

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



# مذكرة ماستر

ميدان علوم المادة

فرع فيزياء

فيزياء المواد

رقم: أدخل رقم تسلسل المذكرة

إعداد الطالب:

محامدية نور ولكل سماح

يوم: 26/06/2022

## تأثير العيوب النقطية على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge

### لجنة المناقشة:

رئيس	جامعة محمد خيضر - بسكرة	استاذ	عبد الوهاب وهاب
مشرف	جامعة محمد خيضر - بسكرة	أ.محاضر	لعياضي وداد
ممتحن	جامعة محمد خيضر - بسكرة	أ.محاضر	نور الدين اوحباب

# الاهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

"وقل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنين"

سورة التوبة ، الآية 105.

ثمرة هذا الجهد المتواضع أهديها بعد الحمد لله الواحد الأحد على توفيقه الى أغلى وأوفى شمعتين أضيئ بهما درب حياتي الوالدين الكريمين فجزاهم الله عنا خير جزاء.  
الى من أتقاسم معهم المحبة الأسرية أخوتي : جمال ، رشيد ، صلاح ، خالد ، سارة ، ريم ، نصرو ، والى أحابي أبناء أخوتي الصغار : عماد ، لجين ، ورياض ، اياد.  
الى أعز الأصدقاء والزملاء الذين رافقونا المسيرة الدراسية الجامعية والى كل من وسعه قلبي ولم تسعه ورقتي.

لكم جميعا أهدي ثمرة جهدي.

# الاهداء

الى الانسان الذي كان لي سند وقدوة وقوة أبي الحبيب أطال الله في عمره  
الى من أعطتني الكثير ولم تطلب مقابل الى من كافحت من أجلي أمي العزيزة  
الى باعثة العزم والتصميم والارادة صاحبة البصمة الحادقة في حياتي خالتي  
الزهران

الى رفقاء البيت الطاهر الأنيق أشقائي الأعراف

الى كل من ساندني في مشواري الدراسي

والى كل من وسعه قلبي ولم تسعه ورقتي

أهدي ثمرة جهدي لكم

سماح

# شكر و عرفان

اللهم أعوذ بك من قلب لا يخشع وعين لا تدمع وعلم لا ينفع ودعاء لا يستجاب. نحمد  
ونشكر المولى عز وجل على كل العزيمة والصبر الذي منحنا اياهما طيلة هذا المشوار  
ليتكمل جهدنا بهذا العمل.

نتقدم بخالص شكرنا الى أساتذتنا المشرفة " لعياضي و داد" التي لم تدخر جهدا  
لمساعدتنا في انجاز هذا العمل وعلى المجهود الذي بذلته معنا من خلال متابعتها للعمل  
بنصائحها القيمة .

كم نتقدم بخالص الشكر والتقدير الى أساتذتنا الكرام لجنة المناقشة لقبولهم مناقشة  
هذه المذكرة وافادتنا بتصحيحاتهم واثرائنا بتوجيهاتهم.

ونختتم شكرنا الى كل من ساعدنا في انجاز هذه المذكرة من قريب أو بعيد ولو بكلمة  
طيبة أو دعاء.

# قائمة الجداول

رقم الصفحة	عنوان الجدول	الجدول
48	الاعدادات الخاصة بالمواد التي تم ادخالها في برنامج المحاكاة SCAPS.	1.III
48	التطعيم والسلك بالنسبة للخلية الشمسية ( $p^+/n/n^+$ ).	2.III
48	خصائص العيوب المستعملة في هذا العمل المقاسة تجريبيا.	3.III
49	الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية قبل التعرض للإشعاع.	4.III
49	التغيرات النسبية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المستعملة بدلالة كثافة العيوب للعيوب النقطة $E_{n5}$ عند تعريضها لإشعاع النيوترونات.	5.III
52	التغيرات النسبية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المستعملة بدلالة كثافة العيوب للعيوب النقطة H4 عند تعريضها لإشعاع الالكترونات.	6.III
55	التغيرات النسبية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المستعملة بدلالة كثافة العيوب للعيوب نقطي $PR_1$ عند تعريضها لإشعاع البروتونات.	7.III
58	التغيرات النسبية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المستعملة بدلالة كثافة العيوب للعيوب النقطة $PR_2$ عند تعريضها لإشعاع البروتونات.	8.III

# قائمة الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	الشكل
5	عيب شونكي.	1.I
6	عيب فرنكل.	2.I
7	- (أ) عيب ابدالي اقل حجما من الذرة الاصلية. - (ب) عيب ابدالي اكبر حجما من العنصر الاصلي.	3.I
7	عيب بيني.	4.I
8	عيب نقطي (الفجوة).	5.I
9	مخطط يوضح الانخلاع الحدي.	6.I
10	مخطط يوضح الانخلاع اللولبي.	7.I
10	انخلاع مختلط.	8.I
11	حدود الحبيبات.	9.I
12	حدود التوائم.	10.I
15	مستويات الطاقة.	11.I
16	تمثيل المقطع العرضي.	12.I
20	خلية شمسية.	1.II
21	طبقات الخلية الشمسية.	2.II
22	خلية شمسية صنعت من بلورة احادية من السيلكون.	3.II
22	بنية السليكون احادي البلورة.	4.II
23	السليكون كثير البلورات في لوح شمسي.	5.II
24	البنية البلورية لعنصر السليكون.	6.II
24	خلايا شمسية رقيقة.	7.II
25	الطبقات المكونة للخلية الشمسية من نوع Cdte.	8.II
26	البنية البلورية للغاليوم ارسنايد GaAs.	9.II
27	خلية شمسية عضوية.	10.II
27	خلية شمسية صبغية.	11.II
28	النطاق الطاقوي للغاليوم ارسنايد GaAs.	12.II

29	النطاق الطاقى للجرمانيوم Ge.	13.II
30	مخطط استخدامات الطاقة الشمسية.	14.II
31	مبدأ عمل الخلية الشمسية.	15.II
32	الدائرة المكافئة للخلية الشمسية.	16.II
32	رسم يمثل خصائص I-V.	17.II
39	لوحة تشغيل SCAPS.	1.III
40	تحديد المشكلة.	2.III
41	لوحة تعريف الخلايا الشمسية.	3.III
42	لوحة خصائص الطبقة.	4.III
43	نقطة التشغيل.	5.III
44	لوحة خصائص العيب.	6.III
45	جهة الاتصال الصحيحة (الامامية).	7.III
46	لوحة نطاقات الطاقة.	8.III
47	لوحة عرض لمنحنيات I-V.	9.III
50	منحنى جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي $E_{n5}$ .	10.III
50	منحنى تيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي $E_{n5}$ .	11.III
51	منحنى معامل التعبئة للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي $E_{n5}$ .	12.III
51	منحنى المردود للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي $E_{n5}$ .	13.III
53	منحنى جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي $H_4$ .	14.III
53	منحنى تيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي $H_4$ .	15.III
54	منحنى معامل التعبئة للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي $H_4$ .	16.III

54	منحنى مردود للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي $H_4$ .	17.III
56	منحنى جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي PR1.	18.III
56	منحنى تيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي PR1.	19.III
57	منحنى معامل التعبئة للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي PR1.	20.III
57	منحنى المردود للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي PR1.	21.III
59	منحنى جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaAs /Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي PR2.	22.III
59	منحنى التيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي PR2.	23.III
60	منحنى معامل التعبئة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي PR2.	24.III
60	منحنى المردود للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب $N_t$ بوجود العيب النقطي PR2.	25.III



# الفهرس

	الاهداء
	شكر و عرفان
I	قائمة الجداول
II	قائمة الاشكال
V	الفهرس
2	مقدمة عامة
	الفصل الاول مدخل الى العيوب
4	I-1-مقدمة
4	I-2-تعريف العيوب
4	I-3-انواع العيوب في المادة البلورية
4	I-3-1- العيوب النقطية
5	I-3-1-1- عيب شوتكي
5	I-3-1-2- عيب فرنكل
6	I-3-1-3- الشوائب
8	I-3-1-4- العيوب المانحة والأخذة
8	I-3-1-5- الفجوة
9	I-3-2- العيوب الخطية
9	I-3-2-1- الانخلاع الحدي
9	I-3-2-2- الانخلاع اللولبي

10	I-3-2-3-الانخلاع المختلط
11	I-3-3-العيوب السطحية
11	I-3-3-1-حدود الحبيبات
11	I-3-3-2-حدود التوائم
12	I-4-اهمية و فوائد العيوب في الاجسام الصلبة
12	I-5-نظريات العيوب البلورية
13	I-6-حساب تركيز العيوب النقطية و طاقة تكوين العيب
14	I-7- اسباب نشأة العيوب في المادة البلورية
15	I-8-تعريف مصائد الالكترونات
15	I-9-تعريف مصائد الثقوب
15	I-10-خصائص العيوب
15	I-10-1- مستوي الطاقة و نوع المصيدة
16	I-10-2- كثافة المصائد
16	I-10-3-التقاط المقطع العرضي
17	I-11- الخلاصة
	<b>الفصل الثاني</b>
	<b>الخلايا الشمسية</b>
19	II-1- مقدمة
19	II-2- نبذة تاريخية عن الخلايا الشمسية
19	II-3- تعريف الخلايا الشمسية
20	II-4- مكونات الخلية الشمسية

21	5-II- أنواع الخلايا الشمسية
21	1-5-II- خلية شمسية سيلكونية احادية البلورة
23	2-5-II- الخلايا الشمسية السليكونية متعددة البلورات
24	3-5-II- الخلايا الشمسية الغير متبلورة
25	4-5-II- الخلايا الشريطية
25	1-4-5-II- خلايا الكوبرانديوم ديسلنايد (GIS)
25	2-4-5-II- خلايا الكادميوم تليرايد (cdte)
26	3-4-5-II- خلايا الغاليوم ارسنايد (GaAs)
26	5-5-II- الخلايا التكنولوجية المستجدة
28	6-5-II- الخلايا الشمسية من نوع GaAS/Ge
30	6-II- استخدامات الطاقة الشمسية
31	7-II- مبدأ عمل الخلية الشمسية
32	8-II- الدارة المكافئة للخلية الشمسية
32	9-II- الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية
33	1-9-II- تيار الدارة القصيرة $I_{sc}$
33	2-9-II- جهد الدارة المفتوحة $V_{co}$
33	3-9-II- معامل التعبئة FF
33	4-9-II- مردود الخلية الشمسية
34	10-II- الايجابيات والسلبيات لاستخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية
34	1-10-II- الايجابيات

34	II-10-2-السليبيات
35	II-11-الخلاصة
	الفصل الثالث نتائج محاكاة تأثير العيوب النقطية على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge
37	III-1- مقدمة
37	III-2-تعريف SCAPS
38	III-3-مبدأ عمل (كيفية تشغيل) SCAPS
38	III-3-1-اطلاق SCAPS
38	III-3-2-الاساسيات
40	III-3-3- تعريف المشكلة
43	III-3-4- تحديد نقطة العمل
43	III-4- كيفية ادراج العيوب في المحاكي SCAPS
45	III-4-1- الحساب
47	III-5- بنية الخلية المستعملة
48	III-6- الخصائص الكهربائية للخلية قبل التعرض لإشعاع
49	III-7- تأثير العيب النقطي $E_{n5}$ الناشئ عن اشعاع النيوترونات على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge
52	III-8- تأثير العيب النقطي H4 الناشئ عن اشعاع الالكترونات على المردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge
55	III-9- تأثير العيب النقطي $PR_1$ الناشئ عن اشعاع البروتونات على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge
58	III-10- تأثير العيب النقطي $PR_2$ الناشئ عن اشعاع البروتونات على مردود الخلية الشمسية

	من نوع GAaS/Ge
61	11-III - مقارنة بين جميع العيوب في تأثيرها على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge
62	12-III - الخلاصة
<b>64</b>	الخلاصة العامة
	المراجع
	الملخص

مقدمة عامة

## مقدمة عامة

في وقتنا الحالي أصبحت تعتبر الطاقة الشمسية هي بطل الطاقة النظيفة ، حيث أنه ومن خلالها يمكن توفير احتياجات الطاقة لمدة سنة وذلك في واحد ساعة فقط ، ويتم الاهتمام بالطاقة الشمسية بشكل كبير جدا حاليا لأنها وعلاوة على ما يمكنها تقديمه من كمية طاقة هائلة يوميا فهي مصدر لطاقة كهربائية نظيفة أي دون التسبب في ثنائي أكسيد الكربون أو انبعاثات غازات الاحتباس الحراري ، ومنه تزداد أهمية الطاقة الشمسية إلى جانب الطاقات المتجددة الأخرى ، وقد شهدت مؤخرا انخفاض في تكاليف الانتاج بشكل يؤهلها إلى منافسة النفط والغاز، حيث يتم إنتاج الطاقة الشمسية باستخدام تقنية الفولتروضوئية التي تمتص حرارة الشمس وتحولها الى طاقة كهربائية ، رغم ذلك قد تتأثر إنتاجية الطاقة الشمسية بوجود عيوب في الخلية تؤدي إلى تناقص مردودية الخلية الشمسية وربما زيادتها ، ومن أجل تحديد الخصائص الكهربائية والكيميائية أصبحت المحاكاة العددية هي الأداة الأساسية للتنبؤ بها ولان التجربة مكلفة جدا أصبحت المحاكاة محل التجربة ، لذلك مختبرات الخلايا الشمسية أصبحت تستخدم برامج المحاكاة مثل SCAPS ، وهو برنامج متاح مجالا لجميع البحوث المتخصصة بالخلايا الشمسية ، هو برنامج محاكاة خلية شمسية ذات بعد واحد تم تطويره في قسم الالكترونيات وانظمة المعلومات (ELIS) في جامعة جنت بلجيكا [1] .

فسوف نقوم في هذا العمل بدراسة تأثير العيوب النقطية على مردود الخلية الشمسية GaAs/Ge بواسطة محاكاة برنامج SCAPS والمقارنة بينهم ، تتم هذه المقارنة على أساس مردود هذه الخلية الشمسية ، حيث نستعرض في الفصل الاول تعريف العيوب وأنواعها وأهم أسبابها ، وفي الفصل الثاني مفاهيم عامة حول الخلية الشمسية ، وفي الفصل الثالث سنشرح في التعرف على برنامج SCAPS وشرح مفصل لبنية الخلية المدروسة والنتائج والمقارنة بينهم .

**الفصل الأول:**  
**مدخل الى العيوب**



**1.1.I. مقدمة**

يعتبر ترتيب الذرات في موضعها الاصيلي من أهم خصائص البلورة و على الرغم من وجود العيوب البلورية في المواد الصلبة إلا أن حلم الحصول على بلورة مثالية لازال يراود العلماء رغم أن العديد من العيوب تحسن من خصائص البلورة ، ويصبح ذلك الحلم صعب نظرا لوجود العديد من الصعوبات أثناء التحضير التي تؤدي إلى عدم التناسق الذري في البلورة ، و تتعدد أنواع العيوب البلورية التي يمكن أن تصادف العلماء في هذه الحالة ، فدرجة الحرارة قد تؤدي الى وجود عيوب أو تشوه في البلورة كذلك وجود ذرات غريبة يؤدي إلى وجود عيب يسمى الشوائب ، و بالرغم من تطور التقنيات إلى أنه غالبا ما تحتوي البلورة المحضرة على بعض الذرات الغريبة ، مما يؤدي الى صعوبة في تعيين التركيب البلوري الصحيح وبذلك نستطيع أن نقول أنه لا توجد بلورة مثالية خالية من العيوب ، فما هو تعريف العيوب ؟ وما هي أنواعها ؟ وكيف تنشأ هذه العيوب ؟ وأهم فوائدها ؟.

**2.I. تعريف العيوب**

يعرف العيب بأنه أي انحراف أو اختلال في مواقع الذرات في بلورة معينة ، أي أنه عدم الانتظام في البنية البلورية ويتكون أثناء النمو البلوري ، ومصطلح عيب في اللغة يعني صفة سلبية ، إلا أنه علميا له عدة فوائد و أكبر دليل ما يسببه من فوائد في الشبكة البلورية و بواسطة هذه الفوائد يمكن التحكم في الكثير من الخواص الفيزيائية [2].

**3.I. أنواع العيوب في المادة البلورية**

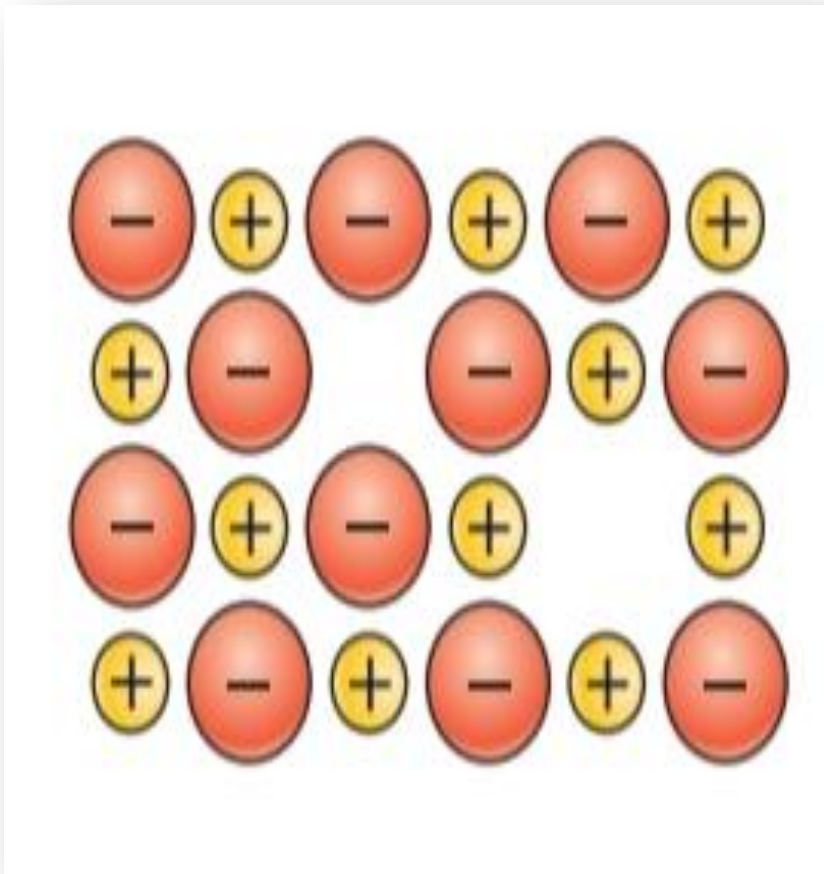
كما ذكرنا سابقا أن العيوب البلورية عديدة و تنقسم حسب حجمها ونذكر أهم هذه العيوب وهي العيوب النقطية و العيوب الخطية و العيوب السطحية [3].

**1.3.I. العيوب النقطية**

وهي عبارة عن تشوه في منطقة صغيرة محددة و تكون عبارة عن انحراف أو انحلال في موقع ذرة أو عدد قليل من الذرات و تسمى بالعيوب النقطية لأنها تحدث في منطقة صغيرة ليس لها أبعاد اذا ما قورنت بحجم البلورة قد تظهر هذه العيوب عن طريق حركة الذرات أو الايونات عندما تكتسب الطاقة عن طرق التسخين ، أثناء المعالجة الحرارية أو عن طريق الادخال المتعمد أو غير المتعمد وتصنف العيوب البلورية النقطية الى أنواع وهي [3].

**1.1.3.I. عيب شوتكي**

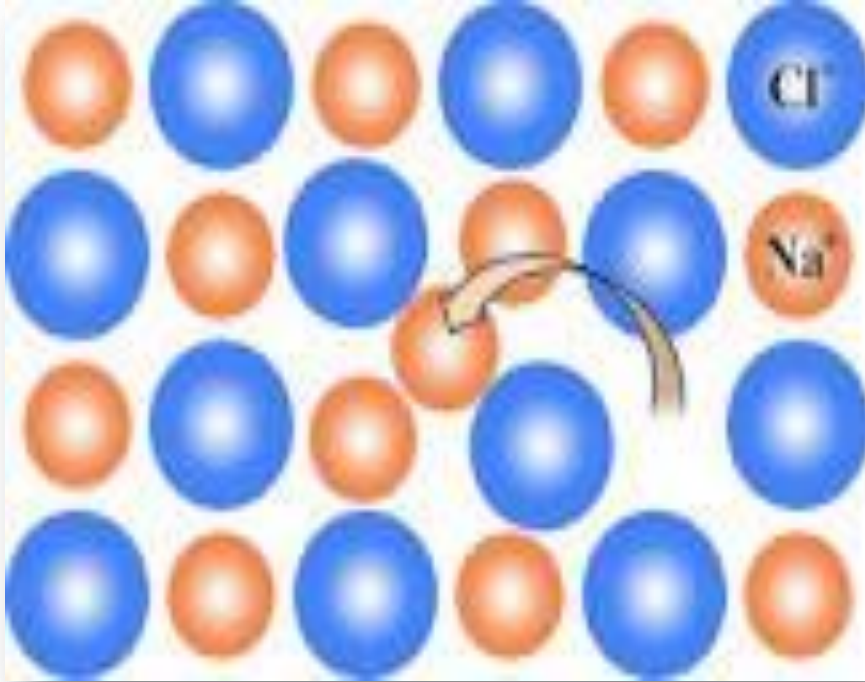
يسمى بعيب شوتكي نسبة إلى العالم شوتكي وفيه يتم انتقال ذرة أو بعض الذرات أو أيونات عن موضعها الأصلي في النظام الشبكي إلى السطح مخلفا فراغات تسمى بفراغ شوتكي دون وجود أي ذرات إبدالية مكان هذا الفراغ ، و يولد عيب شوتكي عيبان في نفس الوقت ، الاول هو أن الذرة تترك مكانها و بالتالي وجود فراغ ، والثاني أن الذرة الأصلية تنتقل لسطح فتسبب اتساعا يعني ظهور تغيرات في البلورة ، كما هو موضح في الشكل 1.I [3].



الشكل 1.I : عيب شوتكي [4].

