جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم الدقيقة و علوم الطبيعة و الحياة
قسم علوم المادة

# مذكرة ماستر

ميدان علوم المادة
شعبة الفيزياء
فيزياء المواد

---

إعداد الطالب:
بحري نوال – بوطبة فوزية

# دراسة خلية شمسية p-n بوصلة غير متجانسة oxide/si

---

**لجنة المناقشة:**

| | | | |
|---|---|---|---|
| تيبرمسين توفيق | أ. مح أ | جامعة محمد خيضر بسكرة | الرئيس |
| مفتاح أفاق | أستاذ | جامعة محمد خيضر بسكرة | المشرف |
| نواجي مليكة | أ. مح أ | جامعة محمد خيضر بسكرة | الممتحن |

السنة الجامعية: 2019 - 2020

# الشكر

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 مفتاح أفاق لإشرافها على هذه المذكرة و على جميل صبرها و توجيهاتها القيمة. لدعمها و ثقتها التي شرفتنا بها أثناء هذه الفترة ،لقد سعدنا جدا بالتعامل معها كانت فعلا تجربة جد رائعة.

دون أن أنسى أعضاء لجنة المناقشة الأستاذ تيبرمسين توفيق والأستاذة نواجي مليكة لتفضلهم بمناقشة هذه المذكرة.

كما نتوجه بجزيل الشكر للزميلة و الصديقة شرون ريمة لما قدمته من مساعدة و دعم لا يقدر بثمن لإتمام هذا العمل.

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.

**نوال & فوزية**

# الإهداء

أهدي هذا العمل إلى :

أمي و أبي.....

إخوتي و أخواتي.....

حفظكم الله لي جميعا و رعاكم.

**نوال**

إذا كان الإهداء يعبر و لو بجزء من الوفاء فالإهداء إلى الينبوع الذي لا يمل من العطاء إلى من حاكت سعادتي بخيوط منسوجة من قلبها إلى رمز الحب **أمي الغالية**.

إلى من كلله الله بهيبة الوقار و علمني العطاء دون انتظار إلى الذي أحمل اسمه بكل إفتخار **أبي الغالي**.

إلى من حبهم يجري في عروقي و يلهج بذكراهم فؤادي **إخواني الغاليين**.

إلى من سرنا سويا نشق الطريق معا نحو النجاح و الإبداع **أصدقائي الأعزاء**.

إلى من علموني حروفا من ذهب **أساتذتي الكرام** .

إلى كل من نساه قلمي و لم ينساه قلبي أهديكم هذا العمل راجيا من المولى عز و جل القبول و النجاح.

**فوزية**

**الملخص:**

في هذا العمل قمنا بمحاكاة الخلايا الشمسية (SnO/Si , $Cu_2O$/Si , NiO/Si) بإستعمال برنامج **SILVACO-ATLAS** و الذي يستخدم لمحاكاة الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية المقترحة.

الحالة الإبتدائية كانت باعتبار كل من سمك (0.1 $\mu m$) Si،سمك الأكاسيد ($Cu_2O$/NiO) (100$\mu m$) (SnO/)،تطعيم الأكاسيد p (1e17 $cm^{-3}$)،تطعيم السيليكون n (1e14 $cm^{-3}$)،عمل الإنتزاع للأنود (5.1)،عمل الإنتزاع للكاثود (4.2) لكل من (SnO/Si,Cu2O/Si,NiO/Si). و كانت أحسن النتائج لSnO/Si ،بكفاءة تحويل تقارب 12 في المئة.بعد الدراسة التحسينية بكل الوسائط سالفة الذكر ،وجدنا أن أحسن النتائج كانت للخلية NiO/Si بكفاءة تحويل في حدود 22 في المئة.وفسرنا ذلك بشفافية الأكسيد وقيمة ألفته الإكترونية الملائمة لفصل فعال وتجميع للثقوب ضمن منطقة الأكسيد.

**الكلمات المفتاحية**: خلية شمسية سيليكونية غير متجانسة الوصلة، محاكاة، أكسيد ناقل نوع p .

**Abstract:**

In this work we have simulate three heterojunction solar cells (Cu2O / Si, NiO / Si), (SnO / Si), using the SILVACO-ATLAS software, which is used to extract the electrical properties of the proposed solar cells.

The initial case has been given by considering the Si thickness of (0.1 $\mu m$), the oxides (SnO/$Cu_2O$/NiO) thickness of (100 $\mu m$) , p- doping (1e17 $cm^{-3}$) , n- doping (1e14 $cm^{-3}$) ,anode workfunction (5.1) ,cathode workfunction (4.2) . The best results in the primary study obtained was for SnO / Si , with a conversion efficiency of about 12 %. After the optimization study based on thicknesses, work-function and doping , the NiO / Si cell has shown the best conversion efficiency of 22 %. We interpreted this by the transparency of the oxide and its electronegativity value appropriate for efficient separation and collection of holes within the oxide region.

**Keyword**: heterojunction Si solar cell, simulation, Conductive oxide p-type.

## قائمة الأشكال


| الشكل | العنوان | الصفحة |
|---|---|---|
| الشكل.1.1 | مخطط مبسط لمبدأ عمل خلية شمسية | 8 |
| الشكل.1.2 | الوصلة PN | 8 |
| الشكل.1.3 | الوصلة PNعند الإستقرار | 9 |
| الشكل.1.4 | يمينا مخطط الحزم ،يسارا بنية الخلية الشمسية | 10 |
| الشكل.1.5 | بنية خلية شمسية أحادية التبلور | 12 |
| الشكل.1.6 | بنية خلية شمسية متعددة البلورات | 13 |
| الشكل.1.7 | بنية الخلايا الشمسية الرقيقة | 14 |
| الشكل.1.8 | خلية شمسية من السيليكون الغير متبلور | 15 |
| الشكل.1.9 | رسم بياني يوضح الطبقات الخمس التي تتكون منها الخلايا الشمسية CdTe | 16 |
| الشكل.1.10 | خلايا شمسية شريطية متعددة الطبقات | 16 |
| الشكل.2.1 | مخطط توضيحي لحزم الطاقة عند $0K$ لكل من ناقل ؛عازل ؛ شبه ناقل | 23 |
| الشكل.2.2 | أكسيد القصدير $SnO_2$ | 25 |
| الشكل.2.3 | الخلية الاساسية لأكسيد القصدير$SnO_2$ | 26 |
| الشكل.2.4 | الفاصل الطاقي لأكسيد القصدير$SnO_2$ | 27 |
| الشكل.2.5 | رسم تخطيطي يوضح الإنتقالات المباشرة وغير مباشرة في اشباه النواقل | 28 |
| الشكل.2.6 | أكسيد النحاس CuO | 29 |
| الشكل.2.7 | تخطيط لبنية CuO | 29 |
| الشكل.2.8 | بنية النطاق الإلكتروني و كثافة الحالات ل CuO المحسوبة بواسطة DFT (logiciel siesta) | 31 |
| الشكل.2.9 | أكسيد النيكل NiO | 33 |
| الشكل.2.10 | البنية البلورية (a) للنيكل،(b) لأكسيد النيكل NiO | 34 |
| الشكل.2.11 | فجوة النطاق لأغشية NiO كدالة لدرجة حرارة الأكسدة | 35 |
| الشكل.2.12 | المقاومة كدالة لدرجة حرارة الأكسدة لأغشية أكسيد النيكل NiO بشكل متساو لمدة ساعة او 2.5 ساعة في نطاق درجة الحرارة 300 $C^o$ - 600 $C^o$ | 36 |
| الشكل.2.13 | مخطط توضيحي لمبدأ عمل خلية شمسية | 37 |

| | | |
|---|---|---|
| الشكل.2.14 | توضيح لتوليد التيار في خلية شمسية.الدوائر التي تحمل علامة $Ph$تمثل الفوتونات | 38 |
| الشكل.2.15 | فصل الإلكترونات عن الثقوب في المنطقة الناضبة بواسطة الحقل الكهربائي | 39 |
| الشكل.2.16 | المنحنى المميز $J-V$ لخلية كهروضوئية | 40 |
| الشكل.2.17 | رسم تخطيطي للدارة المكافئة للخلية الشمسية | 40 |
| الشكل.2.18 | الإستطاعة الأعظمية لخلية شمسية | 42 |
| الشكل.2.19 | خصائص "جهد-تيار"$J-V$ للوصلة الغير متجانسة $SnO_2$/n-Si تقاس في الظلام عند درجات حرارة مختلفة و تحت ضوء الشمس عند 300K | 44 |
| الشكل.2.20 | منحنيات $J-V$في الإضاءة و الظلام للخلايا الشمسية CuO/Si االمصنوعة بطريقة التبخر الحراري | 45 |
| الشكل.2.21 | الخصائص الكهروضوئية للخلايا الشمسية الغير المتجانسة CuO/Si الناتجة عن التبخر الحراري | 46 |
| الشكل.2.22 | منحنيات $J-V$ للخلية الشمسيةp-NiO/n-Si | 47 |
| الشكل.3.1 | بيئة تصنيع الرقاقة الافتراضية | 60 |
| الشكل.3.2 | مداخل ومخارج Atlas | 61 |
| الشكل.3.3 | النافذة الأساسية TonyPlot | 62 |
| الشكل.3.4 | مخطط انسيابي لمراحل بناء نموذج في ATLAS | 63 |
| الشكل.3.5 | بنية الخلية الشمسية SnO (p-type) / Si(n-type) في الحالة الإبتدائية مع أنود واحد من النحاس | 68 |
| الشكل.3.6 | الخاصية $(J-V)$ مقارنة بين SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si في الحالة الإبتدائية | 69 |
| الشكل.3.7 | الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود | 70 |
| الشكل.3.8 | الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسيةSnO(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود | 71 |
| الشكل.3.9 | الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية $Cu_2O$ (p-type)/Si (n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود | 72 |
| الشكل.3.10 | الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية $Cu_2O$ (p-type)/Si (n-type) من أجل | 73 |

| | | |
|---|---|---|
| | مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود | |
| الشكل.3.11 | الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية NiO (p-type)/Si (n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود | 75 |
| الشكل.3.12 | الخاصية$(J-V)$ للخلية الشمسية NiO (p-type)/Si (n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود | 76 |
| الشكل.3.13 | الخاصية $(J-V)$؛مقارنة بين SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si عند عمل الإنتزاع للأنود 5.8/ للكاثود 3.4 | 77 |
| الشكل.3.14 | تأثير سمك طبقة SnO(p-type) على الخاصية $(J-V)$ | 79 |
| الشكل.3.15 | تأثيرتغيرات سمك طبقة SnO(p-type) على الوسائط الكهربائية | 80 |
| الشكل.3.16 | تأثير سمك طبقة Si (n-type) على الخاصية $(-V)$ للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) | 81 |
| الشكل.3.17 | تأثيرتغيرات سمك طبقة Si (n-type) على الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si (n-type) | 82 |
| الشكل.3.18 | تأثير سمك طبقة $Cu_2O$(p-type) على الخاصية $(J-V)$ | 83 |
| الشكل.3.19 | تأثيرتغيرات سمك طبقة $Cu_2O$(p-type) على الوسائط الكهربائية | 84 |
| الشكل.3.20 | تأثير سمك طبقة Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type). | 85 |
| الشكل.3.21 | تأثيرتغيرات سمك طبقة Si (n-type) على الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si (n-type) | 86 |
| الشكل.3.22 | تأثير سمك الطبقة NiO(p-type) على الخاصية $(J-V)$ | 87 |
| الشكل.3.23 | تأثيرتغيرات سمك طبقة NiO(p-type) على الوسائط الكهربائية | 88 |
| الشكل.3.24 | تأثير سمك طبقة Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية NiO(p-type)-Si(n-type) | 89 |
| الشكل.3.25 | تأثيرتغيرات سمك طبقة Si (n-type) على الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si (n-type) | 90 |
| الشكل.3.26 | الخاصية $(J-V)$؛مقارنة بين SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si عند القيم المثالية للسمك لكل خلية | 91 |
| الشكل.3.27 | تأثير تغيرات تطعيم الأكسيد SnO(p-type) على الخاصية $(J-V)$ | 92 |

| | | |
|---|---|---|
| الشكل.3.28 | تأثير تغيرات تطعيم السيليكون Si(n-type) على الخاصية (J-V) للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) | 93 |
| الشكل.3.29 | تأثير تغيرات تطعيم الاكسيد $Cu_2O$ على الخاصية$(J-V)$ للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) | 94 |
| الشكل.3.30 | تأثير تغيرات تطعيم السيليكون Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) | 95 |
| الشكل.3.31 | تأثير تغيرات تطعيم الاكسيد NiO على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) | 97 |
| الشكل.3.32 | تأثير تغيرات تطعيم السيليكون Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) | 98 |
| الشكل.3.33 | الخاصية $(J-V)$ مقارنة بين SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si في الحالة النهائية | 99 |

