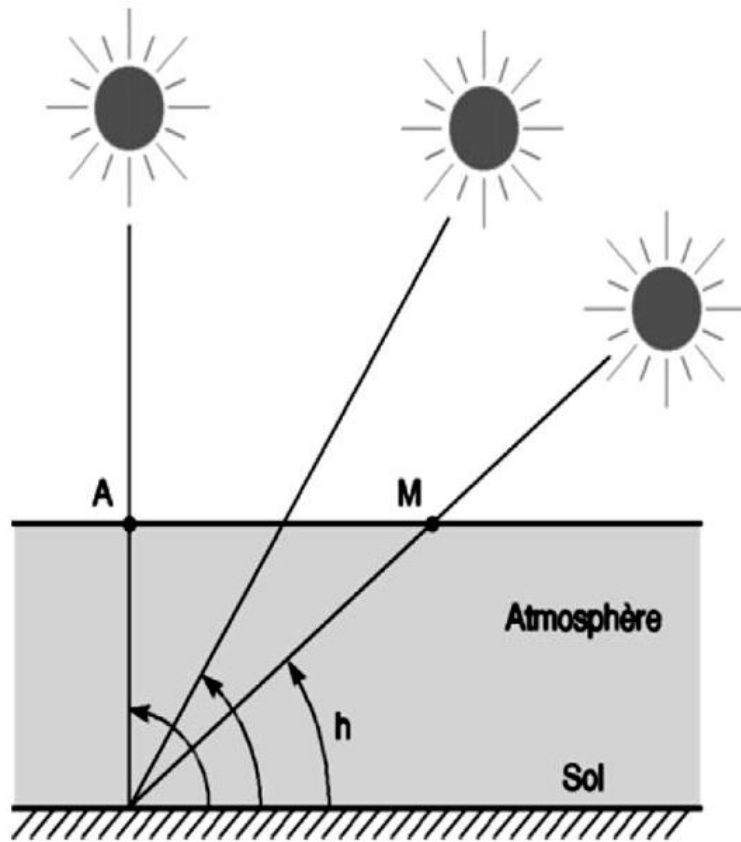
الشكل (3.1) يوضح مجال الطيف الكهرومغناطيسي للشمس [1]



الشكل (3.1): الطيف الكهرومغناطيسي للشمس [1]

إن كثافة أشعة الشمس الساقطة عادة على سطح الأرض تسمى بالثابت الشمسي، هذا الثابت يقدر تقريبا بـ 1.4 كيلوواط/م^2 قبل المرور بالغلاف الجوي، أما بعده فينخفض الى 1 كيلوواط/م^2 ، وذلك بسبب الانعكاسات والإمتصاصات التي يلاقيها هذا الإشعاع مع غازات طبقة الغلاف الجوي،

تُعرف " كتلة الهواء " أو Air Mass (AM) بالإنجليزية، بأنها النسبة بين سُمك الغلاف الجوي الذي يخترقه الإشعاع الشمسي المباشر للوصول إلى سطح الأرض، وسُمك الغلاف الجوي المخترق عند السقوط العمودي للإشعاع على نفس الموقع. وتُعرف أيضاً في بعض المراجع باسم الكتلة الجوية أو $Ma [5]$.



الشكل (4.1) : تعريف كتلة الهواء [5]

يمكن حساب كتلة الهواء عند نقطة مستوى سطح البحر باستخدام العلاقة :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} = Ma \quad (2-1)$$

حيث

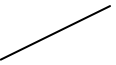
h : تمثل زاوية ارتفاع الشمس فوق الأفق،

OA : هو المسار المباشر للأشعة الشمسية.

بناءً على ذلك، يتم تعريف معاملات كتلة الهواء كما يلي:

- **AM0** : عندما تكون الشمس خارج الغلاف الجوي تمامًا، أي في الفضاء.
 - **AM1** : عندما تكون الشمس عمودية على سطح الأرض.
 - **AM1.5** : عندما تكون زاوية الشمس 45 درجة، وهو الطيف الشمسي المرجعي المستخدم في الاختبارات القياسية للخلايا الشمسية.
 - **AM2** : عندما تكون زاوية الشمس 30 درجة.
- هذه القيم ضرورية في دراسة أداء الخلايا الشمسية، حيث تؤثر كتلة الهواء على كمية الإشعاع الشمسي المتاح والطيف الضوئي الذي يصل إلى الأرض [4] .

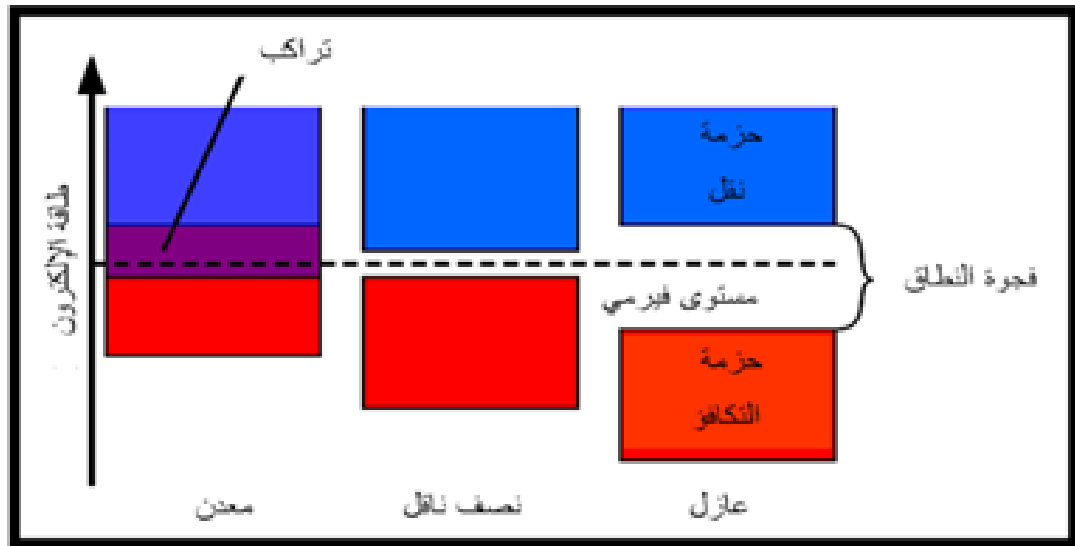
جدول 1. 2: مختلف قيم كتلة الهواء مع تغير موضع الشمس. [1]

وضع الأشعة الشمسية	وضع الشمس	الثابت الشمسي (w/m^2)	كتلة الهواء
خارج مجال الغلاف الجوي		1367	OM0
داخل مجال الغلاف الجوي	90°	925	OM1
داخل مجال الغلاف الجوي	45°	693	OM1.5
داخل مجال الغلاف الجوي	30°	691	OM2

1. 3. أنصاف النواقل:

هناك ثلاث أنواع من المواد وهي العوازل والنواقل وأنصاف النواقل وهي وسيطة بين العوازل و النواقل عند $T=0K$ يتصرف أنصاف النواقل مثل العوازل. ويوصل الكهرباء بمجرد ارتفاع درجة الحرارة لا يمكن أن تتواجد الإلكترونات إلا في نطاقات طاقة محددة جيداً. إذا امتص نصف الناقل كمية كافية من الطاقة في شكل حرارة أو إشعاع، فإن الطاقة المستقبلية سوف تنتقل إلى الذرات وبالتالي تتسبب في إطلاق الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل. يتم إجراء هذا التصنيف بشكل أساسي من خلال فرق الطاقة بين نطاق التوصيل ونطاق التكافؤ، والذي يسمى الفجوة "Eg". [6]

بالنسبة للنواقل، تتداخل نطاقات التكافؤ والتوصيل، وبالنسبة للعوازل، تكون المسافة بين النطاقين عالية جداً، أما بالنسبة لأنصاف النواقل فإن الفرق صغير جداً مما يسمح للإلكترون بالانتقال من مستوى التكافؤ إلى مستوى التوصيل في حالة حصوله على طاقة كافية. [7]. كما هو موضح في الشكل (5. 1) :



الشكل (5.1) : نطاقات الطاقة التوصيلية والتكافؤية في المواد العازلة وأنصاف النواقل

والنواقل. [4]

1. 3. 1. أنواع أنصاف النواقل:

1.1.3.1 أنصاف النواقل الجوهرية:

أنصاف أنصاف النواقل الجوهرية هي مادة نصف ناقلة تكون نقية تماماً ولا تحتوي على تطعيم

2.1.3.1 أنصاف النواقل المطعمة :

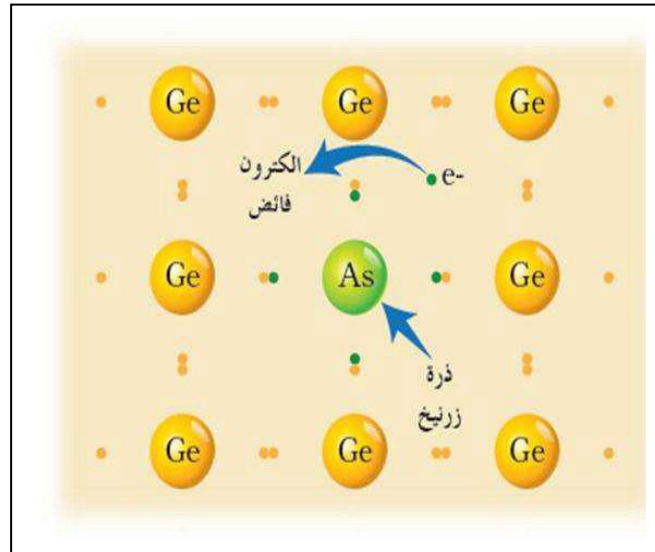
أنصاف النواقل المطعمة هي أنصاف نواقل تم تطعيمها عمداً من أجل تعديل خصائصها الكهربائية. يتم إنشاء أنصاف النواقل عن طريق إضافة ذرات التطعيم إلى أنصاف النواقل الجوهرية. و إن إضافة التطعيم إلى مادة ما يمكن أن يحسن من أدائها ، ويمكن أن تسبب هذه العملية في تغيرات الخصائص الكهربائية حيث يتم استخدام التطعيم للتحكم في عدد الإلكترونات أو الثقوب في مادة معينة ، مما يؤدي إلى إنتاج مواد من النوع p أو النوع n اعتماداً على عدد الثقوب أو عدد الإلكترونات الحرة [8.9]. وكنتيجة لذلك، سنحصل على نوعين من أنصاف النواقل المطعمة:

1.2.1.3.1 النوع n :

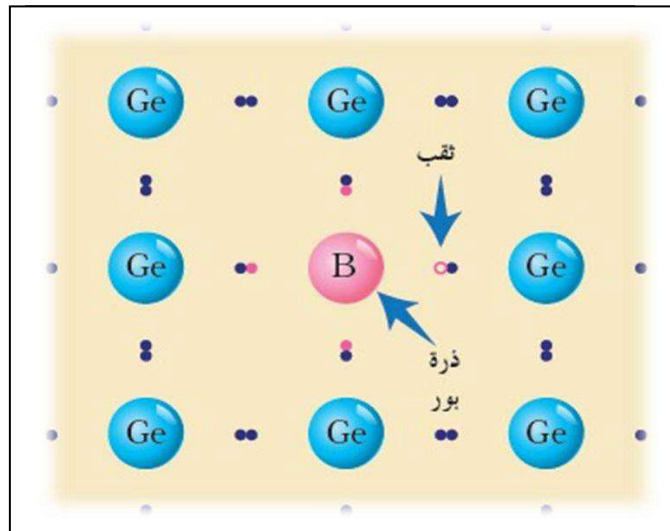
على سبيل المثال ، يتم تطعيم أنصاف النواقل رباعية التكافؤ مثل السيليكون Si أو الجرمانيوم Ge بذرات من عنصر خماسي التكافؤ مثل الفوسفور P ، الزرنيخ As إلخ. هذه الذرات تحتوي على إلكترون خامس إضافي لا يجد رابطة يرتبط بها سيبقى منفرداً مما يؤدي إلى زيادة عدد الإلكترونات الحرة وهي التي تحمل التيار في هذا النوع تكون الإلكترونات هي حاملات الشحنة ، فيقال عنها أنصاف النواقل من النوع n [9]

1.2.1.3.1 النوع p :

يتم تطعيم ذرات أنصاف النواقل بذرات من عنصر ثلاثي التكافؤ مثل البورون B أو الألمنيوم Al ، هذه الذرة لا تستطيع تشبع سوى ثلاث روابط وبالتالي فإن رابطة واحدة لكل ذرة التطعيم تكون مفقودة مما يترك فجوة في البنية البلورية ويجعلها تميل إلى إستقبال الإلكترون لتعويض النقص في هذا النوع تكون الفجوات هي حاملات الشحنة وهي التي تحمل التيار فيقال عنها أنصاف النواقل من النوع p [10]



الشكل (6 .I): أنصاف النواقل من النوع n [3]



الشكل (7.1) : أنصاف النواقل من النوع p [3]

2.3.1 تفاعل الإشعاع مع أنصاف النواقل :

1.2.3.1 التوليد:

يتم إنتاج الإلكترونات و الثقوب من خلال العمليات التي يمكن أن توفر الحد الأدنى من طاقة التوليد E_C لزوج (إلكترون - ثقب)، حيث يقوم الإلكترون أو الثقب مع طاقة حركية كافية بالقفز من نطاق التكافؤ الى نطاق التوصيل وبالتبادل، مما يؤدي الى توليد إلكترون و ثقب. يمكن إجراء نفس العملية لإثارة إلكترون من نطاق التكافؤ الى نطاق التوصيل من خلال إهتزاز الشبكة التي توفر الطاقة او عن طريق امتصاص فوتون [11]

يعتمد امتصاص الضوء في المواد شبه الموصلة على قانون Lambert-Bouguer، والذي يصف كيفية تناقص شدة الضوء أثناء مروره عبر المادة. وفقاً للعلاقة [1]:

$$I(x) = I(1 - R)\exp(-\alpha \cdot x) = I_0\exp(-\alpha \cdot x) \quad (3-1)$$

حيث:

- I_0 : شدة الضوء الساقط .
 - R : معامل الانعكاس، وهو جزء من الطاقة الضوئية التي تنعكس على سطح المادة .
 - α : معامل الامتصاص، ويحدد احتمال امتصاص الفوتونات لكل وحدة طول .
 - x : العمق داخل المادة الذي يمر عبره الضوء .
- عند امتلاك الفوتونات طاقة تفوق طاقة الفجوة النطاقية Band Gap، فإنها تقوم بإثارة الإلكترونات في نطاق التكافؤ ودفعها إلى نطاق التوصيل، مما يؤدي إلى توليد الأزواج (إلكترون - ثقب)، وهو الأساس الفيزيائي لعمل الخلايا الشمسية.
- لحساب معدل توليد الأزواج $G(x)$ ، تستخدم العلاقة:

$$G(X) = \alpha \cdot (1 - R) I_0 e^{-\alpha x} \quad (4.1)$$

هذه العلاقة تظهر أن توليد الأزواج يتأثر بقيم معامل الامتصاص ومعامل الانعكاس إضافة إلى شدة الضوء الساقط، وكلما زادت قيم α ، زاد الامتصاص وارتفع معدل توليد الأزواج في المادة. [1]

2.2.3.1 الإلتحام:

يتم تعريف الإلتحام على أنه الآلية العكسية للتوليد. تشارك فقدان الطاقة تختفي ناقلات الزائدة عن طريق إستعادة توازنها الديناميكي الحراري. يعيد نصف الناقل المضطرب توازنه الديناميكي الحراري من خلاله عندما يحدث الإلتحام يتوقف الإلكترون والنقب عن كونهما ناقلين حرين. خلال هذه الظاهرة ينتقل الإلكترون من حالة طاقة أعلى وبهذا يجب أن يطلق كمية من الطاقة تساوي الفرق بين قيمتها الابتدائية والحالة النهائية يمكن تصنيف هذه الطاقة إلى ثلاثة أنماط: إشعاعية ينبعث منها فوتون ضوء. ، غير إشعاعي أو إنبعث لفوتون حرارة أو Auger حيث يتم نقل الطاقة الحركية إلى إلكترون آخر حر أو ثقب [6]. يمكن أن يوصف الإلتحام على النحو التالي:

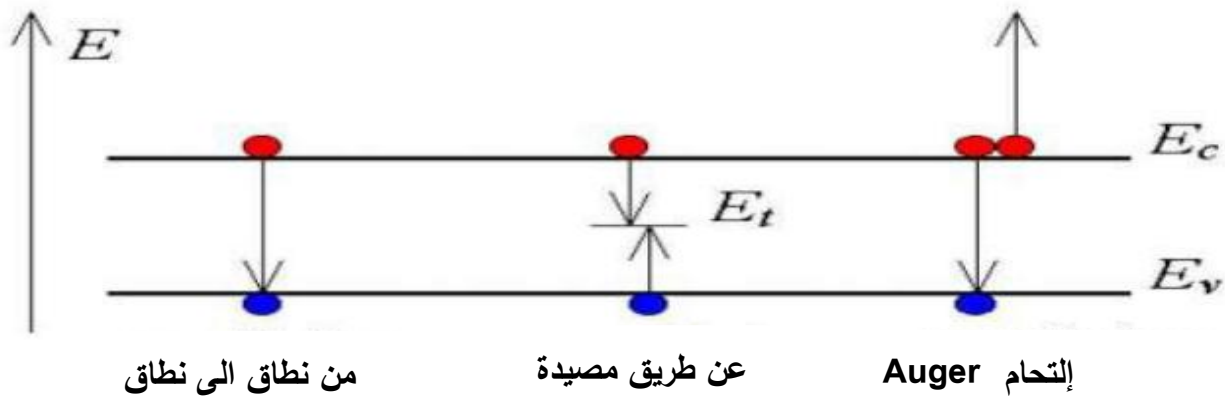
- إلتحام مباشر (من نطاق الى نطاق)

- إلتحام غيرمباشر (عن طريق مصيدة)

- إلتحام Auger

- إلتحام سطحي

وتظهر هذه العملية في الشكل (8.1)



الشكل (8.1) أنواع الإلتحام [11]

1.2.2.3.1 إلتحام مباشر :

الإلتحام المباشر هو عملية مهيمنة في أشباه الموصلات النقية التي تمتلك فجوة طاقة مباشرة، حيث يتم اتحاد إلكترون من نطاق التوصيل مع ثقب في نطاق التكافؤ دون فقدان طاقة حركية، مما يؤدي إلى انبعاث فوتون بطاقة تساوي فجوة الطاقة للنظام. هذه الظاهرة تعد عكسية لعملية امتصاص الضوء، حيث يحدث توليد الفوتون بدلاً من امتصاصه. هذا النوع من الإلتحام يكون أكثر شيوعاً في المواد ذات الفجوة المباشرة مثل GaAs (زرنيخ الغاليوم)، حيث يتمتع بمعدل إلتحام إشعاعي مرتفع مقارنةً بالمواد ذات الفجوة غير المباشرة مثل السيليكون، الذي يعتمد على إعادة توزيع الزخم عبر الفونونات. [6]

يُعبّر عن الإلتحام المباشر بالمعادلة التالية [12] :

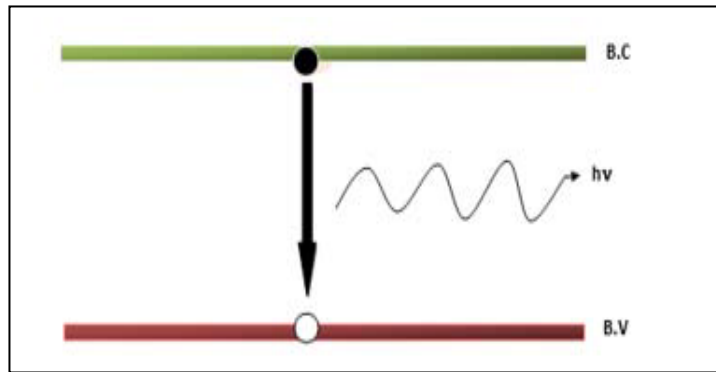
$$U_{\text{rad}} = B (n \cdot p - n_i^2) \quad (5.1)$$

حيث

B : الثابت الذي يعتمد على انصاف النواقل المستخدمة.

p و n : تركيز الثقوب. والإلكترونات.

n_i : التركيز الجوهري.