**2.1.3.I. عيب فرنكل**

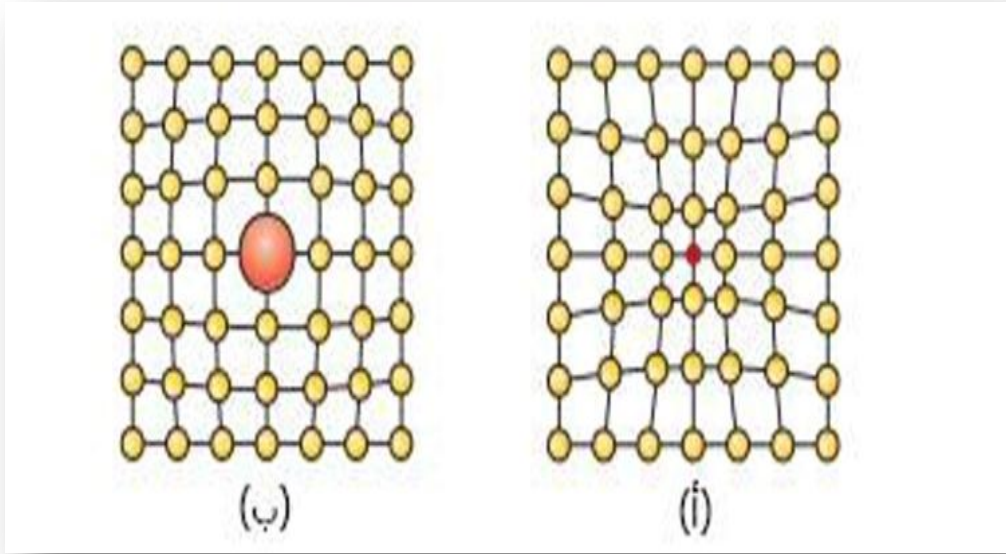
يعرف عيب فرنكل على أنه عيب داخلي و ذلك لأن الذرة تنتقل من موقعها الطبيعي داخل البلورة إلى موقع آخر في نفس البلورة ، أي أن الذرة لا تصعد الى السطح و الشكل 2.I يوضح هذا النوع من العيوب [3].



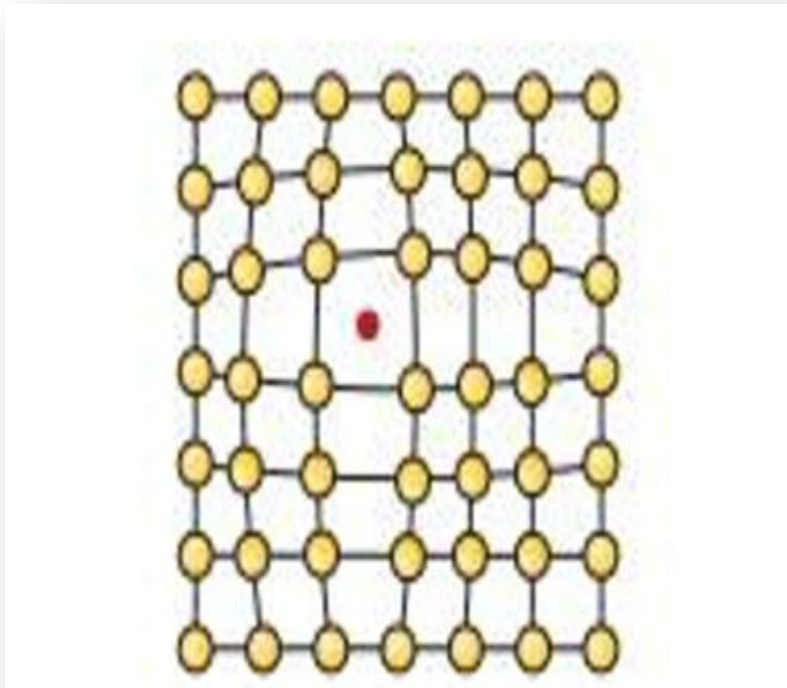
الشكل 2.I : عيب فرنكل .

### 3.1.3.I. الشوائب

وفي هذه الحالة تكون الذرة الشائبة ذات طبيعة مختلفة عن طبيعة البلورة الاصلية وهي نوعين وهما الشوائب الإبدالية و الشوائب البينية ، أما عن الاولى وهي عبارة عن ذرة أو أيون دخيل يحتل موقع الذرة الاصلية لشبكة البلورية و يكون عادة حجم الذرة الدخيلة أكبر من حجم الذرة الأصلي لكي يستطيع إزاحتها مثل ذرة النيكل في الحديد ، أما النوع الثاني وهي الشوائب البينية وهي عبارة عن ذرة دخيلة أو أيون دخيل يحتل موقعا بينيا بين الذرات ، وأي تغيير يحدث في هذه البلورة يعطي تركيبا كيميائيا لا نظاميا نتيجة زيادة أو نقص في عدد نوعي الايونات (الموجبة أو السالبة ) فإذا كان هنالك نقص في الايونات فسوف تتشكل عيوباً فجوية وإذا كانت هناك زيادة في الايونات تتشكل عيوب بينية.



الشكل 3.I : أ - عيب ابدالي اقل حجما من الذرة الأصلية.  
 ب - عيب ابدالي اكبر حجما من العنصر الأصلي [4].



الشكل 4.I : عيب بيني [4].

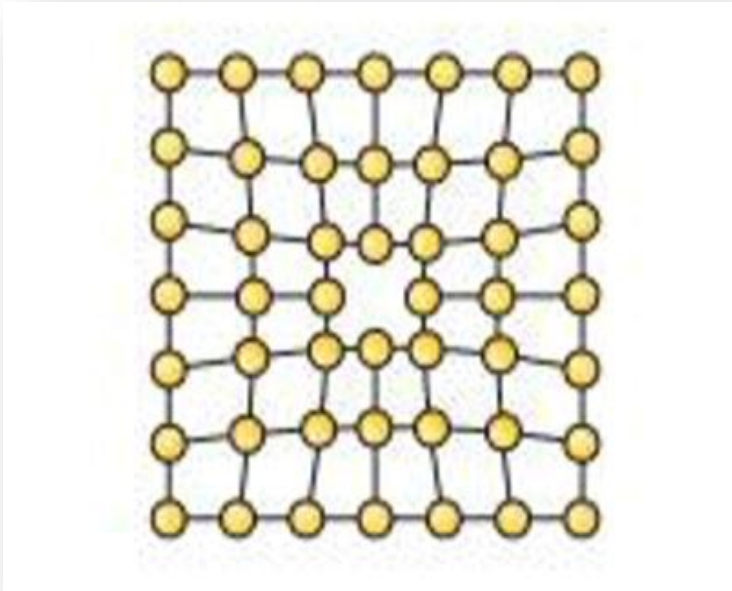
**4.1.3.1. العيوب المانحة والأخذة**

ويحدث هذا النوع من العيوب في أنصاف النواقل ، وهي قدرة الشوائب في استقبال إلكترونات أو إعطاء الإلكترونات ، مثلا عند إدخال شائبة من العمود الخامس في الجدول الدوري مثل الفوسفور مع بنية بلورية من العمود الرابع فسيكون هنالك إلكترون إضافي أثناء تشكل الرابطة التكافؤية ويسمى هذه النوع من العيوب بالعيوب المانحة ، أما الحالة الثانية وهي العيوب الاخذة فتتم عندما نقوم بإدخال شائبة من العمود الثالث على بنية بلورية من عناصر العمود الرابع مثل الكربون و الجرمانيوم ... إلخ، فان الرابطة التكافؤية تختل و تتشكل ثقب أو ما يسمى بالعيوب الاخذة.

تعتبر هذه العيوب من أهم العيوب قاطبة في فيزياء الحالة الصلبة فمنها تصنع أشباه الموصلات التي تعطينا الثنائيات و الترانزستورات و المضخات و تدخل في صناعة كل الاجهزة الالكترونية الحديثة دون استثناء [5].

**5.1.3.I. الفجوة**

وهي عبارة عن ذرة أو شاردة مفقودة من التركيب البلوري للمادة ، و في هذه الحالة تزداد العشوائية والانتروبي ، و منه حدوث استقرار ترموديناميكي للمادة ، و بالتالي فان الفجوة موجودة في كل المواد البلورية [4].



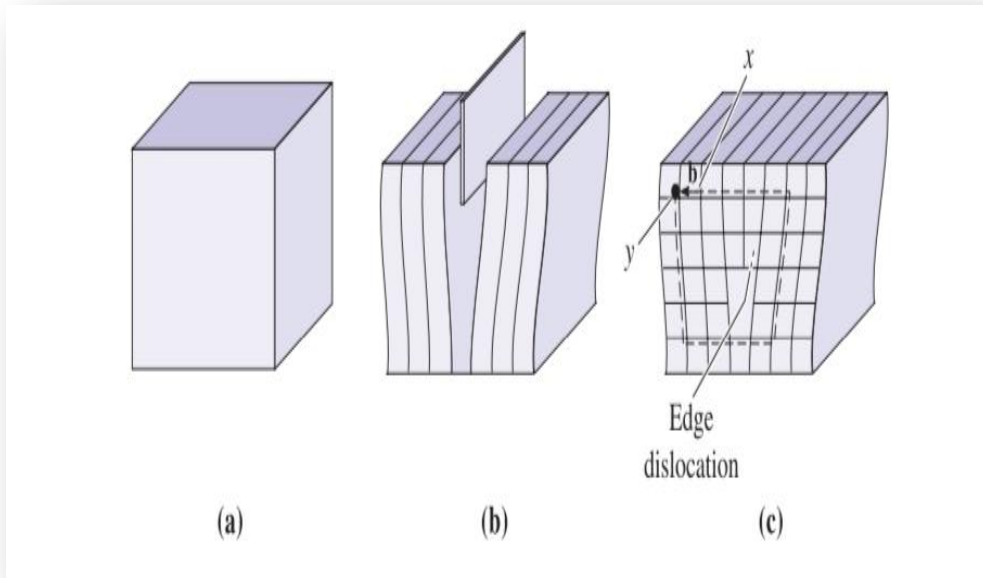
**الشكل 5.I: عيب نقطي (الفجوة) [3].**

### 2.3.I. العيوب الخطية

وهي عبارة عن مجموعة من الذرات على شكل خط تنزاح عن مكانها الاصلي في الشبكة البلورية ، وغالبا ما يمتد لمسافة كبيرة داخل الشبكة البلورية ، و ينقسم إلى عدة أنواع [2].

#### 1.2.3.I. الانخلاع الحدي

و يمكن وصفه على أنه عدم استمرارية أحد المستويات البلورية حتى نهاية البلورة ، أي هو عبارة عن نصف صف من الذرات ، يبين الشكل 6.I انخلاع حدي حيث نلاحظ أنه في الجزء العلوي يكون هنالك إنضغاط و في الجزء السفلي يكون هنالك شد [2].

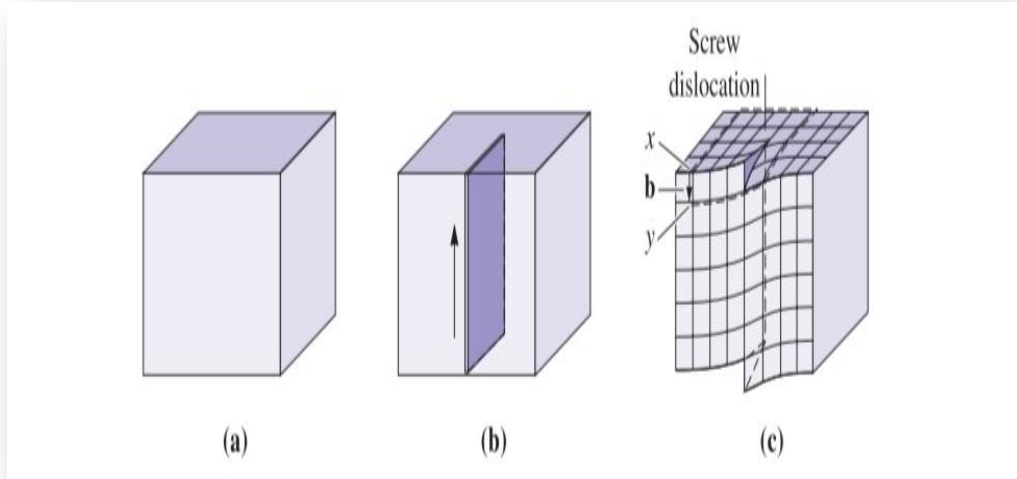


الشكل 6.I : مخطط يوضع الانخلاع الحدي [4].

#### 2.2.3.I. الانخلاع اللولبي

وهو عبارة عن انتقال متعاقب لمستويات الذرات بشكل لولبي أو حلزوني حول خط الانخلاع نتيجة لتطبيق قوة شد أو انضغاط [2].

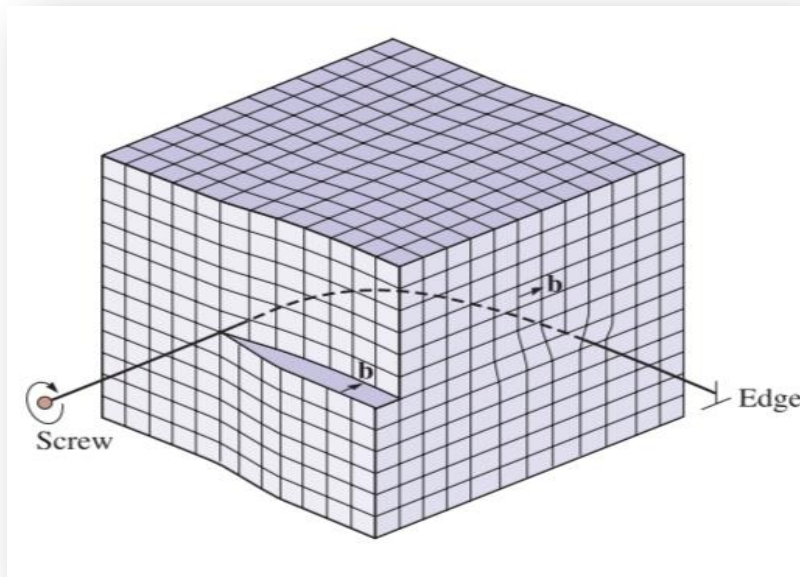




الشكل 7.I : مخطط يوضح الانخلاع اللولبي [4].

### 3.2.3.I. الانخلاع المختلط

هو تراكم الانخلاع الحدي و اللولبي و ذلك مع وجود منطقة انتقالية [2].



الشكل 8.I : انخلاع مختلط [4].

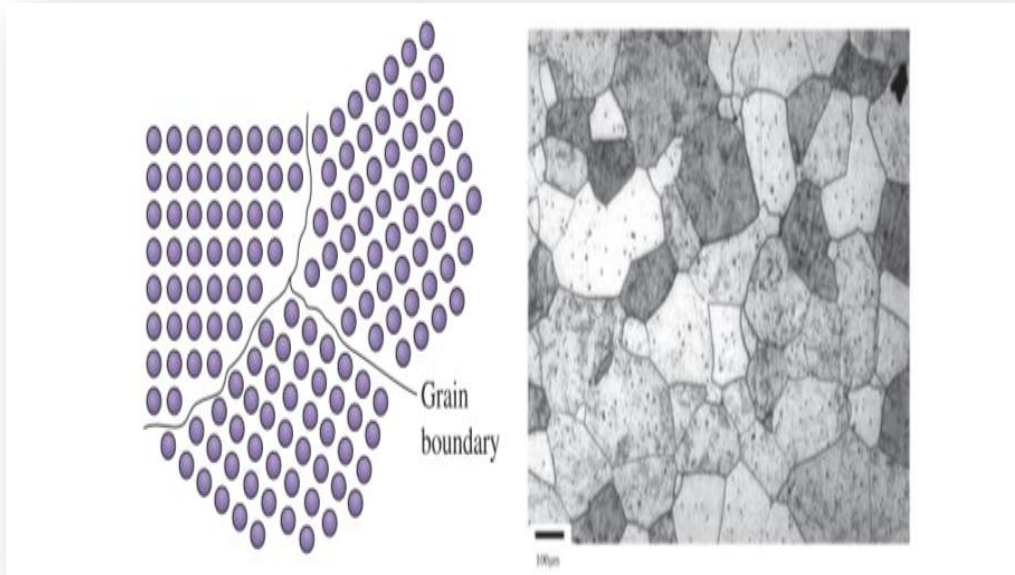
**3.3.1. العيوب السطحية**

وهي عبارة عن تجمع عدد من العيوب الخطية لكي تكون سطحاً من العيوب و تمتد العيوب في هذه الحالة في بعدين ، حيث أن سطح البلورة بحد ذاته عبارة عن عيب لأن دورية الشبكة مختلة و تنقسم العيوب السطحية أو المستوية الى أنواع منها:

**1.3.3.I. حدود الحبيبات**

نجد في بعض المواد الصلبة أن البنية البلورية الخاصة بها لا تكون عبارة عن بلورة واحدة بل عبارة عن عدة بلورات صغيرة و يطلق عليها بالحبيبات و أن كل واحدة منها تختلف عن الأخرى في اتجاهها و حجمها و شكلها و يفصل بين هذه الحبيبات حدود تسمى بحدود الحبيبات و تعمل هذه الحدود على إعاقة حركة الإلكترونات الحرة.

تكون الذرات متقاربة جداً من بعضها في بعض المواقع في حدود الحبيبات بحيث تتسبب في حدوث منطقة الضغط ، وفي مناطق أخرى تكون متباعدة لدرجة أنها تسبب منطقة شد [4].

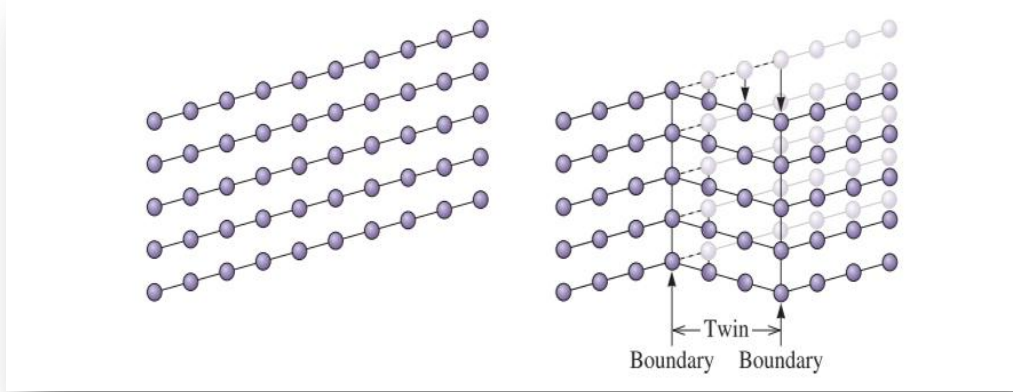


الشكل 9.I : حدود الحبيبات [4].

**2.3.3.I. حدود التوائم**

تحدث حدود التوائم نتيجة لعدم استمرارية دورية الشبكة و ذلك بان يتم التناظر بين الجزء المشوه وغير المشوه.





الشكل 10.I : حدود التوائم [4].

وهناك أيضا العيوب الاصطناعية التي يتم التحكم فيها بتحديد المادة المركبة التي نريدها بدقة عالية وذلك عن طريق التبريد أو التسخين أو بالطرق الحديثة المسماة بالتشعيع.

#### 4.I. أهمية و فوائد العيوب في الاجسام الصلبة

تلعب العيوب دورا رئيسا في التأثير على الخواص الميكانيكية و الكهربائية و البصرية و المغناطيسية للمواد المهندسة نذكر منها :

- ❖ التحكم في قوة و ليونة المادة المعدنية من خلال التحكم في عدد العيوب و نوعها.
- ❖ التحكم في درجتي حرارة الانصهار و التجمد في المواد الصلبة.
- ❖ التحكم في التآلق الضوئي و التآلق الحراري بواسطة الشوائب المختلفة.
- ❖ التحكم في الناقلية الكهربائية و الحرارية و الخواص الميكانيكية للمواد الصلبة [4].

#### 5.I. نظريات العيوب البلورية

علميا يمكن تفسير سبب نشأة العيوب البلورية بالاعتماد على القواعد الديناميكا الحرارية ، حيث يكون

السبب الاول في تبلور مادة معينة بتركيب بلوري معين الى ان الطاقة الحرة (Free Energy (F التي تحقق التوازن الديناميكي الحراري لهذا التركيب تكون أقل من أي تركيب آخر ، و ذلك بتطبيق معادلة Helmholtz وهي :

$$F=E-TS \quad (1.I)$$

حيث: E الطاقة الداخلية الكلية ، S الانتروبي ، T درجة الحرارة ولكي يكون هنالك حد أدنى لطاقة هلمهولتز يجب أن يكون هنالك قدر معين من العيوب داخل الشبكة البلورية عند درجة حرارة أكبر من الصفر المطلق [3].

### 6.I حساب تركيز العيوب النقطية و طاقة تكوين العيب

نعتبر على سبيل المثال عيب شوتكي و نبدأ بإيجاد اقل طاقة حرة بالنسبة لعدد المواقع الفارغة في الشبكة و لتكن  $E_v$  الطاقة المطلوبة لانتزاع ذرة من موقعها الاصلي داخل الشبكة الى موقع طبيعي آخر على السطح ، فتكون الزيادة في الطاقة المرافقة لتكوين n موقعا فارغا هي  $nE_v$ .  
وتحدد الانتروبي التمثيلي عدد الطرق المختلفة W التي يمكن بها توزيع ذرات البلورة على عدد المواقع المتاحة في الشبكة طبقا لعلاقة بولتزمان:

$$S=K \text{Ln}W \quad 2.I$$

حيث : K ثابت بولتزمان.

لكن عدد الطرق التي يمكننا بها إانتزاع n ذرة من بلورة تحتوي على N ذرة هو:

$$W= \frac{N(N-1).....(N-n+1)}{n!} \quad 3.I$$

بتعويض 3.I في 2.I ثم في 1.I يصبح لدينا:

$$F=n E_v-KT \ln \frac{N!}{(N-n)!n!} \quad 4.I$$

ويتحدد عدد عيوب شوتكي n من شرط التوازن الديناميكي الحراري عند حجم ثابت حيث تكون F اقل ما يمكن بالنسبة للتغيير في n و يكون :

$$\left(\frac{\partial F}{\partial n}\right)= E_v-k T \text{Ln} \frac{N-n}{n} = 0 \quad 5.I$$

$$\text{Ln} \frac{N-n}{n} = E_v/(KT) \quad 6.I$$

وعندما تكون  $n \ll N$  فان هذه النتيجة تعطينا تركيز عيوب شوتكي C بالمعادلة:

$$C=\frac{n}{N}=\exp(-E_v/(KT)) \quad 7.I$$

و بنفس الطريقة يمكن استنتاج معادلة مشابهة بالنسبة لعيوب فرنكل و التي تكون من الشكل:

$$C = \exp(-E_v / (2KT)) \quad 8.I$$

حيث  $E_v$  طاقة تشكيل عيب فرنكل في البلورة و يلاحظ ظهور المعامل 2 في علاقة بولتزمان الاسية وعادة ما تتكون في البلورات الايونية أزواج من الفراغات الايونية الموجبة و السالبة وهذا التكوين يجعل البلورة متعادلة كهروستاتيكية في نطاق محدد و تحسب طاقة تكوين كل زوج من المعادلة السابقة.