## قائمة الجداول


| الجدول | العنوان | الصفحة |
|---|---|---|
| جدول2.1 | الخصائص الأساسية لأكسيد القصدير $SnO_2$ | 25 |
| جدول2.2 | الخصائص الإلكترونية لأكسيد القصدير $SnO_2$ | 28 |
| جدول2.3 | الخصائص البلورية لأكسيد النحاس CuO | 30 |
| جدول2.4 | الخصائص الإلكترونية لأكسيد النحاس CuO | 32 |
| جدول2.5 | الخصائص العامة لأكسيد النيكل NiO | 33 |
| جدول2.6 | الخصائص البلورية لأكسيد النيكل NiO | 34 |
| جدول2.7 | الخصائص الإلكترونية لأكسيد النيكل NiO | 36 |
| جدول2.8 | بعض الخصائص الكهروضوئية للخلية الشمسية الغير متجانسة CuO/Si الناتجة بالتبخر الحراري | 45 |
| جدول2.9 | بعض الخصائص الكهروضوئية للخلية الشمسية p-NiO/n-Si | 47 |
| جدول3.1 | المدخلات الفيزيائية المستخدمة في المحاكاة | 66 |
| جدول3.2 | مقارنة بين االوسائط الكهربائية للخلايا الشمسية SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si في الحالة الإبتدائية | 69 |
| جدول3.3 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود | 70 |
| جدول3.4 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود | 71 |
| جدول3.5 | الوسائط الكهربائية المحسوبة للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود | 72 |
| جدول3.6 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود | 73 |
| جدول3.7 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO (p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود | 75 |
| جدول3.8 | الوسائط الكهربائية المحسوبة للخلية الشمسية NiO (p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود | 76 |

| | | |
|---|---|---|
| جدول3.9 | مقارنة بين الوسائط الكهربائية للخلايا الشمسية SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si عند عمل الإنتزاع للأنود 5.8/ للكاثود 3.4 | 78 |
| جدول3.10 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة SnO | 79 |
| جدول3.11 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة Si | 81 |
| جدول3.12 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة $Cu_2O$ | 83 |
| جدول3.13 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة Si | 85 |
| جدول3.14 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقةNiO | 87 |
| جدول3.15 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة Si | 89 |
| جدول3.16 | مقارنة بين الوسائط الكهربائية للخلايا الشمسية SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si عند عند القيم المثالية للسمك لكل خلية | 91 |
| جدول3.17 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم الأكسيد SnO(p-type) | 92 |
| جدول3.18 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم السيليكون Si و التطعيم الخلفي | 94 |
| جدول3.19 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم الأكسيد $Cu_2O$ | 95 |
| جدول3.20 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم السيليكون Si (مع إعتبار التطعيم الخلفيB-D 5e18 $cm^{-3}$) | 96 |
| جدول3.21 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم الأكسيد NiO | 97 |
| جدول3.22 | الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم السيليكون Si | 98 |

| | | |
|---|---|---|
| جدول3.23 | مقارنة بين الوسائط الكهربائية للخلايا الشمسية SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si في الحالة النهائية | 100 |

**قائمة الرموز**

| الرمز | التسمية |
|---|---|
| SnO | أكسيد القصدير |
| $SnO_2$ | ثنائي أكسيد القصدير |
| CuO | أكسيد النحاس |
| $Cu_2O$ | أكسيد النحاس الأحادي |
| NiO | أكسيد النيكل |
| Si | السيليكون |
| $SiO_2$ | أكسيد Si طبقة ضد عاكسة شفافة |
| DC | التيار المستمر |
| PV | الخلايا الكهروضوئية |
| Bc | عصابة النقل |
| Bv | عصابة التكافئ |
| Gap | فجوة |
| TCO | أكاسيد ناقلة شفافة |
| M | الرمز الكيميائي لمعدن |
| O | الرمز الكيميائي للأكسيجين |
| $BaTiO_3$ | تيتانيات الباريوم |
| $Cdsb_2O_6$ | أكسيد كادنيوم الأنتيموان |
| $Cdln_2O$ | نوربورنات |
| $E_g$ | الفاصل الطاقي |
| $SnO_2$ | ثنائي أكسيد القصدير |
| $Sn^{+4}$ | أيون القصدير |
| $O^{-2}$ | أيون الاوكسيجين |
| $PbO_2$ | أكسيد الرصاص الرباعي |
| $TiO_2$ | ثنائي أكسيد التيتانيوم |
| $RuO_2$ | كلوريد الروثينيوم الثلاثي |
| $TaO_2$ | أكسيد التانتيليوم |

| | |
|---|---|
| الشعاع $\vec{K}$ | شعاع الموجة في منطقة بريلوان |
| $\rho$ | المقاومة الكهربائية |
| $\mu$ | الحركية |
| σ | الناقلية الكهربائية |
| $Cu^{+2}$ | أيون النحاس |
| $z$ | العدد الذري |
| DFT | نظرية الدالة الوظيفية للكثافة |
| $\varepsilon$ | السماحية النسبية |
| $m_e$ | كتلة ال$e$ في نطاق التوصيل |
| $m_t$ | كتلة الثقوب في نطاق التوصيل |
| $\mu_p$ | حركية الثقوب |
| $\mu_n$ | حركية الإلكترونات |
| Néél | درجة حرارة نيل (TN) |
| Entropie | الأنتروبي |
| CfC | بنية مكعبة ممركزة الأوجه |
| NaCl | كلوريد الصوديوم |
| $Ni^{+2}$ | أيون النيكل |
| $NiCO_3$ | كربونات النيكل الثنائي |
| $Ni(NO_3)_2$ | نترات النيكل |
| $Ni(OH)_2$ | هيدروكسيد النيكل الثنائي |
| $R$ | الشعاع الأيوني |
| 1S 2S 2P 3S 3P 3d 4S | الهياكل الإلكترونية |
| NSP | Nebulized spray pyrolysis |
| CVT | النقل الكيميائي بالبخار |
| $E_a$ | طاقة التنشيط |
| $\chi$ | التقارب الإلكتروني |
| $M$ | الكتلة المولية |

| | |
|---|---|
| $N$ | الكثافة الإلكترونية |
| $N_c$ | كثافة الحالات الفعالة (نطاق التوصيل) |
| $N_v$ | كثافة الحالات الفعالة (نطاق التكافئ) |
| $W$ | السمك |
| $Ph$ | الفوتونات |
| $e$ | الإلكترونات |
| $h$ | الثقوب |
| $(J-V)$ | الخاصية (جهد – تيار) |
| $J_{SC}$ | تيار الدارة القصيرة |
| $V_{OC}$ | جهد الدارة المفتوحة |
| $\eta$ | كفاءة التحويل |
| $FF$ | معامل التعبئة |
| $I_{Ph}$ | التيار الضوئي |
| $V$ | الجهد المولد في الخلية |
| $R_S$ | المقاومة التسلسلية للديود الثنائي |
| $R_{Sh}$ | المقاومة على التوازي للديود |
| T | درجة الحرارة المطلقة بالكلفن K |
| n | معامل الإنكسار |
| $K_B$ | ثابت بولتزمان |
| $q$ | شحنة الإلكترون |
| $I_0$ | تيار التشبع |
| $n$ | العامل المثالي للديود |
| $P$ | الإستطاعة |
| $P_{MPP}$ | الإستطاعة الأعظمية |
| $I_{MPP}$ | التيار الموافق لأعظم إستطاعة |
| $V_{MPP}$ | الجهد الموافق لأعظم إستطاعة |
| $P_i$ | الإستطاعة الواردة |

| | |
|---|---|
| $P_{max}$ | الإستطاعة الأعظمية |
| $I_m$ | التيار الأعظمي |
| $V_m$ | الجهد الأعظمي |
| SILVACO-ATLAS | برنامج المحاكاة |
| VWF | تصنيع الرقاقة الإفتراضية |

**قائمة المعادلات**


| المعادلة | العنوان | الصفحة |
|---|---|---|
| (2.1) | الخاصية المميزة تيار- جهد للخلية الشمسية | 41 |
| (2.2) | تيار الدارة القصيرة | 41 |
| (2.3) | جهد الدارة المفتوحة | 42 |
| (2.4) | الإستطاعة الأعظمية | 42 |
| (2.5) | معامل التعبئة $FF$ | 43 |
| (2.6) | المردود $\eta$ | 43 |
| (2.7) | المردود $\eta$ بعبارة توضيحية أكثر | 43 |

## فهرس المحتويات


**الشكر**.....i

**الإهداء**.....ii

**الملخص**.....iv

**Abstract**.....iv

**قائمة الأشكال**.....v

**قائمة الجداول** .....ix

**قائمة الرموز**.....xii

**قائمة المعادلات**.....xvi

**فهرس المحتويات**.....xvii

**المقدمة العامة**.....1

**المراجع**.....4

**الفصل 1 :عموميات حول الخلايا الشمسية**.....5

1.1. مقدمة.....6

2.1.الخلايا الشمسية .....6

1.2.1. تاريخ الخلايا الشمسية.....6

2.2.1. مفهوم الخلايا الشمسية.....7

3.1. الوصلة PN .....8

4.1. مبدأ عمل الخلايا الشمسية .....9

5.1.أنواع الخلايا الشمسية.....11

1.5.1.الخلايا الشمسية السليكونية المتبلورة.....11
2.5.1.الخلايا الشمسية من الشرائح الرقيقة (TFSC) Thin Film Solar Cell.....14
3.5.1.الخلايا الشمسية من السيليكون الغير متبلور.....14
4.5.1.الخلايا الشمسية من كادميوم التيليوريد.....15
5.5.1.الخلايا الشمسية السيليكونية المتبلورة الشريطية Biohybrid Solar Cell.....16
6.1.إيجابيات و سلبيات الخلايا الشمسية.....17
7.1.الخلاصة .....18
**المراجع**.....19
**الفصل 2 : نظرة عامة حول الأكاسيد الناقلة P للخلايا الشمسية**.....22
1.2.مقدمة.....23
2.2.الأكاسيد الناقلة الشفافة.....23
3.2.الخصائص البنيوية و الإلكترونية لأكسيد القصدير$SnO_2$.....23
1.3.2.أكسيد القصدير $SnO_2$ .....24
2.3.2.الخصائص البنيوية لأكسيد القصدير $SnO_2$.....26
3.3.2.الخصائص الإلكترونية لأكسيد القصدير $SnO_2$.....26
4.2.الخصائص البنيوية و الإلكترونية لأكسيد النحاس CuO.....28
1.4.2.أكسيد النحاسCuO.....28
2.4.2.الخصائص البنيوية لأكسيد النحاس CuO.....29
3.4.2.الخصائص الإلكترونية لأكسيد النحاس CuO.....30
5.2.الخصائص البنيوية و الإلكترونية لأكسيد النيكلNiO.....32
1.5.2.أكسيد النيكل NiO.....32
2.5.2.الخصائص البنيوية لأكسيد النيكل NiO.....34

3.5.2.الخصائص الإلكترونية لأكسيد النيكل NiO.....35
6.2.مبادئ عمل الخلايا الشمسية الغير المتجانسة "n-Si/أكسيد موصل- p"(الإمتصاص-التوليد الضوئي-النقل-التجميع).....37
7.2.الخصائص المميزة $J-V$(جهد- تيار) لبعض الخلايا الشمسية "n-Si/ أكسيد موصل–p" (SnO/Si; CuO/Si; NiO/Si).....39
1.7.2.الخاصية $J-V$ للخلية الشمسية.....39
2.7.2.الخاصية $J-V$ للخلية الشمسية ($p\text{-}SnO_2/n\text{-}Si$).....43
3.7.2.الخاصية $J-V$ للخلية الشمسية ( p-CuO/n-Si).....44
4.7.2.الخاصية $J-V$ للخلية الشمسية (p-NiO/n-Si).....47
8.2.الخلاصة.....48
**المراجع** .....49
**الفصل 3 : مقارنة بين الخلايا الشمسية $SnO/Si,Cu_2O/Si,NiO/Si$** .....58
1.3.مقدمة.....59
2.3. برنامج المحاكاة.....59
1.2.3.تعريفات.....59
2.2.3.المداخل و المخارج في SILVACO-ATLAS .....61
1.2.2.3 DeckBuilD.....61
2.2.2.3 Tonyplot.....61
3.2.3. بنية الإدخال في SILVACO-ATLAS.....62
4.2.3. مخطط البناء العام لـATLAS.....62
1.4.2.3 Mesh.....63
2.4.2.3 Régions (المناطق ).....64

Electrode.3.4.2.3 (القطب الكهر بائي).....64

Dopage.4.4.2.3 (التطعيم).....64

Matériel.5.4.2.3 (المواد).....64

Modèles physiques.6.4.2.3 (النماذج الفيزيائية).....65

Contacts .7.4.2.3(جهات الإتصال).....65

Interface.8.4.2.3 (الواجهة).....65

Lumière.9.4.2.3 (الضوء).....65

Méthode de la solution.10.4.2.3 (طريقة الحل).....65

Spécification de la solution.11.4.2.3 (تحديد وتخصيص الحل).....66

Extraction des données et traçage.12.4.2.3 (استخراج البيانات و تعقيبها).....66

3.3.مناقشة و تحليل النتائج.....66

1.3.3.وسائط المحاكاة.....66

2.3.3.مقارنة الخاصية $(J-V)$ بين الخلايا الثلاث $SnO/Si,Cu_2O/Si,NiO/Si$ في الحالة الإبتدائية.....67

3.3.3.دراسة تأثير عمل الإنتزاع الأنود/الكاثود..... 69

1.3.3.3.الخلية الشمسية(n-type)Si/(p-type)SnO ..... 70

2.3.3.3.الخلية الشمسية $Cu_2O$ (p-type)/S (n-type).....72

3.3.3.3.الخلية الشمسية(n-type).....74

4.3.3.3.مقارنة الخاصية $(J-V)$بين الخلايا الثلاث $SnO/Si,Cu_2O/Si,NiO/Si$ عند عمل الإنتزاع للأنود 5.8/للكاثود 3.4.....77

4.3.3.دراسة تأثير السمك.....78

1.4.3.3.تأثير سمك طبقة SnO.....78

2.4.3.3.تأثير سمك طبقة Si للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type).....80