الشكل (9.1): مخطط وصفي لعملية إعادة الا لئحام من النوع الإشعاعي.

2.2.2.3.1 إلتحام غير المباشر (عن طريق مصيدة) :

الإلتحام غير المباشر، المعروف أيضاً باسم إلتحام Shockley-Read-Hall (SRH)، يحدث في أشباه الموصلات ذات الفجوة غير المباشرة .

ترتبط هذه العملية من عمليات إعادة الاتحاد، الموضّحة في الشكل (6.1)، بوجود عيوب (مثل الانزلاقات البلورية أو الفجوات الذرية...) داخل البنية البلورية لعنصر السيليكون، وقد تم شرحها لأول مرة من قبل شوكلي وريد وهال. تؤدي هذه العيوب إلى ظهور مستويات طاقة منفصلة داخل فجوة الطاقة للمادة. وتُعرف هذه المستويات باسم "الفخاخ"، حيث إنها تسهل إعادة اتحاد حاملتي الشحنة (الإلكترونات والثقوب) عبر آلية من خطوتين: في البداية، يسترخي إلكترون من حزمة التوصيل إلى مستوى طاقة وسيط مرتبط بعيب بلوري، ثم تحدث استرخاء ثانية تمكّنه من الاتحاد مع ثقب في حزمة التكافؤ [13]

تتمذج عملية إعادة الاتحاد من نوع شوكلي-ريد-هال (SRH) بالمعادلة التالية [12] :

$$U_{SHR} = \frac{(\sigma_p \sigma_n V_{th} N_t (np n_i^2))}{\sigma_n (n + n_1) + \sigma_p (p + p_1)} \quad (6.1)$$

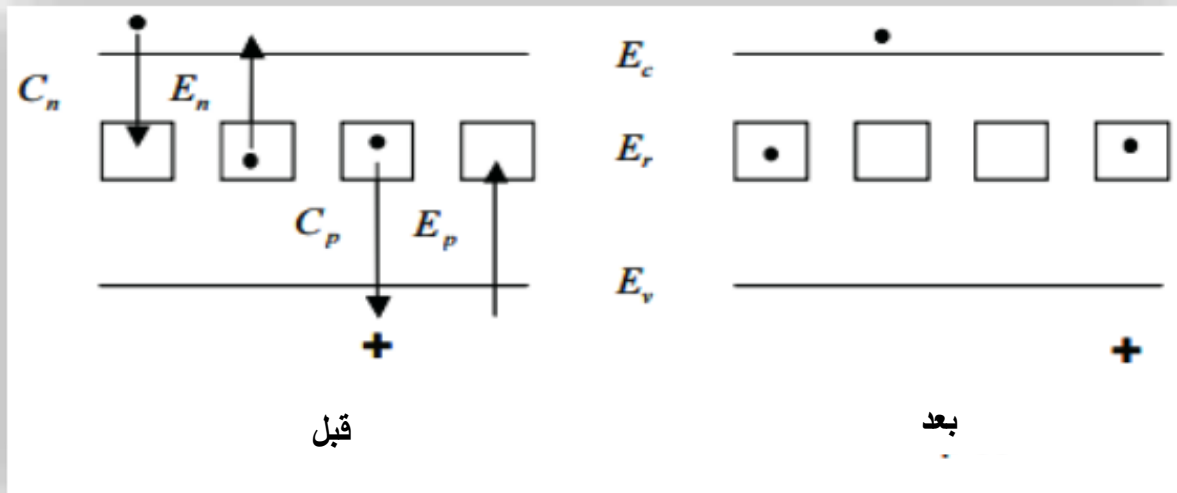
حيث

N_t : تركيز العيوب .

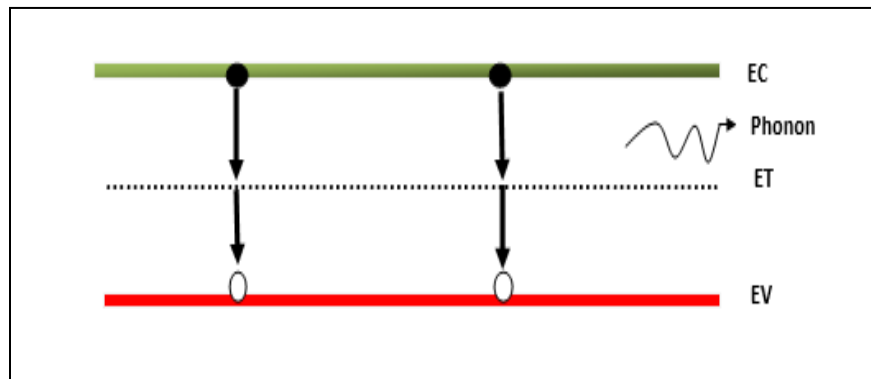
σ_p, σ_n : مراكز إقتناص الثقوب و إلكترونات .

V_{th} : السرعة الحرارية .

يمكن اعتبار أن هذه العملية تتم خلال مرحلتين: حيث يقتنص إلكترون (ثقب) من طرف حالة طاقة موجودة في النطاق الممنوع. إقتناص ثقب (إلكترون) في نفس الحالة الطاقة قبل إنبعاث الإلكترون (الثقب) مجدداً إلى نطاق التوصيل، فانهما يلتحمان معا في شائبة. تلعب مصائد الإلكترونات و الثقوب دورا مهما على التيار في أنصاف النواقل، حيث تخفض من كثافة الحاملات الحرة ولكن لاتلعب دورا مهما في الإلتحام للحاملات أنظر الى الشكل (10.1) [14] :



الشكل (10.1) : مراكز الالتحام.



الشكل (11.1) : إعادة الالتحام من نوع SRH

3.2.2.3.1 : إلتحام Auger :

يُعرف الالتحام من نوع Auger بأنه عملية يتم فيها نقل طاقة إلكترون أثناء إعادة الاتحاد إلى إلكترون حر آخر على شكل طاقة حركية، بدلاً من إصدارها كفوتون. وتُطلق هذه الطاقة لاحقاً على هيئة فونونات. تعتبر هذه الآلية الأكثر شيوعاً في المناطق التي تحتوي على تطعيم عالي، حيث تكون كثافة الحاملات الحرة

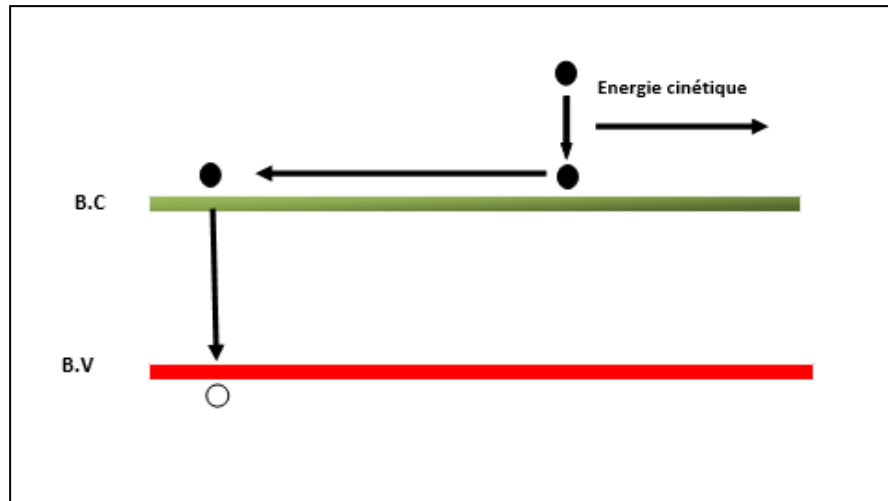
مرتفعة، كما هو الحال في أشباه الموصلات ذات الفجوة غير المباشرة. في هذا النوع من الالتحام، قد يصدر الإلكترون من مستوى عالٍ في نطاق التوصيل أو الحفرة من مستوى عميق في نطاق التكافؤ [6]. ويعطى معدل الالتحام بالعلاقة الموضحة في بالصيغة التالية [12]:

$$U_{Auger} = (Cp_0 + Cn_0) (np - n_i^2) \quad (7.1)$$

حيث:

- Cp_0 و Cn_0 : هما معاملات إلتحام Auger الخاصة بالإلكترونات والثقوب.
- np : هو حاصل تركيز الإلكترونات والثقوب.
- n_i^2 : هو مربع تركيز الإلكترونات والثقوب في شبه الموصل الذاتي.

يتميز إلتحام Auger بأنه فعال في المواد شديدة التطعيم، حيث يؤدي إلى خسائر في الأداء داخل الخلايا الشمسية ذات الكثافة العالية للحاملات، مما يحدّ من كفاءة تحويل الطاقة.



الشكل (12.1): مخطط وصفي لعملية إعادة الالتحام من نوع Auger.

4.2.2.3.1 الإلتحام السطحي:

تُعد سطحية أشباه الموصلات موقعاً تكثر فيه عمليات إعادة الاتحاد، وذلك نتيجة للروابط غير المشبعة لذرات السطح والعيوب البنيوية الأخرى المميزة عند درجة حرارة ثابتة ($T = 300K$) وتعتمد معدلات إعادة الاتحاد السطحي الأمامي والخلفي على كثافة التلطيح [15].

يمكن للإلتحام السطحي أن يؤثر بشكل كبير على أداء أجهزة أنصاف النواقل، خصوصاً في الخلايا الشمسية، حيث تحتوي الأسطح والواجهات عادةً على عدد كبير من مراكز الإلتحام الناتجة عن عيوب البلورة أولشوائب. هذه العيوب تؤدي إلى تسريع عملية إعادة الاتحاد، مما يقلل من كثافة الحاملات الحرة ويؤثر على تيار التشبع والكفاءة الكمية. [11]

يُعبّر عن سرعة الإلتحام السطحي بالعلاقة [15] :

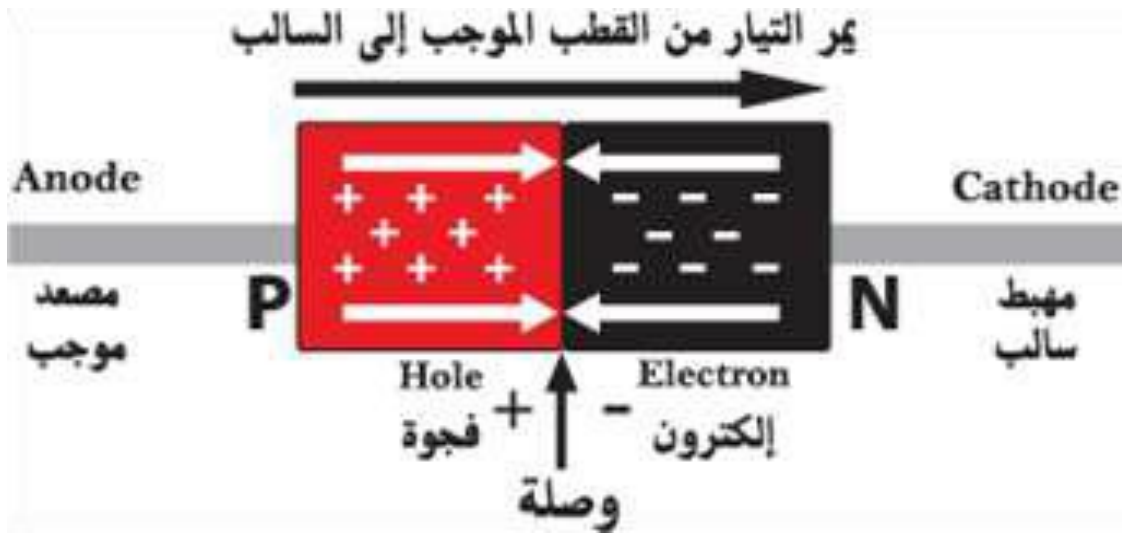
$$S = S_0 \left(\frac{N}{N_{set}} \right) \quad (8.1)$$

حيث: إن S_0 و N_{set} يعتمدان على معالجة السطح وتقنية التمرير السطحي.

تعتمد سرعة الإلتحام السطحي بشكل أساسي على خصائص مادة أشباه الموصلات المستخدمة، حيث تختلف آلية الإلتحام وفقاً لبنية المادة ونوع العيوب الموجودة في السطح. على سبيل المثال، في السيليكون، يمكن تقليل تأثير الإلتحام السطحي عبر تقنيات التمرير السطحي مثل إضافة طبقات أكسيد السيليكون (SiO_2) أو استخدام طبقات مضادة للانعكاس [6].

4.1 الوصلة PN :

تتكون الوصلة الثنائية p-n من بلورتين متلاصقتين من أشباه الموصلات أحدهما من نوع (n-type) الغني بالالكترونات الحرة لوجود شائبة خماسية و الجزء الثاني من النوع (p-type) الغني بالفجوات لوجود شائبة ثلاثية. عند توصيل الجزئين مع بعض عند منطقة التلامس تنتقل شحنات سالبة من (n-type) وتلتحم مع الثقوب الموجودة في الجزء p type [1] يرمز لثنائي القطب في الدوائر الالكترونية كآتي: [3]



الشكل (13.1): الوصلة PN [3]

عند تشكيل ثنائي الوصلة P-N يكون تركيز كل من الإلكترونات والفجوات (الثقوب) على جانبي الوصلة كما في الشكل (13.1).، ونتيجة لهذا الاختلاف في التركيز على جانبي الوصلة فإن الشحنات سوف تنتشر من الوسط الأكثر تركيزاً إلى الوسط الأقل تركيزاً. حيث تنتشر الإلكترونات من المنطقة N إلى المنطقة P كما تنتشر الفجوات (الثقوب) من المنطقة P إلى المنطقة N. [1]

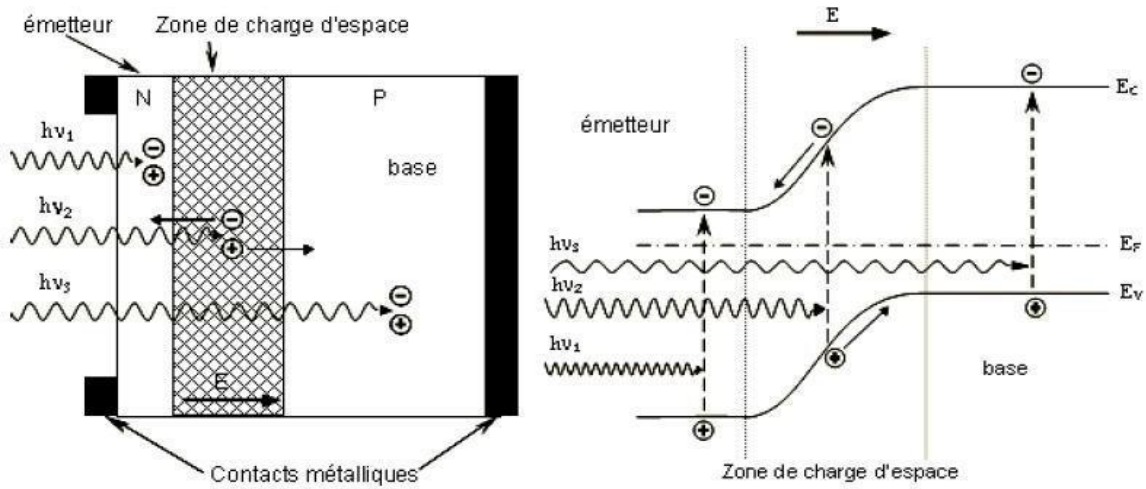
5.1 الخلية الشمسية:

1.5.1 مبدأ عمل الخلايا الشمسية:

تعد الخلية الشمسية جهازاً إلكترونياً يعمل على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية، ويعتمد هذا التحويل على ثلاث مراحل رئيسية:

1. امتصاص الفوتونات: عندما تسقط فوتونات ضوئية على سطح الخلية، يتم امتصاصها بشرط أن تكون طاقتها أعلى من قيمة الفجوة الطاقية (النطاق الممنوع) للمادة شبه الموصلة.
2. توليد الأزواج الإلكترونية: بعد امتصاص الفوتونات، تُحوّل طاقتها إلى طاقة كهربائية من خلال توليد أزواج من الإلكترونات والثقوب داخل المادة شبه الموصلة.

3. فصل وجمع الشحنات: تنتقل الإلكترونات المتولدة إلى الجانب N من الخلية، بينما تنتقل الثقوب إلى الجانب P، مما يؤدي إلى خلق فرق في الجهد يسمح بتدفق التيار الكهربائي في الدارة الخارجية عند توصيلها. تتكون المواد شبه الموصلة المستخدمة في الخلايا الشمسية من مستويين طاقيين رئيسيين كما هو موضح في الشكل (14.1). وعند اختراق الضوء لسطح الخلية، يتم تحفيز الإلكترونات للانتقال من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، مما يترك ثقبًا في مواقعها الأصلية، وهذا هو الأساس في توليد التيار الكهربائي [16].



الشكل (14.1): يمينا مخطط الحزم،يسارا بنية الخلية الشمسية [16]

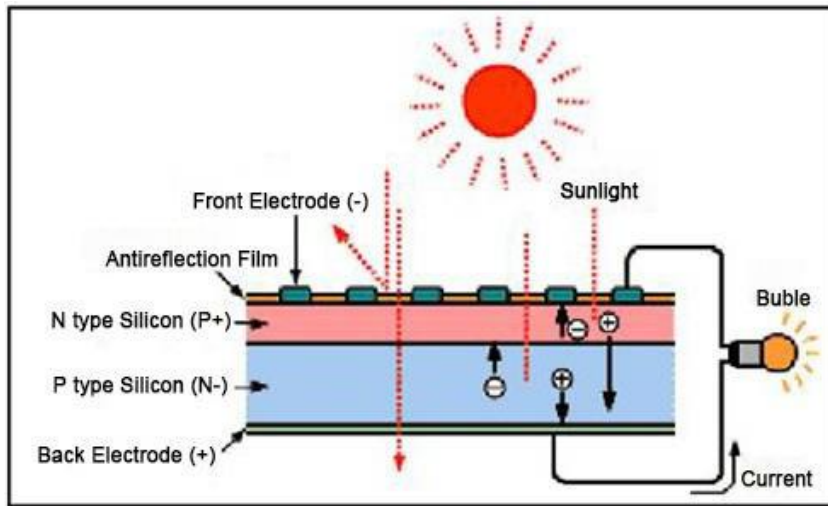
عند سقوط فوتونات الضوء على الخلية الشمسية تولد الحاملات (إلكترون/ثقب) في منطقة P و N وكذا في المنطقة شحنة الفراغ، حيث تسلك هذه الحاملات سلوك مختلف عند كل منطقة:

✚ في المنطقة P أو N تنتقل حاملات الشحنة الأقلية المتولدة ضوئيا الأقل عددا إلى حدود منطقة

شحنة الفراغ بالإنتشار ومن ثم تتأثر بالحقل الكهربائي.