و يلاحظ من المعادلات السابقة أن تركيز العيوب النقطية في البلورة يزداد بارتفاع درجة الحرارة ، و عند التبريد السريع يتجمد بداخل البلورة عدد كبير من هذه العيوب التي كانت في حالة اتزان ديناميكي حراري عند درجة حرارة مرتفعة ، و تتأثر تبعاً لذلك الخصائص الفيزيائية الحساسة للتغيرات التركيبية الداخلية ، و تؤخذ عادة قياسات المقاومة الكهربائية كمقياس لعدد الفراغات المجمدة في الشبكة البلورية نتيجة التبريد المفاجئ و برسم العلاقة بين  $\ln \frac{\rho}{\rho_0}$  من  $1/T$  نحصل على خط مستقيم يعطي ميله المقدار  $E_v/k$  ومنه يمكن حساب  $E_v$  [3].

### 7.I أسباب نشأة العيوب في المادة البلورية

كما ذكرنا سابقاً أنه لا توجد بلورة مثالية و أن كل بلورة تحتوي على عدد من العيوب البلورية التي ربما تكون مفتعلة و مرغوب فيها (لتحسين خصائص معينة) ، أو عكس ذلك و من أهم أسباب نشأة العيوب

درجة الحرارة العالية.

خضوع المادة للمواد الكيميائية و الميكانيكية .

طريقة التشجيع و هي طريقة لإنتاج عيب .

غير ذلك فانه هنالك عدة أسباب أخرى لنشأة العيوب تتعلق بالوسط الخارجي (وسط العمل، غبار، ضغط.... إلخ) و الأدوات والأجهزة المستعملة.

### 8.I تعريف مصائد الالكترونات

هي مستويات طاقة تتموضع عند حواف النطاق الممنوع حيث احتمال اقتناص الالكترونات أكبر من احتمال اقتناص الثقوب.

### 9.I تعريف مصائد الثقوب

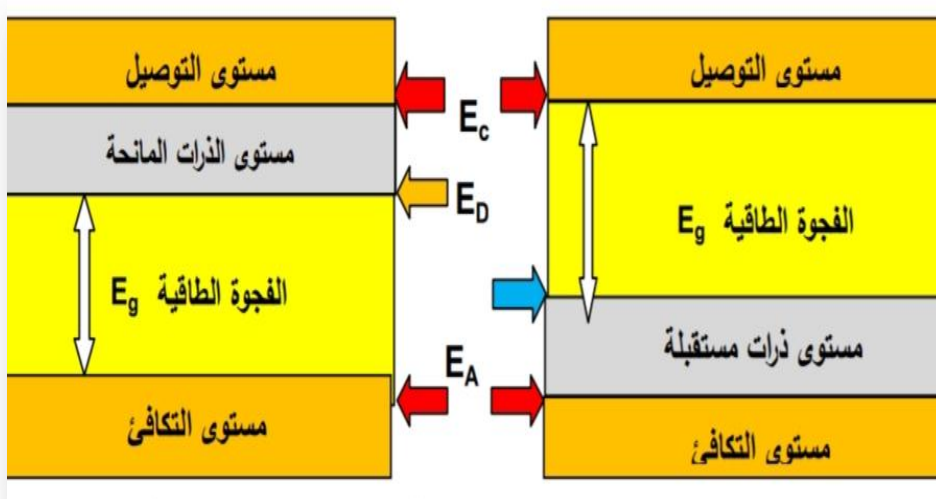
هي عبارة عن مستويات طاقة تتموضع عند حواف النطاق الممنوع حيث احتمال اقتناص الثقوب أكبر من احتمال اقتناص الالكترونات.

### 10.I خصائص العيوب

نعرف العيب على أنه مجموعة من المصائد (مصائد الكترونات و مصائد ثقوب) حيث تختلف العيوب عن بعضها البعض و تتميز بعدة خصائص (مستوي الطاقة ، التقاط المقطع العرضي ، كثافة المصيدة... إلخ) [6].

### 1.10.I. مستوى الطاقة و نوع المصيدة

بالاعتماد على الناقل يمكننا التعرف على مصيدة الالكترونات و مصيدة الثقوب التي يمكن توقع التقاطها ، حيث يمكن توقع أن تلتقط مصائد الثقوب عدة ثقوب من نطاق التكافؤ ، و من المتوقع أن مصائد الالكترونات تحبس الكترونات في نطاق التوصيل [6].



الشكل 11.I : مستويات الطاقة.

## 2.10.I. كثافة المصاد

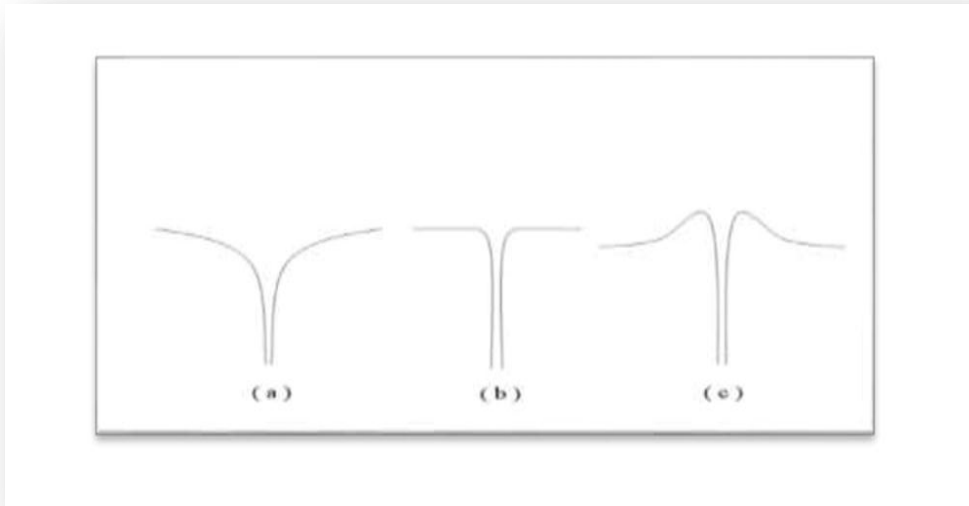
نعرف كثافة المصاد على أنها عدد المصاد المتواجدة في حجم معين، مع وجود علاقة خطية بين طاقة الاشعاع ( $\phi$ ) و معدل إدخال مراكز إعادة التركيب  $K$  ، حيث تزداد كثافة المصاد بزيادة طاقة الاشعاع.

$$N_i = K \phi \quad 10.I$$

تزداد كثافة المصاد بسبب الجزيئات التي تشع المادة ، مع ثبات نوع الضرر الذي تم انشاؤه [6].

## 3.10.I. اقتناص المقطع العرضي

يكون بوجود الالتحام في المصاد بواسطة الحاملات، وذلك من خلال احتمال الاقتناص بواسطة مصيدة شاعرة و التي تعرف باسم المقطع العرضي و بواسطة الاقتناص يتم تحديد قيمة المقطع العرضي للاقتناص و ذلك بالقرب من المصيدة كما هو موضح في الشكل 12.I [ 7 ]



الشكل 12.I: تمثيل المقطع العرضي [6].

**11.I. الخلاصة**

قدمنا في هذا الفصل دراسة نظرية عامة حول العيوب وأنواعها ، حيث وجدنا أنه لا توجد بلورة مثالية خالية من العيوب ويبقى ذلك حلما عند العلماء ، وتطرقنا أيضا إلى أسباب نشأة هذه العيوب ، وبرغم من أن كلمة عيب تعني صفة سيئة إلا انه في الفيزياء أو في البلورات لديها جانب جيد ومهم حيث تحسن من خصائص البلورات ، وتم أيضا في هذا الفصل التعرف على خصائص هذه العيوب.

**الفصل الثاني :**  
**الخلايا الشمسية**

**1.II. مقدمة**

تعتبر الطاقة الشمسية أحد صور الطاقة المتجددة ، حيث أصبحت تشكل اهتماما كبيرا في العالم كونها طاقة نظيفة وصديقة للبيئة ، ومن طرق استغلالها هو استخدام الألواح الشمسية التي تعمل على تحويل الطاقة الشمسية الى كهرباء ، كما شهدت في الآونة الاخيرة نموا ملحوظا في استعمالات الطاقة الشمسية لارتفاع الوقود الاحفوري ، حيث سنتطرق في هذا الفصل إلى مفهوم الخلايا الشمسية وأهم أنواعها واستخداماتها ، وسوف نتعرف كذلك على الطاقة الكهروضوئية مبادئها وخصائصها وإيجابيات وسلبيات استخدامها .

**2.II. نبذة تاريخية عن الخلايا الشمسية**

يعود اكتشاف الخلية الكهروضوئية إلى القرن الماضي الميلادي عندما قام العالم بكيرل في عام 1839م بدراسة تأثير الضوء على بعض المعادن والمحاليل وخصائص التيار الكهربائي الناتج عنها [8] ، كما ادخل العالمان آدم وسميث (Adams-Smithe) مفهوم الناقلية الكهربية الضوئية لأول مرة عام 1877م وتم تركيب أول خلية شمسية من قبل العالم فريتز عام 1833م حيث توقع أن تساهم في انتاج الكهرباء مستقبلا ، وقد سجل عام 1941م تصنيع أول خلية سيلكونية بكفاءة لا تتجاوز 1 % ثم لحق ذلك في عام 1951م إنجازات مختبرات بل الامريكية (Bell Lab) حيث قام ثلاث باحثين (Prince) ، (Chapin) ، (Pearson) بتطوير خلية كهروضوئية بكفاءة بلغ 6 % إستخدمت وقتها في التطبيقات الفضائية وفي عام 1983م تم في استراليا إختراع أول سيارة تعمل بالطاقة الشمسية تسافر مسافة 4000 كيلومتر [9] .

**3.II. تعريف الخلايا الشمسية**

الخلية الشمسية أو الضوئية أو الكهربية و كان يطلق عليها في الايام الاولى لصناعتها بطارية شمسية ولكن ذلك يحمل معنى مختلف تماما الان ، وهو جهاز يحول الطاقة الشمسية مباشرة إلى طاقة كهربية مستعملا التأثير الضوئي الجهدي [10] ، وهي عبارة عن أجزاء مركبة مصنوعة من مواد شبه ناقلة وهي أصغر نظام كهروضوئي [9] ، تتكون الخلية من طبقة من السيليكون تضاف لها شوائب لإعطائها بعض الخواص الكهربية ، الطبقة العليا يضاف لها عنصر الفسفور من أجل ضخ الإلكترونات عند اصطدام الضوء بها وهذه الطبقة تسمى الطبقة (N) ، بينما الطبقة السفلى يضاف لها عنصر البور من أجل إعطائها خاصية امتصاص الإلكترونات تسمى هذه الطبقة (P) ، فعند اصطدام ضوئيات الشعاع الشمسي بالطبقة العليا يمنح الإلكترونات طاقة تعتمد على شدة الاشعاع الضوئي ، وعند وجود موصل كهربائي تنتقل الإلكترونات من الطبقة العليا إلى الطبقة السفلى هكذا يتولد جهد وتيار كهربائيان ، ولقد شهدت استعمالات الطاقة الشمسية نموا ملحوظا في السنوات الاخيرة لأنها



تعتبر من البدائل المساعدة لمصادر الطاقة التقليدية من البترول والفحم والغاز ومشتقاته المحدودة في الطبيعة ، وتتميز الخلايا بإنتاج كهرباء دون إحداث تلوث للبيئة ، وعمرها الافتراضي يصل الى 30 سنة ، إلا ان العائق الرئيسي لاستخدامها هو تكلفة إنتاجها .



الشكل 1.II : خلية شمسية.

#### 4.II. مكونات الخلية الشمسية

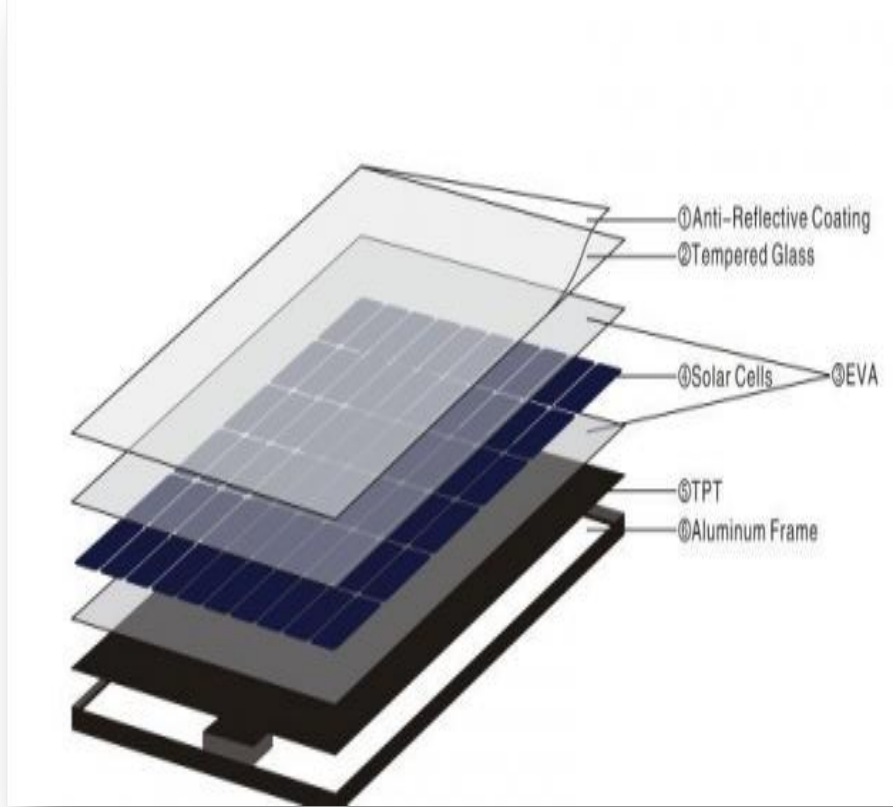
تتكون الخلية الشمسية من عدة طبقات :

- طبقتان حساستان للضوء ، وتتكون من المواد الكهروضوئية : وهي عبارة عن أشباه موصلات مثل عنصر السيلكون المضاف إليه بعض الشوائب لتكوين طبقتين مختلفتين ، وهما :

**\*طبقة N:** وهي عبارة عن طبقة مكونة من عنصر السيليكون النقي ، مع مقدار قليل جدا من الفسفور ، بحيث تتكون روابط تكافؤية بين ذراتهما ، حيث أن السيليكون يمتلك أربع إلكترونات في مداره الاخير، اما الفسفور فله خمسة إلكترونات ، مما ينتج عنه لإلكترون حر وحيد ، يمكن الاستغناء عنه في أي لحظة بسبب اكتمال المدارات ، ويسمى هذا الكترون الحامل السالب الحر.

**\*طبقة P:** وهي عبارة عن طبقة مكونة من السيليكون النقي والبورون ، بحيث يشكل العنصران روابط تكافؤية بين ذراتهما ، بحيث يمتلك البورون ثلاثة إلكترونات في مداره الاخير بينما السيليكون يمتلك أربعة إلكترونات ، مما يجعل الرابطة بينهما غير مكتملة وتحتاج إلى الكترون إضافي وهو يسمى بالثقب أو الحامل الموجب.

- \* طبقتان من الاسلاك: تحتوي الخلية الشمسية على طبقتين مكونتين من شبكة من الاسلاك النحاسية ، أحدهما في الاعلى تسمى كاثود ، والاخرى في الاسفل تسمى أنود .
- \* طبقة غير عاكسة للضوء من الزجاج : تغطي الخلايا الشمسية بطبقة من الزجاج تسمح بمرور الضوء خلالها ، ولا تسمح له بالارتداد ، وبالتالي يمكن استغلال أكبر مقدار من الضوء .

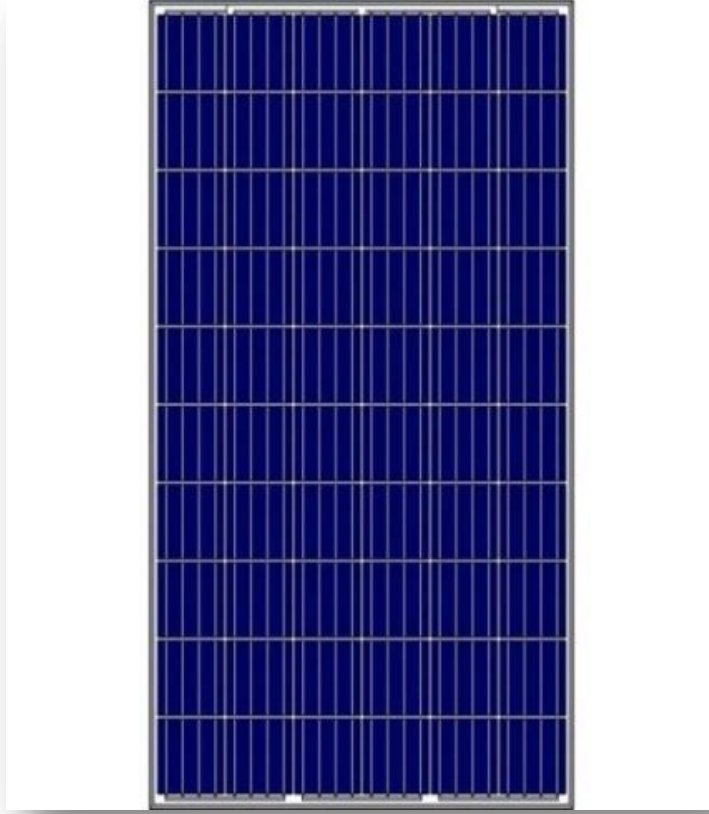


الشكل 2.II : طبقات الخلية الشمسية.

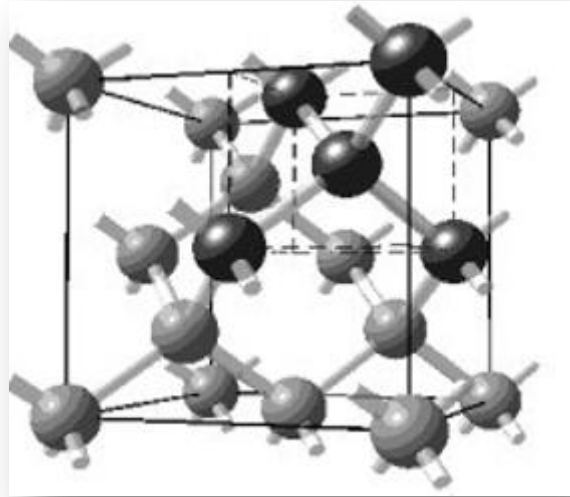
## 5.II. أنواع الخلايا الشمسية

### 1.5.II. خلية شمسية سيلكونية احادية البلورة

هي خلية مصنوعة من السليكون النقي ، وكفاءة هذا النوع من الخلايا من 11% الى 16% وهي ذو كفاءة عالية مقارنة بالأنواع الاخرى ، عيوبها أنها ذات تكلفة مرتفعة جدا بسبب نقاوتها [11].



الشكل II.3 : خلية شمسية صنعت من بلورة احادية من السيلكون.



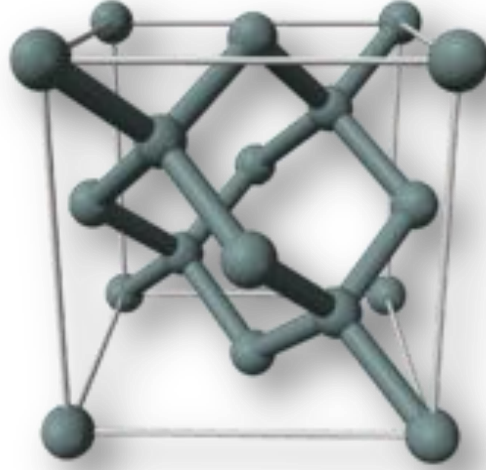
الشكل II.4 : بنية السليكون احادي البلورة.

**2.5.II. الخلايا الشمسية السليكونية متعددة البلورات**

هي عبارة عن رقائق من السليكون كشطت من بلورات سليكون أسطوانية تم معالجتها كيميائياً في أفران لزيادة الخواص الكهربائية لها ، ثم بعد ذلك تغطي أسطح الخلايا بمضاد انعكاس لكي تمتص الخلايا أشعة الشمس ، وهي ذات كفاءة توليد كهربائي 12 % إلى 14 % وهي بسيطة في التصنيع وأقل تكلفة من الخلايا أحادية البلورة ويمكن التعرف عليها من خلال الأشكال غير المنتظمة التي تظهر بوضوح بالعين المجردة [9].



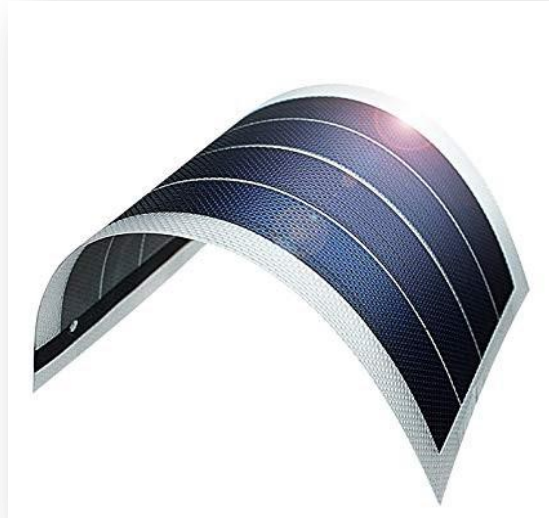
الشكل 5.II : السليكون كثير البلورات في لوح شمسي.



الشكل 6.11 : البنية البلورية لعنصر السليكون.

### 3.5.11. الخلايا الشمسية غير متبلورة

تدعى بالخلايا الرقيقة أو الخلايا السليكونية ، حيث مادة السليكون يترسب على شكل طبقات رقيقة على أسطح من الزجاج أو البلاستيك ، غالبا ما يكون هذا النوع من الخلايا من المنتجات الاستهلاكية الصغيرة كالآلات الحاسبة والساعات ، يتم تصنيعها بتقنية أقل تكلفة ولكنها ذات كفاءة أقل من 3% الى 6% وتتناقص بشكل كبير مع مرور الوقت [9] .



الشكل 7.11 : خلايا شمسية رقيقة.