3.4.3.3.تأثير سمك طبقة $Cu_2O$.....82

4.4.3.3.تأثير سمك Si للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type).....84

5.4.3.3.تأثير سمك طبقة NiO.....86

6.4.3.3.تأثير سمك طبقة Si للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type).....88

7.4.3.3.مقارنة الخاصية $(J-V)$ بين الخلايا الثلاث SnO/Si,$Cu_2O$/Si,NiO/Si عند القيم المثالية للسمك لكل خلية.....90

5.3.3.دراسة تأثير التطعيم SnO(p-type)/Si(n-type).....91

1.5.3.3.تأثير تطعيم الأكسيد SnO(p-type).....91

2.5.3.3.تأثير تطعيم السيليكون Si(n-type) للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) ..... 93

6.3.3.دراسة تأثير التطعيم $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type).....94

1.6.3.3.تأثير تطعيم الأكسيد $Cu_2O$ (p-type).....94

2.6.3.3.تأثير تطعيم السيليكون Si(n-type) للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type).....95

7.3.3.دراسة تأثير التطعيم NiO(p-type)/Si(n-type).....96

1.7.3.3.تأثير تطعيم الأكسيد NiO (p-type).....96

2.7.3.3.تاثير تطعيم السيليكون Si (n-type) للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) ..... 98

8.3.3.مقارنة الخاصية $(J-V)$ بين الخلايا الثلاث $SnO/Si,Cu_2O/Si,NiO/Si$ في الحالة النهائية.....99
4.3.الخلاصة..... 100
**المراجع**..... 102
**الخلاصة العامة**.....104

# المقدمة العامة

يبحث الإنسان دوما عن مصادر جديدة للطاقة لتغطية احتياجاته المتزايدة في تطبيقات الحياة المتطورة التي نعيش، و يعيب الكثير من مصادر الطاقة نضوبها و تكلفة استغلالها المرتفعة و التأثير السلبي لاستخدامها على البيئة،و قد تنبه الإنسان في العصر الحديث إلى إمكانية الإستفادة من حرارة أشعة الشمس و التي تتصف بأنها طاقة متجددة و دائمة لا تنضب. و أدرك جليا الخطر الكبير الذي يسببه استخدام مصادر الطاقة الأخرى و الشائعة (و خاصة النفط و الغاز الطبيعي) في تلوث البيئة و تدميرها، مما يجعل الطاقة الشمسية الخيار الأفضل على الإطلاق.

يعد الإشعاع الشمسي مصدر للطاقة المتجددة و النظيفة لأنه لا يسفر عن تشغيلها نفايات ملوثة و لا ضوضاء ولا إشعاعات .يمكن حصاده بأقل تأثير على البيئة [1].

غالبية الخلايا الشمسية الموجودة في السوق اليوم مصنوعة من نوع من السيليكون Si.حسب بعض التقديرات بنسبة تصل إلى 90% و مع ذلك يمكن ل Si أن يتخذ أشكالا مختلفة. تتميز الإختلافات بدرجة نقاء Si معظم الخلايا الشمسية القائمة على السيليكون في السوق حوالي 95% تتألف من Si البلوري .مما يجعل هذا النوع الأكثر شيوعا من الخلايا الشمسية [2].

في محاولة لتحويل الإشعاع الشمسي إلى كهرباء تم تطوير أجهزة تسمى الخلايا الكهروضوئية (PV).المواد التي تمتص الجسيمات التي يتكون منها الضوء أو الفوتونات ، هي أشباه الموصلات.يتم الحصول على الخلية الكهروضوئية عن طريق إحضار مادة أشباه الموصلات p-doped،حيث تكون الثقوب هي الحاملات الأغلبية،في إتصال مع مادة أشباه الموصلات n-doped ،حيث تكون الإلكترونات هي الحاملات الأغلبية ،و بالتالي تتشكل الوصلة pn.الإختلاف في التطعيم بين جانبي الوصلة pn يخلق مجالا كهربائيا في الواجهة،حيث تمتص الخلية الكهروضوئية فوتونات معينة من الطيف الشمسي لتوليد الأزواج ثقب/إلكترون و التي سيتم فصلها باستخدام الوصلة pn. يتم غلق الدارة عن طريق إدخال شحنة،و بالتالي توليد كهرباء.تسمى هذه الظاهرة :التأثير الكهروضوئي[3] .

نهتم في عملنا إلى دراسة الخلايا الشمسية الغير متجانسة p(oxide)/n(si) باستخدام برنامج المحاكاة العددية **SILVACO-ATLAS** .

الخلايا الشمسية المعتمدة في هذه الدراسة هي كالتالي :$SnO/Si,Cu_2O/Si,NiO/Si$ ،اخترنا الأكاسيد الناقلة الشفافة ($SnO-Cu_2O-NiO$) كمادة أشباه الموصلات (p-type) و ذلك بفضل تنوع خصائصها البلورية و الكهربائية و الفاصل الطاقوي الذي تتمتع به و الذي يسمح لها بالإمتصاص .

الهدف من هذه الدراسة :

- تحديد و دراسة تأثير العوامل المؤثرة على أداء الخلية الشمسية من خلال مفهوم المحاكاة الرقمية .
- دراسة الخلايا الشمسية (NiO/Si, $Cu_2O$/Si, SnO/Si) و الحصول على منحنيات الخصائص $(J-V)$ لكل منها في ظروف تشغيل مختلفة.
- تحقيق أفضل خلية ذات كفاءة عالية في استخدام الطاقة و سعر منخفض التكلفة .

للقيام بذلك ،ينقسم عملنا إلى ثلاث فصول على النحو التالي :

الفصل 01:مقدمة و مفاهيم عامة حول الخلايا الشمسية و أنواعها و مبدأ عملها.

الفصل02:نتطرق إلى ذكر الخصائص الإلكترونية و البلورية للأكاسيد المستخدمة في الدراسة ($SnO_2$/$Cu_2O$/NiO) ،أيضا شرح مبدأ عمل الخلايا الشمسية الغير متجانسة p/n و تقديم نتائج بعض الدراسات السابقة في محاكاة الخلايا الشمسية (NiO/Si, $Cu_2O$/Si, SnO/Si).

الفصل 03:نعرض فيه نبذة عن برنامج المحاكاة **SILVACO-ATLAS** ، أيضا عرض نتائج المحاكاة و التحسينات التي قمنا بدراستها على الخلايا الشمسية الثلاث :تأثير عمل الإنتزاع للانود /الكاثود ،تأثير سمك الأكسيد/ Si ،تأثير التطعيم (p-n) مع الأخذ بعين الإعتبار التطعيم الخلفي 5e18 $cm^{-3}$ و مناقشة هذه النتائج.

## المراجع

[1] J. Widmer, " Batch transport and energy levels in organic semiconductors dissertation", PHD Thesis ,Institute of applied photophysics ,Dresden uneversity of technology, 2013.

[2] http://www.altenergy.org/renewables/solar/common-types-of-solar-cells.html.

[3] K. Gitanjali, "Épitaxie par faisceaux chimiques d'alliages nitrures dilués à base d'aluminium pour des applications photovoltaïques", Thèse de Doctorat, Université de Sherbrooke (Québec) Canada, 2014.

# الفصل 1

# عموميات حول الخلايا الشمسية

## 1.1. مقدمة :

توفر الطاقة المتجددة المتمثلة في الطاقة الشمسية و طاقة الرياح و طاقة الأمواج و غيرها حلولا جديدة لإحتياجات الطاقة المتزايدة،و تعتبر الطاقة الشمسية من أفضل الطاقات المستخدمة و أكثرها شيوعا حيث تتضمن تقنية الخلايا الفولطوضوئية والتي تقوم بتوليد الطاقة الكهربائية بشكل مباشر من الإشعاع الشمسي و تحويلها إلى تيار مستمر DC 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].

في هذا الفصل ، سوف نقدم بعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بالخلايا الشمسية و مبدأ عملها ، كما سنتطرق إلى ذكر بعض أنواعها و في الختام سنتناول بعض إيجابيات و سلبيات الخلايا الشمسية .

## 2.1.الخلايا الشمسية :

### 1.2.1. تاريخ الخلايا الشمسية:

صناعة الكهروضوئية (PV) مثل أي صناعة أخرى،ونموها يعتمد على الطلب والحالة المالية للمنطقة. فمثلا نمو متوسط الصناعة الكهروضوئية بنسبة 54.7 % سنويا من 2004 إلى 2008 في جميع أنحاء العالم بسبب الطلب القوي على كل ما هو غير تقليدي، ومع ذلك نموها إنخفض إلى 15.9 % في عام 2009 بسبب إنخفاض الطلبات نتيجة للأزمة المالية العالمية. ألمانيا هي واحدة من الدول البارزة لإعتماد الطاقة الشمسية. نتيجة لذلك ، لوحظ نمو قوي في صناعة الكهروضوئية في ألمانيا وإيطاليا في عام 2010 (تأسيس 1.27 GW10 G W a n d) في ألمانيا وإيطاليا على التوالي [2].

منذ ذلك الحين ، بدأت صناعة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في إظهار نمو أقوى. معدل نمو سوق الخلايا الشمسية في جميع أنحاء العالم وصل إلى 18 % سنويا حتى عام 2015 [3].لكن من جهة أخرى ، فقد إختفى عدد من شركات الخلايا الشمسية و غيرها على وشك الإفلاس لأن الشركات الصينية تحتل أكثر من 50 % من الإنتاج في جميع أنحاء العالم من خلايا شمسية منخفضة التكلفة و وحدات (غالبًا مع خلايا منخفضة مدة الحياة)، وقد ابتليت سوق الخلايا الشمسية بأدنى متوسط الأسعار العادية منذ عام 2012. وقد تسبب في هذا الشركات التي تفتقر إلى القدرة التنافسية في الجودة والتكلفة

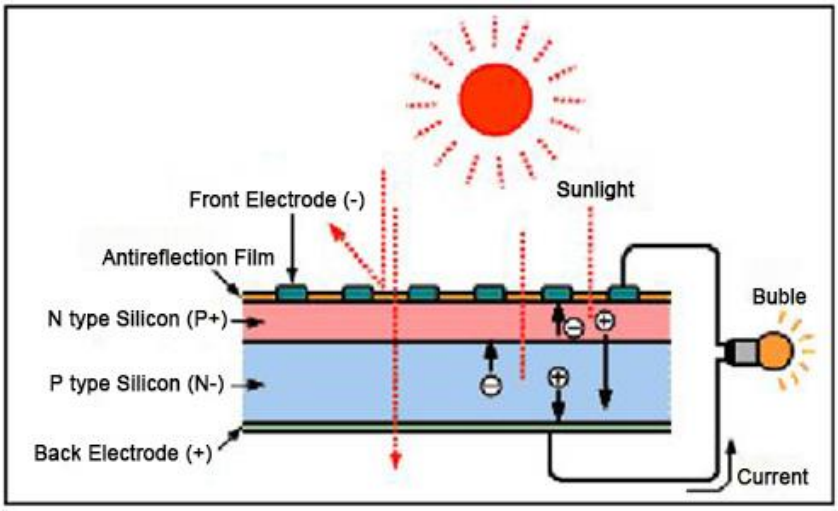
لإعادة هيكلتها. في المدى الطويل ، فإن الطلب على أوروبا سوف تتوسع الخلايا الشمسية لتشمل "دول المجموعة الثماني " مثل أمريكا والصين ، وسوف تستمر صناعة الخلايا الشمسية لتنمو. الركود الحالي في صناعة الخلايا الشمسية لا يعني أن الحاجة العالمية للطاقة الشمسية لديها إنخفضت[4].

بعض التواريخ المهمة في تاريخ الخلايا الكهروضوئية:

- ✓ 1839 : إكتشف الفيزيائي الفرنسي إدموند بيكريل عملية إستخدام أشعة الشمس لتوليد التيار الكهربائي في مادة صلبة: هذا هو تأثير الكهروضوئية.
- ✓ 1875 : معارض WERNER VON SIEMENS أمام أكاديمية العلوم برلين مقال عن التأثير الكهروضوئي في أشباه الموصلات.
- ✓ 1954 :قام ثلاثة باحثون أمريكيون بتطوير خلية ضوئية بكفاءة عالية لأن صناعة الفضاء تبحث عن حلول لتزويد الأقمار الصناعية بالطاقة.
- ✓ 1958 : تم تطوير الخلية الأولى ذات المردود % 9 ،و إرسال الأقمار الصناعية التي تعمل بالطاقة من الخلايا الشمسية إلى الفضاء.
- ✓ 1973 : أول منزل مدعوم من الخلايا الكهروضوئية.
- ✓ 1985 : أول سيارة تعمل بالطاقة الكهروضوئية في أستراليا [5].