✚ في منطقة الشحنة الفراغية الأزواج (ثقب /إلكترون) المولدة بالفوتونات، تنفرد تحت تأثير الحقل

الكهربائي فتتجه الإلكترونات نحو المنطقة N بينما تتجه الثقوب إلى المنطقة p [17]



الشكل (15.1): مخطط مبسط لمبدأ عمل خلية شمسية. [17]

2.5.1 الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية :

1.2.5.1 خصائص التيار الكهربائي والمخطط المكافئ لخلية شمسية:

في خلية شمسية موصولة بمقاومة كهربائية وخاضعة لضوء الشمس، ينشأ تيار يتوزع عبر المقاومة والبنية الداخلية للصمام الثنائي، التيار الإجمالي $I(V)$ هو: حاصل طرح التيار الكهربائي للصمام في الظلام من التيار الكهروضوئي، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$I(V) = I_{0bc}(V) - I_{ph} = I_S \left(\exp \frac{qV}{KT} - 1 \right) - I_{ph} \quad (9.1)$$

حيث :

I_{ph} : هو التيار الكهروضوئي، I_{0bc} هو تيار الإزلام

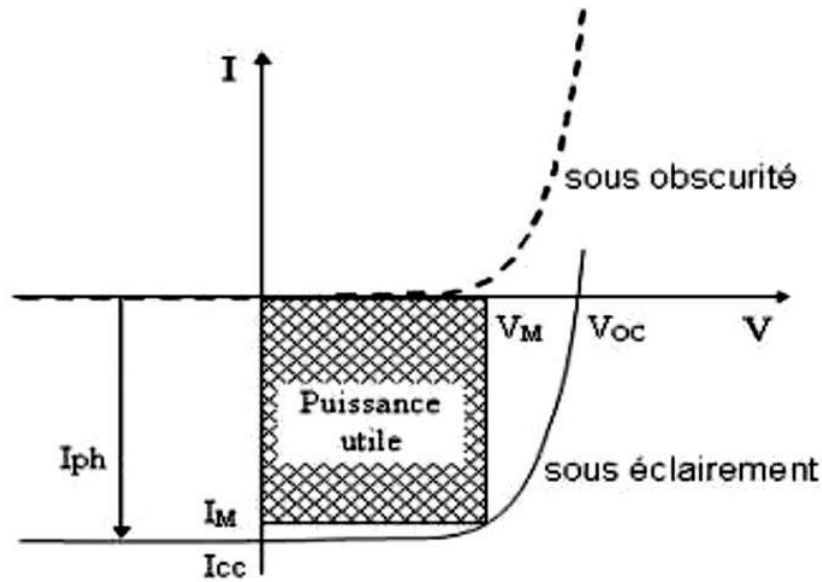
I_S : تيار الإشباع لصمام

q : الشحنة الكهربائية العنصرية

k : ثابت بولتزمان

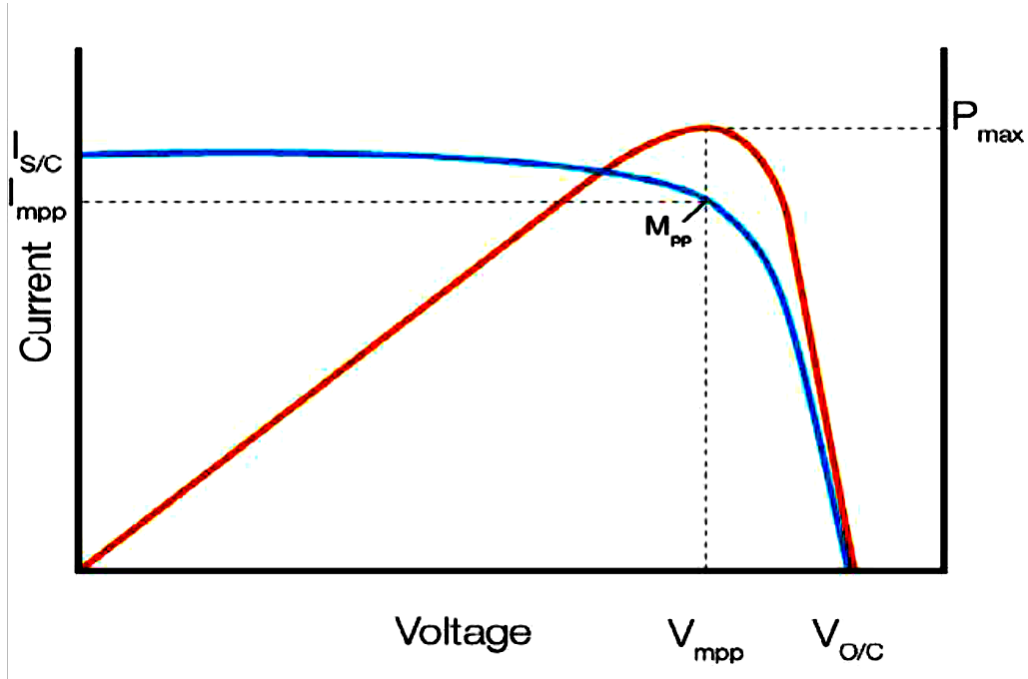
T : درجة الحرارة

إن خاصية الخلية في الظلام مطابقة لخاصية الصمام الثنائي ، الخاصتين تيار-جهد للخلية الشمسية في حالة الظلام ممثل بالخط المتقطع وفي حالة الإضاءة ممثلة بالخط المستمر، نلاحظ ان منحنى تحت الإضاءة يقطع محور الترتيب في النقطة I_{cc} ، هذه القيمة تفسر على أنها توليد ثابت لتيار من طرف الضوء والتي تدعى تيار الدارة القصيرة، هذا التيار يتولد والخلية الشمسية مضاءة وتحت فرق جهد معدوم، أما القيمة V_{oc} فالعكس حيث تمثل فرق جهد الدارة المفتوحة، كما أن منحنى الإضاءة يمثل مجمل التيارين، التيار المتولد في حالة الضوء والتيار في حالة الظلام.[1]



الشكل (16.1): خصائص التيار الكهربائي في حالة الظلام وفي حالة الضوء لخلية كهروضوئية.

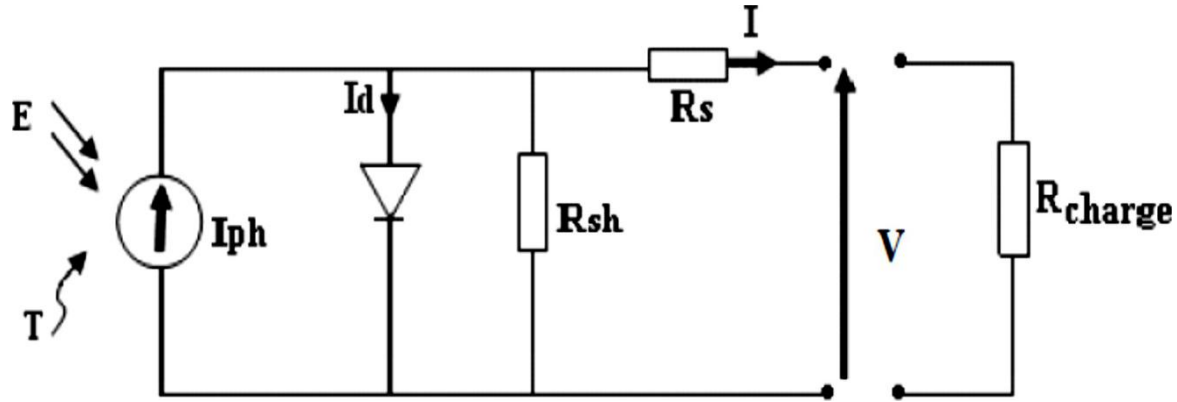
يبين الشكل (17.1) المنحنى المميز للتوتر (الجهد)- التيار في الخلية شمسية وهو يمثل تغير التيار بدلالة التوتر على أقطاب الخلية الشمسية [3]



شكل (17.1) : المنحنى المميز للجهد- التيار للخلية الشمسية [3]

يمثل المنحنى الأزرق في الشكل (17.1) المجموعات المحتملة من التيار والجهد الخارجة من الخلية الشمسية، حيث أنه في لحظة تنتج الخلية الشمسية قيمة محددة من التيار والجهد تقع على منحنى تيار- جهد و. يمثل المنحنى الأحمر منحنى الاستطاعة للخلية الشمسية، حيث يوضح هذا المنحنى الاستطاعة المنتجة عند أي نقطة تشغيل على المنحنى تيار- جهد، وهي ببساطة حاصل ضرب الفولطية والتيار في هذه النقطة [4]

الشكل (18.1) يمثل المخطط المكافئ للخلية الشمسية والذي يمثل صمام ثنائي مثالي متصل بالتوازي مع مصدر لتيار كهربائي.



الشكل (18.1) مخطط كهربائي حقيقي لخلية كهروضوئية.[1]

في الخلايا الشمسية، تمثل المقاومة التسلسلية R_s والمقاومة المتوازية R_{sh} عنصرين رئيسيين يؤثران على الأداء الكهربائي للخلية.

- المقاومة التسلسلية R_s : تعبر عن المقاومة الداخلية للمواد المكونة للخلية الشمسية، بما في ذلك مقاومة الطبقات المختلفة مثل أشباه الموصلات، التوصيلات المعدنية، والجهات المتصلة بالأقطاب الكهربائية، زيادتها تؤدي إلى انخفاض كفاءة تحويل الطاقة، حيث تتسبب في فقدان الجهد عبر الدارة.
 - المقاومة المتوازية R_{sh} : تعبر عن وجود تيارات التسرب التي تتولد عبر الشوائب أو العيوب الموجودة في المادة أو عند نقاط الاتصال. إذا كانت قيمة هذه المقاومة منخفضة جداً، فإنها تزيد من فقدان الطاقة داخل الخلية، مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة التحويل.
- هذه العوامل مهمة جداً عند تصميم الخلايا الشمسية لضمان الحد من الخسائر وزيادة الفعالية الكهربائية. تمثل المعادلات نموذجاً رياضياً لوصف التيار الكهربائي داخل الخلية الشمسية وفقاً للمخطط المكافئ لها. يمكن تلخيص العلاقة الأساسية بالعلاقة التالية :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (10.1)$$

حيث:

- I_{ph} : هو التيار الناتج عن التأثير الكهروضوئي .

- I_d : هو التيار الناتج عن الصمام الثنائي (Diode) .
- I_p : هو التيار الناتج عن المقاومة التوازية R_{sh} .

وفي النموذج الأكثر تفصيلاً، يمكن التعبير عن التيار عبر العلاقة:

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (11.1)$$

حيث:

- R_s : هي المقاومة السلسلية التي تمثل فقدان الجهد داخل الطبقات الداخلية للخلية،
- R_{sh} : هي المقاومة التوازية التي تعبر عن تيارات التسرب داخل المواد.

2.2.5.1 قيم الخلية الشمسية:

أهم القيم الأساسية المميزة للخلية الشمسية هي:

- جهد الدارة المفتوحة V_{OC} .
- تيار الدارة القصيرة I_{sc} .
- الإستطاعة الأعظمية P_{max} .
- معامل الشكل FF .
- مردود التحويل الطاقوي η .
- الاستجابة الطيفية RS .

1.2.2.5.1 جهد الدارة المفتوحة V_{OC} :

يمثل هذا الجهد أقصى قيمة يمكن أن تصل إليها الخلية الشمسية، ويتم قياسه بين طرفي الخلية عندما لا يمر أي تيار في الدارة، أي في حالة الدارة المفتوحة حيث تكون المقاومة كبيرة جداً (تقترب من المالا نهائية). في هذه الحالة، تكون القدرة الناتجة معدومة لأن التيار يساوي صفراً [18] ويحسب بالعلاقة التالية :

$$V_{oc} = V_{th} \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{sc}} \right) \quad (12.1)$$

2.2.2.5.1 تيار الدارة القصيرة I_{sc} :

يمثل هذا التيار القيمة العظمى التي يمكن أن تولدها الخلية الشمسية، ويتم قياسه عندما تكون المقاومة في الدارة معدومة، أي في حالة قصر الدارة. في هذه الحالة، يكون الجهد بين طرفي الخلية مساوياً للصفر، وبالتالي تكون القدرة الكهربائية الناتجة أيضاً معدومة. حيث يزداد خطياً مع شدة الإضاءة، ويتعلق بالسطح المضاء، طول موجة الإشعاع، ودرجة الحرارة [19]. وبحسب بالعلاقة التالية :

$$I_{sc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (13.1)$$

3.2.2.5.1 الاستطاعة الأعظمية P_{max} :

تعرف الإستطاعة (القدرة الكهربائية) بأنها الناتج الأعلى من حاصل الضرب بين التيار والجهد عند نقطة التشغيل [4] وتعطى بالعلاقة التالية:

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (14.1)$$

I_{max} : التيار المطابق للحد الأقصى من الطاقة المزودة وحدته (mA/cm^2)

V_{max} : الجهد المقابل للحد الأقصى من الطاقة الواردة وحدته (V)

بالنسبة لخلية شمسية مثالية فإن الاستطاعة تعطى بالعلاقة التالية:

$$P_{max\ ideale} = I_{sc} \times V_{oc} \quad (15. 1)$$

4.2.2.5.1 عامل الشكل FF ;

يُعد هذا المعامل مؤشراً على كفاءة أداء الخلية الشمسية، ويُعرّف على أنه النسبة بين الإستطاعة العظمى التي تنتجها الخلية والإستطاعة النظرية الممكن تحقيقها [18]، ويُحسب باستخدام العلاقة التالية :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc..}} \quad (16.1)$$

حيث:

- P_{max} : الاستطاعة الأعظمية عند نقطة التشغيل المثلى (I_{max}, V_{max})
 - $I_{sc..}$: تيار الدارة القصيرة،
 - V_{oc} : جهد الدائرة المفتوحة.
- كلما زادت قيمة عامل الشكل، زادت كفاءة تحويل الطاقة الكهربائية، مما يعكس جودة الخلية الشمسية.

5.2.2.5.1 مردود التحويل η :

المردود η يشير الى مردود تحويل الاستطاعة، ويعرف، بأنه النسبة بين الاستطاعة العظمى المصروفة واستطاعة الضوء الساقط P_{in} [20] :

ويعطى بالعلاقة :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (17.1)$$

حيث:

- P_{max} : الاستطاعة العظمى التي يمكن للخلية تحويلها إلى طاقة كهربائية.
- P_{in} : الاستطاعة الضوئية الساقطة على سطح الخلية .

6.2.2.5.1 الاستجابة الطيفية للخلية الكهروضوئية:

الاستجابة الطيفية RS للخلية الشمسية هي النسبة بين تيار الدارة القصيرة المولد من طرف الخلية، واستطاعة الضوء الساقط، بدلالة مختلف الأطوال الموجية المكونة لهذا الإشعاع [1] ، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$RS(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (18.1)$$

المردود الكمي الخارجي EQE للخلية هو النسبة بين عدد حاملات الشحنة المولدة وعدد الفوتونات الضوئية الساقطة لكل طول موجة ويرتبط مع الاستجابة الطيفية حسب العلاقة التالية [1] :

$$EQE(\lambda) = RS(\lambda) \cdot \frac{hc}{\lambda q} \quad (19.1)$$

المردود الكمي الداخلي IQE للخلية هو النسبة بين عدد حاملات الشحنة المولدة وعدد الفوتونات التي تخترق المادة، ويرتبط بالمردود الكمي الخارجي بالعلاقة التالية:

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (20.1)$$

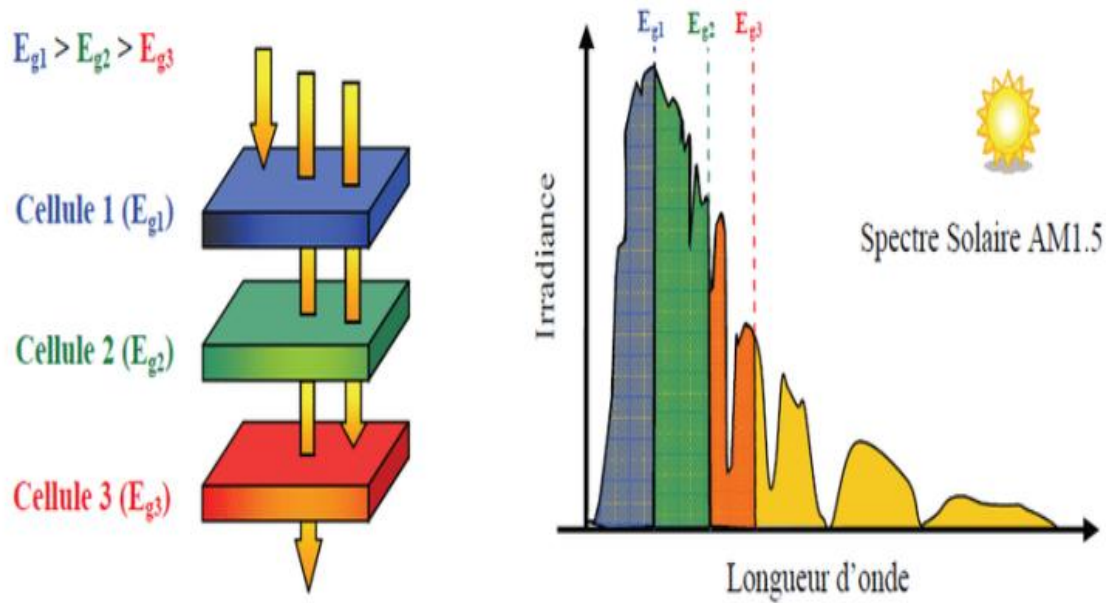
معامل الانعكاس R يعطى بالعلاقة [1] :

$$R(\lambda) = \left(\frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda) + n_1(\lambda)} \right)^2 \quad (21.1)$$

باعتبار ان المواد المتصلة تملك معامل انكسار: n_1 و n_2 .