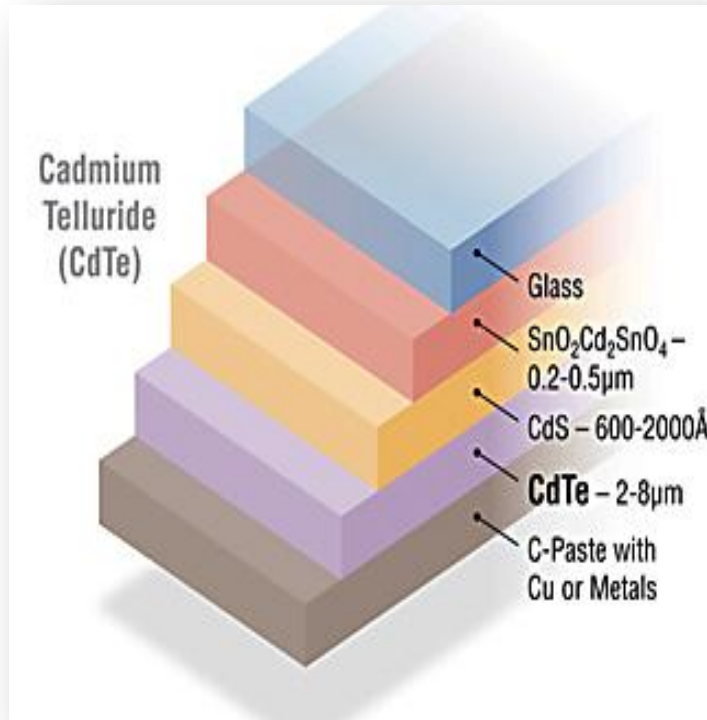
## 4.5.II. الخلايا الشريطية

## 1.4.5.II. خلايا الكوبرانديوم ديسلنايد (CIS)

هي مواد من أشباه الموصلات مركبة من النحاس والاندسيوم والسلينايد (CIS) ، قد استخدمت في تصنيع خلايا وصلت كفاءتها 12% ، هذا النوع من الخلايا لا يعاني من مشكلة نقصان الكفاءة عند الاستخدام ، وبما أن مادة الالمنيوم غالية الثمن وبالرغم من أن الكمية المستخدمة قليلة فان ذلك يؤثر على سعرها ، ومن عيوبها استخدام الهيدروجين والسلينايد عند التصنيع وهي مواد سامة وتسبب مشاكل كبيرة في حالة حدوث خلل في التصنيع [12].

## 2.4.5.II. خلايا الكادميوم تليرايد (Cdte)

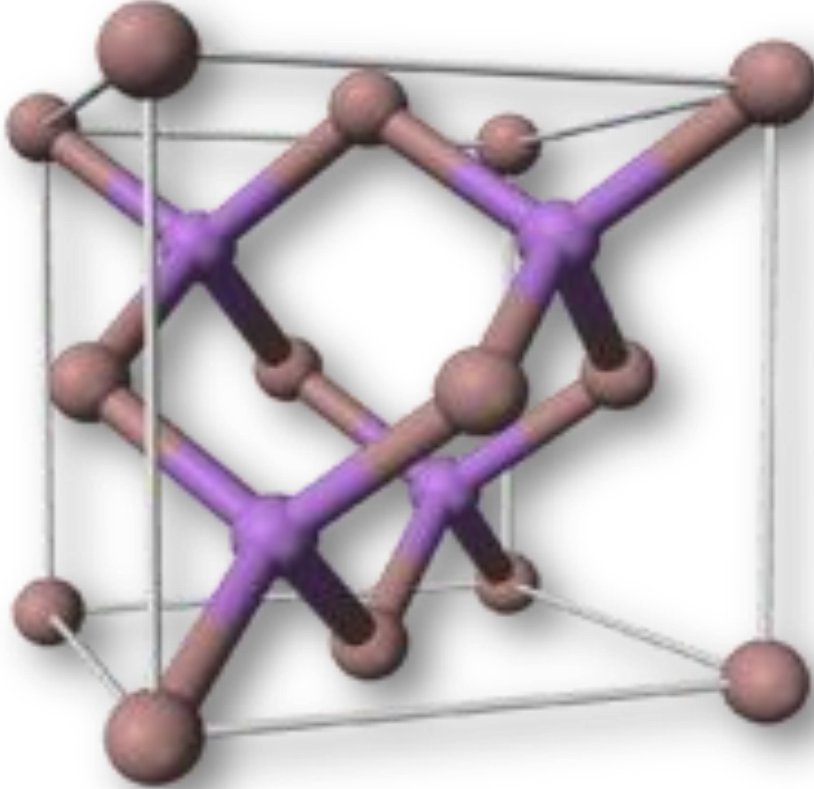
هي مواد من أشباه النواقل تتألف من الكادميوم وتليرايد ، من مميزاتها سهولة تصنيعها ، بالإضافة إلى عدم انخفاض كفاءتها عند الاستخدام والتي تتراوح من 7% إلى 11% ، ومن عيوبها أن الكادميوم مادة سامة [8].



الشكل 8.II : الطبقات المكونة للخلية الشمسية من نوع Cdte .

**3.4.5.II. خلايا الغاليوم ارسنايد (GaAs)**

الغاليوم ارسنايد هي مادة ملائمة جدا للاستخدام في تطبيقات الخلايا الكهروضوئية لكونها ذات معامل امتصاص عالي للضوء ، كما لديها كفاءة جيدة ويمكن أن تعمل تحت درجة حرارة عالية نوعا ما بدون تناقص في أدائها كالخلايا السيلكونية ، لكن تكلفة تصنيعها أعلى من تكلفة تصنيع الخلايا السيلكونية بسبب أن عمليات إنتاجها غير متطورة حاليا ، ويمكن أن تصل كفاءتها 30 % [12].

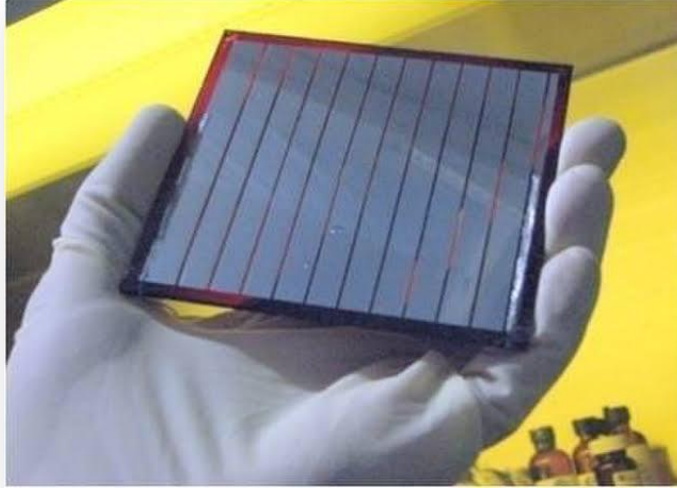


**الشكل 9.II :** البنية البلورية للغاليوم ارسنايد GaAs .

**5.5.II. الخلايا التكنولوجية المستجدة**

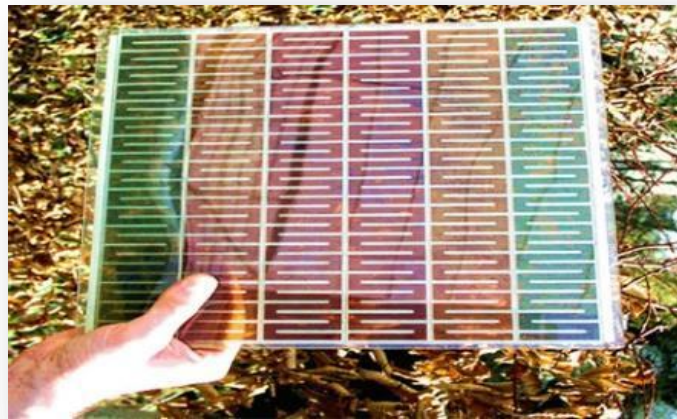
يمكن استخدام العديد من المواد للاستفادة من الأشعاع الشمسي في توليد الطاقة كما هو الحال عند استخدام المواد العضوية في خلايا بيروفسكايت الشمسية ذات البناء البلوري المحدد ، كما تحتوي هذه الخلايا على عدة مواد مثل الكلور ، البروم ، اليود ، والرصاص، وهي ذات كفاءة عالية ، لكنها محدودة الاستخدام بسبب قصر عمرها ، ويشار إلى وجود أنواع أخرى من الخلايا ، ومنها ما يلي [13]:

✓ الخلايا الشمسية العضوية : تتكون من طبقات ، تمتاز هذه الخلايا بخواص فريدة مقارنة بتقنيات الخلايا الشمسية الأخرى ، بحيث أنها ذات تكاليف منخفضة وتمتاز كذلك بمرونة وقابلية تدويرها وخفة وزنها ، ولكن التحدي الكبير الذي تواجهه هذه الخلايا هو مردودها المنخفض.



الشكل 10.ii : خلية شمسية عضوية .

✓ الخلايا الشمسية الصبغية : تصنع من ثنائي أكسيد التيتانيوم ، وتغلف بطبقة رقيقة جدا من المحسسات، حيث تعتمد على تكنولوجيا النانو في التصنيع ، ومن الجدير بالذكر أنها لا تزال تحت الفحص المخبري التجريبي بالرغم من كفاءتها العالية نظريا .

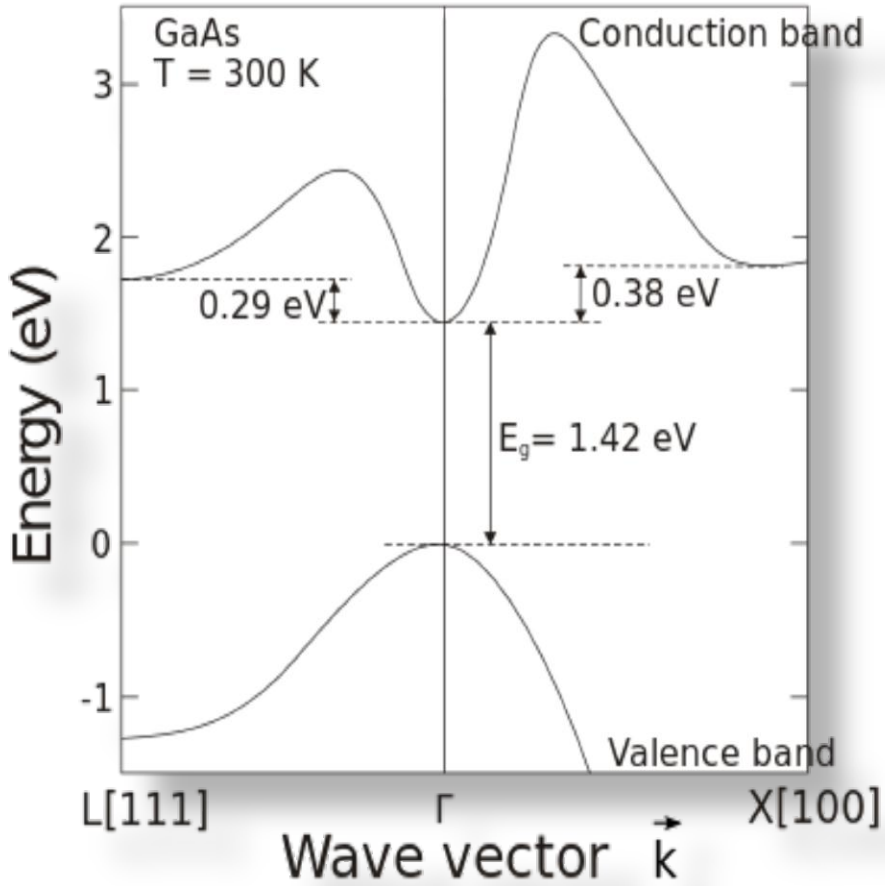


الشكل 11.ii : خلية شمسية صبغية.

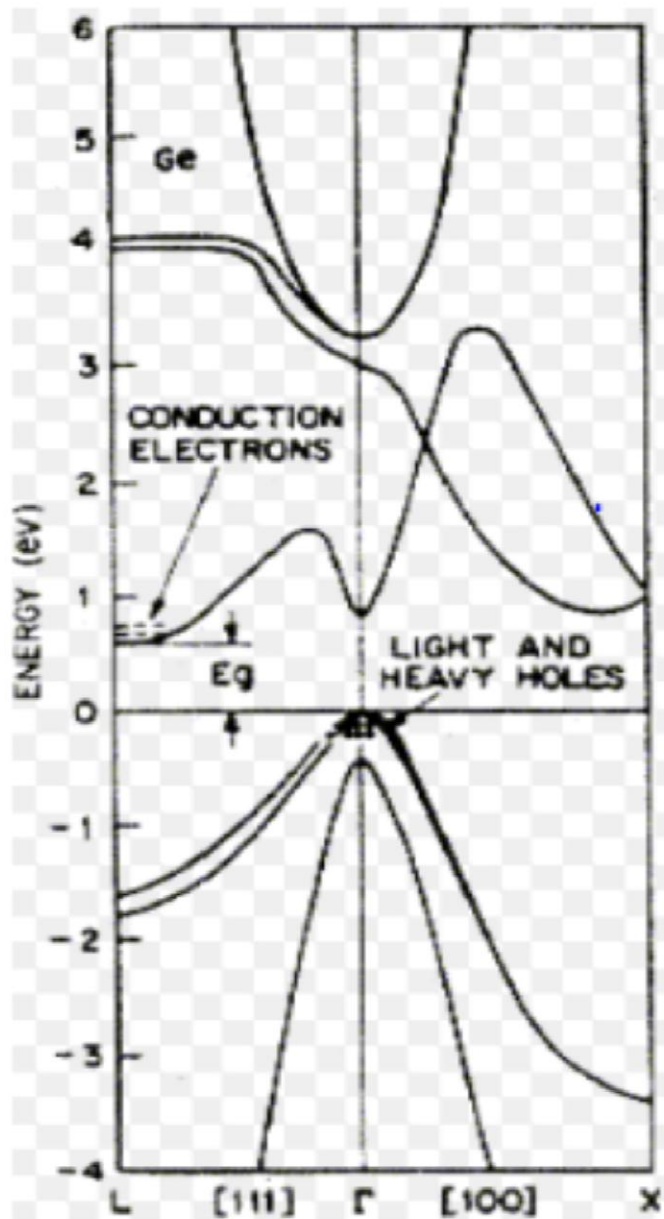


### 6.5.II. الخلايا الشمسية من نوع GaAs/Ge

تتكون هذه الخلايا من عدة طبقات من مواد شبه موصلة للغاليوم ارسنايد GaAs و الجرمانيوم Ge ، تتميز كل من هذه المواد بالقدرة على امتصاص طيف ضوئي معين مما يمكنها من تحويل جزء كبير من أطيف الشعاع الشمسي المستقبل ، ويعد هذا الصنف من الخلايا الكهروضوئية الأعلى كفاءة بحيث تصل هذه الاخيرة إلى 46% إلا أن تكلفة تصنيعها جد باهظة [14].

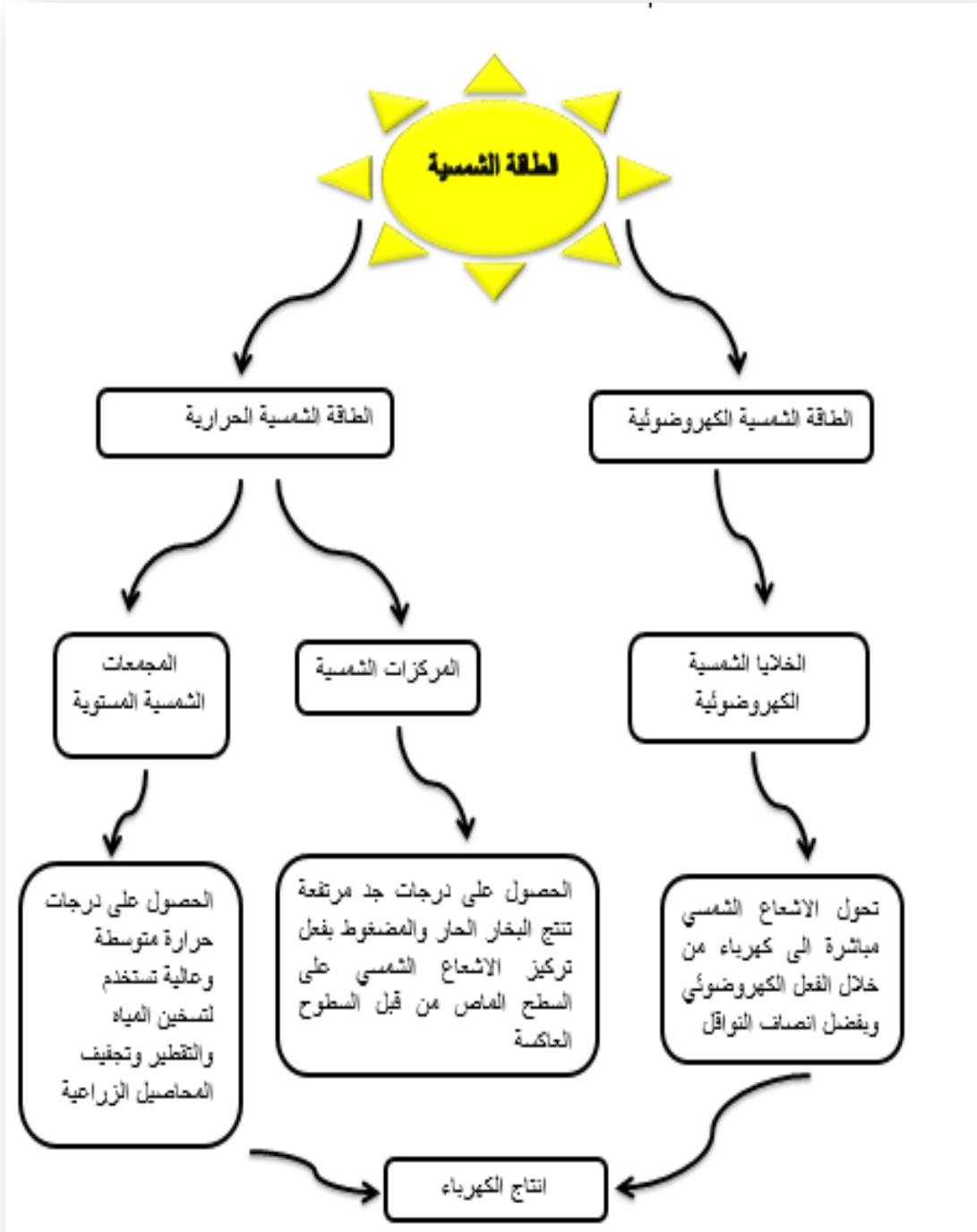


الشكل 12.II : النطاق الطاقى للغاليوم ارسنايد GaAs .



الشكل 13.ii : النطاق الطاقى للجرمانيوم Ge.

6.II. استخدامات الطاقة الشمسية



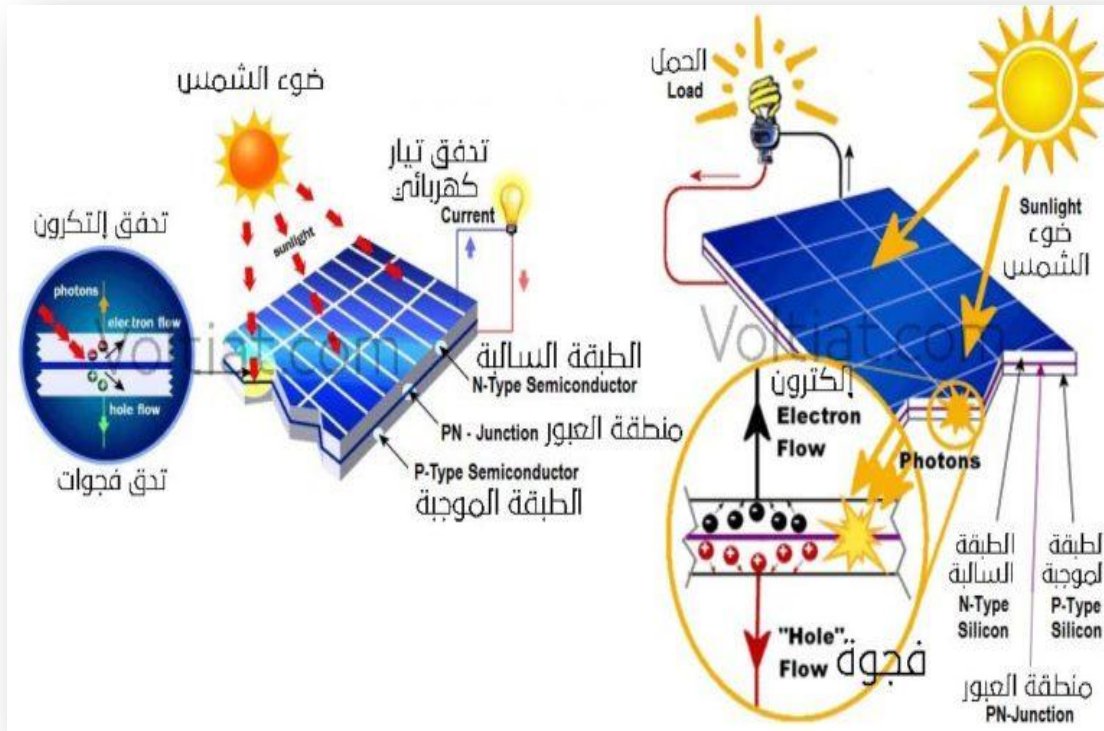
الشكل 14.II : مخطط استخدامات الطاقة الشمسية [15].

## 7.II. مبدأ عمل الخلية الشمسية

الخلية الضوئية هي جهاز يحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهروضوئية ويعتمد هذا التحويل ثلاث آليات:

- ✓ امتصاص الفوتونات (التي تكون طاقتها أكبر من طاقة النطاق الممنوع) بواسطة المادة التي تشكل الجهاز .
- ✓ تحويل طاقة الفوتون إلى طاقة كهربائية والتي تتوافق مع إنشاء أزواج (الالكترونون/ثقب) في مادة أشباه الموصلات .
- ✓ جمع الجسيمات المتولدة في الجهاز .

لذلك يجب أن يكون للمادة المكونة للخلايا الضوئية مستويات للطاقة وأن تكون موصلة بما فيه الكفاية للسماح بتدفق التيار وبالتالي من أجل جمع الجسيمات المتولدة ، من الضروري وجود مجال كهربائي لفصل الأزواج (الالكترونون/ثقب) التي تم إنشاؤها لهذا الغرض [9].