### 2.2.1. مفهوم الخلايا الشمسية :

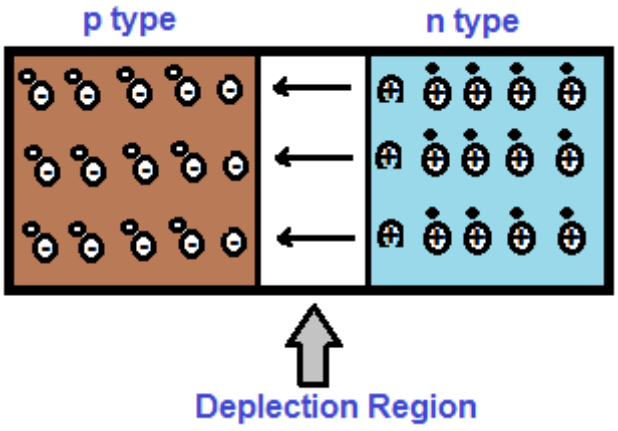
إن الخلايا الشمسية و التي تسمى أيضا بالخلايا الكهروضوئية (أكثر تحديدا الفولطية الضوئية) عبارة عن صمام ثنائي ضوئي محسن لإنتاج التيار الإلكتروني إستجابة للإشعاع الضوئي بإستخدام التأثير الكهروضوئي[6] .الضوء الساطع على الخلايا الشمسية ينتج كلا من التيار والجهد لتوليد الطاقة الكهربائية هذه العملية تتطلب أولا ، المواد التي إمتصاص الضوء فيها يرفع الإلكترون إلى حالة طاقية أعلى ، وثانيا حركة الإلكترون ذو الطاقة الأعلى تكون من الخلية الشمسية إلى الدارة الخارجية، ثم يبدد الإلكترون طاقته في الدارة الخارجية ويعود إلى الخلية الشمسية[7]. يجب أن تكون الوصلة التي يدخل الضوء من خلالها رقيقة بما فيه الكفاية لتمرير معظم الضوء إلى منطقة النضوب حيث يتم تحويل الضوء إلى الثنائية "إلكترون / ثقب" [8] أو ما يعرف بعملية توليد الحاملات الحرة.




**الشكل.1.1:**مخطط مبسط لمبدأ عمل خلية شمسية.

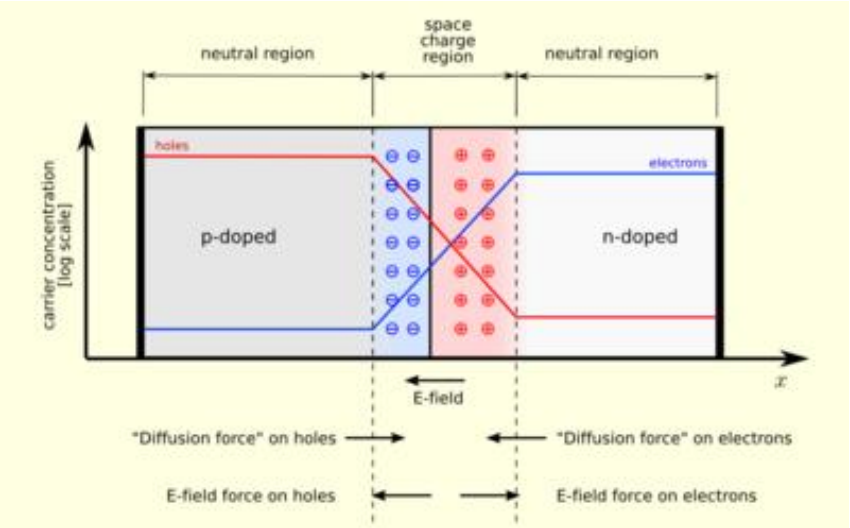
### 3.1. الوصلة PN:

تعتبر الوصلة PN أساس معظم الأجهزة الالكترونية ، كما أن لها أهمية كبيرة سواء في التطبيقات الإلكترونية الحديثة أو في فهم أجهزة أشباه الموصلات الأخرى. تم إنشاء خصائص الوصلاتP -N بواسطة Shockley [9][10]. تتكون الوصلة الثنائية P-N من بلورتين متلاصقتين من أشباه الموصلات أحدهما من نوع N-type الغني بالإلكترونات الحرة لوجود تطعيم خماسي ،و الجزء الثاني من النوع P-type الغني بالفجوات لوجود تطعيم ثلاثي. عند توصيل الجزئين مع بعض عند منطقة التلامس تنتقل شحنات سالبة من N-type وتلتحم مع الثقوب الموجودة في الجزء P-type[11].




**الشكل.1.2:**الوصلة PN[11].

عند تشكيل ثنائي الوصلة P-N يكون تركيز كل من الإلكترونات والفجوات (الثقوب) على جانبي الوصلة كما في **الشكل.3.1**، ونتيجة لهذا الإختلاف في التركيز على جانبي الوصلة فإن الشحنات سوف تنتشر من الوسط الأكثر تركيزا إلى الوسط الأقل تركيزا. حيث تنتشر الإلكترونات من المنطقة N إلى المنطقة P كما تنتشر الفجوات (الثقوب) من المنطقة P إلى المنطقة N.




**الشكل.1.3:** الوصلة PN عند الإستقرار.

ونتيجة لعملية الانتشار والالتحام هذه نجد أن المنطقة القريبة من الوصلة أصبحت لا تحتوي على الإلكترونات و الفجوات الحرة، كما أن الشحنة في هذه المنطقة أصبحت غير متعادلة لأن الإلكترون الذي يعبر إلى المنطقة P يترك ذرته على شكل أيون موجب، كما أن الفجوة التي تعبر من المنطقة P إلى المنطقة N تبقى ذرتها على شكل أيون سالب .و هكذا تتكون شحنة الفراغ (space-charge) على جانبي الوصلة ويطلق على هذه المنطقة التي تكونت فيها الشحنة الفراغية منطقة النضوب depletion region [11].

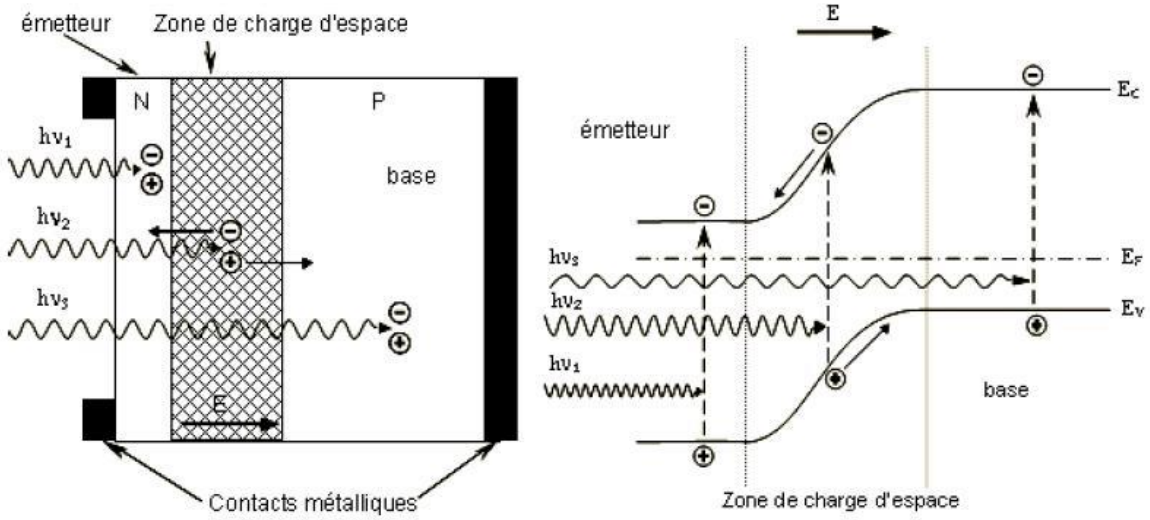
### 4.1. مبدأ عمل الخلايا الشمسية:

الخلية الشمسية هي مركبة إلكترونية تحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية ويرتكز هذا التحويل على ثلاث مراحل هي :

- إمتصاص الفوتون (في حالة ما إذا كانت طاقة الفوتون الوارد أكبر من طاقة النطاق الممنوع Band gap).

- تحويل طاقة الفوتون إلى طاقة كهربائية بإنشاء الثنائية (إلكترونات/ثقوب) في أشباه الموصلات.
- تجميع الإلكترونات المتحررة في الخلية في الجهة N و الثقوب في الجهة P ، ومن ثم إلتحام الإلكترونات مع الثقوب مولدة التيار الذي يسري عبر الدارة الخارجية[12].

تتشكل المواد المكونة للخلايا الشمسية من مستويين طاقيين،كما هو موضح في **الشكل.4.1** ، إختراق الضوء لسطح الخلية يحدث إنتقال الإلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل ،عندما يتحرك الإلكترون من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل يترك ثقبا في موضعه[13].




**الشكل.1.4:**يمينا مخطط الحزم ،يسارا بنية الخلية الشمسية[13].

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 تتأثربالحقل الكهربائي.
- في منطقة الشحنة الفراغية الأزواج (ثقب /إلكترون) المولدة بالفوتونات ،تتفرق تحت تأثير الحقل الكهربائي فتتجه الإلكترونات نحو المنطقة N بينما تتجه الثقوب إلى المنطقة P [12].

### 5.1.أنواع الخلايا الشمسية:

الخلايا الشمسية هي اللبنات الأساسية للوحدات الضوئية و المعروفة بإسم الألواح الشمسية. تتميز بخصائص كهربائية مثل التيار و الجهد التي تتأثر بالإضاءة .مصدر الضوء هنا يختلف ما بين أشعة الشمس أو الضوء الاصطناعي .

عادة ما يتم تسمية الخلايا الشمسية بإسم أشباه الموصلات المصنوعة منها. يجب أن يكون لهذه المواد خصائص معينة من أجل إمتصاص أشعة الشمس،بعض الخلايا هي مصممة للتعامل مع أشعة الشمس التي تصل إلى سطح الأرض ، بينما يتم تحسين الآخرى للإستخدام في الفضاء. الخلايا الشمسية يمكن أن تكون مصنوعة من طبقة واحدة فقط من المواد الماصة للضوء ( الوصلة المفردة) أو استخدام تكوينات فعلية متعددة (الوصلات المتعددة) للإستفادة من إمتصاص مختلف و آليات فصل الشحن أفضل.

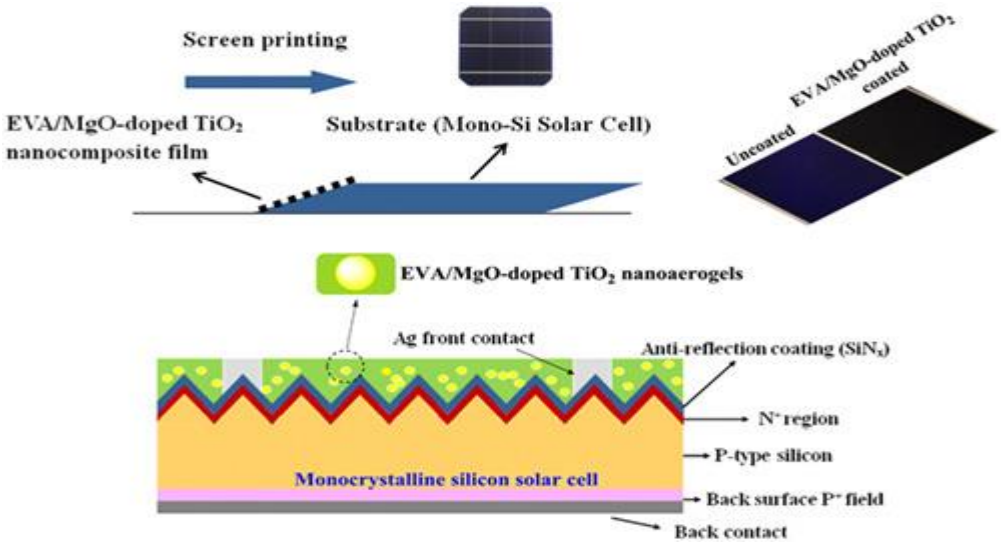
تصنف الخلايا الشمسية حسب الأجيال (تطورها) إلى خلايا الجيل الأول والثاني والثالث. الأول خاص بالخلايا القائمة على رقاقة مصنوعة من Si البلوري ،خلايا الجيل الثاني هي خلايا شمسية رقيقة الطبقات ، تشمل Si الغير متبلور ، CdTe والخلايا CIGS. الجيل الثالث من الخلايا الشمسية يتضمن عددًا من تقنيات الطبقات الرقيقة الحديثة معظمهم ليس له حتى الآن تطبيقات تجارية وما زالت قيد البحث أو مرحلة التطوير. من بين أنصاف النواقل الحديثة نذكر "أنصاف النواقل العضوية" وكذلك أخرى غير العضوية وكذلك الهجينة التي تدمج كلا النوعين. هناك الكثير من البحوث المستثمرة في هذه التقنيات لأنها تهدف إلى إنتاج خلايا شمسية منخفضة التكلفة وذات كفاءة مقبولة (ليس بالضرورة أن تكون عالية لكن بالمقابل أن تكون مستقرة)[14].

#### 1.5.1.الخلايا الشمسية السليكونية المتبلورة :

غالبية الوحدات الشمسية الموجودة في السوق اليوم مصنوعة من السيليكون Si ، حسب بعض التقديرات بنسبة تصل لـ % 90. ومع ذلك ، يمكن للسيليكون أن يتخذ أشكالًا مختلفة. تتميز الإختلافات بدرجة نقاء السيليكون. النقاء بهذا المعنى هو الطريقة التي يتم بها تصنيع و تنقية السيليكون الخام. كلما زاد نقاء قطع Si ، زادت كفاءة الخلايا الشمسية في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء. غالبية الخلايا الشمسية القائمة على السيليكون في السوق – حوالي % 95 - تتألف من السيليكون البلوري ، مما يجعل هذا النوع الأكثر شيوعا من الخلايا الشمسية[20].هناك نوعان من هذه الخلايا :

✓ **الخلايا الشمسية السيليكونية أحادية البلور :**

يطلق عليها ب Monocrystalline silicon أو "single-crystal silicon"او "mono c-Si"[17]،تم تصنيع أول خلية شمسية متوفرة تجاريا من السليكون أحادي البلورة و هو على شكل سيليكون نقي للغاية لتحضير هذه الأخيرة يتم سحب بلورة من Si المنصهر مما يخلق سبيكة أسطوانية [16].حيث تكون الشبكة البلورية للمادة الصلبة بأكملها مستمرة [15]. ثم يتم نشر هذه البلورة ميكانيكيا في شرائح رقيقة مصقولة ومطعمة لإنشاء الوصلة PN المطلوبة، بعد إضافة طبقة مضادة للإنعكاس وإتصال (ملامسات) المعادن الأمامية و الخلفية يتم فالنهاية توصيل الخلية و تعبئتها جنبا إلى جنب مع العديد من الخلايا الأخرى في لوحة شمسية كاملة [16]. تجعل درجة نقاء السيليكون العالية من هذا النوع من الألواح الشمسية واحدا من أعلى معدلات الكفاءة حيث تتجاوز الأحدث منها 20% ،كما يتميز هذا النوع من الخلايا بعزل عالي و تحتل مساحة أقل و تدوم أطول مما يجعلها أغلى من نظيراتها الكريستالية. و من المزايا الأخرى التي يجب أخذها بعين الإعتبار إنها تميل إلى أن تكون أقل تاثرا بـ درجات الحرارة المرتفعة مقارنة بمتعدد البلورات [17].