6.1 الخلية ثنائية الوصلة :

تتكون معظم الخلايا الكهروضوئية غير العضوية اليوم من وصلة PN واحدة. في هذه الوصلة، فقط الفوتونات التي تساوي طاقتها أو تفوق فجوة نطاق المادة هي القادرة على تكوين أزواج إلكترون-فجوة. بمعنى آخر، تكون الاستجابة الكهروضوئية لخلية ذات وصلة واحدة محدودة. فقط جزء من الطيف الشمسي التي تكون طاقة فوتونها أكبر من فجوة امتصاص المادة هي المفيدة؛ وبالتالي، فإن طاقة الفوتون المنخفضة غير قابلة للاستخدام. يُعرف منذ زمن طويل حل أولي للحد من الخسائر من الناحية التكنولوجية: يكفي استخدام أنظمة متعددة الوصلات ، عن طريق تكديس الوصلات ذات فجوات نطاق متناقصة الشكل (19.1). هذا يُمكن من استغلال كامل الطيف الشمسي تقريبًا بكفاءة تحويل عالية جدًا. [22]



الشكل (19.1): مخطط توضيحي لمبدأ تشغيل خلية متعددة الوصلات. [23]

المراجع

- [1] بوعبد الله عبد الغني " محاكاة رقمية لتأثير الطبقة Sb في تقليص في العيوب الخلية الشمسية CiGS مذكرة دكتوراء 2021/2020 جامعة محمد خيضر.بسكرة.
- [2] Y.Marouf, "Modélisation des cellules solaires en In GaN en utilisant Atlas Silvaco", Mémoire magistère, Université Mohamed kheider-Bisk (2013)
- [3] بكوش أسماء محاكات عددية للأداء وكفاءة الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة من نوع تيلورايد الكادميوم CdTe ، مذكرة ماستر 2022/2021 جامعة محمد خيضر .بسكرة .
- [4] ديبونة عبد الباسط ،قماري عبد الله، محاكاة خلية شمسية باستعمال برنامج سيلفاكواطلس SILVACO-ATLAS ،. ، مذكرة تخرج لنيل شهادة الماستر 2022/2021. جامعة قاصدي مرباح ورقلة.
- [5] F.Abdo, " Croissance de couche mince de silicium par en épitaxie phase liquide à basse température pour application photovoltaïques ", Thèse de Doctorat à l'institut national des sciences appliqués de Lyon- France, 2007.
- [6] شيخ غنية وشرقي ياسمينة . تأثير مصائد الإلكترونات على الخلايا الشمسية الغير متجانسة .مذكرة ماستر 2021/2020 جامعة محمد خيضر بسكرة.
- [7] O. Sammari, Mémoire de Master, " Simulation numériques d'une cellule solaire a double jonction en InGaP /Si ", Université Mohamed Khider Biskra, (2018).
- [8] S. Daniel, " Modeling radiation effect on a triple jonction solar cell using Silvaco Atlas ", Thesis Naval postgraduate School Monterey California, (2012).
- [9] J. Lavery, "Quantum tunneling model of P-N Junction in Silvaco", Thesis Naval postgraduateSchool Monterey California, (2007).
- [10] A. Aouina, Thèse de Magister, " Rôle du rayonnement dans l'élaboration et l'étude de nanoagregats semi-conducteurs de ZnS", Université Mentouri Constantine, (2010).
- [11] A. Bali, "Etude comparative entre les cellules solaire de type p+-AlGaAs/ p-GaAs

/n-GaAs et une autre de type n⁺-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs”, Mémoire de magistère, Université Mohamed Khider Biskra

- [12] F.D.Auret, S.A.Goodman, G.Myburg, and W.O.Barnard, "Electrical characterization of neutron irradiation induced defects in undoped epitaxially grown n-GaAs", J.Appl.Phys, Vol.74 ,No.7, 1 october 1993.
- [13] L.Remache, Thèse de Doctorat, "Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements anti réfléchissants", Université Mentouri Constantine, (2011).
- [14] H. Mathieu , H. Fanet , “Physique des semiconducteurs et des composants électroniques”, Dunod, Paris, (2009).
- [15] I. MALLEM, Thèse de Magister, "Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO", Université Mohamed Khider Biskra, (2014).
- [16] D. Dadoo “Production et application des nanostructures d'oxyde de cuivre”, Thèse de doctorat, Université de Trento-Italie, (2010)
- [17] I. Saadeddin, B. Pecquenard , J.P. Manaud , R. Decourt , C. Labrugere, T. Buffeteau, G. Campet, Applied Surface Science 253 (2007) 5240–5249
- [18] مروى سعداوي ، الاشعاع الشمسي كمصدر اساسي للطاقة البديلة ومختلف تطبيقاته العملية، مذكرة ماستر 2021/2020 ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة .الجزائر
- [19] الدكتور بومعروف ، مدخل لمحاكاة خلية شمسية في الظلام وفي الضوء 2020/2019 جامعة محمد خيضر بسكرة .الجزائر.
- [20] W. DIB, “Modelisation des structures photovoltaïques aspects fondamentaux et appliques”, These de doctorat, Université Abou bekr belkaïd de Tlemcen, (2010).
- [21] A. Mahfoud, “Modélisation des cellules solair tandem à couche minces et à haut rendement”, these of Doctorate, Université Setif, (2015).
- [22] E. GIUDICELLI¹, N. MARTAJ^{1, 2}, R. BENNACER³, Y. CUMINAL¹, et Ph. COMBETTE¹ , " Caractérisation thermique des cellules photovoltaïques multi-

jonction par la méthode 3ω ", IIES, UMR5214, Université Montpellier II, Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier, France; 2EPF-Ecole d'Ingénieurs, 21 boulevard Berthelot, 34000 Montpellier; 3LMT CNRS UMR 8535, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Cachan, France.

- [23] B.Tebboub, Thèse de Magister, "Etude conceptuelle des systèmes photovoltaïques à double et triple jonction", Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2015

الفصل الثاني:

التعرف على برنامج سلفاكو أطلس

Silvaco Atlas

1. مقدمة:

يتضمن برنامج SILACOL مجموعة واسعة من الدراسات المتكاملة في إعداد وتوصيف الخلايا الشمسية سنقوم بتطبيق الجزء الخاص بالخلايا الشمسية SILACOL ATLAS لمحاكاة الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية المقترحة

2. تعريف SILVACO :

تُعد شركة SILVACO International واحدة من الشركات الرائدة في مجال برمجيات تصميم الإلكترونيات. تُقدم الشركة مجموعة متنوعة من البرامج التي تشمل تصميم الدوائر التناظرية والرقمية، مع أدوات تغطي نطاقاً واسعاً من التطبيقات بدءاً من النماذج البسيطة وصولاً إلى المخططات المتقدمة للدوائر المتكاملة IC [1]. برنامج SILVACO-ATLAS هو برنامج محاكاة لأنصاف النواقل يعتمد على المبادئ الفيزيائية ثنائية وثلاثية الأبعاد. يمكن البرنامج من التنبؤ بالخصائص الكهربائية المرتبطة بالبنية الفيزيائية الدقيقة تحت ظروف استقطاب محددة وتتم هذه المحاكاة من خلال تمثيل البنية بشبكة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد مكونة من عدد من العقد (نقاط الشبكة). بتطبيق معادلات تفاضلية مشتقة من قوانين ماكسويل على هذه الشبكة، يمكن تتبع حركة حاملات الشحنة داخل البنية المدروسة. وبهذا، يتيح البرنامج إمكانية تقييم الأداء الكهربائي للمكون سواء في ظروف التيار المستمر، أو التيار المتناوب، أو أثناء أوضاع التشغيل العابرة [2]. تم تصميمه ليتم استخدامه مع الأدوات التفاعلية لتصنيع الرقاقة الافتراضية (VIRTUAL WAFER FAB vwf). هذه الأدوات هي:

➤ **DECKBUIL** : يوفر بيئة تفاعلية لإعداد ومعالجة عمليات المحاكاة.

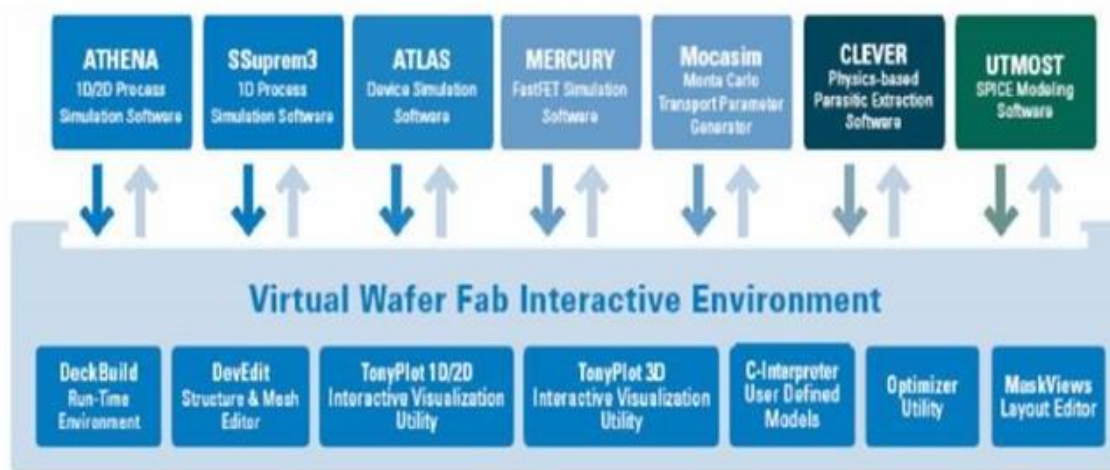
➤ **TONYPLO** : أداة رسومية لتمثيل نتائج المحاكاة، بدءاً من البنية الفيزيائية وصولاً إلى الخصائص الكهربائية.

➤ **DEVEDIT** : أداة تفاعلية لتحديد بنية النموذج والشبكة والتحسين.

➤ **MASKVIEWS** : محرر قناع خاص بالدوائر المتكاملة.

➤ **OPTIMIZER** : يدعم التحسين عبر محاكيات متعددة. أداة لتحسين معايير المحاكاة [3]

يساهم استخدام الرقاقة الافتراضية (VWF) في تحسين كفاءة إجراء المحاكاة دون الاعتماد على برامج خارجية. ويظهر الشكل (3.11) أن برنامج Silvaco بالاستعانة بـ VWF يوفر أداة محاكاة قوية وفعالة. [3]



الشكل (1.11): بيئة تصنيع الرقاقة الافتراضي [3]

3.11 المدخل و المخرج في SILVACO-ATLAS :

الشكل (2.11) : يوضح أنواع المعلومات التي تدخل وتخرج من ATLAS. تستخدم معظم عمليات المحاكاة على ATLAS مدخلين: ملف نصي يحتوي على أوامر لتنفيذ ATLAS و ملف هيكلي يحدد الهيكل الذي سيتم محاكاته. ينتج ATLAS ثلاثة أنواع من المخرج. يوفر إخراج وقت التشغيل دليلاً لتقدم تشغيل عمليات المحاكاة ، وهنا تظهر رسائل الخطأ والتحذير. تخزن ملفات السجل جميع الجهود والتيارات عند الحدود و التيارات الداخلية في المركب ، وتخزن ملفات الحل البيانات ثنائية وثلاثية الأبعاد المتعلقة بقيمة متغيرات الحل ضمن المركب من أجل كل قيمة استقطاب [4].

1.3 مدخلات برنامج ATLAS:

تستخدم معظم عمليات المحاكاة في برنامج ATLAS مدخلين أساسيين:

- 1 ملف نصي للأوامر: يحتوي على تعليمات محددة لتنفيذ المحاكاة.
- 2 ملف هيكلي: يصف البنية الفيزيائية التي سيتم محاكاتها.

II. 2.3 مخرجات برنامج ATLAS:

ينتج برنامج ATLAS ثلاثة أنواع رئيسية من المخرجات:

1 إخراج وقت التشغيل: (Runtime Output)

- يقدم معلومات حول سير المحاكاة ويعرض رسائل الخطأ والتحذير.
- يساعد على تتبع تقدم العمليات وضبط إعدادات المحاكاة.

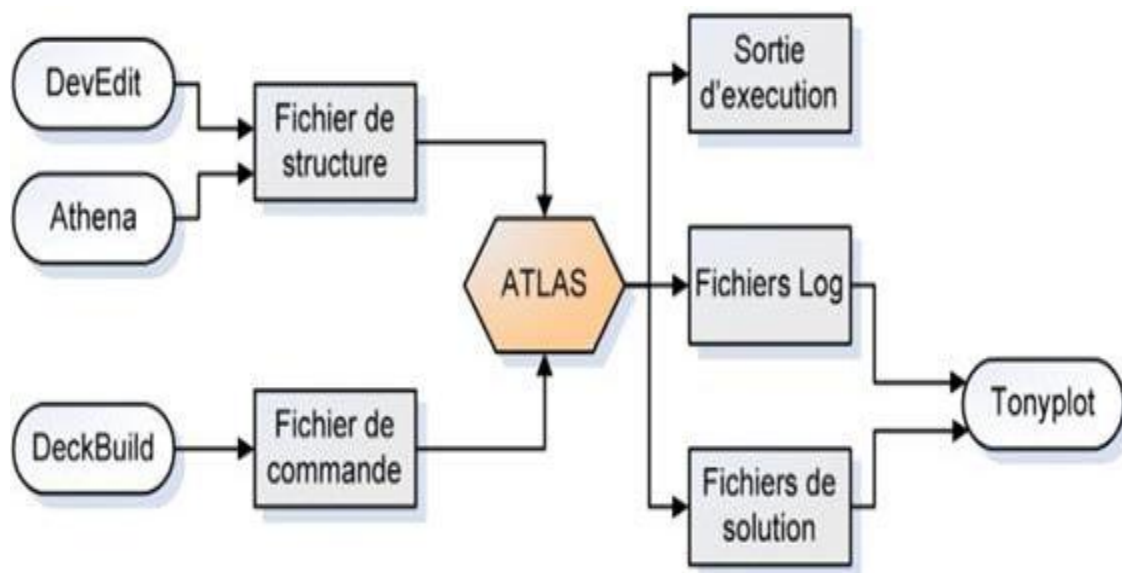
2 ملفات السجل (Log Files):

- تخزن البيانات الخاصة بالجهود والتيارات عند الحدود.
- تحتوي أيضًا على معلومات حول التيارات الداخلية داخل المركب.
- تُعد مرجعًا لتقييم أداء الجهاز وتحليل نتائجه.

3 ملفات الحل (Solution Files):

- تتضمن بيانات ثلاثية وثنائية الأبعاد تتعلق بمتغيرات الحل.
- تُخزن لكل قيمة استقطاب على حدة، مما يسمح بمقارنة الأداء الكهربائي تحت ظروف تشغيل مختلف.

يوضح الشكل (2.11) كيفية تدفق المعلومات داخل وخارج برنامج ATLAS



الشكل (2.11) : مداخل ومخارج Atlas [5]

DeckBuild 4.11 :

DeckBuild هي بيئة تشغيل رسومية تفاعلية تُستخدم لتطوير العمليات وإعداد مدخلات نظام المحاكاة. تتألف هذه البيئة من نافذة أساسية تُستخدم لإنشاء منصة الإدخال، بالإضافة إلى نافذة أخرى مخصصة لاستخراج نتائج المحاكاة وتحليل الوسائط. كما تحتوي على مجموعة من النوافذ المنبثقة التي تدعم لغة أوامر متكاملة، مما يُسهل تنفيذ العمليات بطريقة مرنة وسلسة بيئة تشغيل رسومية تفاعلية ، لتطوير العمليات ومدخلات نظام المحاكاة [6].

```

mesh

x.m l=0 s=2.5
x.m l=10 s=2.5
y.m l=1.61 s=0.05
y.m l=2.11 s=0.05
y.m l=2.61 s=0.001
y.m l=2.91 s=0.02
y.m l=6 s=0.1
y.m l=12 s=0.5
y.m l=30 s=3
y.m l=102.91 s=0.02
y.m l=103.51 s=0.02
y.m l=103.61 s=0.01
y.m l=103.71 s=0.01
y.m l=103.91 s=0.02

#top cell: a-Si:H
region num=1 material=oxide                y.min=1.61    y.max=2.11
region num=2 material=zno                  x.min=0 x.max=10 y.min=2.11 y.max=2.61
region num=3 material=Si                   x.min=0 x.max=10 y.min=2.61 y.max=2.91
region num=4 material=Si                   x.min=0 x.max=10 y.min=2.91 y.max=102.91
region num=5 material=Si                   x.min=0 x.max=10 y.min=102.91 y.max=103.51
region num=6 material=ZnO conductor        y.min=103.51 y.max=103.61
region num=7 material=Silver conductor     y.min=103.61 y.max=103.71

ATLAS>
ATLAS> tonypplot solarex12_0.log -set solarex12_1.set
ATLAS>
EXTRACT> init infile="solarex12_0.log"
EXTRACT> extract name="Jsc" y.val from curve(v,"anode", i,"anode") where x.val=0.0
Jsc=-3.1022e-009
EXTRACT> extract name="Jscm2" -3.1022e-009*1e08*1e03/10
Jscm2=-31.022
EXTRACT> extract name="Voc" x.val from curve(v,"anode", i,"anode") where y.val=0.0
Voc=0.548743
EXTRACT> extract name="P" curve(v,"anode", (v,"anode" * i,"anode")) outf="solarex12_P.dat"
EXTRACT> extract name="Pm" -31.022*0.548743*1e08*1e03/10
EXTRACT> extract name="Pm" -31.022*0.548743*1e08*1e03/10

Output ☒ Scroll to bottom 
Line: 21 Column: 20 Warning! simulator has exited at line 112 with a non-zero status - atlas Size of generated files: 227.1 KB Free space: 3.2 GB DeckBuild 4.2.5.R (aka 4.2.5.R) Copyright © 1984 - 2019 Silvaco, Inc.
    
```

الشكل (3.11): يوضح واجهة Deckbuild

: Tonyplot 5.11

TonyPlot هي أداة معالجة رسومات تستخدم مع جميع محاكيات SILVACO وهي جزء لا يتجزأ من VWF ، فهي توفر إمكانيات كاملة لعرض وتحليل خصائص الإخراج (هيكل المكون الإلكتروني ، وملف تعريف التطعيم ، والخصائص الكهربائية). يمكن أن يعمل TONYPLOT بشكل مستقل أو مع أدوات VWF التفاعلية الأخرى ، مثل DECKBUILD أو VWF أو SPDB انظر الشكل (4.11). [4].



الشكل (4.11): النافذة الأساسية TonyPlot.