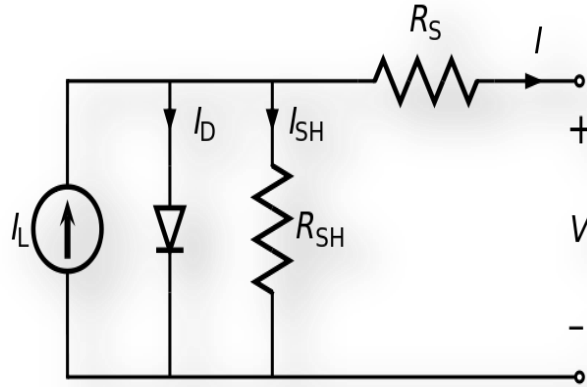


الشكل II.15 : مبدأ عمل الخلية الشمسية.

### 8.II. الدارة المكافئة للخلية الشمسية

من أجل فهم سلوك الخلية الشمسية كان لابد من عمل نموذج كهربائي مكافئ لها وذلك النموذج مبني على مكونات كهربائية معروفة سهلة الدراسة والتحليل.

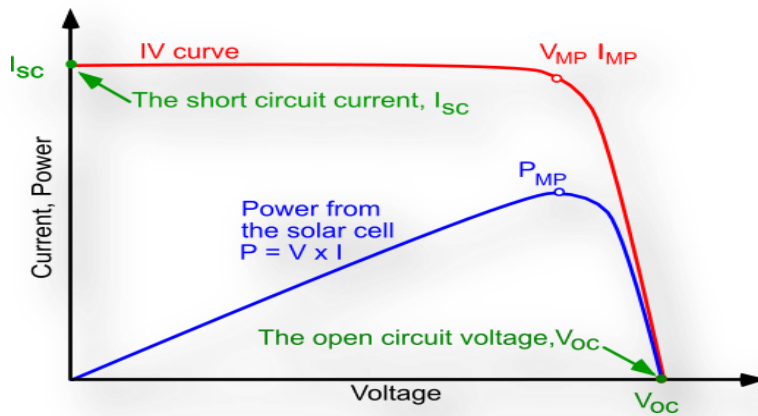
في النموذج المثالي للخلايا الشمسية يتم تمثيل الخلية بمصدر للتيار الكهربائي معه موحد ثنائي Diode ولكن عمليا لا توجد خلية شمسية مثالية لذلك يتم وضع مقاومة على التوازي shun resistance ومقاومة أخرى على التوالي series resistance كحاكاة للواقع [9].



الشكل 16.II : الدارة المكافئة للخلية الشمسية.

### 9.II. الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية

للخلية الشمسية أربع خصائص وهما تيار الدارة القصيرة  $I_{sc}$  ، وجهد الدارة المفتوحة  $V_{co}$  ، ومعامل التعبئة  $F_F$  ، والمردود  $\eta$  ، ويعبر عنهم ب:



الشكل 17.II : رسم يمثل خصائص I-V .

### 1.9.II. تيار الدارة القصيرة $I_{sc}$

هو أقصى تيار يمكن أن يولده اللوح في حالة انعدام المقاومة أو قربها من الصفر نتيجة توصيل طرفيه معا (في ظل ظروف الاختبار القياسية) ويعبر عنه بالعلاقة التالية [1]:

$$I_{sc} = I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{kt}\right) - 1 \right) - I_{ph} \quad (1.II)$$

حيث:  $I_0$  هو تيار التشبع (تيار تسرب الخلايا الشمسية في الظلام).

### 2.9.II. جهد الدارة المفتوحة $V_{co}$

وهو الجهد المقاس عند أطراف الخلية الشمسية عندما لا يمر في الدارة أي تيار ، وهو أعلى جهد يمكن أن تولده الألواح الشمسية في ظل ظروف الاختبار القياسية ، نظرا لعدم وجود حمل متصل مع طرفي اللوح ، وبالتالي لا ينتج أي تيار ويعطى بالعلاقة التالية [15]:

$$V_{co} = V_{th} \log\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{sc}}\right) \quad (2.II)$$

### 3.9.II. معامل التعبئة $F_F$

معامل التعبئة هو النسبة بين الطاقة القصوى مقسوم على جهد الدارة المفتوحة مضروب في تيار القصر ويكتب بالعلاقة التالية [1]:

$$F_F = \frac{P_m}{I_{sc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{co}} \quad (3.II)$$

حيث:  $V_m$  و  $I_m$  هما التيار والجهد عند نقطة الطاقة القصوى.

$I_{sc}$  هو تيار الدارة القصيرة.

$V_{co}$  هو الجهد في حالة الدارة المفتوحة.

### 4.9.II. مردود الخلية الشمسية

يعرف على أنه النسبة بين الطاقة القصوى التي تنتجها الخلية وقوة الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى الخلية ويكتب بالعلاقة التالية [1]:

$$\eta = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{H_{ins} \times S} \quad (4.II)$$

حيث:  $p_{in}$  هو إجمالي طاقة الضوء الساقط التي تضرب الخلية الشمسية.

$H_{ins}$  هو شدة الإشعاع وحدته  $(W/m^2)$ .

$S$  هي مساحة سطح الخلية وحدتها  $(m^2)$ .

**10.II. الايجابيات والسلبيات لاستخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية****1.10.II. الايجابيات**

- ✓ طاقة متجددة وصديقة للبيئة.
- ✓ ليس لها ضوضاء عند العمل.
- ✓ يمكن استعمالها باي مكان يوجد فيه ضوء.
- ✓ تدوم لفترة طويلة من 20 إلى 30 سنة [16].

**2.10.II. السلبيات**

- ✓ لا يمكن إنتاج الطاقة عند انعدام الضوء في حالة الغيوم ، الامطار ، وسقوط الثلوج .
- ✓ لا يمكن إنتاج الطاقة في الليل.
- ✓ تدهور كفاءة الألواح الشمسية بمرور الوقت.
- ✓ ارتفاع تكلفة إنتاج اللوح الشمسي ، الامر الذي يصعب التوسع في استغلالها [ 16].

**11.II. الخلاصة:**

تم في هذا الفصل دراسة عامة مبسطة عن الخلايا الشمسية ، حيث تعتبر هذه الاخيرة من أهم الطاقات المتجددة في الوقت الحالي ، و ذلك بفضل الخصائص الفريدة والمثيرة للاهتمام فهي مجانية ، ووفيرة وتدوم لفترات طويلة ، تتميز بإنتاج كهرباء دون احداث تلوث للبيئة ، وكان الغرض من استخدامها هو كبديل للطاقة التقليدية ، ومن أفضل تقنيات تحويلها استعمال الالواح الشمسية الكهروضوئية التي تسمح بإنتاج التيار الكهربائي المستمر، تتواجد الخلايا الشمسية في عدة انواع : خلايا شمسية سليكونية (متعددة واحادية البلورات ) ، خلايا الغير متبلورة ، والخلايا الشريطية ( CIS ، GaAs ، Cdte ) ، والخلايا الشمسية المتجددة (الصبغية والعضوية) ، والخلايا الشمسية من نوع GaAs/Ge ، حيث يعتمد مبدأ عملها على سطوع الضوء على بلور ، وبالتالي فهي مادة مفتاحية للتقدم التكنولوجي لباقي تقنيات الطاقات النظيفة المتجددة .



الفصل الثالث :  
نتائج محاكاة تأثير العيوب  
النقطية على مردود الخلية  
الشمسية من نوع  
GaAs/Ge

### 1.III. مقدمة

هذا الفصل سوف تتم فيه أولاً دراسة شرح مفصل لنظام المحاكاة (SCAPS) لمحاكاة الخلية الشمسية في بعد واحد ، يعمل على تحليل ودراسة أداء الخلية الشمسية في بعد واحد تحت التأثير الكهروضوئي، وثانياً تتم فيه وصف هيكل الخلية الشمسية ، ودراسة تأثير العيوب ( $E_{ns}$ ) عيب ناشئ من اشعاع النيوترونات ، ( $H_4$ ) عيب ناشئ من اشعاع الالكترونات ، ( $PR_1$  و  $PR_2$ ) وهي عيوب ناشئة من اشعاع البروتونات على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge في وجود عدة قيم لكثافة العيوب ومن ثم المقارنة بين النتائج المتحصل عليها باستخدام برنامج SCAPS. عندما نقول تأثير العيوب النقطية على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge يجب علينا ايضاً دراسة تأثير هذه العيوب على كثافة التيار و جهد الدارة المفتوحة ومعامل التعبئة لما لهم من علاقة حتمية بالمردود.

### 2. III. تعريف SCAPS

SCAPS هو اختصار (Solar Cell Capacitance simulator) ، يعمل هذا البرنامج على أجهزة الكمبيوتر التي تعمل بنظام التشغيل (7 ، 8 ، 10) ، Vista ، Windows ، NT ، 2000 XP ، وهو برنامج متاح مجالا لجميع البحوث المتخصصة بالخلايا الشمسية ، (95 ، 98) Windows ، وهو برنامج محاكاة خلية شمسية ذات بعد واحد تم تطويره في قسم الالكترونيات وأنظمة المعلومات في جامعة جنت بلجيكا ، ساهم العديد من الباحثين في تطويره Alex Niemegeers و Johan Verschraegen ، و يتم استخدامه للتحليل العددي للخلايا الشمسية تشمل الأداء والخصائص المتعلقة بالخلية الشمسية ، وكذا القياسات المتعددة لإعدادات اخراج الخلايا الشمسية [1] ، نظراً لتطورات الأخيرة تم جعل برنامج SCAPS مخصص من اجل خلايا تيلوريد الكاديوميوم Cdte وخلايا النحاس والاندسيوم والسلينايد (CIS) ، ثم تم تمديده ليشمل خلايا الشمسية البلورية السيليسيوم Si وخلايا الغاليوم ارسنايد GaAs والخلايا غير المتبلورة Si [17] ، ونذكر البعض من مميزات هذا البرنامج :

- ✓ يمكنه التعامل مع 7 طبقات اشباه الموصلات.
- ✓ امكانية استعمال التدرج في أغلب الاعدادات (حسب الموضع والعمق في الخلية).
- ✓ آليات اعادة التركيب : من نطاق الى نطاق (مباشر) ، Auger ، SRH.
- ✓ مستويات العيب ، نوع شحنة العيب : بدون شحنة (مثالية) ، أحادي التكافؤ (مانح فردي) ، متقبل) ، ثنائي التكافؤ (مانح مزدوج ، مذبذب) ، متعدد التكافؤ (من تحديد المستخدم).

- ✓ مستويات العيب ، التوزيعات النشطة : مستوى واحد ، منتظم ، Gauss ، ذيل ، أو مجموعات.
- ✓ مستويات العيب ، الخاصية الضوئية : الاثارة المباشرة مع الضوء المحتمل (تأثير فلطائي شوائب ، IPV).
- ✓ النفق: النفق داخل النطاق (داخل نطاق التوصيل أو داخل نطاق التكافؤ) ، نفق من وإلى حالات الواجهة.
- ✓ التوليد: أما من جيل الحساب الداخلي أو من ملف  $G(X)$  الذي قدمه المستخدم.
- ✓ الاضاءة: مجموعة متنوعة من الأطياف القياسية وغيرها (AM0 ، AM1.5G ، AM1.5D ، AM1.5Gediton2 ، احادي اللون ، أبيض ، .....).
- ✓ الاضاءة: من الجانب p أو الجانب n [18].

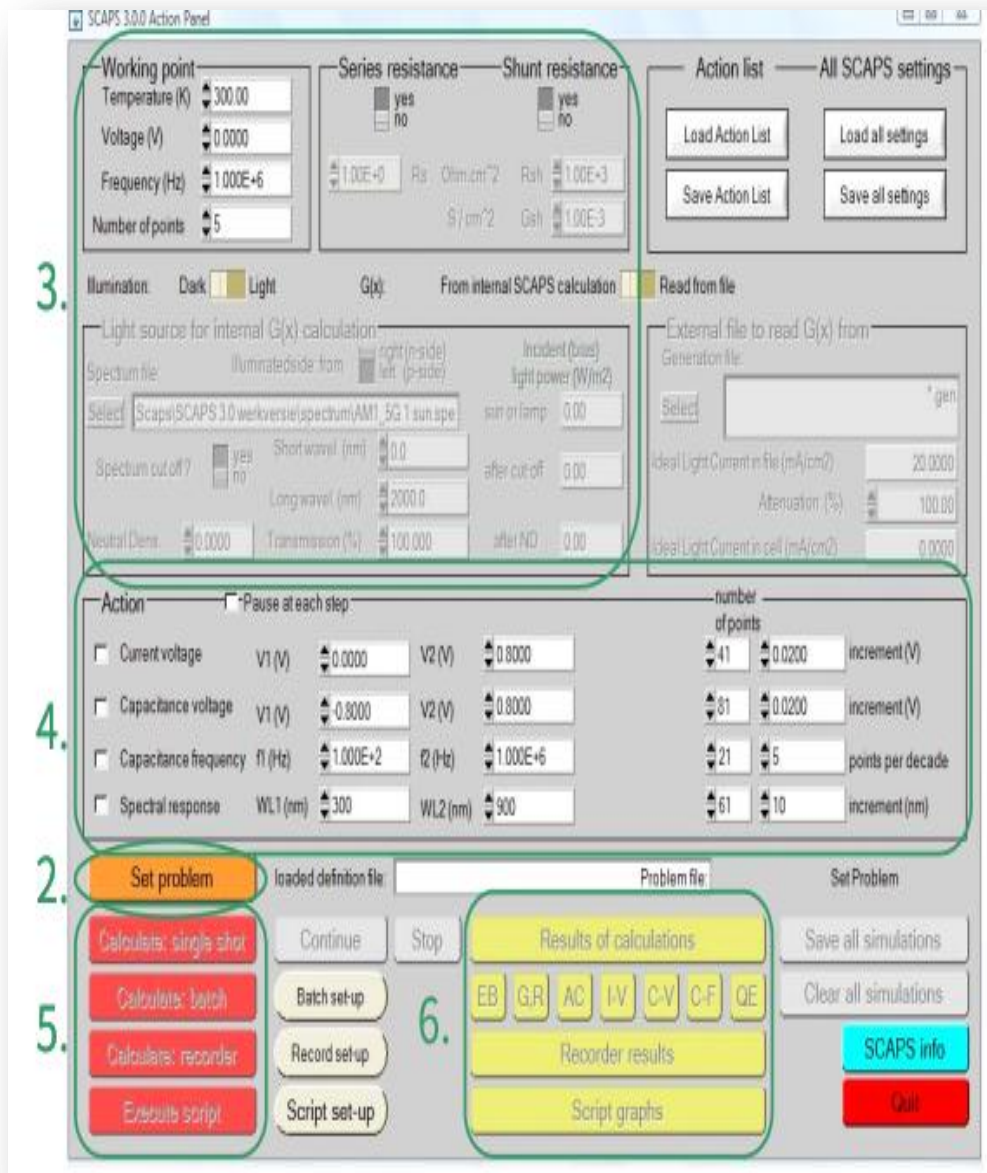
### 3.III. مبدأ عمل (كيفية تشغيل) SCAPS

#### 3.1.III. اطلاق SCAPS

أنقر فوق الرمز الموجود على سطح المكتب ، أو أنقر نقرا مزدوجا فوق الملف SCAPS3200.EXE في مدير الملفات (أو في اي اصدار آخر من SCAPS) ، يفتح SCAPS مع لوحة العمل [18].

#### 3.2.III. الأساسيات

SCAPS هو برنامج موجه لنظام Windows ، تطويره باستخدام Lab Windows/CVI of National Instruments ، هنا مصطلحات LW/CVI ل "لوحة" (الأسماء المستخدمة في البرامج الأخرى هي : نافذة ، صفحة ، نافذة منبثقة.....) ، يفتح SCAPS ب "لوحة العمل " فتظهر لنا النافذة التي في الشكل 1.III [18].



الشكل 1.III : لوحة تشغيل SCAPS.

1. قم بتشغيل SCAPS.
2. حدد المشكلة ، بالتالي الهندسة والمواد وجميع خصائص الخلية الشمسية .
3. حدد الظروف التي تريد اجراء المحاكاة فيها ، أي تحديد نقطة العمل.
4. حدد ما ستحسبه ، أي القياس الذي ستحاكيه.
5. أبدأ الحساب (العمليات).
6. أعرض المنحنيات المحاكاة (انظر القسم 6).

### 3.3.III. تعريف المشكلة

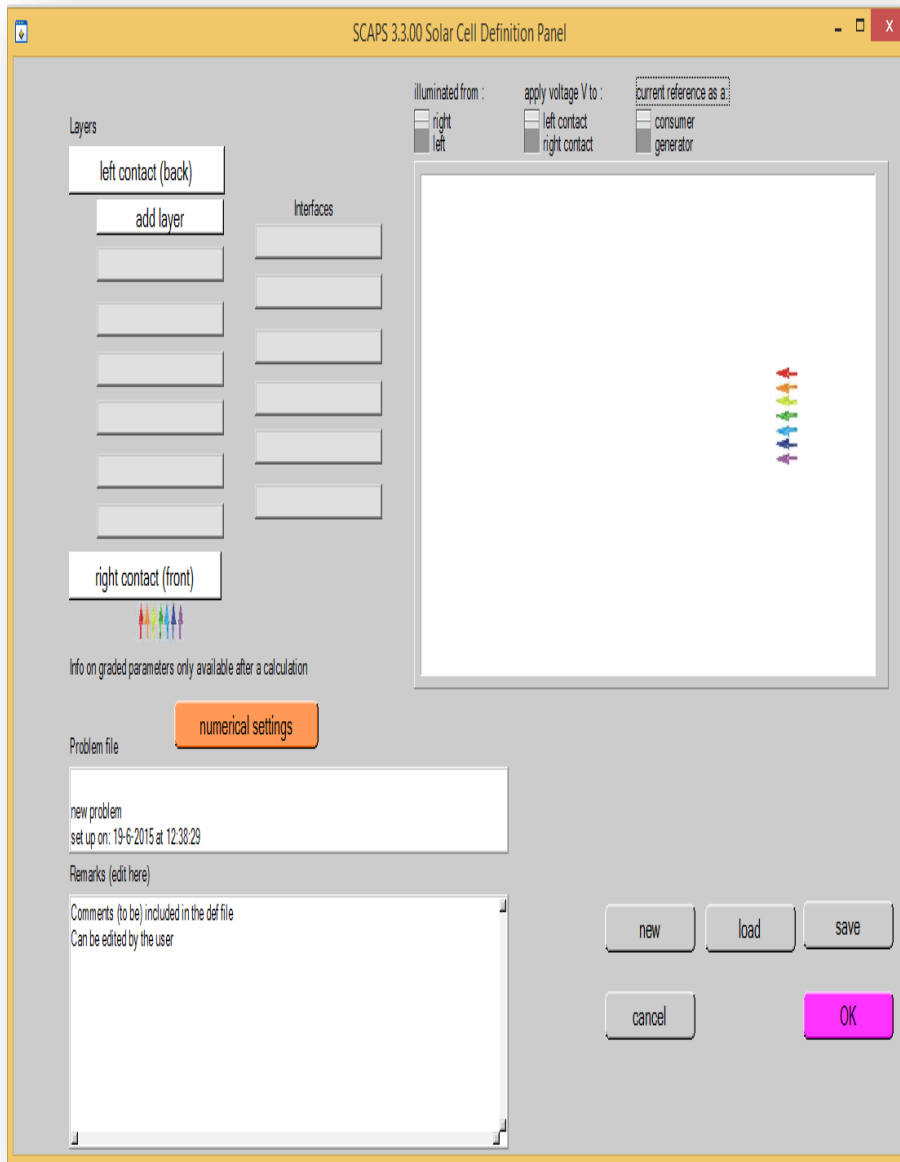
ننقر فوق Set problem في لوحة الاجراءات ، ونختار Load in في الزاوية اليمنى السفلية من اللوحة التي تفتح لاحقا ، نحدد ونفتح (GaAs-Si.def على سبيل المثال) بعد ذلك ، يمكن تغيير جميع خصائص الخلية بالنقر فوق "تعيين المشكلة" في لوحة الأجراء [18].



### الشكل 2.III : تحديد المشكلة.

ننقر فوق زر "تعيين المشكلة " لتحديد طبقات الخلية ، عند النقر على الزر تفتح "لوحة تعريف الخلايا الشمسية" ، ننقر فوق زر "add layer" أسفل قسم الطبقات باتجاه أعلى اليسار ، تتيح "لوحة خصائص الطبقة" للمستخدمين تعيين معلمات مختلفة مثل :

- ✓ d السماكة ( $\mu\text{m}$ ).
- ✓  $E_g$  فجوة النطاق (eV).
- ✓ X تقارب الالكترونون (eV).
- ✓  $\epsilon_t$  سماحية العزل (النسبية).
- ✓ الكثافة الفعالة للحالات CB و VB.
- ✓  $\mu_n$  السرعة الحرارية للالكترونون (cm/s).
- ✓  $\mu_p$  السرعة الحرارية للثقب (cm/s).
- ✓  $N_d$  كثافة الحاملات للمانحات ( $\text{cm}^{-3}$ ).
- ✓  $N_A$  كثافة الحالات للأخذات ( $\text{cm}^{-3}$ ) [18].



الشكل 3.III : لوحة تعريف الخلايا الشمسية.