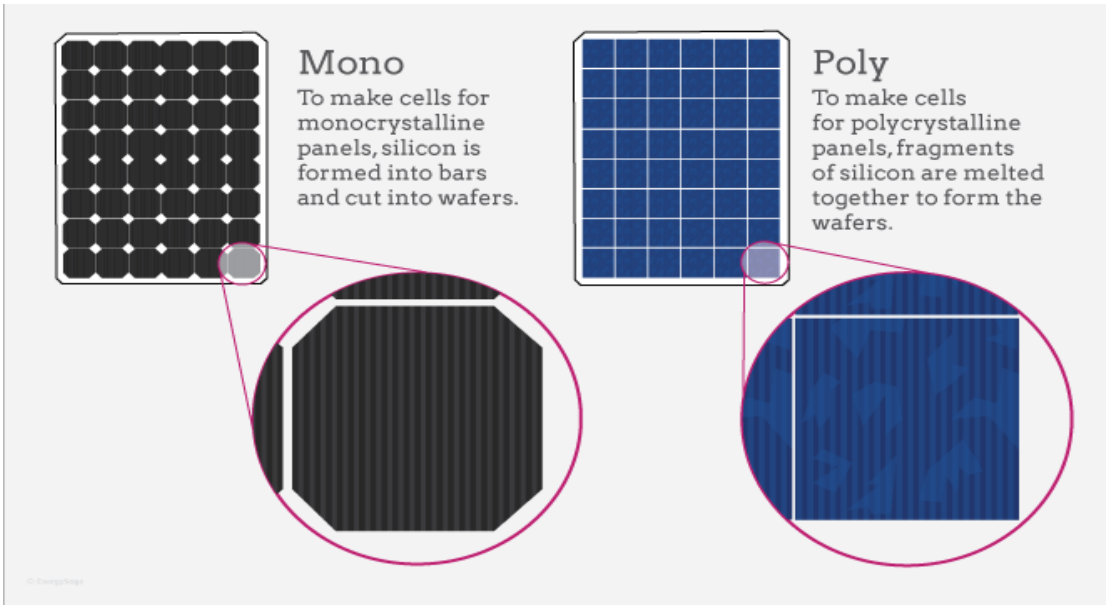



**الشكل.1.5:**بنية خلية شمسية أحادية التبلور.

✓ **الخلايا الشمسية السيليكونية متعددة البلورات :**

بدلا من التركيب البلوري الموحد تحتوي الخلايا المتعددة البلورات على العديد من الحبيبات الصغيرة من البلورات [16].يمكن تمييز هذا النوع بسرعة لأن الخلايا تكون مربعة الشكل و لا يتم قطع زواياه له مظهر أزرق،و هي مصنوعة من ذوبان السيليكون الخام [17] من خلال عملية تنقية كيميائية تدعى " siemens" تتضمن هذه العملية تقطير مركبات السيليكون و تحللها الى Si في درجات حرارة عالية .

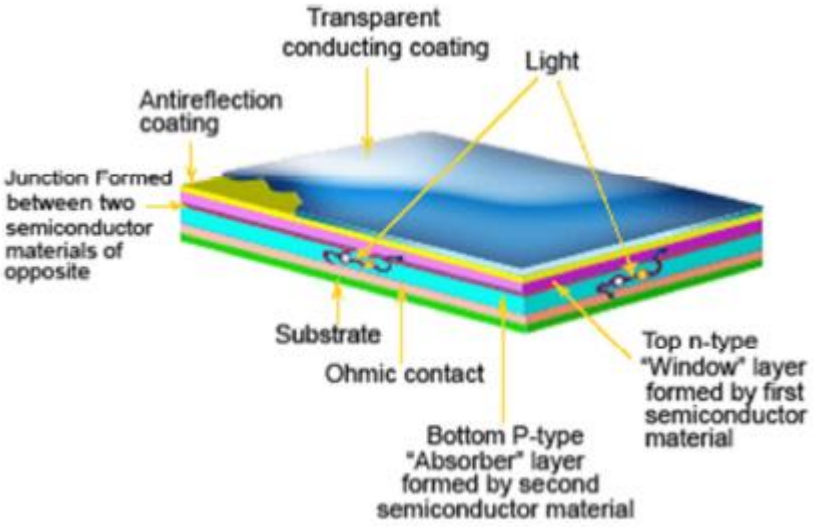
تنتج صناعة الطاقة الضوئية أيضا السيليكون المعدني المطور (UMG-Si) باستخدام عمليات التنقية المعدنية بدلا من عمليات التنقية الكيميائية .عند إنتاجه لصناعة الإلكترونيات يحتوي متعدد السيليكون على مستويات شوائب أقل من جزء واحد من (PPB) " perbillon"، في حين أن السيليكون متعدد البلورات من الدرجة الشمسية (SoG-Si) يكون أقل نقاء بشكل عام [18]. هناك بديل أرخص ولكن أقل كفاءة من خلايا السيليكون الكهروضوئية متعددة البلورات التي تهيمن على السوق العالمية ، والتي تمثل حوالي% 70 من الإنتاج الكهروضوئي العالمي والتي تم تسويقها في عام 2015[16].




**الشكل.1.6:**بنية خلية شمسية متعددة البلورات.

### 2.5.1.الخلايا الشمسية من الشرائح الرقيقة Thin Film Solar Cell (TFSC):

تصنع الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة تجاريا بالعديد من التقنيات و المواد بما في ذلك (CdTe) و (CIGS) و الـSi غير متبلور و غيرها . يتم تصنيعها عن طريق إيداع طبقة رقيقة أو أكثر من المواد الكهروضوئية مثل Si أو النحاس أو cadmium على المسند مثل الزجاج أو البلاستيك أو المعدن[19]. ما يميز هذه الألواح الشمسية سهولة الإنتاج و التكلفة الأقل [17].




**الشكل.1.7:**بنية الخلايا الشمسية الرقيقة.

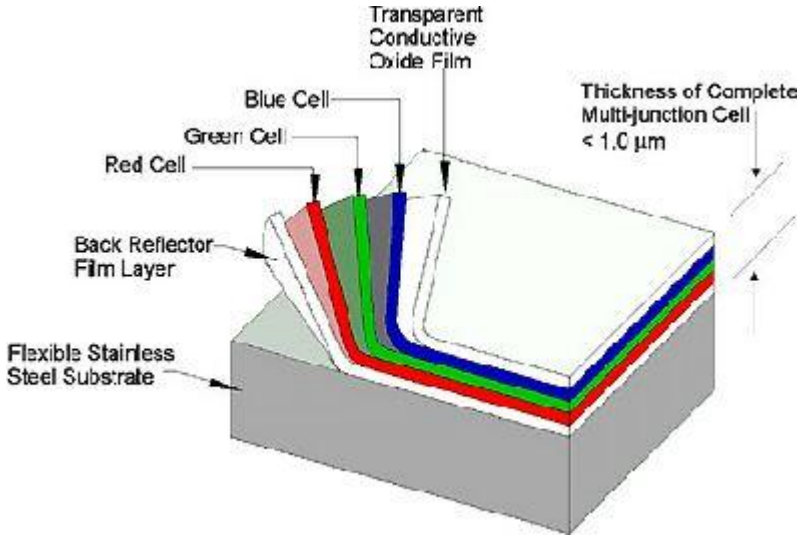
### 3.5.1.الخلايا الشمسية من السيليكون الغير متبلور:

بداية أستخدمت الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة المصنوعة من السيليكون الغير متبلور في التطبيقات الأصغر حجما .بما في ذلك أشياء مثل الآلات الحاسبة و غيرها .....[20].

تتشكل ألواح السيليكون الغير متبلور عن طريق ترسيب غازي لطبقة رقيقة من مادة السيليكون يبلغ سمكها حوالي 1 ميكرومتر "micro mètre" على مسند أو ركيزة مثل الزجاج أو المعدن. يمكن أيضا ترسيب Si الغير متبلور في درجات حرارة منخفضة جدا تصل حوالي 75° درجة مئوية مما يسمح بالترسيب على البلاستيك أيضا . الشبكة البلورية هنا في أبسط أشكالها تحتوي على تسلسل واحد من طبقات p-i-n ،و مع ذلك فإن خلايا الطبقة المفردة تعاني من تدهور في ناتجها من الطاقة (في حدود 15-35%) عندما تتعرض لأشعة الشمس و تسمى آلية التدهور "تأثير stæbler-wronski" .

من بين تقنيات تطوير الخلايا الشمسية بإستخدام السيليكون الغير متبلور هي الطبقات المتعددة الوصلات التي تستخدم نظام ثلاثي (أو ثنائي) الطبقات محسن لإلتقاط أكبر عدد من الفوتونات من الطيف الشمسي كما نلاحظ من الرسم التوضيحي. سمك الخلية الشمسية في هذه الحال يشكل حوالي 1/300 من حجم الخلية الشمسية السليكونية أحادية التبلور.

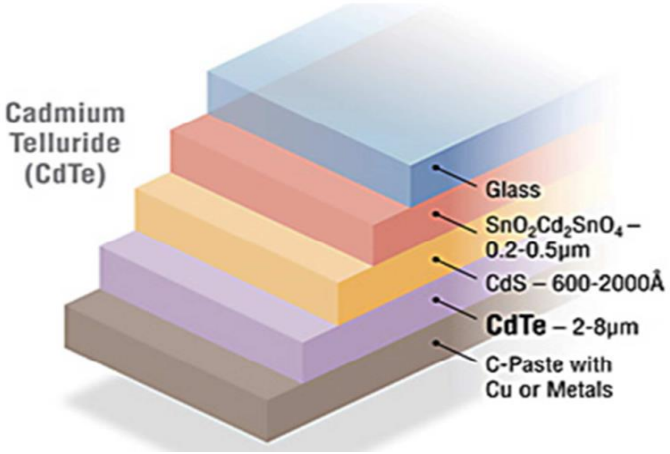
في حين يحقق السيليكون البلوري مردود تحويل بنسبة 18% تقريبا .يصل مردود الخلايا الشمسية الغير متبلورة عند 7% تقريبا. و يعود معدل الكفاءة المنخفض جزئيا إلى تأثير stæbler-wronski الذي يظهر في الساعات الأولى عندما تتعرض الألواح لضوء الشمس و ينتج عن ذلك إنخفاض في إنتاج الطاقة من لوحة Si الغير متبلور من 10% إلى حوالي 7% . الميزة الرئيسية للخلايا الشمسية الغير متبلورة هي تكاليف تصنيعها المنخفضة ، مما يجعل هذه الخلايا تنافسية للغاية[21][22].




**الشكل.1.8:**خلية شمسية من السيليكون الغير متبلور[21][22].

### 4.5.1.الخلايا الشمسية من كادميوم التيليوريد :

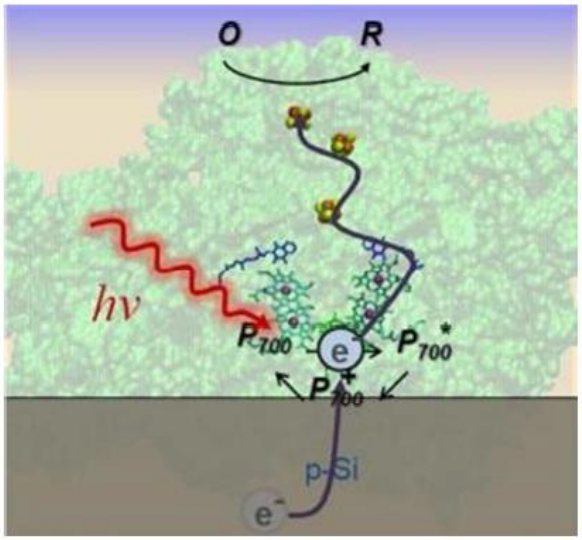
وهي عبارة عن طبقة رقيقة من أشباه الموصلات مصممة لإمتصاص وتحويل ضوء الشمس إلى كهرباء[23].تعتبر تقنية بتكاليف أقل من الخلايا الشمسية التقليدية المصنوعة من السيلكون البلوري في أنظمة متعددة الكيلووات[24][25][26]، في حين تعتبر سمية الكاديوم قلق بيئي يتم تخفيفه عن طريق إعادة تدوير وحدات CdTe في نهاية فترة حياتها [27].