6.11 بنية الإدخال في SILVACO-ATLAS :

يتم إدخال الأوامر في برنامج ATLAS على شكل قائمة تعليمات تنظم تشغيل المحاكاة. تُحفظ هذه الأوامر عادة في ملف نصي بتنسيق ASCII، ويمكن إعدادها باستخدام أي محرر نص يفضل إنشاء ملف الإدخال ضمن بيئة DECKBUILD، حيث يمكن الاستفادة من قائمة الأوامر المدمجة لتسهيل عملية الإعداد. يحتوي الملف على مجموعة من العبارات، تتألف كل عبارة من كلمة رئيسية تُحدد نوع التعليمات، يليها مجموعة من المعاملات والقيم المرتبطة بها. يأخذ التنسيق العام الشكل التالي [4]

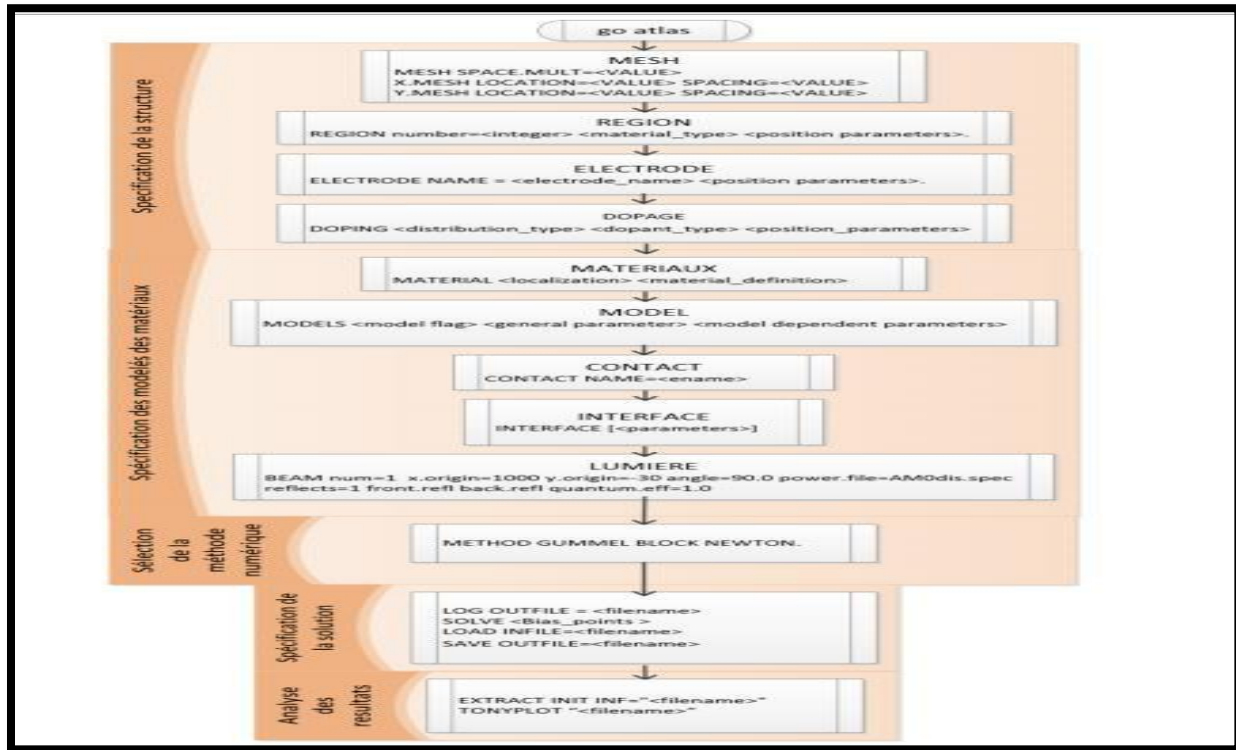
<STATEMENT><PARAMETER>=<VALUE>

7.11 مخطط محاكاة الخلية الشمسية بـ SILVACO-ATLAS :

من أجل تحديد خلية شمسية في هذا البرنامج من الضروري إدخال الأبعاد وخصائص المواد وكل هذا يتم

في واجهة DeckBuild. مخطط محاكاة الخلية الشمسية بـ SILVACO-ATLAS مبين في الشكل (5.11) .

تنقسم طريقة محاكاة وإدخال المعلومات في هذا البرنامج إلى خمسة مراحل تقريبا وهي كالآتي:



الشكل (5.11): مخطط إنسيابي لمراحل بناء ATLAS

1.7.11 تحديد البنية:

1.1.7.11 الشبكة (Mesh):

الخطوة الأولى في تصميم المركب بعد الأمر go atlas هي تحديد الشبكة الشبكة هي عبارة عن شبكة تغطي المنطقة

المادية التي يتم فيها بناء المركب ومحاكاته يتم إنشاء الشبكة ببساطة عن طريق سلسلة من الخطوط الأفقية

والشاقولية التي يحددها المستخدم مع مسافة بينهما . للشبكة دور مهم في الحصول على محاكاة جيدة ويجب أن يتم

ذلك بعناية فائقة ويجب أن يتم اختيار الشبكة بطريقة تؤدي إلى حل وسط بين سرعة التنفيذ ودقة النتائج [8]

التنسيق العام لتعريف الشبكة هو [9] :

X.MESH LOCATION = <VALUE> SPACING = <VALUE>

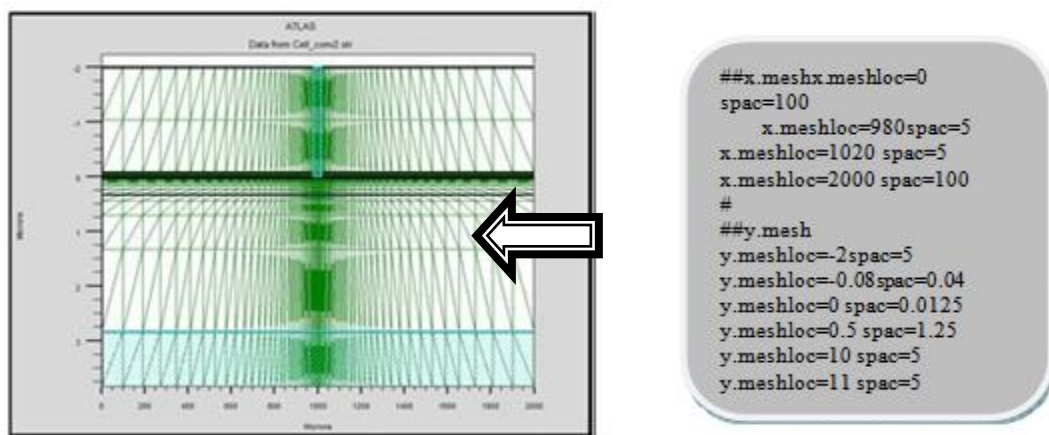
Y.MESH LOCATION = <VALUE> SPACING = <VALUE>

حيث:

MESH: لتحديد شبكة.

LOCATION: لتحديد مواقع الخطوط الرئيسية.

الشكل (6.11) يبين شبكة لبنية بواسطة برنامج ATLAS .



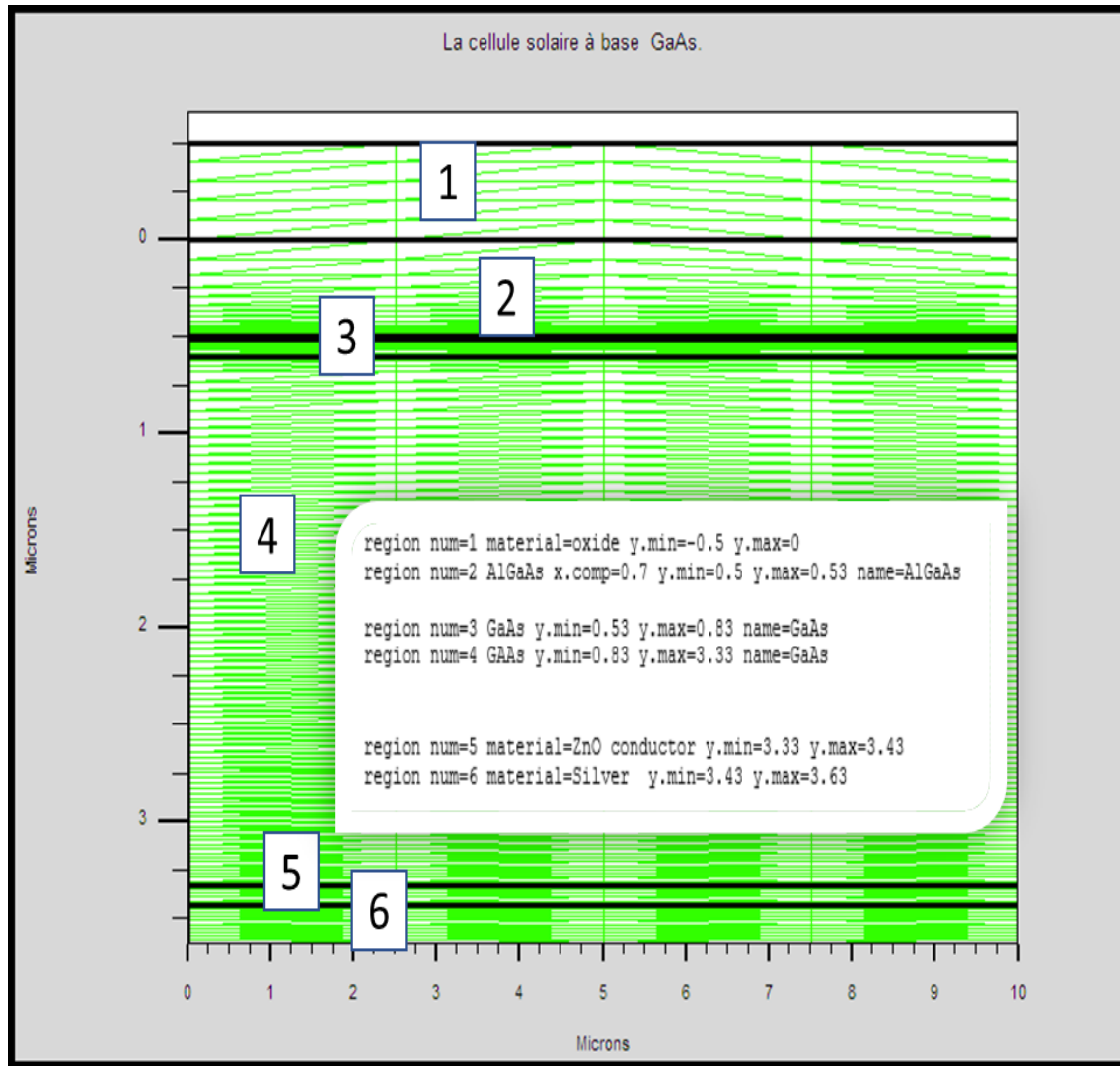
الشكل (6. 11): شبكة لبنية خلية بواسطة ATLAS.

II. 2.1.7 المناطق والمواد (MATERIALM and REGIONS):

يستخدم أمر المنطقة لتقسيم الشبكة الأولية إلى أجزاء مميزة، بحيث تُخصص كل منطقة لمادة مختلفة، كما يُستخدم أيضًا لتحديد خصائص المواد الأولية، والتي يمكن ربطها لاحقًا بأرقام المناطق، من الضروري أن تغطي جميع أجزاء الشبكة ببعض المناطق، ويجب أن تُرتب هذه المناطق تصاعديًا، أي لا يمكن تعريف المنطقة رقم 5 قبل تعريف المنطقة رقم 4، يتم تعريف المناطق بالشكل التالي : [10] .

REGION nombre = <integer><material_type>< position des paramètres >

يُبين الشكل (7. 11) الأوامر المستخدمة لتعريف المناطق المختلفة. حيث يمكن ملاحظة وجود ست مناطق مميزة، وقد تم تحديد حدود كل منطقة بوضوح على المحورين X و Y ، مع تخصيص مادة معينة لكل منطقة على حدة.



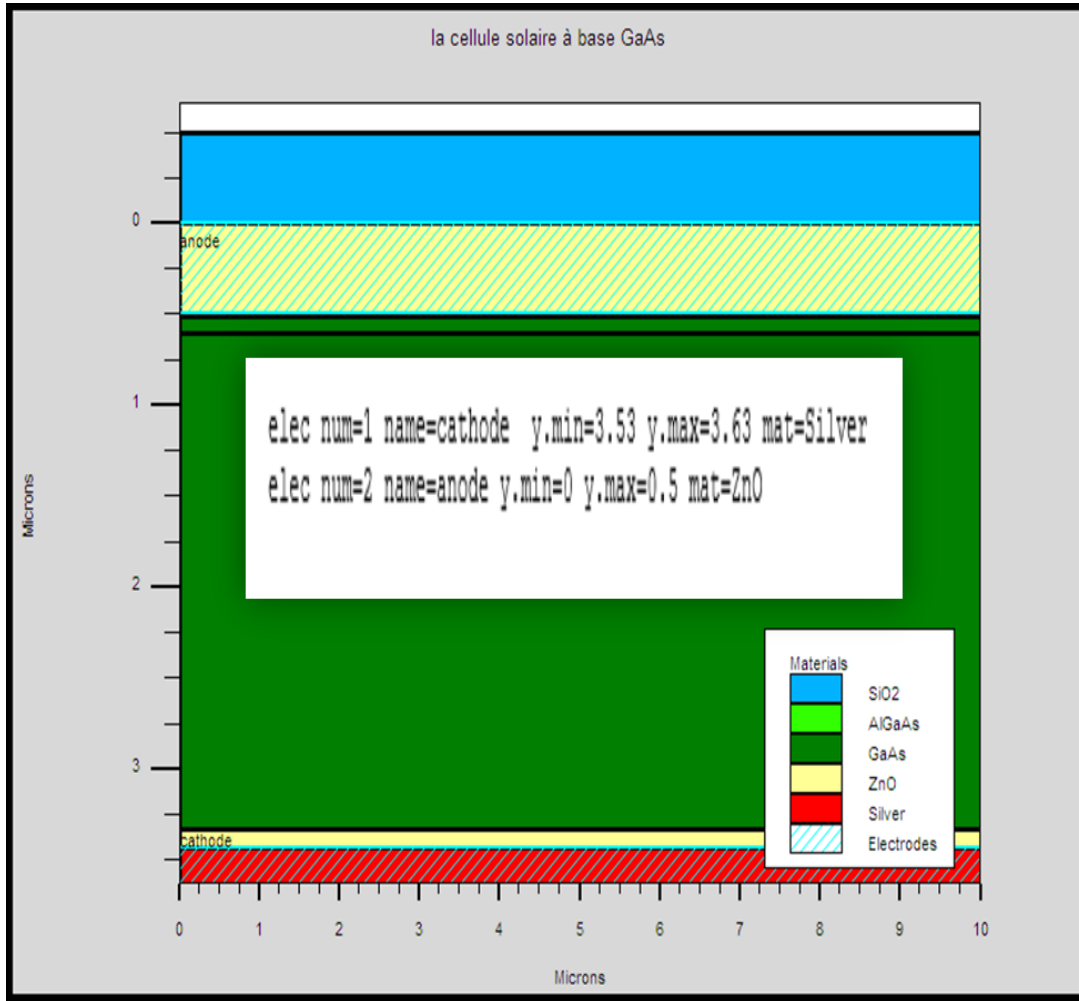
الشكل (II. 7) : تعريف المناطق بواسطة ATLAS.

II. 3.1.7 القطب الكهربائي (ELECTRODE):

يجب تحديد الأقطاب الكهربائية للخلية الشمسية و تعريف نوعية القطب لكل منطقة إذا كان كاثود (مهبط) أو الانود (مصعد) و يحتوي أطلس على حد أقصى قدره 50 قطبًا كهربائيًا يمكن تعريفه [9.3]. صيغة تعريف الأقطاب الكهربائية هي كما يلي:

ELECTRODE NAME = < nom de l'électrode > < position des paramètres >

يبين الشكل (II. 8) الأوامر المستخدمة لتحديد الأقطاب الكهربائية :



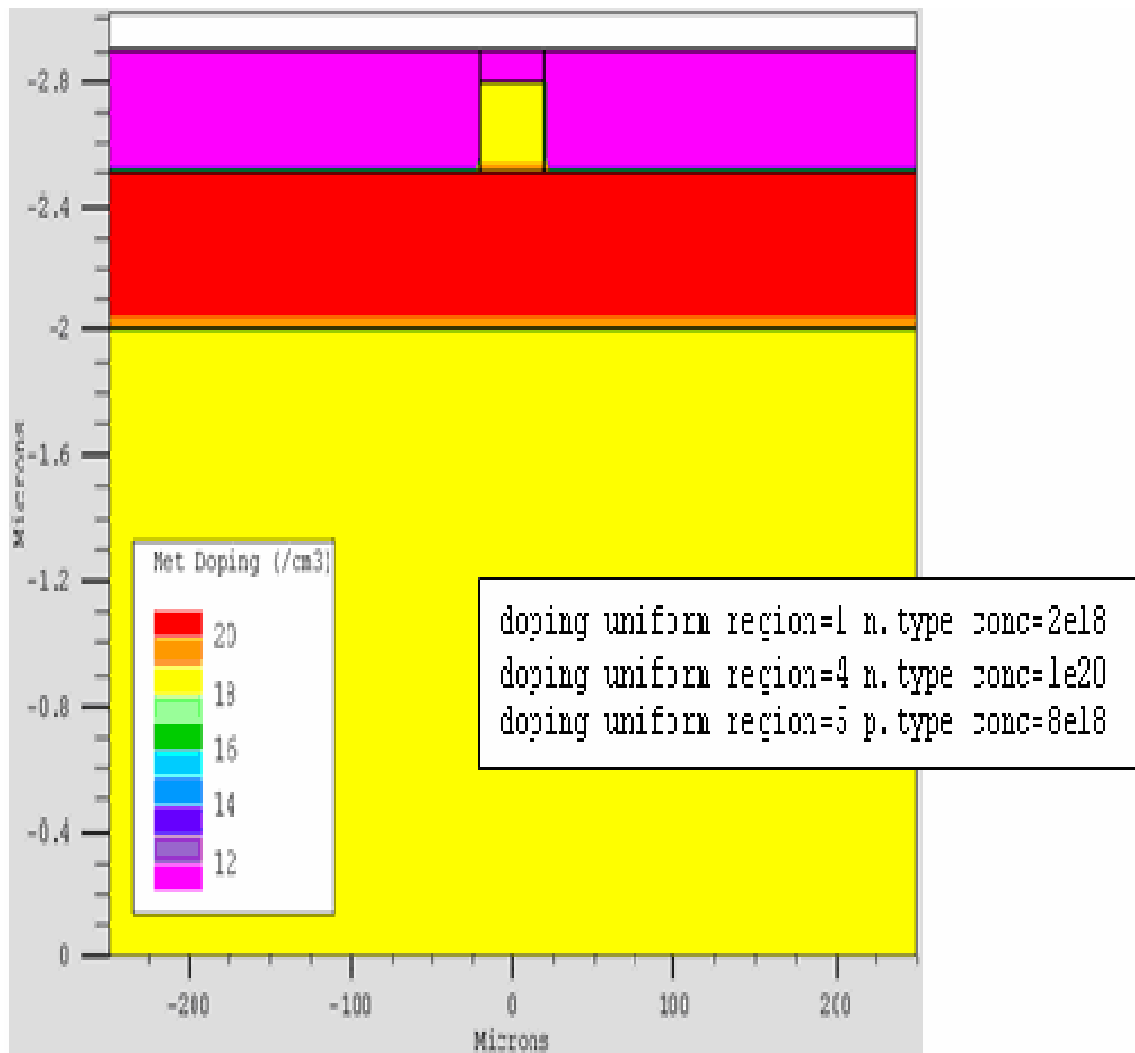
الشكل (II . 8): تعريف الأقطاب الكهربائية بواسطة ATLAS.