LAYER 2		p-MAPb3	
thickness (µm)	0.400		
	uniform pure A (y=0)		
The layer is pure A: y=0, uniform	0.000		
Semiconductor Property P of the pure material	pure A (y=0)		
bandgap (eV)	1.500		
electron affinity (eV)	3.930		
dielectric permittivity (relative)	30.000		
CB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	2.500E+20		
VB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	2.500E+20		
electron thermal velocity (cm/s)	1.000E+7		
hole thermal velocity (cm/s)	1.000E+7		
electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	5.000E+1		
hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	5.000E+1		
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons	1.000E+0	
	effective mass of holes	1.000E+0	
no ND grading (uniform)			
shallow uniform donor density ND (1/cm <sup>3</sup> )	2.140E+14		
no NA grading (uniform)			
shallow uniform acceptor density NA (1/cm <sup>3</sup> )	2.140E+17		

Absorption model	
alpha (y=0)	<input type="checkbox"/> from model <input type="checkbox"/> from file
absorption constant A (1/cm eV <sup>2</sup> )	1.000E+5
absorption constant B (eV <sup>2</sup> /cm)	0.000E+0
300.absorption\MAPb3.txt	
absorption file for y = 0	
<input type="button" value="show"/>	<input type="button" value="save"/>

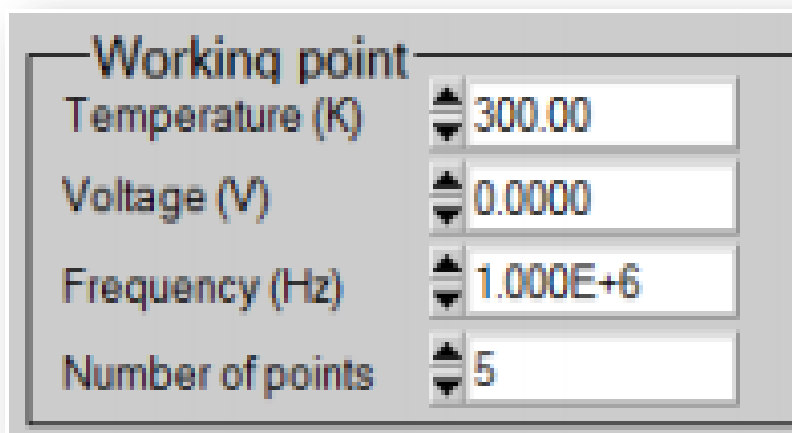
  

Recombination model	
Band to band recombination	
Radiative recombination coefficient (cm <sup>3</sup> /s)	0.000E+0
Auger electron capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Auger hole capture coefficient (cm <sup>6</sup> /s)	0.000E+0
Recombination at defects: Summary	
Defect 1	
Defect 1 charge type: neutral total density (1/cm <sup>3</sup> ): Uniform 1.500E+12 grading N(y): uniform energy distribution: CB tail; Et = 0.70 eV above EV; Ekar = 0.01 eV this defect only, if active: tau_n = 6.7E+04 ns, tau_p = 6.7E+05 ns this defect only, if active: Ln = 9.3E+01 µm, Lp = 2.9E+02 µm	
Defect 2	
Defect 2 charge type: neutral total density (1/cm <sup>3</sup> ): Uniform 1.500E+12 grading N(y): uniform energy distribution: VB tail; Et = 0.70 eV above EV; Ekar = 0.01 eV this defect only, if active: tau_n = 6.7E+05 ns, tau_p = 6.7E+04 ns this defect only, if active: Ln = 2.9E+02 µm, Lp = 9.3E+01 µm	
<input type="button" value="Edit Defect 1"/>	<input type="button" value="Edit Defect 2"/>
<input type="button" value="Edit Defect 3"/>	<input type="button" value="Edit Defect 4"/>
<input type="button" value="Add a Defect 5"/>	<input type="button" value="Remove Defect 1"/>
<input type="button" value="Remove Defect 2"/>	<input type="button" value="Remove Defect 3"/>
<input type="button" value="Remove Defect 4"/>	<input type="button" value="Remove Defect 5"/>
(no metastable configuration possible)	
<input type="button" value="Accept"/>	<input type="button" value="cancel"/>
<input type="button" value="Load Material"/>	<input type="button" value="Save Material"/>

الشكل 4.III : لوحة خصائص الطبقة.

### 3.4.III. تحديد نقطة العمل

تحدد نقطة العمل في محاكاة القياس كما هو مبين في الشكل 5.III:



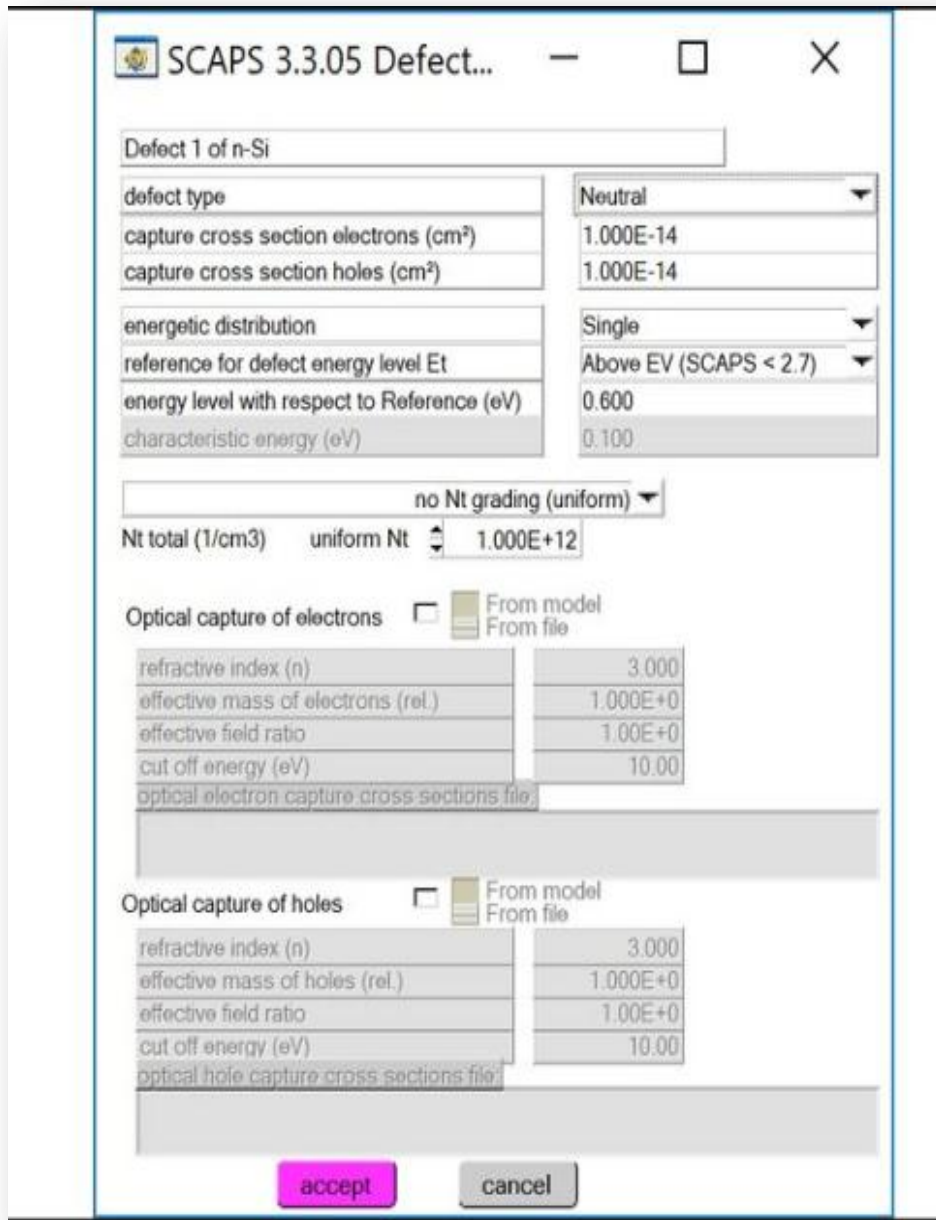
الشكل 5.III : نقطة التشغيل.

- ✓ **درجة الحرارة T:** مناسبة لجميع القياسات ، ملاحظة: في SCAPS فقط  $N_V(T)$  و  $N_C(T)$  والسرعات الحرارية ، الجهد الحراري  $KT$  وجميع مشتقاتها هي المتغيرات الوحيدة التي لها اعتماد صريح على درجة الحرارة .
- ✓ **الجهد V:** يجب تحديده في محاكاة I-V و C-V ، أنه جهد تحيز التيار المستمر في محاكاة C-f ، يبدأ SCAPS دائما عند 0V ، ويستمر عند جهد نقطة العمل في عدد من الخطوات التي يجب ان نحددها أيضا .
- ✓ **التردد f:** يجب تحديده في محاكاة I-V و C-f .
- ✓ **الإضاءة:** تستخدم لجميع القياسات ، بالنسبة لقياس  $QE(\lambda)$  ، الإعدادات الأساسية التي تحدد ظروف الضوء هي : الظلام أو الفاتح ، و اختيار الجانب المضيء ، و اختيار الطيف [18].

### 4.III. كيفية ادراج العيوب في المحاكى SCAPS

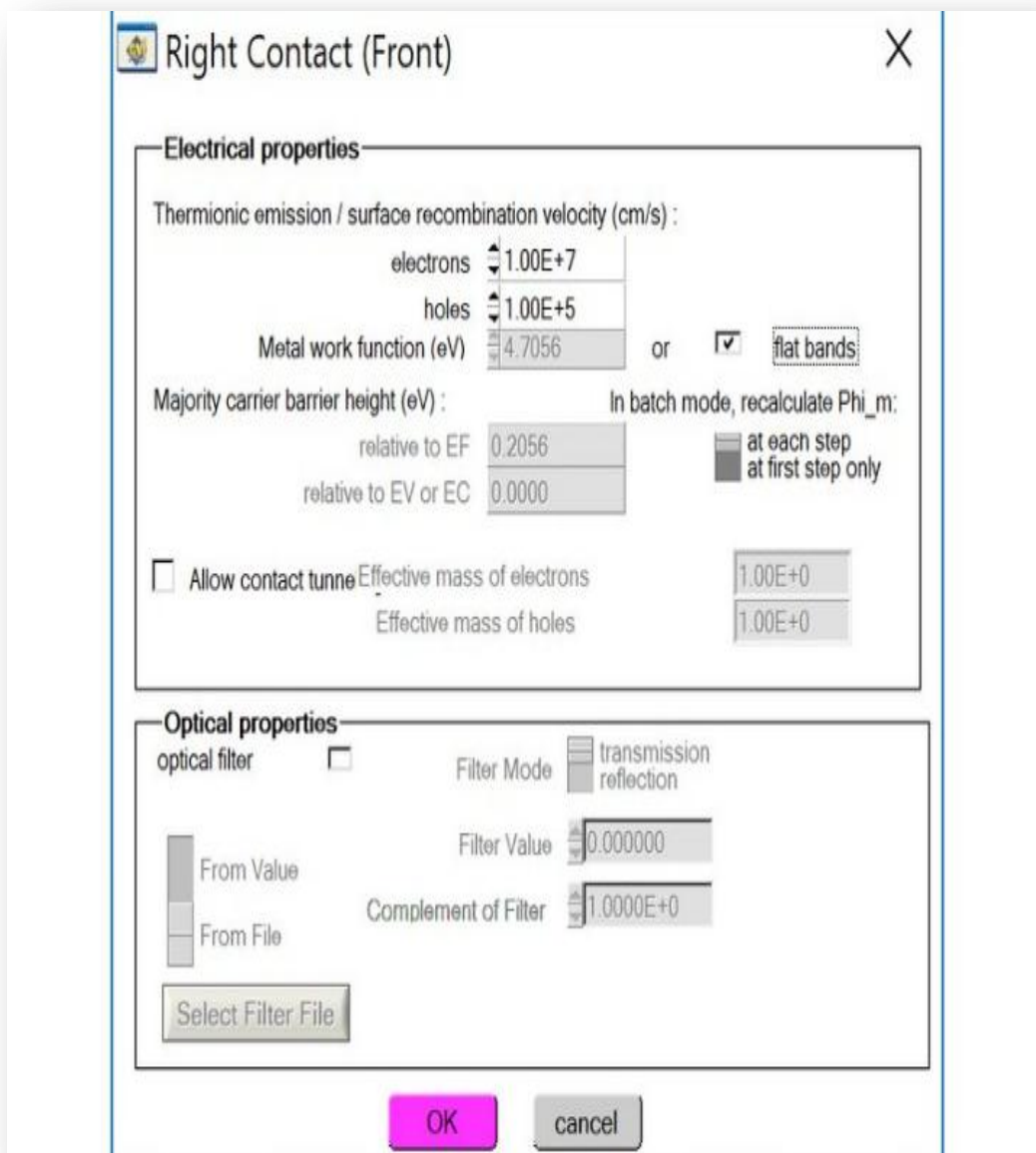
ننقر فوق "إضافة العيب" بالقرب من أسفل لوحة النصف الأيمن وندخل جميع الخصائص الخاصة بالعيوب كما هو موضح في الشكل 6.III ، ننقر فوق "قبول" لإنهاء تعديل العيب [19].





الشكل 6.III : لوحة خصائص العيب.

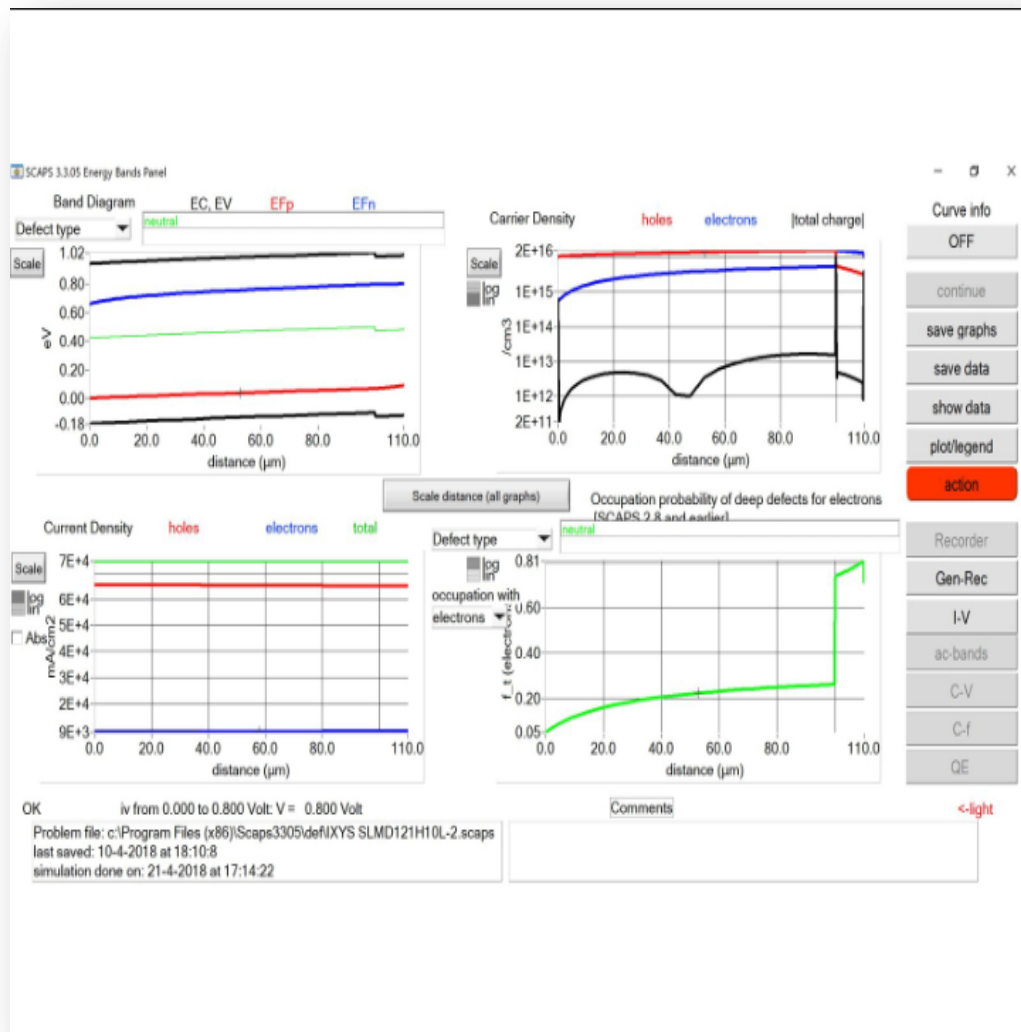
ننقر فوق "right contact(front)" لتعديل جهة الاتصال الأمامية ، نقوم بتغيير الخصائص كما هو موضح في الشكل 7.III ، ننقر فوق "موافق" عند الانتهاء.



الشكل 7.III : جهة الاتصال الصحيحة (الامامية).

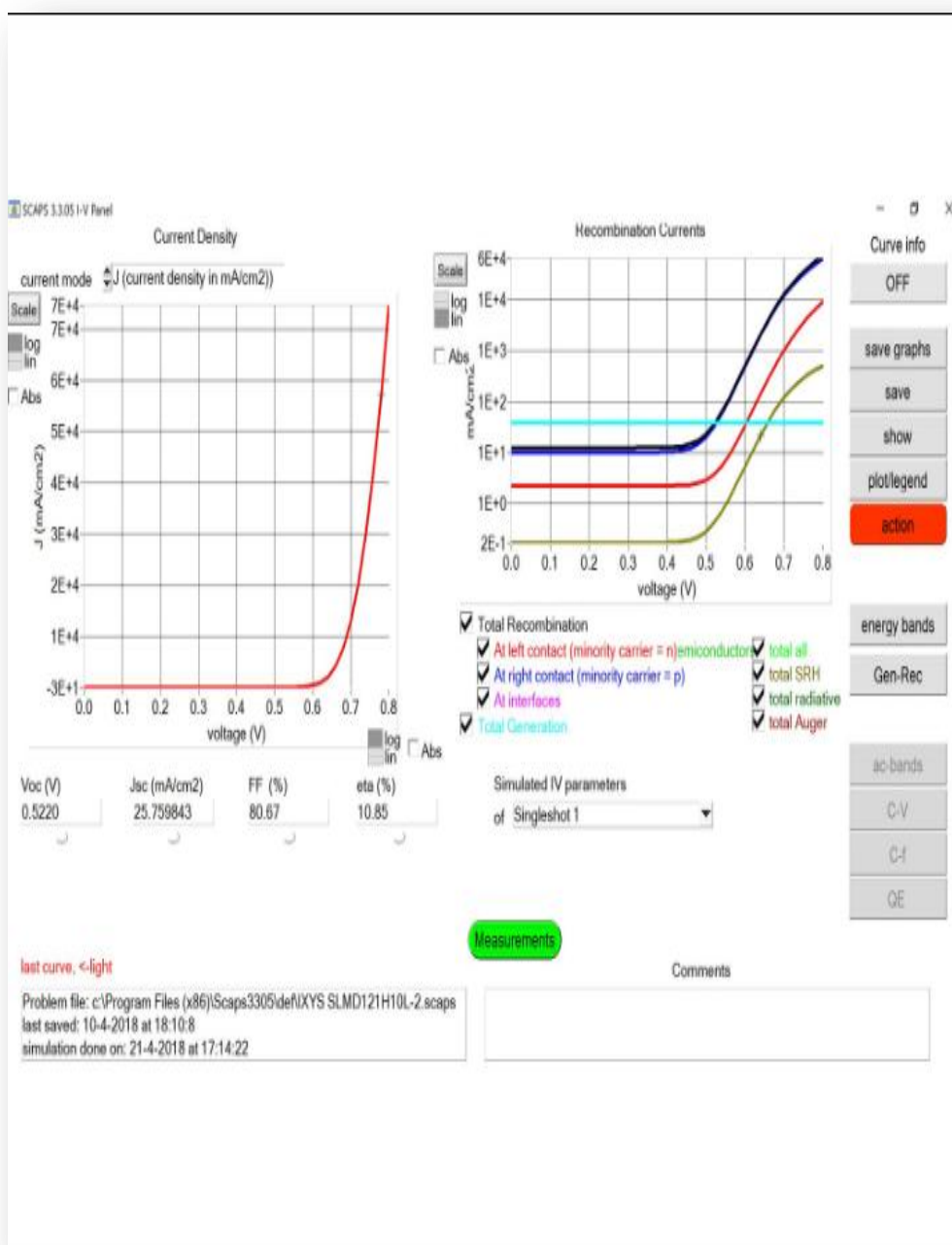
#### 4.1.III الحساب

لبدء الحساب يتعين النقر فوق أحد الخيارات "Calculate" الملونة بالأحمر تحت زر تعيين المشكلة، نظراً لأنه تم تحميل ملف واحد فقط لهذه المشكلة ، ثم تحديد خيار "Single Shot" تفتح لوحة Energy Bands ، وتبدأ الحسابات في الجزء السفلي من اللوحة [20].



الشكل 8.III : لوحة نطاقات الطاقة.

يشار الى لون آخر منحنى محسوب (يصبح الرسم البياني مزدحما للغاية ، انقر فوق clear all لمسح جميع الرسوم البيانية) ، يتم عرض منحنيات اعادة التركيب فقط للمحاكاة الأخيرة. اذا تم تشغيل Curve Info وتم النقر فوق المؤشر الموجود على منحنى في الرسم البياني ، ستظهر لوحة منبثقة والتي تعطي معلومات عن الرسم والمنحنى والنقطة التي تم النقر عليها هنا يمكن عرض ملف القياس [20].



الشكل 9.III : لوحة عرض لمنحنيات I-V.

### 5.III. بنية الخلية المستعملة

في هذا العمل تم دراسة الخلية شمسية GaAs/Ge وهي من نوع  $p^+/n/n^+$  ، الإعدادات الخاصة بالمواد التي تم ادخالها في برنامج المحاكاة SCAPS هي الثوابت الخاصة بالمواد كما هو موضح في الجدول 1.III ، وتلك الخاصة بالخلية في الجدول 2.III ، بالإضافة الى خصائص العيوب النقطية المستعملة في هذا العمل والمقاسة تجريبيا موضحة في الجدول 3.III.

### الفصل الثالث نتائج محاكاة تأثير العيوب النقطية على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge

الجدول 1.III : الاعدادات الخاصة بالمواد التي تم ادخالها في برنامج المحاكاة SCAPS.

Ge	GaAs	تعريفها	الاعدادات
0.66	1.42	النطاق الممنوع	$E_g(\text{ev})$
4.13	4.07	التقارب الالكتروني (ev)	$X$
16	12.9	السماحية النسبية ( $F.cm^{-1}$ )	$\epsilon_r$
$10^{19}$	$4.7 \times 10^{17}$	كثافة الحالات للإلكترونات	$N_c$
$5 \times 10^{18}$	$7 \times 10^{18}$	كثافة الحالات للثقوب	$N_v$
$4 \times 10^3$	$8 \times 10^{18}$	حركية الالكترونات	$\mu_n$
$1 \times 10^3$	$4 \times 10^2$	حركية الثقوب	$\mu_p$

الجدول 2.III: التطعيم والسلك بالنسبة للخلية الشمسية ( $p^+/n/n^+$ ).

المنطقة $n^+$	المنطقة $n$	المنطقة $P$	المنطقة $P^+$	
$10^{19}$	$10^{16}$	$10^{17}$	$10^{18}$	التطعيم ( $cm^{-3}$ )
0.5	3	0.6	0.1	السلك ( $\mu m$ )

الجدول 3.III : خصائص العيوب المستعملة في هذا العمل المقاسة تجريبيا [21] [22] [23].