**الشكل.1.9:** رسم بياني يوضح الطبقات الخمس التي تتكون منها الخلايا الشمسية CdTe.

### 5.5.1.الخلايا الشمسية السيليكونية المتبلورة الشريطية Biohybrid Solar Cell:

الخلية الشمسية الهجينة العضوية هي أحد أنواع الألواح الشمسية، التي لا تزال في مرحلة البحث. وقد اكتشفه فريق من الخبراء في جامعة فاندربيلت. والفكرة الكامنة وراء التكنولوجيا الجديدة هي الإستفادة من البناء (التركيب) الضوئي 1 [17]، (وهو مجمع بروتين نشط ضوئي يقع في غشاء ثايلاكويد) لإعادة إنشاء العملية الطبيعية لعملية البناء الضوئي للحصول على كفاءة أكبر في تحويل الطاقة الشمسية. هذه الخلايا الشمسية الهجينة العضوية هي نوع جديد من الطاقة المتجددة تعمل على محاكاة العملية الطبيعية لعملية البناء الضوئي[21][22].




**الشكل.1.10:**خلايا شمسية شريطية متعددة الطبقات.

مختلف أنواع الخلايا الشمسية التي إستعرضناها حسب الأجيال قد تكون من وصلات متجانسة أي أن المنطقتين N و P تكونان من نفس المادة و قد تكون غير متجانسة أي أن مادة النوع N تختلف عن النوع P .

### 6.1.إيجابيات و سلبيات الخلايا الشمسية :

إن استعمال الخلايا الشمسية له العديد من اللمسات الإيجابية منها:

- ✓ ليس لها ضوضاء عند العمل .
- ✓ تدوم لفترات طويلة حيث تبقى فعاليتها لمدة عشرين إلى ثلاثين سنة.
- ✓ توفير عامل الأمان البيئي حيث أن الطاقة الشمسية هي طاقة نظيفة لا تلوث الجو وتترك فضلات مما يكسبها وضعاً خاصا في هذا المجال وخاصة في القرن القادم.

و مثل العديد من مصادر الطاقة المتجددة فإنها تواجه معوقات منها :

- ✓ لا يمكنها إنتاج طاقة في الليل (إلا بإضافة بطاريات لتخزين الطاقة المتوفرة نهارا مع الحرص على تنظيفها).
- ✓ التكلفة الأولية لشراء ألواح الخلايا الشمسية مرتفعة إلى حد ما،و هذا يشمل دفع ثمن الألواح الشمسية و العاكس و البطاريات و الأسلاك و التركيب.
- ✓ يجب استخدام الطاقة الشمسية على الفور وإلا فيمكن تخزينها في بطاريات كبيرة، ويمكن شحن هذه البطاريات المستخدمة في أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة خلال النهار حتى يتم استخدام الطاقة في الليل، وهذا حل جيد لاستخدام الطاقة الشمسية طوال اليوم ولكنه ما يعيبه أنه مكلف نوعا ما.
- ✓ على الرغم من أنه لا يزال من الممكن جمع الطاقة الشمسية خلال الأيام الملبدة بالغيوم والممطرة إلا إن كفاءة النظام الشمسي تحت ظروف المناخ المشابهة تقل، فالألواح الشمسية تعتمد على أشعة الشمس لجمع الطاقة الشمسية بشكل فعال، لذلك يمكن أن يكون هناك تأثير ملحوظ على نظام الخلايا الشمسية في الأيام التي لا تسطع فيها الشمس.
- ✓ تصبح بمرور الوقت أقل كفاءة[11] .

### 7.1.الخلاصة :

في هذا الفصل،قدمنا دراسة عامة نظرية مبسطة عن الخلايا الشمسية.تعتبر هذه الأخيرة مصدر الطاقة المتجددة الأكثر جاذبية،وذلك بفضل الخصائص الفريدة و المثيرة للإهتمام البحثي كمحفز،مجانية،وفيرة و متوزعة على نطاق واسع ،تدوم لفترات طويلة،تتميز بإنتاج الكهرباء دون ان تؤدي لتلوث البيئة .و قد كان الغرض من استخدامها في الأساس كمصدر بديل للطاقة التقليدية.

يعتمد مبدأ عملها على سطوع الضوء على بلور، و ينتج كهرباء بهذه البساطة .تتواجد الخلايا الشمسية في عدة أنواع :خلايا شمسية سيليكونية (أحادي/متعدد البلورات)،خلايا شمسية سيليكونية متبلورة شريطية ،خلايا شمسية لا متبلورة شرائح رقيقة، CdTe، CIS شرائح رقيقة.و مع التقدم الكبير الذي أحدثته تكنولوجيا الخلايا الشمسية و الطاقة المتجددة و تنوع تطبيقاتها ،بالتالي فهي مادة مفتاحية للتقدم التكنولوجي جنبا مع جنب لباقي تقنيات إنتاج الطاقات النظيفة المتجددة.

**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] Global Market Outlook for Photovoltaics until 2015, European Photovoltaic Industry Association (2010).

[4] Global: Clean Energy: Solar Equity Research, Goldman Sachs Research estimates (2011).

[5] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, Modelling polycrystalline semiconductor solar cells, Thin Solid. Films, 361 (2000) 527-532.

[6] S.R Wenham, M.A Green, M .E Watt Corkish: APPLIED PHOTOVOLTAICS Second Edition page 04, (2007).

[7] http://www.chemistryexplained.com/Ru-Sp/Solar-Cells.html.

[8] Henry Mathieu Hervé Fanet,"Physique des semiconducteurs et des composants éléctroniques",6ème editionDunod, (2009).

[9] W. Shockley, "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors," Bell Syst. Tech.J., 28,435 (1949).

[10] W. Shockley, Electrons and Holes in Semiconductors, D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey,( 1950).

[11] ميموني, إيمان, & باباحني أم الخير. مساهمة في دراسة الطبقات الرقيقة للخلايا الشمسية a-Si: H و a-Siالمرسبة بتقنية PECVD ، أطروحة دكتوراه، 2016، جامعة قاصدي مرباح ورقلة.

[12] K.AMARA ; "Contribution à l'etude de concption d'une central photovoltique de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution

électrique moyenne tension ";Mémoire de magister ;Université mouloud mammeride de Tizi-ouzou (2014-2015).

[13] S.Oussidhoum ; "Etude comparative de performance de cellules solaire à jonction simple et multiple ";Mémoire de magister ;Université mouloud mammeri de Tizi-ouzou (2015).

[14] http://www.solarstik.com/stikopedia/stiktm-u.

[15] W.Heywang, K.H.Zaininger, Silicon: the semiconductor material, in Silicon: evolution and future of a technology, P.Siffert, E.F.Krimmel eds., Springer Verlag, (2004).

[16] Stephen Peake. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, 4th ed. Oxford, UK: Oxford University Press, (2018).

[17] Askari Mohammad Bagher, Mirzaei Mahmoud Abadi Vahid, Mirhabibi Mohsen. Types of Solar Cells and Application. American Journal of Optics and Photonics. Vol. 3, No. 5, 2015, pp. 94-113. doi: 10.11648/j.ajop.20150305.17.

[18] Krebs et. al., Solar Energy Materials and Solar Cells 2009

10.1016/j.solmat.2008.10.004.

[19] "Photovoltaics Report". Fraunhofer ISE. 28 July 2014. Archived from the original (PDF) on 31 August 2014.Retrieved 31 August 2014.

[20] http://www.altenergy.org/renewables/solar/common-types-of-solar-cells.html.

[21] Ciesielskia, Peter N; Frederick M. Hijazib, Amanda M. Scott,Christopher J. Faulkner, Lisa Beard, Kevin Emmett, Sandra J. Rosenthal, David Cliffel, G. Kane Jennings (May 2010)."photosystem I-

Based biohybrid phtoelectrochemical cells".Biosource Technology 101 (9): 3047–3053.doi:10.1016/j.biortech.2009.12.045. Retrieved 24 October 2013.

[22] Yehezkeli, Omer; Ran Tel-Vered, Julian Wasserman, Alexander Trifonov, Dorit Michaeli, Rachel Nechushtai, Itamar Willner (13 March 2012). "Integrated photosytem IIBased photoelectrochemical cells". Nature communication. doi:10.1038/ncomms1741.

[23] V. Fthenakis and H. C. Kim. (2010). "Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation". Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 2039–2048. doi:10.1016/j.rser.2010.03.008.

[24] "Publications, Presentations, and News Database: Cadmium Telluride". National Renewable Energy Laboratory.

[25] K. Zweibel, J. Mason, V. Fthenakis, "A Solar Grand Plan", Scientific American, Jan 2008. CdTe PV is the cheapest example of PV technologies and prices are about 16¢/kWh with US Southwest sunlight.

[26] Further mention of cost competitiveness: "Solar Power Lightens Up with Thin-Film Technology", Scientific American, April 2008.

[27] Fthenakis, Vasilis M. (2004). "Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production" (PDF). Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (4): 303–334. doi:10.1016/j.rser.2003.12.001. Archived from the original on 23 September 2014.

# الفصل 2

# نظرة عامة حول الأكاسيد الشفافة الناقلة نوع P للخلايا الشمسية

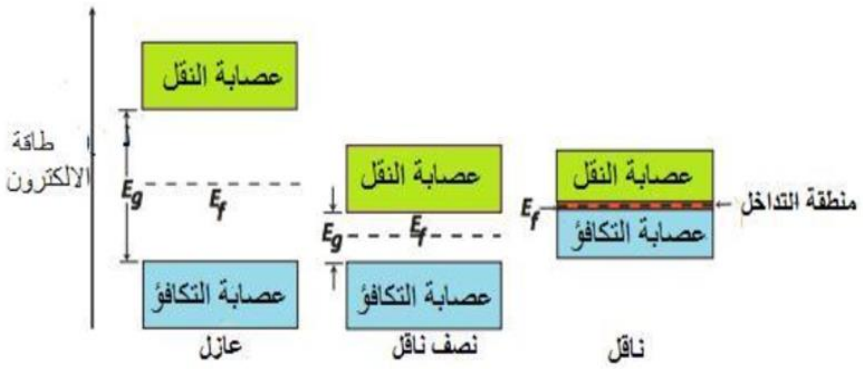
### 1.2.مقدمة:

الخلية الشمسية الغير متجانسة التي اعتمدنا عليها في دراستنا هي "p-أكسيد موصل/n-Si" ؛إخترنا النوع p أكسيد بسبب تنوع خصائص الأكاسيد الناقلة الشفافة و تعددها مما جعل منها مواد مثيرة للإهتمام و أساس البحث و التطبيقات التكنولوجية على حد سواء. فقد سرعت عدة مجالات البحث بخواصها البنيوية و الضوئية و كذلك الكهربائية [1].و كذلك قليلة هي الدراسات التي تعنى بالخلايا الشمسية التي تعتمد على الأكاسيد من نوع P ومنها أكاسيد حديثة نوعا .

و على هذا الأساس في هذا الفصل، سنخص بالذكر بعض أنواع هذه الأكاسيد التي ستكون محل دراستنا في الفصل القادم. و هي أكسيد القصدير $SnO_2$؛أكسيد النحاس CuO؛و أكسيد النيكل NiO؛ للحديث عن أهم خصائصها الإلكترونية و البلورية ؛ بالإضافة إلى أننا سنتطرق إلى طرح مبدأ عمل الخلية الشمسية الغير متجانسة، في الختام نستعرض بعض نتائج الدراسات السابقة فيما يخص الخاصية $(J-V)$ للخلايا الشمسية التالية (SnO/Si; CuO/Si; NiO/Si).

### 2.2. الأكاسيد الناقلة الشفافة:

انطلاقا من نظرية عصابات الطاقة هناك ثلاثة حالات إلكترونية ممكنة وذلك حسب نقلها للتيار الكهربائي وهي :نواقل،عوازل و أشباه الموصلات . في النواقل يكون هناك تداخل بين عصابة النقل (BC) و عصابة التكافؤ (BV) ؛الذي يسمح بالحركة الحرة للإلكترونات في حين أن لأشباه النواقل عصابة ممنوعة تفصل (BV) عن (BC) تسمى فجوة (gap). ويرمز لها ب $E_g$ حيث لايمكن للإلكترونات أن تأخذ قيمها ؛أما في حالة وجود فجوة أكبر من $eV$ 5 يكون عازل لأنه حتى في درجة حرارة الغرفة تكون عصابة النقل فارغة [2] ،كما هو موضح في **الشكل .2.1.**




**الشكل.2.1.**مخطط توضيحي لحزم الطاقة عند $0K$ لكل من ناقل ؛عازل ؛ شبه ناقل[3].

إن الأكاسيد الناقلة الشفافة والتي يطلق عليها (TCO) عبارة عن أكاسيد معادن متكونة من ذرات معدن وذرات أوكسجين ويرمز لها بالرمز $M_xO_y$، حيث M تمثل الرمز الكيميائي للمعدن و O الرمز الكيميائي للأكسجين. و x و y هما أعداد طبيعية. تكون أكاسيد معادن بسيطة والتي تحتوي على معدن واحد مثل ($SnO_2$ ,NiO, CuO) وأخرى مركبة تحوي أكثر من معدن ( $BaTiO_3$؛ $Cdsb_2O_6$؛ $[CdIn_2O$ [4].