II. 4.1.7. التطعيم (DOPAGE):

الخطوة الأخيرة في تحديد البنية هي تحديد التطعيم، والذي يمكن أن يكون من النوع n أو p ، كما يمكن أن يكون توزيعه إما منتظمًا أو غير منتظم (عشوائيًا). ويتم تعريف التطعيم وفق الصيغة التالية:

DOPING < type de distribution > < type de dopant > < position des paramètres >

يبين الشكل (II . 9) الأوامر المستخدمة لتحديد التطعيم :



الشكل (II. 9) : توزيع التطعيم في بنية بواسطة ATLAS.

II.2.7.2 المواد و النماذج المستعملة:

بعد تحديد البنية ، من الضروري تحديد نماذج المواد ، وهي تتكون من خمسة أجزاء: خصائص المواد، النماذج ، الإتصال ، الواجهة ، والضوء .

II.2.7.1 خصائص المواد :

مجرد الانتهاء من تجميع البنية بالكامل، يجب تعريف المواد المستخدمة في بناء الجهاز. تسمح تعليمات تعريف المواد بتحديد بعض المعلومات الأساسية. يمكن أن تنطبق هذه القيم على مادة أو على منطقة معينة. وتتمثل القدرة الأهم التي تتيحها تعليمات تعريف المواد في إنشاء مواد يُعرفها المستخدم بنفسه. إذ يمكن للمستخدم استخدام أي

مادة بشكل عشوائي عند تعريف البنية، ثم تعديل جميع خصائصها لتتوافق مع خصائص مادة مرغوبة. وعلى الرغم من أن المادة ستحمل اسم المادة التي تم اختيارها، إلا أنها ستتصرف وظيفيًا كما يرغب المستخدم، بغض النظر عن اسمها [11].

يتم تعريف المواد على النحو التالي: [9]

MATERIAL < localisation >< définition du matériau >.

II. 2.2.7 الاتصال:

حدد الأمر Contact خصائص ووظائف الأقطاب الكهربائية. وتتم كتابة هذا الأمر بالصيغة التالية [12]:

CONTACT NAME = < name >

فيما يلي مثال على تعريف الأقطاب (جهات الاتصال):

CONTACT NAME = anode current

Contact name = anode workfun = 4.74

II. 3.2.7 الواجهة:

تحدد حدود انصاف النواقل أو العوازل. ويتم تعريفها على النحو التالي [13]:

INTERFACE <parameters><interface_dimensions>

II. 4.2.7 الضوء:

من الضروري، في محاكاة الخلايا الشمسية، تحديد مصدر الضوء بدقة. ويمكن لمطور البرنامج القيام بذلك من خلال مجموعة من الأوامر. وفيما يلي مثال على ذلك:

beamnum=1 x.origin=1000 y.origin=-30 angle=90.0 power.file=AM0dis.spec

reflects=1

front.reflback.reflquantum.eff=1.

تحدد هذه التعليمات عدد الحزم الضوئية، والذي هو 1، بالإضافة إلى موضع انطلاق الشعاع في حالة المصادر الضوئية ثنائية الأبعاد. حيث تشير x.origin و y.origin إلى إحداثيات x و y لنقطة الأصل.

تشير عبارة "du faisceau lumineux en microns" إلى أن موضع الشعاع يُعبر عنه بوحدة الميكرون. أما زاوية السقوط البالغة 90 درجة، فهي تعني أن الشعاع يسقط عموديًا على السطح المضاءة من الخلية الشمسية.

يُستخدم الأمر Power.file لتحديد المصدر الطيفي للضوء، وذلك من خلال الإشارة إلى اسم ملف بامتداد .spec. يحتوي على قيم شدة الطيف الضوئي المستخدمة مقابل أطوالها الموجية. أما الوسيط $reflects = 1$ ، فيُحدد عدد انعكاسات الشعاع الضوئي. وتُستخدم العبارة front.refl و back.refl للسماح بانعكاس الشعاع الضوئي عند الواجهتين الأمامية والخلفية للخلية. وأخيرًا، فإن الوسيط $quantum.eff = 1.0$ يعني أن الكفاءة الكمية تساوي 1، أي أن كل فوتون ممتص يولّد زوجًا إلكترون/ثقب. [14]

II. 5.2.7 النماذج:

يتم إختيار النماذج الفيزيائية وفق معايير معقدة تأخذ بعين الاعتبار خواص المواد المستعمل من أجل الوصول إلى محاكاة واقعية ، كما يجنبنا الاختيار الصحيح للنماذج الفيزيائية الحسابات بالإضافة وبالتالي إقتصاد الوقت والجهد[15] نعرف النماذج الفيزيائية في أطلس على النحو التالي :

MODEL< paramètres generales > paramètres du Modèles.

تنقسم النماذج المادية إلى خمس فئات :الحركية ، الالتحام ، وحركية الحاملات ، والتأين الناتج عن التأثير والنفق ، ويعتمد اختيار النموذج على المواد المختارة للمحاكاة .المثال أدناه ينشط العديد من النماذج.

CONMOB: هو نموذج الحركية اعتمادًا على تركيز التطعيم.

FLDMOB:وهو نموذج التنقل الذي يعتمد على الحركية المتأثرة بالحقل الكهربائي.

SRH: هو نموذج ShockleyRead-Hall لإحصائيات حاملات الشحنة [4]

II. 3.7 الطرق الرقمية للحل :

بعد تحديد نموذج المواد، يجب تحديد الطريقة العددية المستخدمة في الحسابات. ويُستخدم الأمر Method لهذا الغرض، وهو الأمر الوحيد المخصص لاختيار الطريقة العددية.

توجد عدة تقنيات عددية تُستخدم لحل المعادلات المرتبطة بمشكلات أجهزة أشباه الموصلات، ويعتمد محاكي

Silvaco Atlas على ثلاثة أنواع من أساليب الحل : [16]

-الطريقة المفصولة(Gummel)

-الطريقة المقترنة كليًا(NEWTON)

- طريقةBLOC

II. 1.3.7 : GUMMEL

هي أبسط الطرق تعتمد التقارب الخطي ، حيث تحل المعادلات لكل متغير على حدة.

II. 2.3.7 : NEWTON

تستعمل في المعادلات الأسية ، و يكون التقارب من الدرجة الثانية ، تحل المعادلات لجميع المتغيرات معا ، وتستغرق وقتا أكثر مقارنة مع طريقة Gumme .

II. 3.3.7 : BLOCK

تستعمل في نماذج التسخين ، حيث تحل المعادلات الثلاثة بطريقة Newton ثم تحل معادلة التدفق الحراري على حدة.

يمكن إستعمال أكثر من طريقة معا مثل استعمال طريقتي غامال ونيوتن على النحو التالي:

method newton gummel

II. 4.7 الطرق الرقمية للحل :

عند الانتهاء من اختيار الطريقة العددية، تأتي الخطوة التالية وهي تحديد آلية الحل.

تتقسم عملية تحديد الحل إلى مجموعة من التعليمات تشمل LOG ، SOLVE ، LOAD ، و SAVE. [17]

الأمر: LOG

يقوم الأمر LOG بتسجيل جميع الخصائص النهائية في ملف محدد. يتم توليد بيانات التيار المستمر (DC) ، أو البيانات الانتقالية (Transient) ، أو بيانات التيار المتردد (AC) من خلال تعليمة SOLVE، ولكن ذلك يكون بعد تنفيذ تعليمة LOG.

فيما يلي مثال على استخدام الأمر: LOG

LOG OUTFILE = <filename>

في هذا المثال، تقوم تعليمة LOG بحفظ بيانات العلاقة بين التيار والجهد في ملف يُدعى <....>.log. [18]

الأمر: SOLVE

تأتي تعليمة SOLVE مباشرة بعد تعليمة LOG، وهي المسؤولة عن تنفيذ عملية الحل لنقطة أو أكثر من نقاط الانحياز. (polarisation) .

تأخذ هذه التعليمة الصيغة الأساسية التالية: [14]

SOLVE < bias_points >

على سبيل المثال:

solvev anode = 0 vstep = 0.01 vfinal = 2 name = anode

في هذا المثال، تبدأ عملية الحل بجهد انحياز مقداره 0 فولت على جهة الاتصال المسماة anode، وتزداد بقيم خطوات قدرها 0.01 فولت حتى تصل إلى الجهد النهائي 2 فولت، وذلك على نفس جهة الاتصال المحددة بالاسم anode.

Load et Save : الأمر

LOAD يقوم بتحميل الحلول السابقة من ملفات، واستخدامها كقيم ابتدائية لنقاط انحياز أخرى.

أما أمر **SAVE**، فيُستخدم لحفظ جميع المعلومات المتعلقة بنقطة عقدة معينة في ملف مخرجات (Output file)

تكون صيغتا الأمرين كالتالي [17] :

LOAD INFILE=<filename>

SAVE OUTFILE =<filename>

4.7.ii عرض النتائج:

عند التوصل إلى الحلول الخاصة بمحاكاة البنية، يمكن تمثيل البيانات الناتجة بطريقة رسومية باستخدام برنامج

TonyPlot كما يمكن الحصول على خصائص الجهاز واستخراجها من خلال استخدام التعليمة **EXTRACT**

[18]

المراجع

- [1] D. Bradley P, Advanced ThermoPhotovoltaic Cells Modeling, Optimized for Use in Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGS) for Mars and Deep Spase Missions”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2004.
- [2] ATLAS User’s Manuel, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2011.
- [3] B.Garcia, Jr, Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas” , Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2007.
- [4] بحري نوال وبوطبة فوزية " دراسة خلية شمسية P-N بوصلة غير متجانسة oxide/si مذكرة ماستر 2020/2019 جامعة محمد خيضر .بسكرة.
- [5] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.
- [6] TonyPlot User’s Manual, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2012.
- [7] DeckBuild User’s Manual, Device simulation software”, SILVACO International, California. 2013.
- [8] S. MOSTEFA K, Etude et Simulation de Cellules Photovoltaiques a Couches Minces à Base de CIS et CIGS”, Mémoire magistère, Université Abou Bakr Belkid- Tlemcen. 2012.
- [9] بو عبد الله عبد الغني " محاكاة رقمية لتأثير الطبقة Sb في تقليص في العيوب الخلية الشمسية CiGs مذكرة دكتوراء 2021/2020 جامعة محمد خيضر.بسكرة.
- [10] J. Lavery, Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco”, Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008.

- [11] D.Melouki, Mémoire de Master, "ÉTUDE DES PERFORMANCES DE LA CELLULE InGaP/GaAs/Ge PAR SIMULATION", Université Mohammed Boudhiafde M'sila, (2016).
- [12] B. Garcia. Jr, "Indium nitride multifunction solar cell simulation using silvaco atlas", Thesis Naval postgraduate School Monterey California, (2007).
- [13] B.Mamri, Thèse de Magister, "Modélisation d'une cellule solaire à puits quantique en GaAs/AlGaAs", Université Mentouri Constantine1, (2014).
- [14] I .MALLEM, Thèse de Magister, "Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGe par SILVACO", Université Mohamed Khider Biskra, (2014).
- [15] R. Boumaraf, "Simulation de l'effet de la température et les défauts sur les caractéristiques électriques des diodes à base de GaAs," Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [16] Y.Marouf, Thèse de Magister, "Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco", Université Mohamed Khider – Biskra, (2013).
- [17] N .Ben Chenief, Mémoire de Master, "Simulation numérique des caractéristiques cellule solaire a double jonction en GaAs/Ge", Université Mohamed Khider Biskra, (2017).
- [18] M. Mancer, Mémoire de Master, "Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs)", Université Mohamed Khider – Biskra, (2012).

الفصل الثالث:

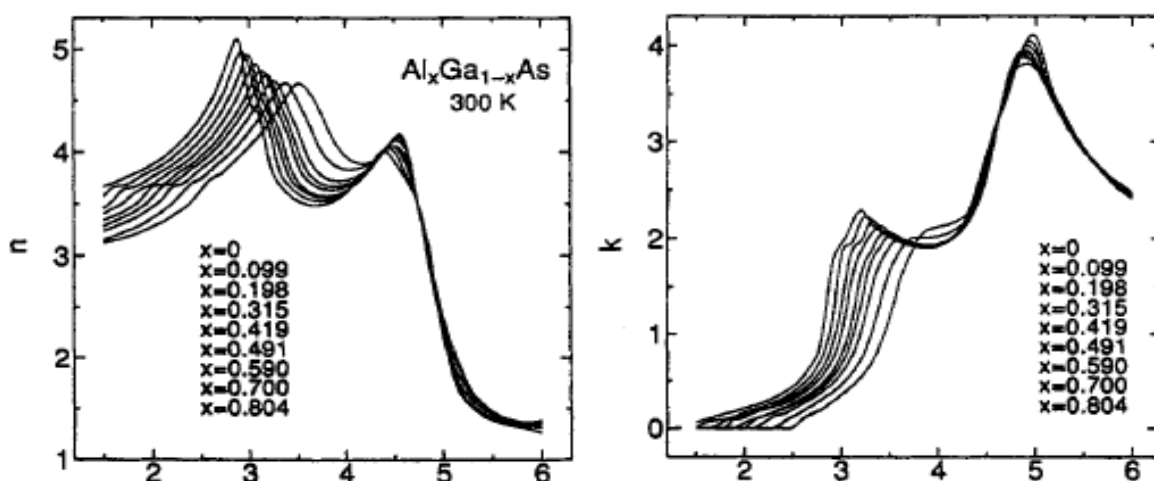
مناقشة و تحليل النتائج

1.III المقدمة:

من اجل المحاكاة العددية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية. SILVACO-ATLAS نستخدم في هذا عمل الخصائص الكهربائية متمثلة في الخاصية جهد تيار (J-V) ووسائط الخروج (كثافة تيار الدارة القصيرة I_{sc} ، جهد الدارة المفتوحة V_{oc} ، معامل الشكل FF و مردود خلية η) تحت إضاءة AMO . الهدف من هذا العمل هو تحسين من كفاءة خلية GaAs وذلك باستخدام مفهوم الوصلة ثنائية الوصلة حيث اخترنا خلية من GaSb كخلية سفلية لخلية GaAs . ينقسم هذا العمل إلى ثلاثة أقسام. سندرس في القسم الأول الخلية GaAs ، القسم الثاني الخلية GaSb ، القسم الثالث الخلية ثنائية الوصلة GaAs/GaSb

2.III أنصاف نواقل $Al_xGa_{1-x}As$ و GaSb :1. 2.III أنصاف نواقل $Al_xGa_{1-x}As$:

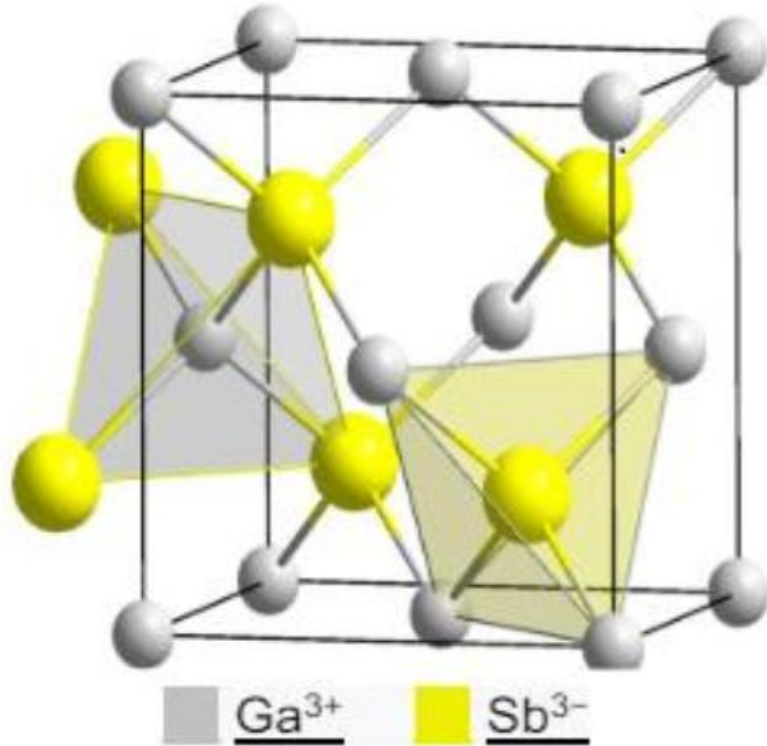
سبيكة $Al_xGa_{1-x}As$ هي محلول صلب مكون من GaAs و AlAs يمكن الحصول على أي خاصية فيزيائية متعلقة بهذه السبيكة من خلال مزج بين الخصائص المقابلة لمركبتي GaAs و AlAs تتميز كلا المادتين بنفس البنية البلورية، كما أن خواصهما الفيزيائية متقاربة. تتغير طبيعة الانتقال الطاقي في سبيكة $Al_xGa_{1-x}As$ تبعاً لنسبة الألمنيوم x ، حيث تقع هذه النسبة ضمن المجال $0 < x < 1$ عندما تكون نسبة الألمنيوم أقل من 0.45، يكون الانتقال الطاقي في السبيكة مباشراً، مماثلاً لذلك الموجود في GaAs. أما عندما تتجاوز نسبة الألمنيوم 0.45، فإن الانتقال يصبح غير مباشر كما هو الحال في و [1.2]AlAs. شكل 1.III يوضح قرينة انكسار n و معامل انطفاء k ل $Al_xGa_{1-x}As$.



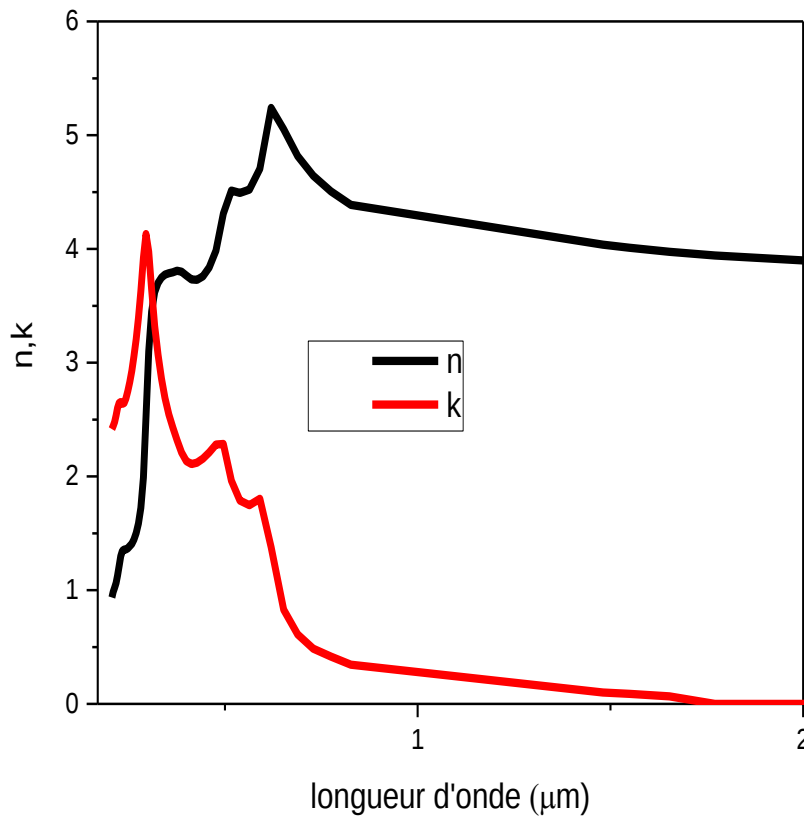
الشكل 1.III : قرينة انكسار n و معامل انطفاء k ل $Al_xGa_{1-x}As$.