$\sigma_n(cm^2)$	مستوي الطاقى $E_t(\text{ev})$	العيوب
$6000 \times 10^{-15}$	0.73	$E_{n5}$
$3 \times 10^{-11}$	0.71	$H_4$
$10^{-12}$	0.781	$PR_1$
$3.4 \times 10^{-12}$	0.649	$PR_2$

### 6.III الخصائص الكهربائية للخلية قبل التعرض للإشعاع

يتم تلخيص الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية GaAs/Ge قبل التعرض للإشعاع في الجدول التالي:

الجدول 4.III : الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية قبل التعرض للإشعاع .

$V_{oc}(v)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$	FF(%)	$\eta(\%)=eta$
0.96	38.79	87.70	24.05

انطلاقاً من النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة للخلية الشمسية وذلك قبل تعرضها للإشعاع والمدونة في الجدول III. 4 فإننا نلاحظ ان هاته القيم هي قيم جيدة مقارنة بالنتائج التي تم الحصول عليها في أبحاث علمية أخرى والمنشورة في عدة مقالات علمية منها [21، 22، 23، 24] وذلك راجع الى بنية الخلية الشمسية المختارة والمعمول بها في هذه الدراسة فهدفنا دائما هو تطوير وتحسين الخلايا الشمسية وذلك بالحصول على أعلى مردود ، اذ نلاحظ أن تيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية المستعملة و المتحصل عليه في هذا العمل والمساوي للقيمة  $38.79 (mA/cm^2)$  والتي هي أكبر من المتحصل عليه في المقال المنشور العلمي [24] والمساوية الى  $28.58 (mA/cm^2)$  وبالتالي فان مردود الخلية التي استعملناها في هذه الدراسة أكبر من المتحصل عليه في [24].

### 7.III تأثير العيب النقطي $E_{n5}$ الناشئ من اشعاع النترونات على مردود الخلية الشمسية من نوع

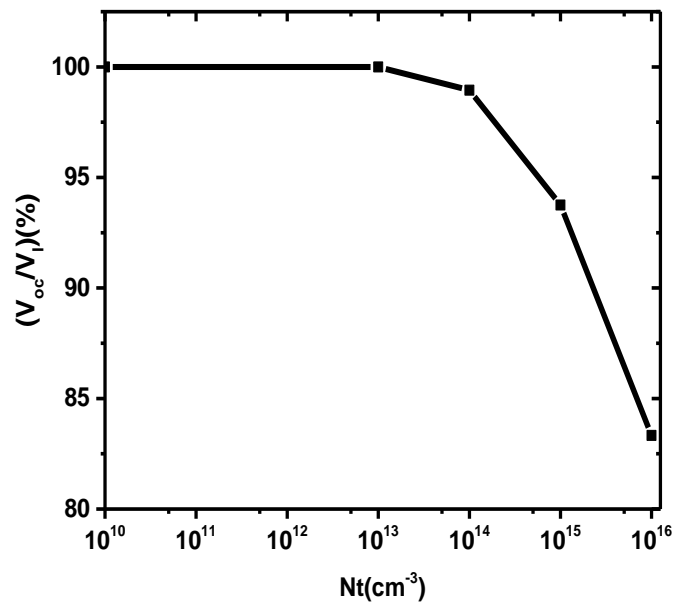
#### GaAs/Ge

سوف ندرس في هذا الجزء تأثير كثافة العيوب  $N_t$  الخاصة بالعيب  $E_{n5}$  على الخلية الشمسية GaAs/Ge عند تعريضها لإشعاع النترونات حيث نتلخص نتائج تأثير كثافة العيوب على خصائص الكهربائية للخلية الشمسية في الجدول 5.III ، كما توضح كل من الأشكال ( 10.III ، 11.III ، 12.III و 13.III) تأثير كثافة العيوب على كل من جهد الدارة المفتوحة و كثافة التيار ومعامل التعبئة و المردود بالترتيب .

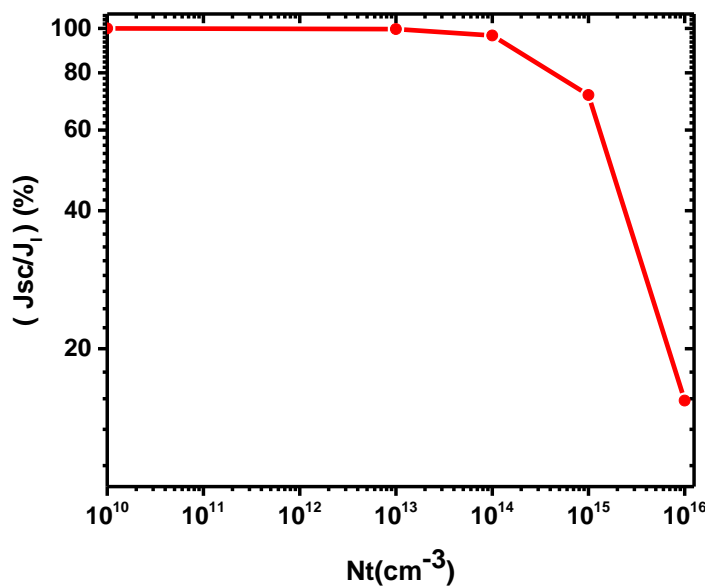
جدول 5.III : التغيرات النسبية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المستعملة بدلالة كثافة العيوب

الخاصة بالعيب النقطي  $E_{n5}$  عند تعريضها لإشعاع النترونات.

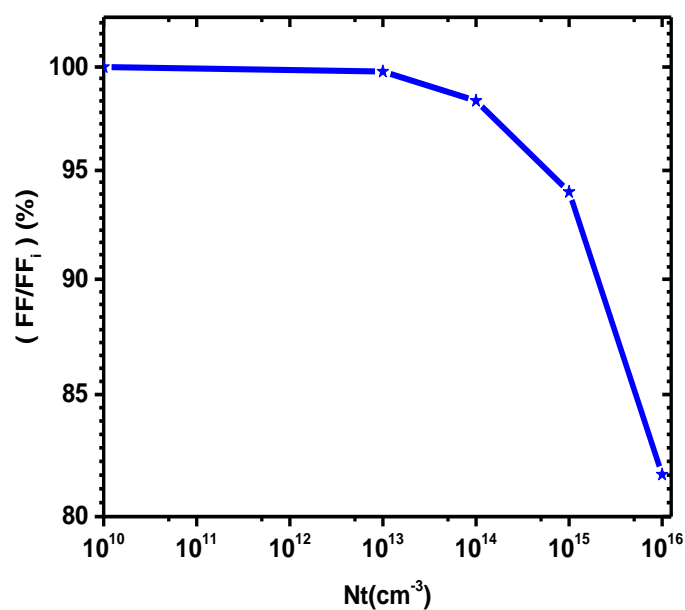
$N_t(cm^{-3})$	$(V_{oc}/V_i)(\%)$	$(J_{sc}/J_i)(\%)$	$(FF/FF_i)(\%)$	$(\eta/\eta_i)=eta$ (%)
$10^{10}$	100( $V_i=0.96V$ )	100( $J_i=0.96$ $mA/cm^2$ )	100( $FF_i=87.70$ )	100( $\eta_i=24.05$ )
$10^{13}$	100	99.63	99.78	99.37
$10^{14}$	98.95	96.46	98.34	94.26
$10^{15}$	93.75	71.56	93.99	63.32
$10^{16}$	83.33	15.41	81.69	10.60



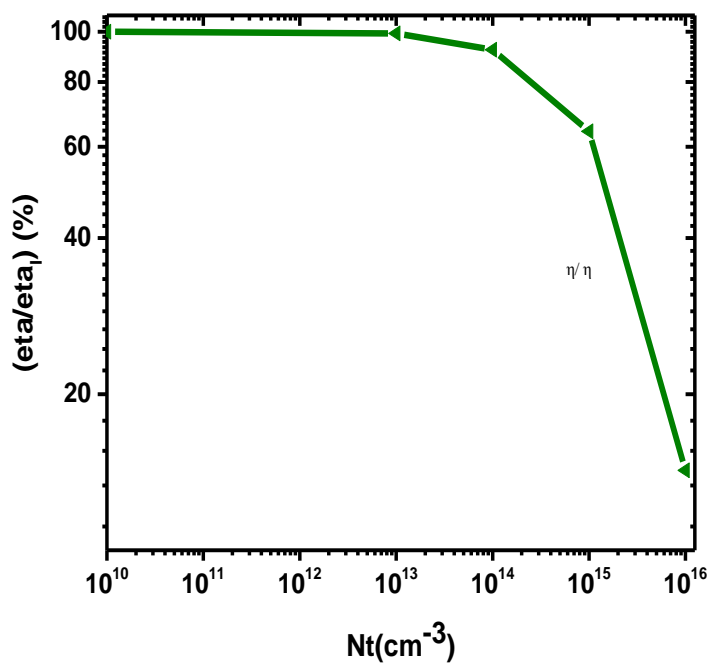
الشكل 10.III : منحنى جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي  $E_{n5}$ .



الشكل 11.III : منحنى تيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي  $E_{n5}$ .



الشكل 12.III : منحنى معامل التعبئة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي  $E_{n5}$ .



الشكل 13.III : منحنى المردود للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي  $E_{n5}$ .



### الفصل الثالث نتائج محاكاة تأثير العيوب النقطية على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge

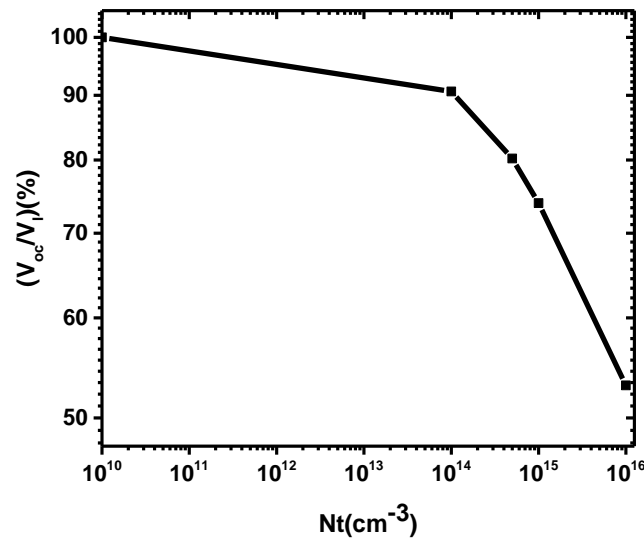
نلاحظ من خلال نتائج الجدول 1.III أنه كلما زادت كثافة العيوب ابتداء من القيمة  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  الى غاية القيمة  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  انخفضت الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية بشكل كبير جدا ، حيث أن جهد الدارة المفتوحة يتناقص من القيمة  $0.96 \text{ V}$  الى القيمة  $0.80 \text{ V}$  كما هو موضح في الشكل 10.III ، وكما نلاحظ أيضا انخفاض في تيار الدارة القصيرة من القيمة  $38.7 \text{ mA/cm}^2$  الى  $5.98 \text{ mA/cm}^2$  كما هو موضح في الشكل 11.III ، إضافة الى ذلك نلمح من خلال الشكل 12.III انخفاضا طفيفا في قيمة معامل التعبئة من  $87.70\%$  الى  $71.65\%$  و ذلك راجع الى انخفاض في كل من تيار الدارة القصيرة وكذا جهد الدارة المفتوحة تبعا للعلاقة  $FF = \frac{P_m}{I_{sc} \times V_{oc}}$  و التي توضح العلاقة الرابطة بين معامل التعبئة و كلا من تيار الدارة القصيرة وكذا جهد الدارة المفتوحة وبحكم أن جداء هذين الأخيرين موجود في المقام أدى هذا الى الانخفاض الطفيف جدا و في الأخير وبحسب العلاقة التالية  $\eta = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{P_{in}}$  نتج انخفاض في المردود  $\eta$  من القيمة  $24.05\%$  الى القيمة  $2.55\%$  و هو ما يثبتته الشكل 13.III.

### 8.III تأثير العيب النقطي H4 الناشئ من اشعاع الالكترونات على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge

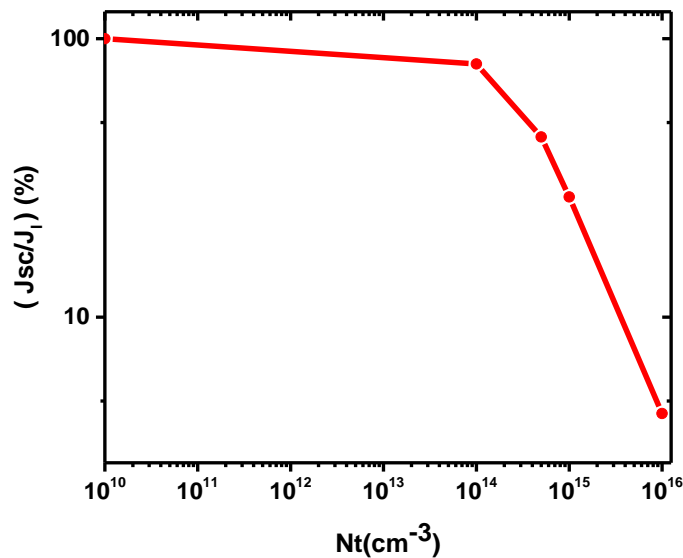
سوف ندرس في هذا الجزء تأثير كثافة العيوب  $N_t$  للعيب النقطي H4 الناشئ عن اشعاع الالكترونات اثر تعرض الخلية الشمسية GaAs/Ge لإشعاع الالكترونات بالنسبة للخصائص الخاصة بالعيب النقطي H4 فهي موضحة في الجدول 3.III حيث تم تلخيص نتائج تأثير كثافة العيوب على الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية في الجدول 6.III ، كما توضح كل من الأشكال ( 14.III ، 15.III ، 16.III و 17.III) تأثير كثافة العيوب على كل من جهد الدارة المفتوحة ، تيار الدارة القصيرة ،معامل التعبئة و كذا مردود الخلية الشمسية GaAs /Ge على الترتيب.

**جدول 6.III :** التغيرات النسبية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المستعملة بدلالة كثافة العيوب للعيب النقطي H4 عند تعريضها لإشعاع الالكترونات.

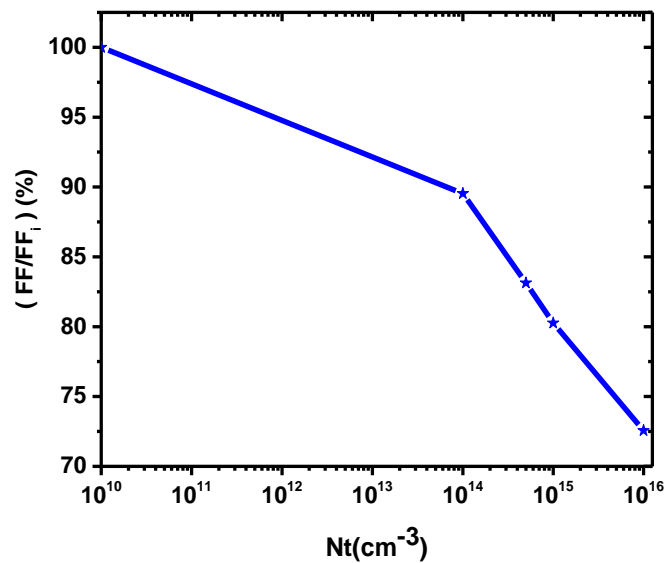
$N_t(\text{cm}^{-3})$	$(V_{oc}/V_i)(\%)$	$(J_{sc}/J_i)(\%)$	$(FF/FF_i)(\%)$	$(\eta/\eta_i) = \text{eta}(\%)$
$10^{10}$	100( $V_i=0.96\text{V}$ )	100( $J_i=0.96 \text{ mA/cm}^2$ )	100( $FF_i=87.70$ )	<b>100(<math>\eta_i=24.05</math>)</b>
$10^{14}$	90.62	81.15	89.53	<b>66.56</b>
$5 \times 10^{14}$	80.20	44.41	83.13	<b>29.97</b>
$10^{15}$	73.95	27.04	80.26	<b>16.13</b>
$10^{16}$	53.06	4.51	72.57	<b>0.16</b>



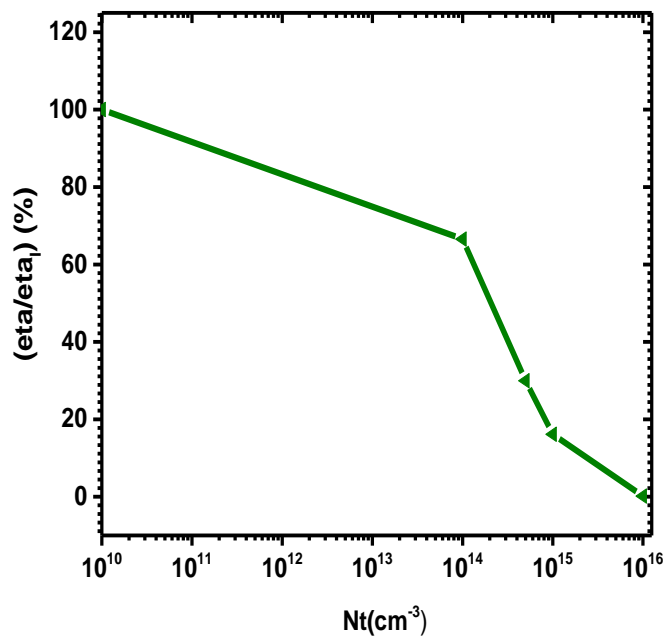
الشكل 14.III : منحنى جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي  $H_4$ .



الشكل 15.III : منحنى تيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي  $H_4$ .



الشكل 16.III : منحنى معامل التعبئة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي  $H_4$ .



الشكل 17.III : منحنى مردود للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي  $H_4$ .

### الفصل الثالث نتائج محاكاة تأثير العيوب النقطية على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge

نلاحظ من خلال النتائج الموضحة في الجدول 6.III أنه كلما زادت كثافة العيوب  $N_t$  من القيمة  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  الى غاية القيمة  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  تناقص كل من جهد الدارة المفتوحة و تيار الدارة القصيرة وكذا معامل التعبئة والمردود ، تناقصت قيم الخصائص الخارجية للخلية الشمسية وبشكل كبير بحيث جهد الدارة المفتوحة ، تيار الدارة القصيرة ، معامل التعبئة والمردود تناقصت قيمهم من  $0.87 \text{ V}$  ،  $31.48 \text{ mA/cm}^2$  ،  $78.52 \%$  ،  $16.01 \%$  الى غاية القيمة  $0.51 \text{ V}$  ،  $1.75 \text{ mA/cm}^2$  ،  $63.65 \%$  ،  $0.04 \%$  كما هو موضح في الأشكال (14.III ، 15.III ، 16.III و 17.III) على الترتيب .

#### 9.III تأثير العيب النقطي $PR_1$ الناشئ عن اشعاع البروتونات على مردود الخلية الشمسية من

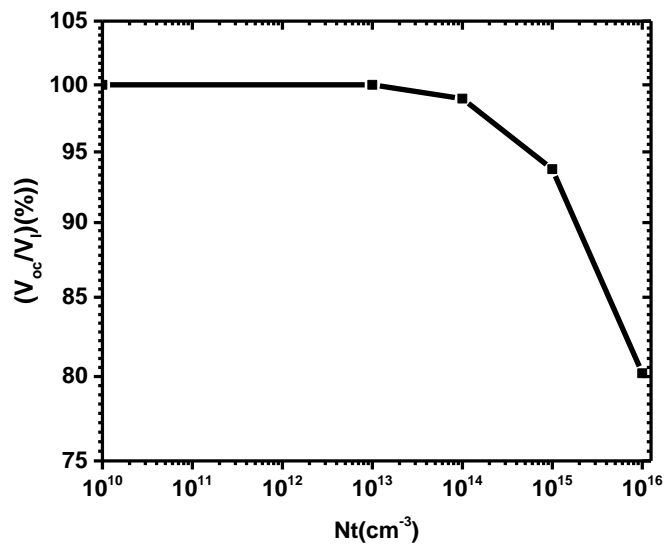
#### نوع GaAs/Ge

في هذا الجزء سوف ندرس تأثير كثافة العيوب  $N_t$  للعيوب نقطي  $PR_1$  الناشئ عن اشعاع البروتونات على مردود الخلية الشمسية GaAs/Ge عند تعريضها لإشعاع البروتونات حيث نلخص نتائج تأثير كثافة العيوب على خصائص الكهربية للخلية الشمسية في الجدول 7.III ، كما توضح كل من الأشكال (18.III ، 19.III ، 20.III و 21.III) تأثير كثافة العيوب على كل من جهد الدارة المفتوحة و تيار الدارة القصيرة ومعامل التعبئة و المردود بالترتيب.

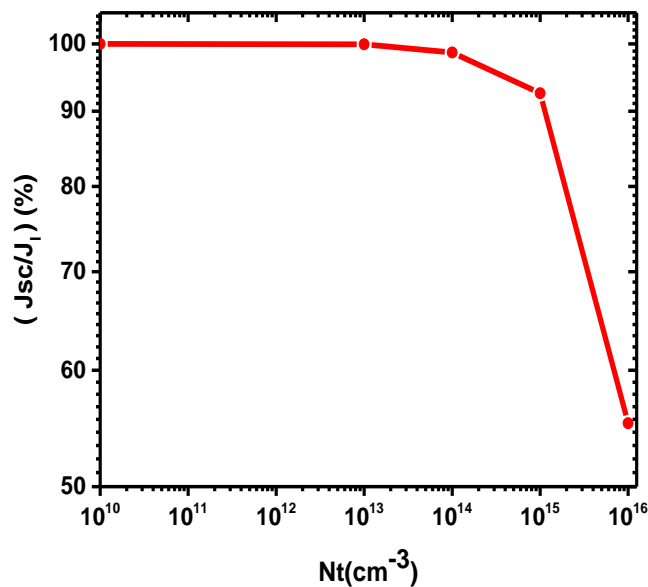
#### الجدول 7.III : التغيرات النسبية للخصائص الكهربية للخلية الشمسية المستعملة بدلالة كثافة

العيوب للعيوب نقطي  $PR_1$  عند تعريضها لإشعاع البروتونات.