تمتلك الأكاسيد الناقلة الشفافة فائضا من الإلكترونات ،هذا الفائض في الإلكترونات يكون نتيجة عيوب بنيوية سببها فراغات الأوكسجين (Oxygène Vacances) الناتجة عن عدم التكافؤ الجزيئي (Non-stoichiomet)؛ خلل ستوكيومتري للأكسيد أو التطعيم بمواد مناسبة [2]. إن TCO تمتلك فاصل طاقي عريض ما يجعلها من أشباه النواقل المنحطة ، وهو ما يعني أن مستوي فارمي يكون قريب من عصابة النقل (BC) أو حتى داخلها في حال ما كانت نسبة التطعيم للأكاسيد الناقلة الشفافة (TCO) عالية ، وهذا يشير إلى أن عصابة النقل تكون مملوءة بالإلكترونات في درجة حرارة الغرفة. مما يجعل TCO ناقلة إضافة إلى أنها تمتلك فاصل طاقي عريض $E_g > 3.1eV$ مما يمنعها من إمتصاص فوتونات تمتلك طاقة أقل من الفاصل الطاقي ويجعلها شفافة للضوء المرئي [5].

يساهم التطعيم بالمواد المختلفة في خلق ثغرات وشوائب، مما يزيد في إعداد الإلكترونات الحرة وبالتالي ترتفع الناقلية لتصبح هذه المواد عبارة عن فلزات ضعيفة [6].

### 3.2.الخصائص البنيوية و الإلكترونية لأكسيد القصدير $SnO_2$ :

#### 1.3.2.أكسيد القصدير $SnO_2$ :

أكسيد القصدير أو( ثنائي أكسيد القصدير أو ثاني أكسيد القصدير) هو مركب كيميائي له الصيغة $SnO_2$ ويكون على شكل مسحوق أبيض إلى رمادي اللون .عبارة عن أحد أنواع الأكاسيد الناقلة الشفافة من نوع n، يتواجد هذا الأكسيد في الطبيعة على شكل حجر قصدير معدني ؛كما أنه يتصف بعدم قابليته للذوبان في الماء [7] .كما يتمتع بصلابة ميكانيكية ومقاومة درجات الحرارة العالية ،ويعتبر أكسيد القصدير وهو في حالته الحجمية عازل ،ولكنه يصبح شبه ناقل عندما يترسب على شكل غشاء رقيق .يحدث هذا التغيير من العازل إلى الشبه ناقل نتيجة الإنحراف عن التكافؤ عند تحضير الأكسيد [8].

**الشكل.2.2:**أكسيد القصدير $SnO_2$.

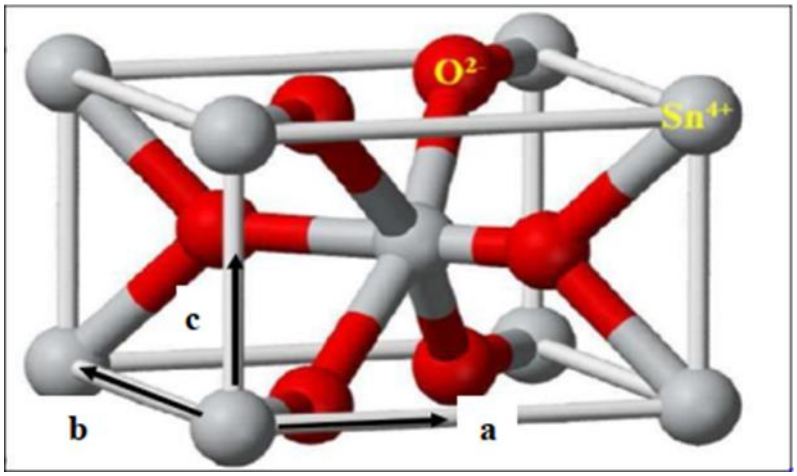
الجدول التالي يلخص بعض الخصائص لأكسيد القصدير $SnO_2$ :

**جدول2.1:** الخصائص الأساسية لأكسيد القصدير $SnO_2$ .

| الإسم المعدني | حجر القصدير |
|---|---|
| الصيغة الكيميائية | $SnO_2$ |
| البنية البلورية | رباعي الزوايا |
| الزمرة الفضائية | P42/mnm |
| ثوابت الشبكة البلورية | a=b=4.738 Å /c=3.187 Å |
| الكتلة المولية $M$ | 150.69 $g/mol$ |
| المظهر | صلب بلوري |
| اللون | أبيض أو رمادي |
| نقطة الإنصهار | 1500-1630ºC |
| نقطة الغليان | 1800-1900ºC |
| الفاصل الطاقي | $E_g$=3.6 $eV$ |
| الكثافة | 6.90 $g/cm^{-3}$ |

### 2.3.2.الخصائص البنيوية لأكسيد القصدير $SnO_2$:

في الضغط الجوي العادي يملك أكسيد القصدير طور واحد مستقر يسمى عندها حجر القصدير وهو يملك بنية مفصلية (Rutile) ،رباعية الزوايا ذات الزمرة الفضائية P42/mnm.وتحتوي الخلية الواحدة على ستة ذرات (ذرتي القصدير وأربع ذرات أكسجين)؛ كل أيون قصدير ($Sn^{+4}$) يكون في مركز المجسم الثماني المنتظم والذي تشكله ستة أيونات أكسجين $O^{-2}$ ، في حين تحيط بكل $O^{-2}$ ثلاثة $Sn^{+4}$ تقع على رؤوس مثلث متساوي الساقين. وتعطي قيم نصف القطر الأيوني للكاتيوم $Sn^{+4}$ و الأنيون $O^{-2}$ على التوالي 0.071 nm و0.14 nm [6]. توجد مجموعة أخرى من الأكاسيد المعدنية التي تمتلك نفس هذه البنية مثل $RuO_2$ / $TaO_2$/ $PbO_2$ / $TiO_2$.يظهر **الشكل.2.3** الخلية الأساسية لأكسيد القصدير ($SnO_2$)، حيث تشكل ذرات القصدير (Sn) سداسي ويمثل الأكسجين الجوار الاقرب [9].



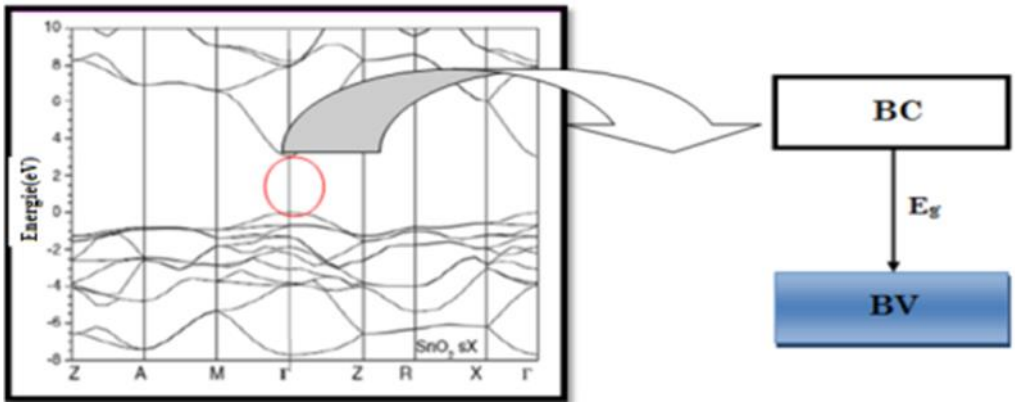

**الشكل.2.3:** الخلية الاساسية لأكسيد القصدير $SnO_2$ [9].

### 3.3.2.الخصائص الإلكترونية لأكسيد القصدير $SnO_2$:

أكسيد القصدير(SnO2) في شكله الصافي هو مادة نصف ناقلة أحادية البلورة ، وله فاصل طاقي يتراوح مابين $E_g$=3.6→4.2 $eV$. ففي درجة حرارة الغرفة وفي حالته الذاتية عبارة على مادة عازلة وله بنية متكافئة ،يمكن الحصول على ناقل جيد عندما يتم ترسيب SnO2 بشكل طبقة رقيقة عند درجة الحرارة 480 $C^o$ وبالتالي تصبح لديه بنية (غير متكافئة). وأيضا يمكن تطعيمه لكي نحصل على خصائص كهربائية جيدة ومن أهم ذرات التطعيم نذكر منها الفلور؛ الانتموان؛ الزنك ؛الانديوم ؛

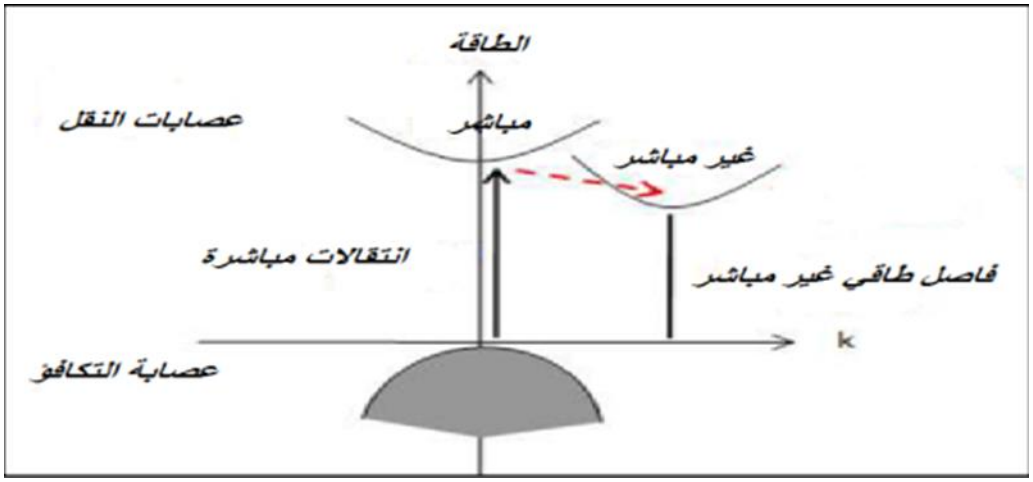
الليثيوم ؛النحاس ؛الحديد....الخ [6]. يعمل التطعيم على الزيادة في عدد حاملات الشحنة ( الإلكترونات) وبالتالي زيادة في الناقلية الكهربائية.

إن لأغشية القصدير فاصل طاقي مباشر يتراوح بين $E_g$ =3.6→ 4.2 $eV$ هذا الإختلاف ناتج عن الطريقة المستخدمة في الترسيب ويرتبط بوضعية القيم القصوى لعصابة التكافؤ و القيم الدنيا لعصابة النقل التي تكون على نفس محور الشعاع $(\vec{K})$ الذي يمثل شعاع الموجة في منطقة بريلوان [9]؛ و**الشكل.2.4** يوضح الفاصل الطاقي لأكسيد القصدير $SnO_2$.




**الشكل.2.4 :** الفاصل الطاقي لأكسيد القصدير $SnO_2$ [9].

نعرف الفاصل الطاقي المباشر أو الغير مباشر ( يعرف أيضا بالعصابة الممنوعة) كما يلي: في حال ما إذا كانت كل من عصابة النقل والتكافؤ توافقان نفس الإتجاه $(\vec{K})$ فإن إنتقال الإلكترونات يكون عمودي ويعرف عندها بالفاصل الطاقوي المباشر،أما إذا كانت القيم الدنيا لعصابة النقل تنزاح بحيث تختلف عن القيم القصوى لعصابة التكافؤ يكون عندها الإنتقال غير مباشر . إذا يمكن القول أن أكسيد القصدير يمتلك فاصل طاقي مباشر [6].




**الشكل.2.5:** رسم تخطيطي يوضح الإنتقالات المباشرة وغير مباشرة في اشباه النواقل[5].

أهم الخصائص الإلكترونية لأكسيد القصدير $SnO_2$ ممثلة في الجدول التالي :

**جدول2.2:**الخصائص الإلكترونية لأكسيد القصدير $SnO_2$ .

| | |
|---|---|
| عرض النطاق الممنو $E_g(eV)$ | 3.6 $eV$ |
| تركيز حاملات الشحنة $cm^{-3}$ | $10^{19}$-$10^{21}$ $cm^{-3}$ [10] |
| المقاومة الكهربائية $\rho(\Omega.cm)$ | $10^{-3}\Omega.cm$ [10][11] |
| الحركية $\mu(cm^2/V.s)$ | 10.5-35 $cm^2/V.s$ [12] |

### 4.2.الخصائص البنيوية و الإلكترونية لأكسيد النحاس CuO :

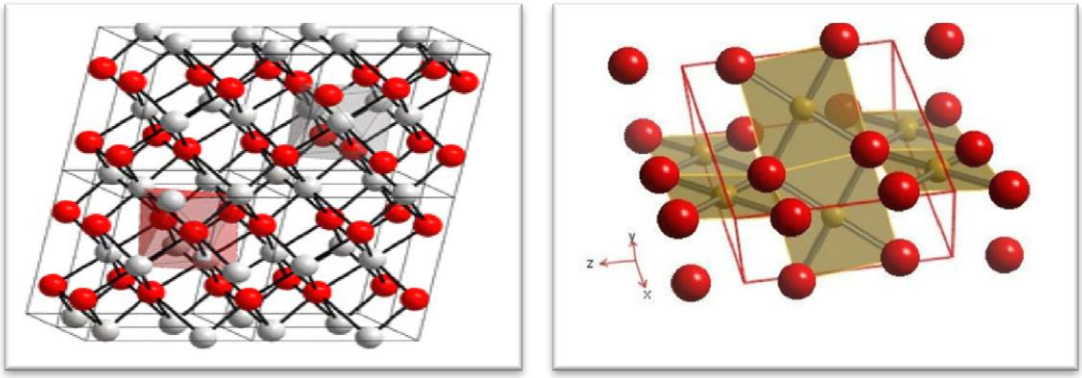
#### 1.4.2.أكسيد النحاسCuO :

أكسيد النحاس هو مركب كيميائي يكون على شكل مسحوق أسود ، نصف ناقل من نوع P ذو نطاق طاقي $(E_g=1.2\rightarrow1.85eV)$ [13]. يعد من المواد شبه الموصلة المهمة و ذلك لكونه أحد مركبات النحاس الكيميائية لا يذوب في الماء أو القواعد. يتميز بتركيبه البلوري أحادي الميل [14]، عديم الرائحة نظرا لامتلاكه فجوة طاقية كبيرة نسبيا و معامل إمتصاص عال في المنطقة المرئية لذلك يستخدم في التطبيقات الشمسية لا سيما الخلايا الضوئية التي تتطلب إمتصاصية جيدة في المجال المرئي [15].