2.2.III. نصف ناقل GaSb :

يُعد مركب GaSb ذا أهمية كبيرة في صناعة الإلكترونيات أو الإلكترونيات الضوئية، حيث استُخدم هذا المركب بالفعل في تصنيع مكونات مثل الكواشف الضوئية والليز والخلايا الكهروضوئية. وبوجه عام، فإن المواد شبه الموصلة من النوع III-V، مثل GaSb، تتبلور ضمن البنية المكعبة ذات الوجوه المركزية المعروفة باسم بنية "الزنك بلاند" (Zinc-Blende). يوضح الشكل 2.III الخلية الأولية ضمن تكوين الزنك بلاند. أما ثابت الشبكة لمركب GaSb فهو في حدود 6.096 أنغستروم كما يظهر في الشكل 3.III قيم معامل الانكسار ومعامل الانطفاء لمادة GaSb بدلالة أطوال الموجات [3].



الشكل (2.III): البنية البلورية ل GaSb



الشكل (3.III) : قرينة انكسار n و معامل انطفاء k ل GaSb .

2.III. 3. خصائص المواد المستخدمة في المحاكاة:

يمكن تلخيص خواص المواد المستعملة في الجدول التالي:

الجدول 1.III: خواص المواد المدروسة.

Al _x Ga _{1-x} As	GaSb	الخاصية
1.10 ⁻⁹	1	مدة حياة الكترون $\tau_n(s)$
2.10 ⁻⁸	1	مدة حياة البرتون $\tau_p(s)$

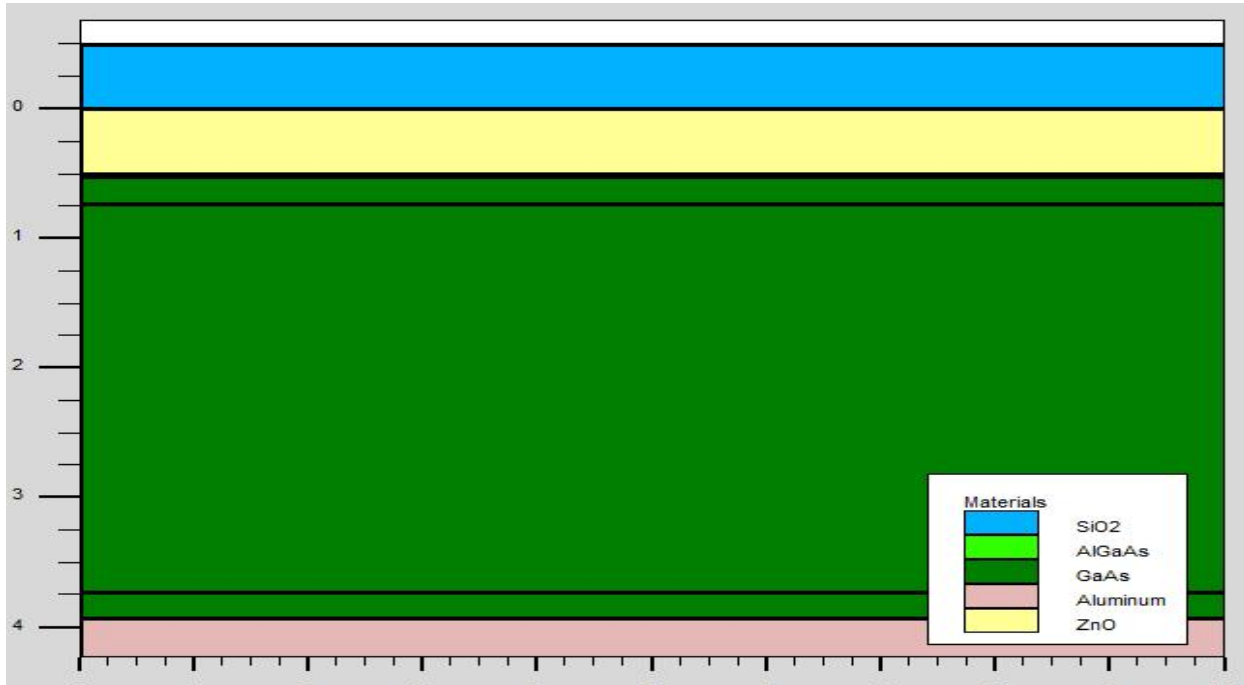
3.III الخلية الشمسية GaAs:

بنية الخلية GasA المختارة في هذه الدراسة تحتوي على اربع طبقات (نافذة p^+ من $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ ، باعث p ، قاعدة n و مسند n^+) وطبقتين من الأعلى من ZnO و SiO_2 . بالإضافة الى المهبط والمصعد. سمك وتطعيم مختلف طبقات الخلية مجدولة في جدول 2.III .

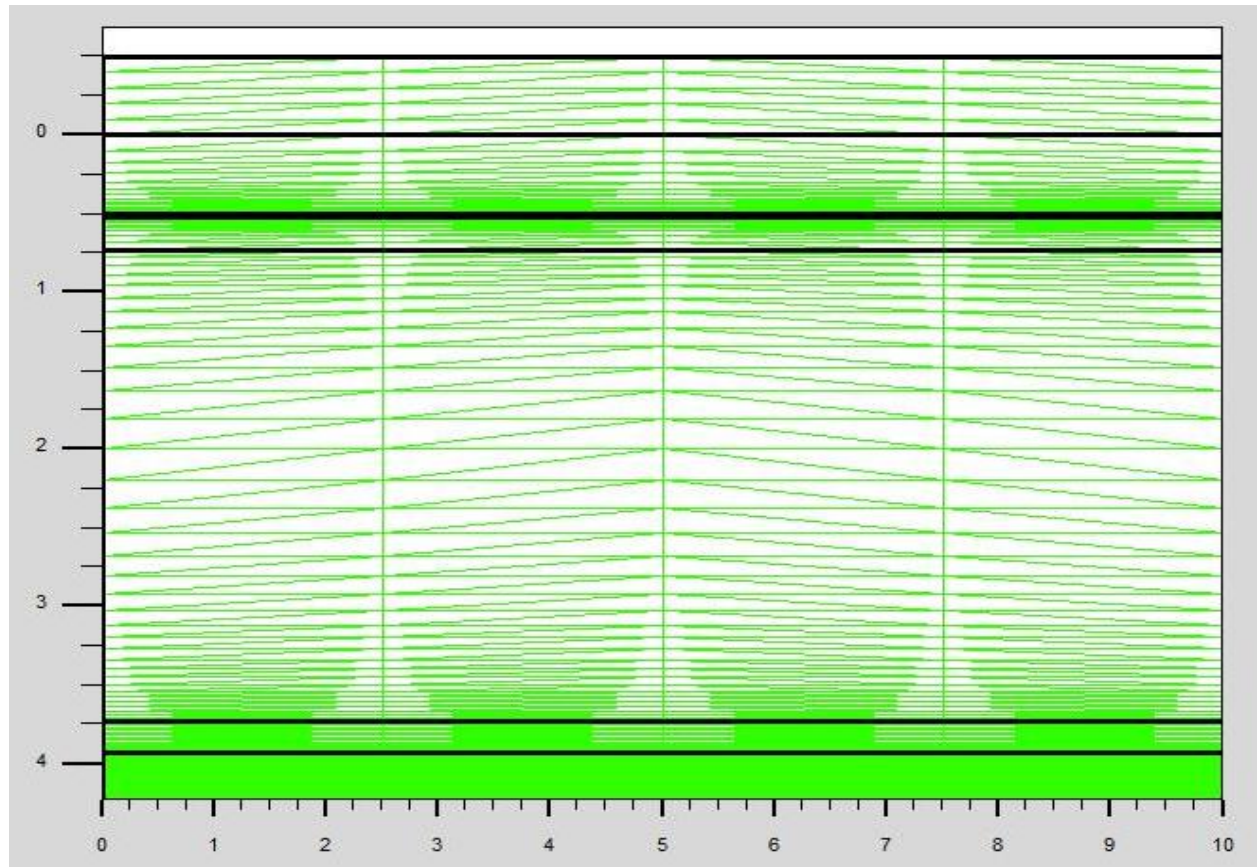
الجدول 2.III: سمك وتطعيم مختلف طبقات الخلية GaAs.

المنطقة	نوع تطعيم	(cm^{-3}) تطعيم	سمك (μm)
(SiO_2) اوكسيد	/	/	0.5
(ZnO) مصعد	/	/	0.5
($Al_{0.8}Ga_{0.2}As$) نافذة	P^+	5.10^{19}	0.03
(GaAs) باعث	P	2.10^{18}	0.2
(GaAs) قاعدة	n	2.10^{17}	3
(GaAs) مسند	n^+	2.10^{19}	0.2
(Al) مهبط	/	/	0.2

تظهر بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS في شكل 4.III و شبكة هذه الخلية في شكل 5.III.

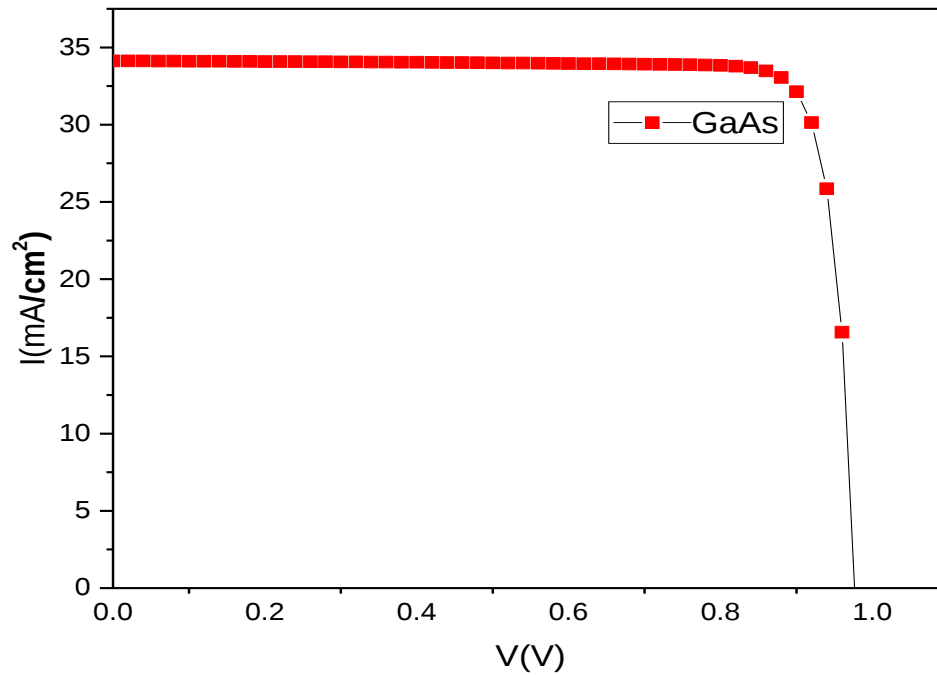


الشكل (4.III): بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS .



الشكل (5.III): بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS .

يوضح الشكل (6.iii) منحنى الخاصية جهد تيار (J-V) للخلية تحت إضاءة AMO. اعتمادا على هذا المنحني يمكن استخراج وسائط الخروج المسجلة في الجدول 3.iii. نلاحظ من هذا الجدول أن النتائج التي حصلنا عليها قريبة من النتائج المتحصل عليها في المرجع [2].



الشكل (6.iii): منحنى الخاصية جهد تيار (I-V) للخلية تحت إضاءة AMO.

الجدول 3.iii: قيم وسائط الخروج للخلية GaAs .

الخلية	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$p_{max}(\text{mW}/\text{cm}^2)$	$FF(\%)$	$\eta(\%)$
هذا العمل	34.13	0.97	29.08	87.27	21.04
المرجع [2]	34.01	0.98	29	87.36	21.64

4.III الخلية الشمسية GaSb:

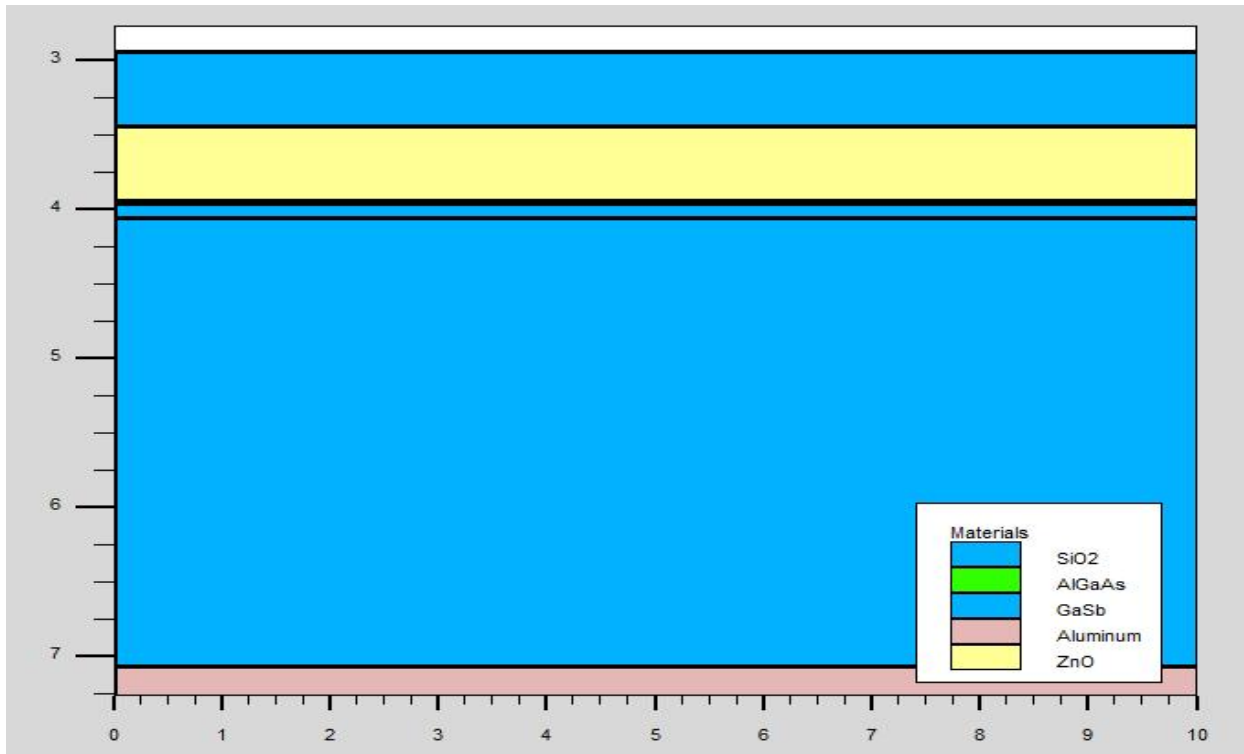
نعتبر هذه خلية كخلية سفلية لخلية ثنائية الوصلة. بنية الخلية GaSb التي تمت محاكاتها بـ ATLAS موضحة في شكل (7.III) و شبكة هذه الخلية في شكل (8.III). تحتوي هذه خلية على ثلاث طبقات (نافذة p من $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ باعثة p وقاعدة n من GaSb) بالإضافة إلى طبقتين ضد عاكسة من ZnO و SiO_2 والمهبط والمصعد. سمك وتطعيم مختلف طبقات الخلية مجدولة في جدول 4.III .

الجدول 4.III: سمك وتطعيم مختلف طبقات الخلية GaSb.

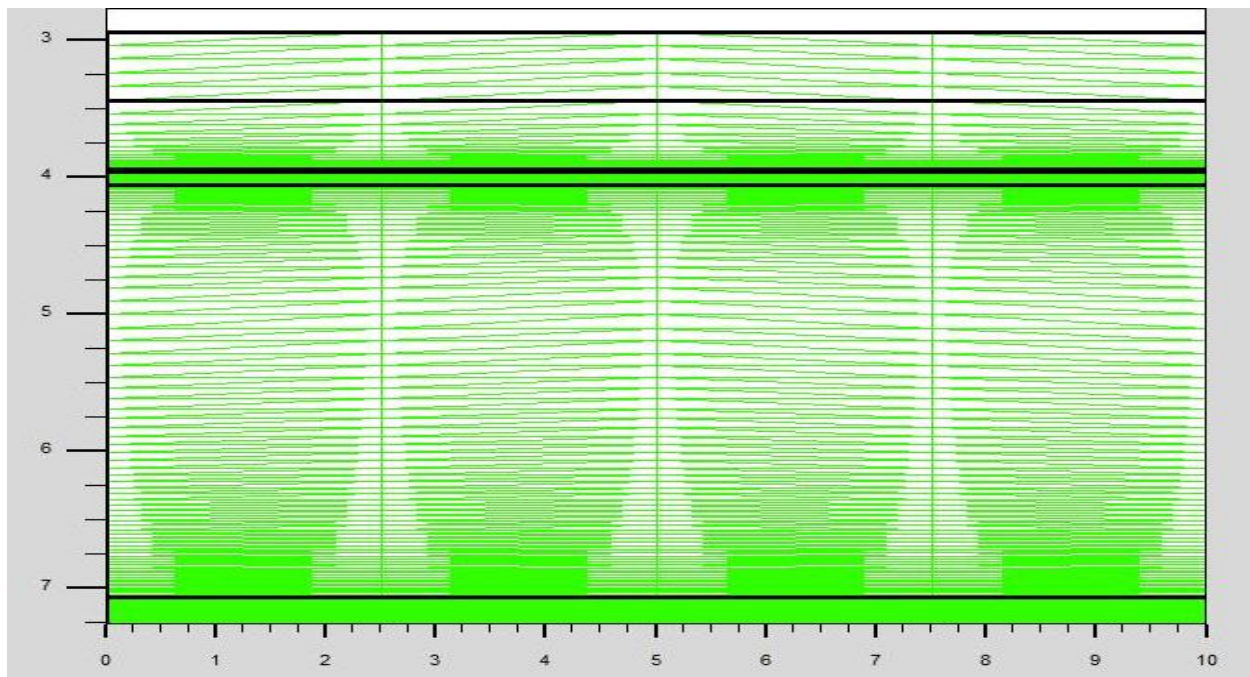
المنطقة	نوع تطعيم	(cm^{-3}) تطعيم	(μm) سمك
(SiO_2) اوكسيد	/	/	0.5
(ZnO) مصعد	/	/	0.5
نافذة ($Al_{0.8}Ga_{0.2}As$)	P	2.10^{18}	0.02
باعث (GaSb)	P	2.10^{18}	0.1
قاعدة (GaSb)	n	2.10^{18}	3
مهبط (Al)	/	/	0.2

يبين الشكل (9.III) منحنى الخاصية جهد تيار (J-V) للخلية تحت إضاءة AMO. يمكن حساب وسائط

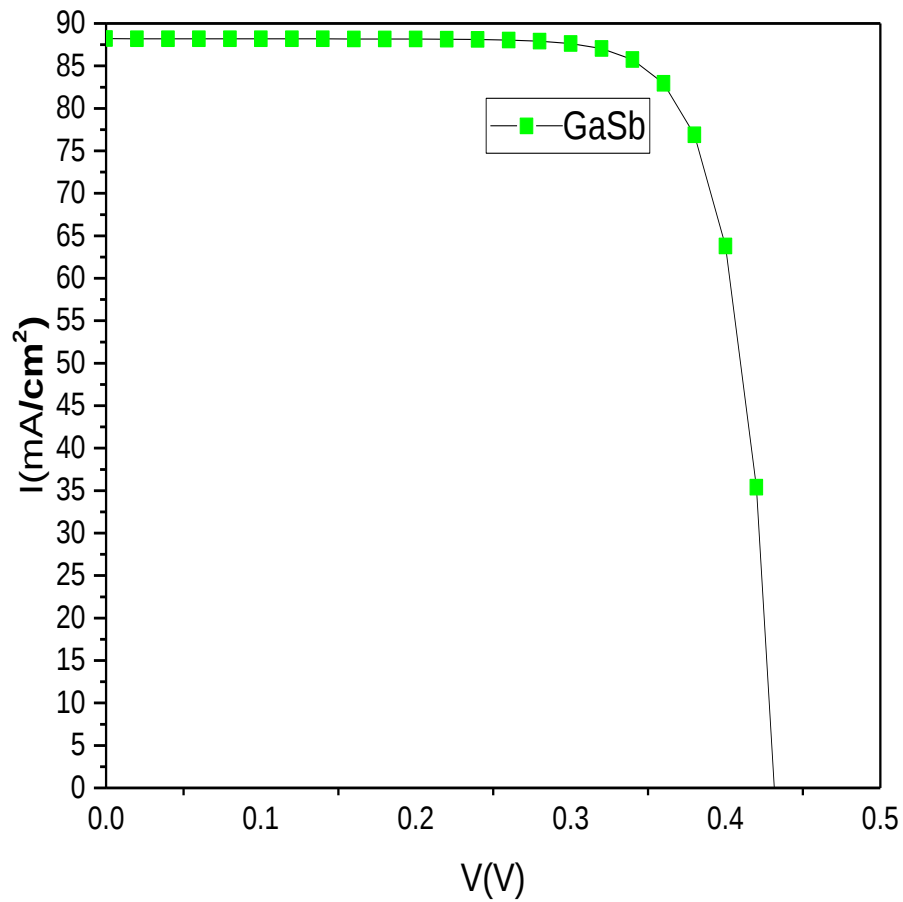
الخروج من هذا المنحني هذه الوسائط مسجلة في الجدول 5.III



الشكل (7.III): بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS .