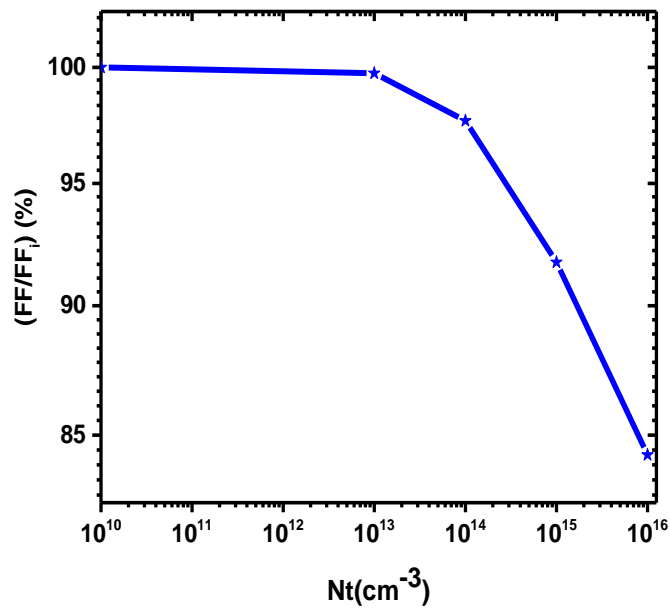
$N_t(\text{cm}^{-3})$	$(V_{oc}/V_i)(\%)$	$(J_{sc}/J_i)(\%)$	$(FF/FF_i)(\%)$	$(\eta/\eta_i) = \text{eta}(\%)$
$10^{10}$	100( $V_i=0.96\text{V}$ )	100( $J_i=0.96 \text{ mA/cm}^{-2}$ )	100( $FF_i=87.70$ )	<b>100(<math>\eta_i=24.05</math>)</b>
$10^{13}$	100	99.94	99.74	<b>99.50</b>
$10^{14}$	98.95	98.68	97.65	<b>96.17</b>
$10^{15}$	93.75	92.57	91.75	<b>80.24</b>
$10^{16}$	80.20	55.22	84.26	<b>37.96</b>



الشكل 18.III : منحنى جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي PR1.

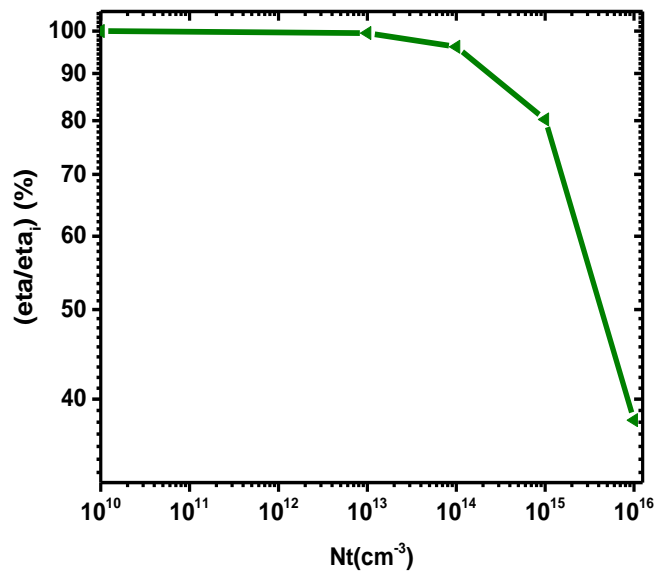


الشكل 19.III : منحنى تيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي PR1.



الشكل 20.III : منحنى معامل التعبئة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة

كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي PR1.



الشكل 21.III : منحنى المردود للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة

كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي PR1.

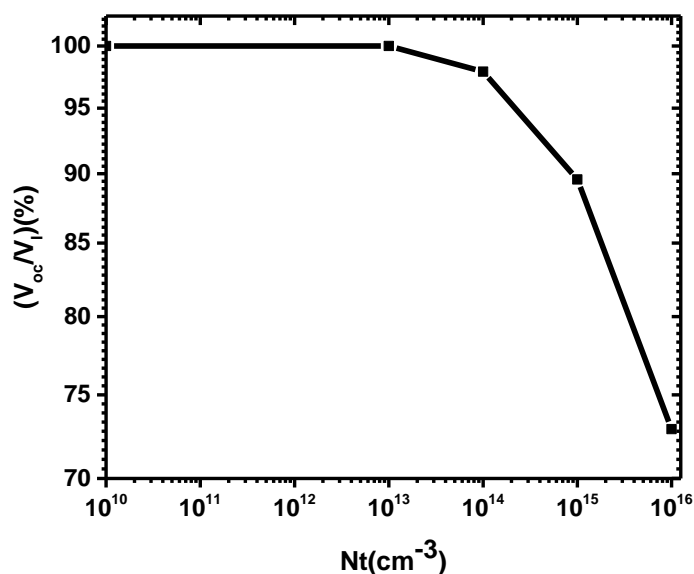
نلاحظ من خلال نتائج الجدول 7.III أنه كلما زادت قيمة كثافة العيوب من القيمة  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  الى غاية القيمة  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  تناقصت كل الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المستعملة ، حيث نلاحظ من الشكل 18.III أن جهد الدارة المفتوحة تناقص من القيمة  $0.96 \text{ V}$  الى القيمة  $0.77 \text{ V}$  ، ومن الشكل 19.III نلاحظ أن تيار الدارة القصيرة تناقص من القيمة  $38.77 \text{ mA/cm}^2$  الى غاية القيمة  $21.42 \text{ mA/cm}^2$  ، وكذلك تناقص في قيمة معامل التعبئة كما هو موضح في الشكل 20.III حيث كانت قيمته  $87.48 \%$  وأصبحت  $73.90 \%$  ، وكذلك نلاحظ انخفاض في قيمة المردود من القيمة  $23.93 \%$  الى غاية القيمة  $9.13 \%$  كما هو موضح في الشكل 21.III.

### 10.III. تأثير العيب النقطي $\text{PR}_2$ الناشئ عن اشعاع البروتونات على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge

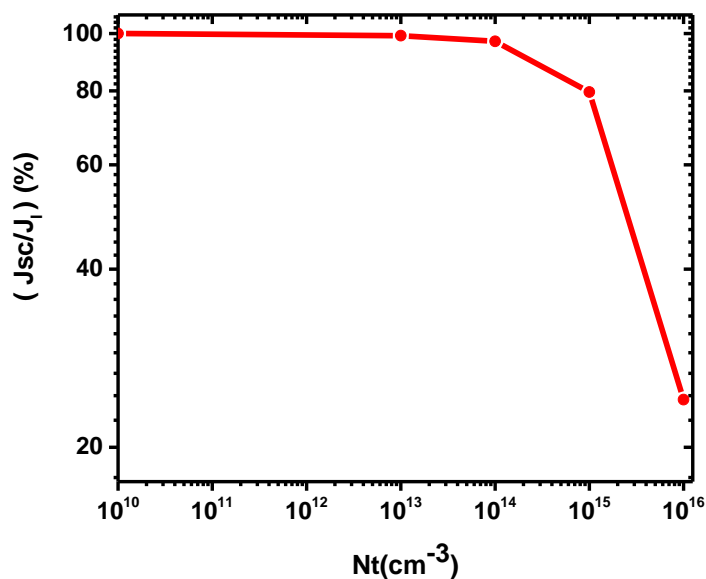
ندرس في هذا الجزء تأثير كثافة العيوب  $N_t$  للعيوب النقطي  $\text{PR}_2$  الناشئ عن اشعاع البروتونات على مردود الخلية الشمسية GaAs/Ge عند تعريضها لإشعاع البروتونات حيث نلخص نتائج تأثير كثافة العيوب على خصائص الكهربائية للخلية الشمسية في الجدول 8.III ، كما توضح كل من الأشكال 22.III ، 23.III ، 24.III و 25.III تأثير كثافة العيوب على كل من جهد الدارة المفتوحة ، تيار الدارة القصيرة ، معامل التعبئة و المردود على الترتيب.

**الجدول 8. III :** التغيرات النسبية للخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المستعملة بدلالة كثافة العيوب للعيوب النقطي  $\text{PR}_2$  عند تعريضها لإشعاع البروتونات.

$N_t(\text{cm}^{-3})$	$(V_{oc}/V_i)(\%)$	$(J_{sc}/J_i)(\%)$	$(FF/FF_i)(\%)$	$(\eta/\eta_i) = \text{eta}(\%)$
$10^{10}$	100( $V_i=0.96\text{V}$ )	100( $J_i=0.96 \text{ mA/cm}^2$ )	100( $FF_i=87.70$ )	<b>100(<math>\eta_i=24.05</math>)</b>
$10^{13}$	100	99.17	99.46	<b>99.25</b>
$10^{14}$	97.91	97.00	96.46	<b>92.30</b>
$10^{15}$	89.58	79.65	89.20	<b>64.24</b>
$10^{16}$	72.91	24.07	79.80	<b>14.26</b>

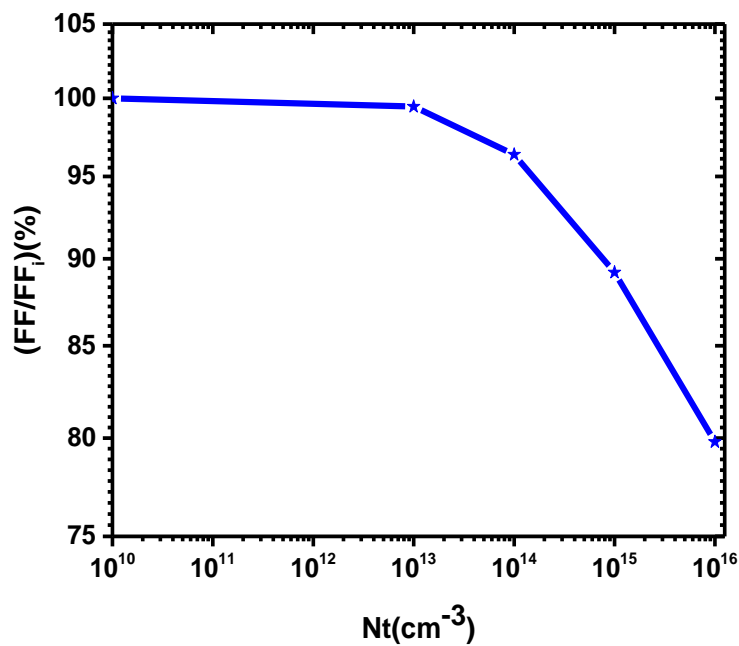


الشكل 22.III : منحنى جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي PR2.

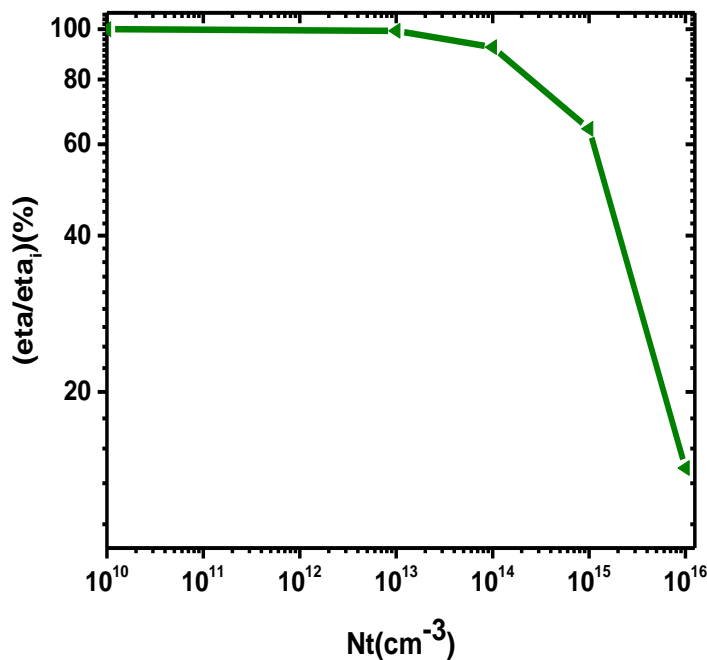


الشكل 23.III : منحنى التيار الدارة القصيرة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي PR2.





الشكل 24.III : منحنى معامل التعبئة للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي PR2.



الشكل 25.III : منحنى المردود للخلية الشمسية GaAs/Ge بدلالة كثافة العيوب  $N_t$  بوجود العيب النقطي PR2.

من خلال نتائج الجدول 8.III نلاحظ أن كل الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية تتناقص بدلالة زيادة كثافة العيوب ، حيث نلاحظ أنه عند القيمة  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  لكثافة العيوب  $N_t$  كانت قيمة جهد الدارة المفتوحة والتيار الدارة القصيرة ومعامل التعبئة والمردود هي  $0.96 \text{ V}$  ،  $38.47 \text{ mA/cm}^2$  ، % ،  $87.23$  ،  $23.87$  على التوالي ، وعند القيمة  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  لكثافة العيوب أصبحت قيمة كل من جهد الدارة المفتوحة والتيار الدارة القصيرة ومعامل التعبئة والمردود  $0.70 \text{ V}$  ،  $9.34 \text{ mA/cm}^2$  ،  $69.99\%$  ،  $3.43$  على الترتيب ، كما هو مبين في الأشكال (22.III ، 23.III ، 24.III ، 25.III).

**11.III. مقارنة بين جميع العيوب في تأثيرها على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge**  
من خلال النتائج ، نلاحظ أن جميع الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية GaAs/Ge تظهر تناقصا كبيرا والمتمثل في جهد الدارة المفتوحة  $V_{oc}$  والتيار الدارة القصيرة  $I_{sc}$  ومعامل التعبئة FF والمردود  $\eta$  مع زيادة كثافة العيوب  $N_t$  عند تعريضها لعدة عيوب ناشئة من اشعاع النترونات ( $E_{n5}$ ) واشعاع الالكترونات ( $H_4$ ) واشعاع البروتونات ( $PR_1$  و  $PR_2$ ) ، حيث الزيادة في كثافة المصادم للإلكترونات يؤدي الى انخفاض في الحاملات الأقلية ، وبالتالي انخفاض الشحنة على الأقطاب الكهربائية وتناقص أداء الخلايا الشمسية .

ان المردود هو أكثر خاصية حساسة لوجود علاقة بين التيار والجهد ومعامل التعبئة حسب العلاقة 4.II ، حيث نلاحظ أن قيمة المردود تتناقص مع تناقص كل من الجهد والتيار ومعامل التعبئة ، حيث نلاحظ أن مردود الخلية الشمسية عند اضافة عيب ناشئ عن اشعاع نترونات  $E_{n5}$  هي  $2.55\%$  وعند اضافة العيب الناشئ عن اشعاع الالكترونات  $H_4$  قيمته هي  $0.04\%$  وفي العيب الناشئ عن البروتونات ( $PR_1$  ،  $PR_2$ ) فقيمته هي  $9.13\%$  ،  $3.43\%$  على الترتيب ، وعند المقارنة بين القيم نلاحظ أن العيب الناشئ من اشعاع الالكترونات هو من أدى الى تناقص كبير في قيمة المردود وبالتالي نستنتج أن العيب  $H_4$  له أكثر تأثير على مردود الخلية الشمسية  $\eta$ .

### 12.III. الخلاصة

تم في هذا الفصل دراسة نتائج محاكاة نتائج تأثير العيوب على مردود الخلية الشمسية بواسطة نظام المحاكاة SCAPS ، حيث أولاً تم شرح عن كيفية تشغيل وكيفية ادراج العيوب في المحاكي SCAPS، وثانياً تم اضافة عدة عيوب ( $PR_2$  ،  $PR_1$  ،  $H_4$  ،  $E_{n5}$ ) الى الخلية الشمسية GaAs/Ge وتغيير في قيمة كثافة العيوب  $N_t$  و دراسة تأثير العيوب على مردود الخلية الشمسية ، حيث لوحظ أن للعيوب لها تأثير على مردود الخلية الشمسية حيث اذا زادت كثافة هذه العيوب نقص المردود بقيمة كبيرة وكل عيب له تأثير خاص ، وبعد المقارنة بين تأثير جميع العيوب على مردود الخلية الشمسية استنتج أن من له أكثر تأثير على المردود هو العيب  $H_4$ .

الخلاصة العامة

## الخلاصة العامة

تم القيام بهذا العمل من أجل التعرف على تأثير العيوب النقطية على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge وذلك من أجل تحسين أداء الخلية الشمسية من أجل استغلالها في المستقبل وإنشاء مشاريع بها ، وذلك بواسطة برنامج المحاكاة SCAPS نظرا لكونه تطبيق ناجح لدراسة الخلايا الشمسية ومتاح مجاني لجميع البحوث العلمية الخاصة بالخلايا الكهروضوئية ، حيث قمنا بهذه الدراسة عن طريق إضافة عيوب للخلية الشمسية بكثافات متزايدة، ونلاحظ بذلك أن الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية (الجهد  $V_{oc}$  ، التيار  $I_{sc}$  ، معامل التعبئة  $F_F$  ، المردود  $\eta$ ) تتناقص بزيادة كثافة العيوب  $N_t$  ، ويعتبر المردود هو أكثر حساسية ، وبعد الاطلاع على النتائج لوحظ أنه عند إضافة عيب  $H_4$  ناشئ من اشعاع الالكترونات تراجع كبير في المردود الخلية الذي وصل الى 0.04% عند كثافة عيب مساوية ل  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ، أما عند إضافة العيب النقطي  $PR_2$  والذي نشأ من اشعاع البروتونات تراجع كذلك مردود الخلية الشمسية الى القيمة 3.43% ، وتواصل الانخفاض كذلك عند إضافة العيب النقطي  $E_{n5}$  والعيب النقطي  $PR_1$  الى أن وصل الى قيمة 2.55% و 9.13% على الترتيب عند كثافة عيب  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  .

وفي الأخير نستنتج أن العيب النقطي  $H_4$  الناشئ من اشعاع الالكترونات كان له تأثير كبير على مردود الخلية الشمسية من نوع GaAs/Ge .

المراجع

## المراجع

- [1] شتيح غنية ، شرقي ياسمينه ، " تأثير مصائد الالكترونات على الخلايا الشمسية غير المتجانسة" ، مذكرة ماستر ، جامعة محمد خيضر- بسكرة- 2021/2020
- [2] د. يسرى مصطفى و أ. د. أحمد الغامدي. فيزياء الحالة الصلبة وتطبيقاتها. الباب الرابع 1434هـ.
- [3] د. سعود بن حميد اللحياي. فيزياء الجوامد. الفصل الثاني "التركيب الحقيقي للجوامد".
- [4] Donald R. Askeland. Pradeep P. Fulay. Wendelin J. Wrigh" The Scienc and Engineering of Materials Sixth Edition" CENGAGE Learning.
- [5] الدكتور محمد الجلاي. فيزياء الجوامد.
- [6] National Aeronautics and Space Administration, Solar Cell Radiation Handbook, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, (1989)
- [7] V.S. Vavilov, "Effects of Radiation on Semiconductors", Consultants Bureau, New York, (1965).
- [8] بحري نوال ، بوطبة فوزية ، " دراسة خلية شمسية p-n بوصلة غير متجانسة oxide/Si" ، مذكرة ماستر ، جامعة محمد خيضر- بسكرة- 2019/2020.
- [9] تاتي مريم ، بسمة رجا ، "تأثير الغبار على الألواح الشمسية الكهروضوئية" ، مذكرة ماستر أكاديمي ، جامعة قاصدي مرباح – ورقلة- 2018/2019
- [10] Solar Cell "WWW, Wikiwand. Com/ Retrived " 02-11-2019, Edited
- [11] Richard Corkish , Encyclopedia of Energy , 2004 .
- [12] محمد رأفت السيد خليل، "كتاب الطاقة الشمسية واستخداماتها" ، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع ، القاهرة 2009
- [13] Bethel Afework, Jordan Maninaira, Kailyn Stenhouse, and others (25-6-2018), "Type of photovataic cells", energyeducation, ca Retrived 31-5-2021 Edited
- [14] يوسف همو، " الخلايا الكهروضوئية: الأنواع والفعالية ( المقال 2)" ، المغرب العلمي
- [15] د. سعود يوسف عياش. تكنولوجيا الطاقة البديلة. عالم المعرفة الكويت فبراير 1981.
- [16] هايل الجازي ، " بحث عن الطاقة الشمسية " ، 31 ماي 2022
- [17] سايح رزقي، " تأثير العيوب على خلية شمسية من السيلسيوم" ، مذكرة ماستر ، جامعة محمد خيضر- بسكرة- 2017/2016

- Marc Burelman, Kooen Docock, Aleex Niemegeers, Johan Verschragen, Stefaan Degrave, "SCAPS manual", Verion:26-11-2021. [18]
- Duoyang Huang "Solar Cell IV Curve Simulation Tutorial", 4-23-2018. [19]
- Dr.Amal Kabalan and Sam Roy, " Integrating Solar Cells Simulation software in an Unergraduate Engineering Class", 2016 ASEE Mid – Atlantic Section Conference [20]
- W. Laiadi, Af. Meftah, N.Sengouga, Am. Meftah, "Irradiation effect on the electrical characteristics of an AlGaAs/GaAs based solar cell: Comparison between electron and proton irradiation by numerical simulation", Superlattices and Microstructures, 58(2013)44-52. [21]
- W Laiadi, Am Meftah , Af Meftah, N.Sengouga," Numerical simulation of the electron traps effect created by neutron irradiation on p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> GaAs solar cell performance", Indian J Phy,04May2020 [22]
- Halima Mazouz, Pierre-Olivier Logerais, Abderrahmane Belghachi, Olivier Riou, Fabien Delaleux, Jean-Feli Durastanti, " Effect of electron irradiation fluence on the output parameters of GaAs solar cell", ScienceDirect,19May2015 [23]
- A.Elahidoost, M. Fathipour, and A. Mojab, " Moddelling the Effecte of 1 Mev Electron Irradiation on the Perfomance Degradation of a Single Junction Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs Solar cell", 20th Irania Confeerence on Electrical Engineering, (ICEE2012), May 15-17,2012, Tehran, Iran. [24]



## المخلص

تتأثر الخلية الشمسية بعدة عيوب ، وهذه العيوب تؤدي الى تناقص في انتاج الخلية الشمسية ، وفي هذا العمل قمنا بدراسة تأثير عدة عيوب ناشئة عن اشعاع الالكترونات والنيوترونات والبروتونات على مردود الخلية الشمسية GaAs/Ge وهي من نوع  $p^+/n/n^+$  ، باستخدام برنامج المحاكاة SCAPS ، حيث وجدنا بعد المقارنة أن العيب النقطي الناشئ عن اشعاع الالكترونات ( $H_4$ ) هو من له أكثر تأثير على مردود الخلية الشمسية GaAs/Ge .

### **Abstract:**

The solar cell is affected by several defects, and these defects lead to a decrease in the production of the solar cell . In this work, we studied the effect of several defects arising from the radiation of electrons, neutrons and protons on the yield of the GaAs/Ge solar cell, which is of the  $p^+/n/n^+$  type, using the SCAPS simulation program, where we found, after comparison, that the point defect arising from electron radiation ( $H_4$ ) is the one that has the most impact on the efficiency of the solar cell GaAs/Ge .