الشكل (8.III): بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS



الشكل (9.111): منحنى الخاصية جهد تيار (J-V) للخلية تحت إضاءة AMO

الجدول 5.111 قيم وسائط الخروج الخلية GaSb.

الخلية	$J_{sc}(\text{mA/cm}^2)$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$P_{max}(\text{mW/cm}^2)$	FF(%)	$\eta(\%)$
هذا العمل	88.21	0.43	29.86	78.45	21.59

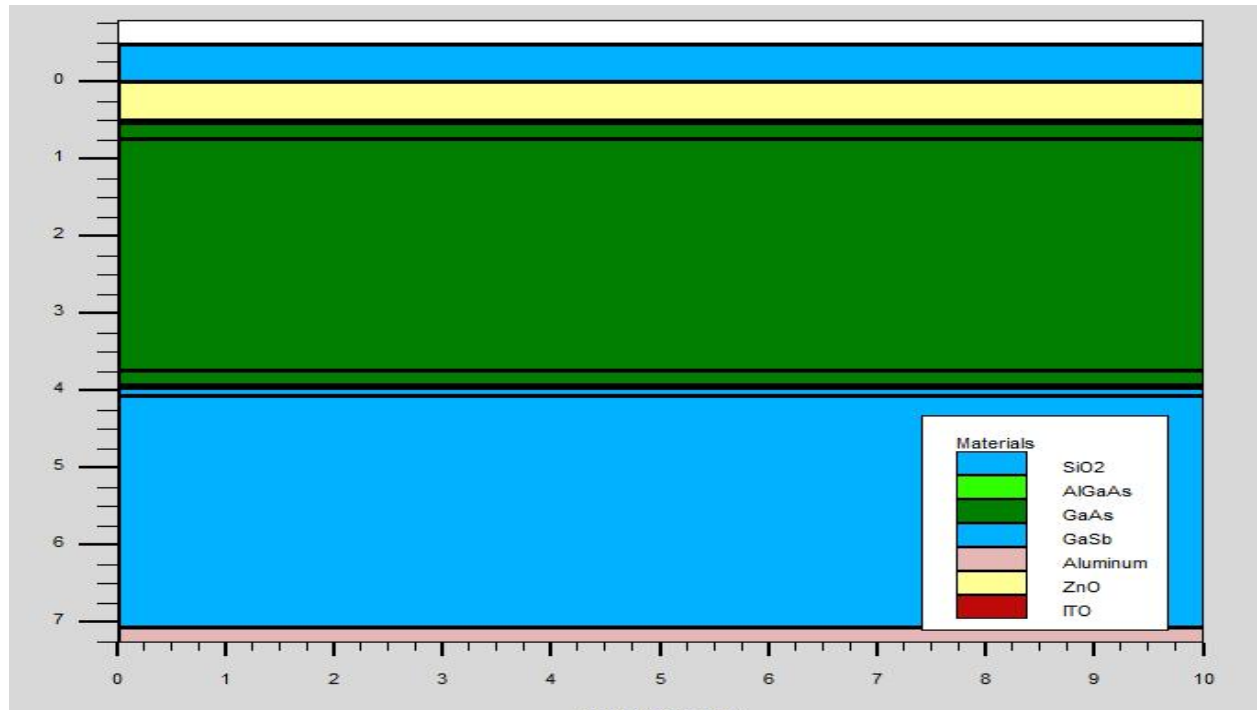
4.III الخلية الشمسية ثنائية الوصلة GaAs /GaSb:

في هذا جزء من الدراسة سنقوم بتجميع الخليتين المدروستين سابقا لتكوين الخلية ثنائية الوصلة . البنية المقترحة مبينة في شكل (10.III). سمك وتطعيم مختلف طبقات الخلية موضح في نفس الشكل. تظهر بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS في شكل (11.III) و شبكة هذه الخلية في (شكل 12.III).

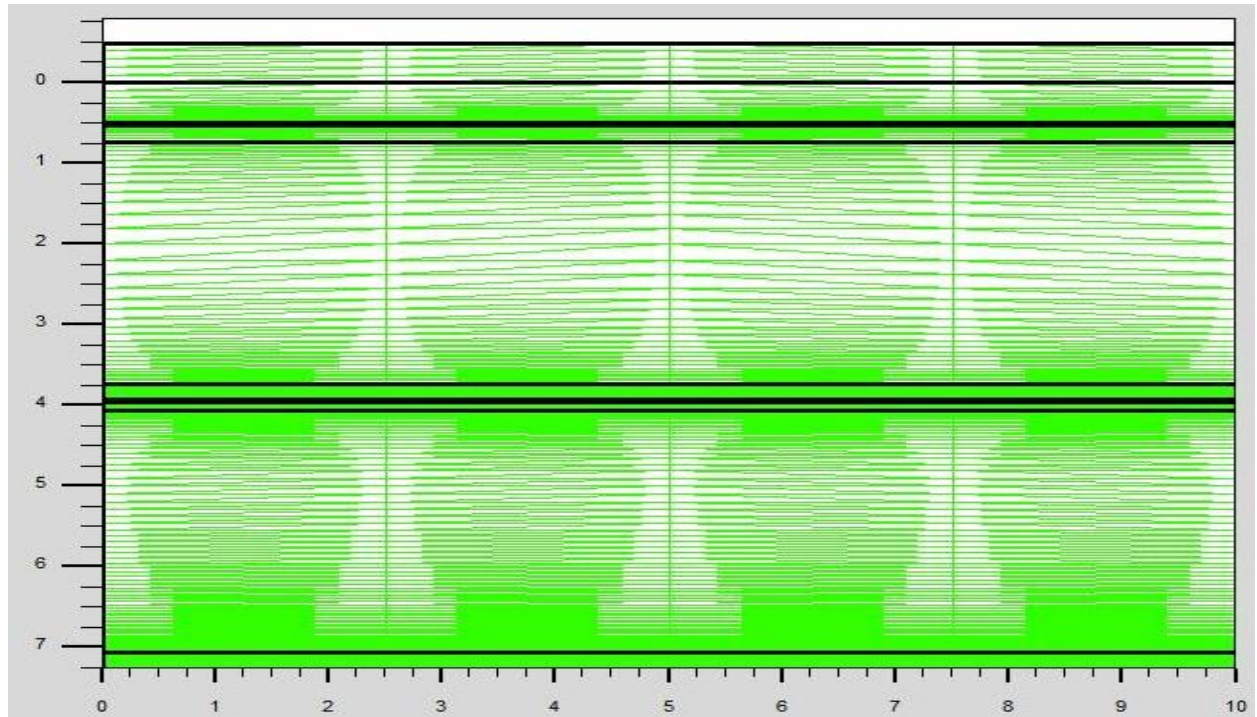
SiO ₂		X=0.5 μm
مصعد	ZnO	X=0.5μm
نافذة	Al _{0.8} Ga _{0.2} As (P ⁺ =5*10 ¹⁹)	X=0.03 μm
باعث	GaAs (p=2*10 ¹⁸)	X=0.2 μm
قاعدة	GaAs (n=2*10 ¹⁷)	X=3 μm
مسند	GaAs (n ⁺ =2*10 ¹⁹)	X=0.2μm
ITO		X=0.01μm
نافذة	Al _{0.8} Ga _{0.2} As (P=2*10 ¹⁸)	X=0.02 μm
باعث	GaSb (p=1*10 ¹⁸)	X=0.1 μm
قاعدة	GaSb (n=2*10 ¹⁸)	X=3 μm
مهبط	Al	X=0.2μm

الشكل (10.III): بنية الخلية ثنائية الوصلة.

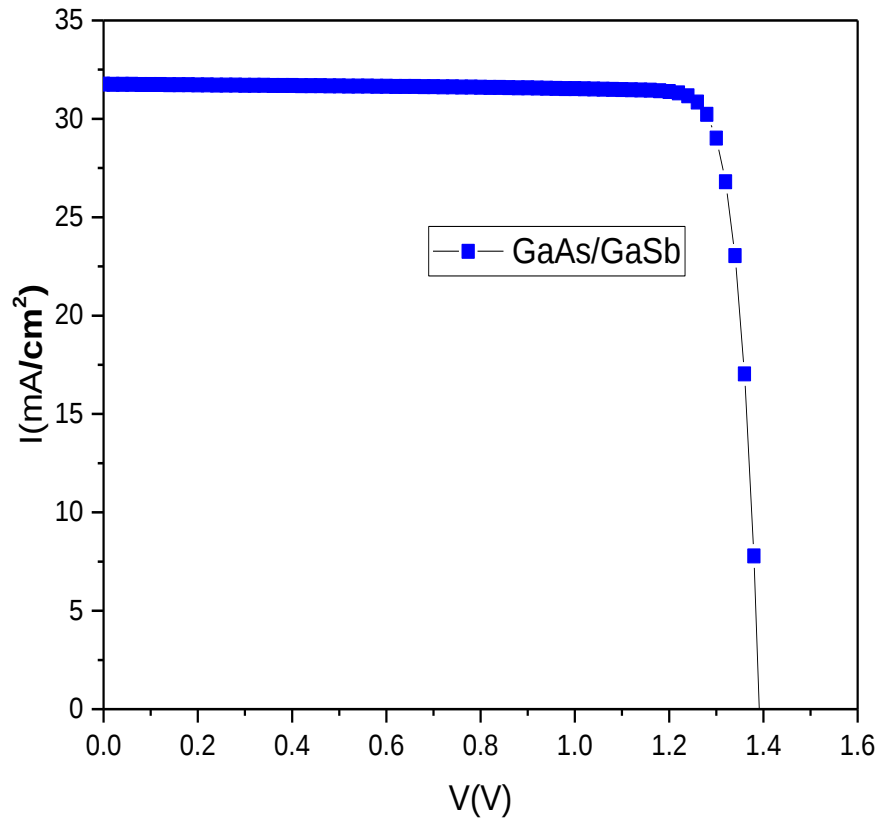
يبين الشكل (13.III) منحنى الخاصية جهد تيار (J-V) للخلية تحت إضاءة AMO. يمكن حساب وسائط الخروج من هذا المنحني هذه الوسائط مسجلة في الجدول 5.III.



الشكل (11.III): بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS.



الشكل (12.III): بنية الخلية التي تمت محاكاتها بواسطة ATLAS



الشكل 13.III: منحنى الخاصية جهد تيار (J-V) للخلية تحت إضاءة AMO.

الجدول 6.III: قيم وسائط الخروج للخلية GaAs/GaSb

الخلية	$J_{sc}(\text{mA/cm}^2)$	$V_{oc} (V)$	$p_{max}(\text{mW/cm}^2)$	FF(%)	$\eta(\%)$
هذا العمل	31.75	1.39	38.87	87.98	28.11

بمقارنة النتائج المتحصل عليها نجد أن الخلية ذات وصلتين قدمت أحسن مردود ب 28.11 بالمئة مقارنة بخلية GaAs التي قدمت مردود ب 21.04 بالمئة.

المراجع:

- [1] S. Maalla et M. Mansouri, " Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en AlGaAs/InP", Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2020.
- [2] M. Mancet, " Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs) ", Thèse de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [3] S. Adachi, "Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors Numerical Data and Graphical Information", Kluwer Academic Publishers, USA, 1999.
- [4] A.Merouani , " Simulation d'une cellule solaire Thermo-Photovoltaïque à base de GaSb ", Thèse de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2017

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة

يُعد برنامج SILVACO واحدًا من أكثر أدوات المحاكاة تطورًا في دراسة الأجهزة البصرية الإلكترونية. في هذا العمل البحثي، استخدمنا برنامج SILVACO لدراسة ومقارنة الخصائص الكهربائية لخلية شمسية مزدوجة الوصلة (GaAs/GaSb) ومقارنتها بخلية شمسية أحادية الوصلة (GaAs). وقد تم استخدام طيف الشمس AM0 في المحاكاة. وقد قُسمت الدراسة إلى ثلاث مراحل رئيسية.

في الجزء الأول، قمنا بعرض منحنى التيار-الجهد (J-V) ومعلومات الخروج الخاصة بخلية GaAs وقد تم الحصول على معلومات الخروج لهذه الخلية من خلال المحاكاة، وهي كالتالي:

$$J_{sc}=34.13 \quad V_{oc}=0.97 \quad P_{max}=29.08 \quad FF=87.27 \% \quad \eta=21.04$$

في الجزء الثاني، تم تحديد نفس المعلومات لخلية تعتمد على مادة (GaSb) وقد حصلنا على النتائج التالية:

$$J_{sc}=88.21 \quad V_{oc}=0.43 \quad P_{max}=29.86 \quad FF=78.45 \% \quad \eta=21.59$$

في الجزء الثالث، وبنفس الطريقة، تم دراسة الخلية الشمسية مزدوجة الوصلة GaAs/GaSb ، وقد حصلنا على النتائج التالية:

$$J_{sc}=31.75 \quad V_{oc}=1.39 \quad P_{max}=38.87 \quad FF=87.98 \% \quad \eta=28.11$$

نلاحظ تحسنًا ملحوظًا في كفاءة الخلية الشمسية مزدوجة الوصلة (GaAs/GaSb) ، حيث تُظهر خصائص كهربائية تقارب تلك الناتجة عن توصيل خليتين على التوالي. التيار المار في الدارة يكون هو الأصغر، ويفرضه وجود الخلية ذات فجوة الطاقة الأكبر في المقدمة. في حين أن الجهد الكلي يُمثل مجموع الجهود الناتجين عن الخليتين. وبالتالي، فإن تحسين الكفاءة مرتبط بشكل أساسي بالزيادة الكبيرة في الجهد.

Résumé :

Les cellules photovoltaïques sont des composants capables de convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique, en utilisant de la lumière avec certains matériaux semi-conducteurs. Ce mémoire est une application du logiciel SILVACO-ATLAS pour comparer les caractéristiques électrique calculées d'une cellule solaire à double jonction en GaAs/GaSb avec ceux d'une cellule solaire à homo-jonction en InP. Cette simulation sous éclairement AM0. Les paramètres de sortie de la cellule solaire double jonction GaAs/GaSb calculés par simulation sont : la densité de courant de court circuit $J_{sc}=31.75 \text{ mA/cm}^2$, la tension de circuit ouvert $V_{co}=1.39 \text{ V}$, le facteur de forme $FF = 87.98 \%$, et le rendement $\eta = 28.11 \%$. Quant à Les paramètres de sortie de la cellule solaire en GaAs est : la densité de courant de court circuit $J_{sc} = 34.16 \text{ mA/cm}^2$, la tension de circuit ouvert $V_{co} = 0.97 \text{ V}$, le facteur de forme $FF = 87.27 \%$, et le rendement $\eta = 21.04 \%$. Ces résultats montrent que le rendement de la cellule solaire à double jonction est meilleur

Mots clés : Cellule solaire, SILVACO-ATLAS, GaAs/GaSb, GaAs, double jonction.

المخلص:

الخلايا الكهروضوئية هي مكونات قادرة على تحويل الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية، باستخدام الضوء مع بعض مواد أشباه الموصلات. هذه المذكرة عبارة عن استخدام لبرنامج SILVACO-ATLAS من أجل مقارنة الخصائص الكهربائية بين خلية شمسية ذات وصلتين من GaAs/ GaSb ووصلة واحدة من GaAs. هذه المحاكاة تحت إضاءة AMO. بفضل المحاكاة تمكنا من الحصول على وسائط الخروج للخلية الشمسية ذات وصلتين: GaAs/ GaSb كثافة تيار الدارة القصيرة $J_{sc} = 31.75 \text{ mA/cm}^2$ ، جهد الدارة المفتوحة $V_{oc}=1.39 \text{ V}$ ، معامل الشكل $FF = 87.98\%$ ، وكفاءة المردود $\eta = 28.11\%$. أما بالنسبة لوسائط الخروج للخلية الشمسية GaAs هي : كثافة تيار الدارة القصيرة $J_{sc} = 34.16 \text{ mA/cm}^2$ ، جهد الدارة المفتوحة $V_{oc}=0.97 \text{ V}$ ، معامل الشكل $FF = 87.27\%$ ، وكفاءة المردود $\eta = 21.04 \%$. وتظهر هذه النتائج أن مردود الخلية الشمسية ذات وصلتين أفضل وذلك عائد إلى الزيادة المعتبرة في الجهد

الكلمات المفتاحية : خلية شمسية، SILVACO-ATLAS , GaAs/ GaSb , GaAs ذات وصلتين.