**الشكل.2.6:** أكسيد النحاس CuO.

### 2.4.2.الخصائص البنيوية لأكسيد النحاس CuO:

يختلف أكسيد النحاس CuO عن أحادي أكسيد المعادن الإنتقالية 3d من خلال بنية أحادية الميل، و هو مادة صلبة أيونية سوداء لها درجة حرارة إنصهار و تبخر 1064 ºC و 1100 ºC على التوالي [16][17].يحتوي CuO على بنية بلورية أحادية الميلان [13]، في المستوي (011) كل أيون $Cu^{+2}$ محاط بأربعة ايونات $O^{-2}$.تكون ذرات النحاس في وسط مستطيل من الأوكسجين بينما تكون ذرات الأوكسجين في مركز رباعي السطوح النحاسي [18] .



**الشكل.2.7:**تخطيط لبنية CuO.

هناك خاصية مهمة لـ CuO هي أنها قادرة على إمتصاص نسبيا عدد كبير من ذرات الأوكسجين في الحجم و في السطح مما يجعلها نصف ناقل من نوع P [19].

أهم الخصائص البنيوية في **الجدول 2.3** [20][21][22].

**جدول 2.3:**الخصائص البلورية لأكسيد النحاس CuO.

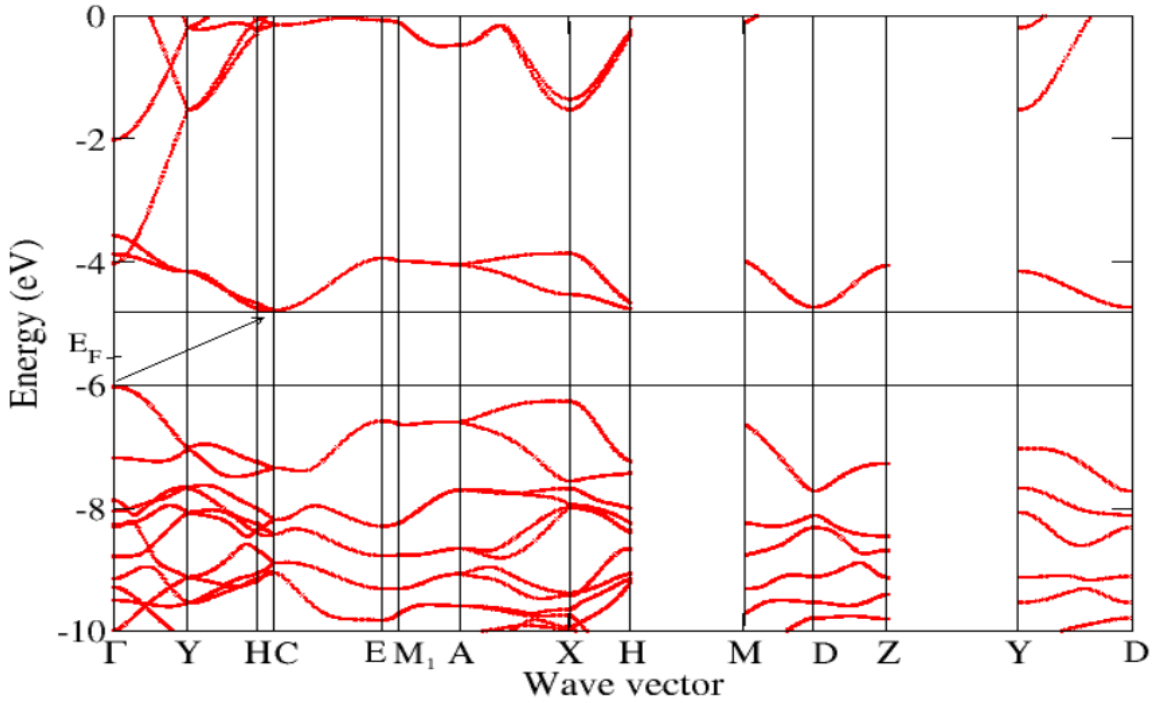
| البنية | احادية الميل /الميلان |
|---|---|
| ثابت الشبكة عند درجة حرارة الغرفة | a = 4,69Å<br>b=3.42Å<br>c = 5,13 Å<br>α = γ = 90°<br>β = 99,57° |
| مجموعة الفضاء | C2/c |
| العدد الذري $z$ | 4 |
| الحجم ($Å^3$) | 81.22 |
| الحجم المولي $(cm^3.mol^-)$ | 12.21 |
| الكتلة الحجمية $(g.cm^{-1})$ | 6.505 |
| طول الرابطة(Å)Cu-O | 1.96 |
| الفاصلة (Å) O-O | 2.62 |
| الفاصلة (Å) Cu-Cu | 2.90 |

### 3.4.2.الخصائص الإلكترونية لأكسيد النحاس CuO:

حظي CuO بإهتمام كبير في الفترة الأخيرة بسبب تعدد تطبيقاته في هذا المجال من الإلكترونيات الضوئية و الخلايا الضوئية....إلخ [23]،يعتبر الـ CuO نصف ناقل من النوع P نظرا لوجود مستويات آخذة تعود إلى الفجوات في النحاس[20][24][25].يتم تحضيره بعدة طرق من بينها الأكسدة الحرارية و الرش CVT(النقل الكيميائي بالبخار)،و الترسيب الكيميائي ...إلخ[26] [27].

يتم قياس النفاذية للفيلم CuO بواسطة طيف Uv-Vis، ووجد أن قيمة النطاق الطاقي بالتقريب $E_g$=1.74$eV$ وهو غير مباشر[28-35] و مناسب لإمتصاص قسط لا بأس به من أشعة الشمس [36] .

كما يمكن أن يختلف $E_g$ وفقا لطريقة التحضير[20][24][25] . الشكل التالي يوضح بنية النطاق الإلكتروني و كثافة الحالات لـ CuO المحسوبة بواسطة DFT(logiciel siesta) [37].




**الشكل.2.8:** بنية النطاق الإلكتروني و كثافة الحالات ل CuO المحسوبة بواسطة DFT ( logiciel siesta)[37] .

أكسيد النحاس CuO يظهر عموما موصلية منخفضة "faible conductivité".لوحظ ظهور تباينات كبيرة في قيم المقاومة ، تتراوح قيم هذه الأخيرة ما بين $\rho$=1 →107$(\Omega.cm)$ [38].كما أن له العديد من المزايا في الإنتاج الكهروضوئي : منخفض التكلفة ،غير سمي و ذو إمتصاص بصري عالي [39][40] ، له نقطة إنصهار عالية (1330°C) [26][41]، قيمة معامل الإنكسار تتراوح مابين n=1.90→3 وفقا لطريقة الإيداع[37].

بعض الخصائص الإلكترونية لـ CuO موضحة في الجدول التالي:

**جدول2.4:**الخصائص الإلكترونية لأكسيد النحاس CuO . [18][19]

| | |
|---|---|
| الكثافة | 6.4 $g/cm^3$ |
| الكتلة الجزيئية"المولية" | 79.55 $g/mol$ |
| نقطة الإنصهار | 1134°C |
| السماحية النسبية $\varepsilon$ | 12 |
| كتلة الإلكترون في نطاق التوصيل | (0.46-0.16)$m_e$ |
| كتلة الثقوب في نطاق التكافئ | (0.54-0.37) $m_e$ |
| عرض النطاق الممنوع $E_g$ في درجة حرارة الغرفة | 2.1$eV$ |
| حركية الثقوب | 0.1-10$cm^2/V.s$ |
| الكتلة الفعالة للثقوب | 0.24$m_0$ |
| الإنتشار الحراري | 0.015 $cm^2.s^{-1}$ |
| الناقلية الحرارية | 17 $W.K^{-1}$ |
| السعة الحرارية | 460±10 $J.kg^{-1}.k^{-1}$ |

## 5.2.الخصائص البنيوية و الإلكترونية لأكسيد النيكلNiO :

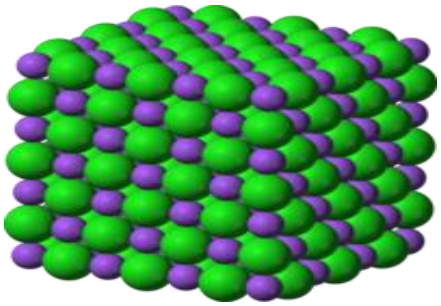
### 1.5.2.أكسيد النيكل NiO :

هو مركب كيميائي له الصيغة NiO يكون على شكل بلورات خضراء. و هو مادة انتقالية و مضادة للحرارة المغناطيسية [42] ، درجة حرارة نيل " Néel" هي 523 K و هي درجة الحرارة التي تميز المواد المضادة للحرارة المغناطيسية. تحت درجة الحرارة هذه ذرات الشبكة الفرعية ممغنطة بشكل تلقائي في الشبكة المغناطيسية و درجة الحرارة استغرقت قليلا 2000K.

درجة حرارة نييل أو نقطة نييل في المغناطيسية (بالإنجليزية Néel temperature ):هي درجة الحرارة التي فوقها تتحول مادة مغناطيسية حديدية مضادة إلى حالة مغناطيسية مسايرة. أي أن عند درجة الحرارة العالية تصبح الطاقة الحرارية في العينة شديدة بحيث تفكك الترتيب المغناطيسي للحبيبات فيها . وتسمي تلك الدرجة درجة حرارة نييل ويرمز لها بالرمز TN .

وتسمى نقطة نييل نسبة إلى مكتشفها الفيزيائي الفرنسي لويس نييل (1904 - 2000) ، والذي حاز على جائزة نوبل للفيزياء عام 1970 تقديرا لإنجازاته في الفيزياء وبصفة خاصة المغناطيسية.

أكسيد النيكل يقدم ترتيبا مضاد مغناطيسي مرتبطا بخصائص تناظر البلورة "بنية مكعبة متمركزة الجسم"، وجه مكعب مركزي[43] ، استقرار كيميائي و ترموديناميكي مقاوم جدا للأكسدة [44].



**الشكل.2.9:**أكسيد النيكل NiO.

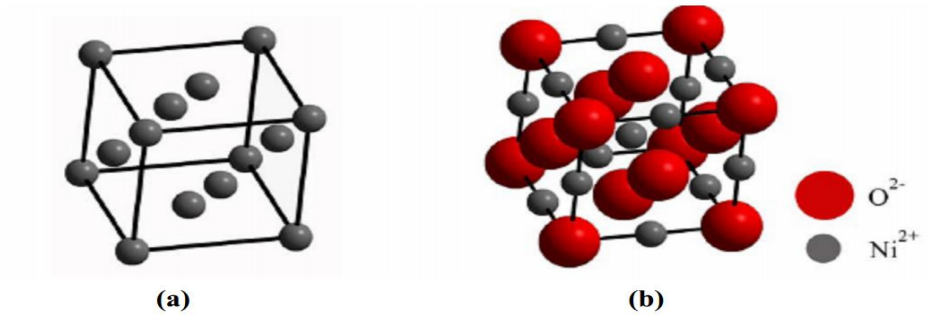
الجدول التالي يوضح بعض الخصائص العامة لأكسيد النيكل NiO :

**جدول2.5:** الخصائص العامة لأكسيد النيكل NiO.

| | |
|---|---|
| متوسط العدد الذري | 18 [45] |
| متوسط الكتلة الذرية $(g)$ | 27.35 [45] |
| الكتلة المولية $M(g/mol)$ | 74.69 [46] |
| نقطة الغليان (C°) | >2000 [46] |
| الذوبان في الماء $mg/L$ | 1.1 عند 20 C° [46]، غير قابل للذوبان [47] |
| نقطة الإنصهار (C°) | 1990 |
| انطالبي التشكل عند 298 K | -240 $KJ/mole$ للذرات |
| Entropie $S^0$ $(JK^{-1}.mole^{-1})$ | 38.00 |

### 2.5.2.الخصائص البنيوية لأكسيد النيكل NiO :

البنية البلورية لـ NiO تظهر في **الشكل.2.10** .هذا المركب يتبلور في بنية مكعبة ممركزة الأوجه cfc من النوع NaCl [48]، ثوابته البلورية هي a=4.117Å [49]،ذو كثافة حجمية $g/cm^3$ 6.72 [50] .هذه البنية المكعبة تتكون من شبكتين فرعيتين متشابهتين A و B بحيث كل الذرات في الشبكة A لديها جوارات فقط ينتمون للشبكة الفرعية B و العكس صحيح [51].الأيونات $Ni^{+2}$ و$O^{-2}$ تحتل مواقع ثمانية، يتم الحصول عليها عن طريق الانحلال الحراري لمركبات النيكل ثنائي التكافئ على سبيل المثال: $NiCO_3$ أو $Ni(NO_3)_2$، $Ni(OH)_2$؛[52][53].




**الشكل.2.10:**البنية البلورية (a) للنيكل،(b) لأكسيد النيكل NiO.

المستوي (100) هو مستوي مختلط و مركب من 50% من النيكل و 50% من الأكسجين، المستويات (111) تكون بالتناوب، Niالنقي، O النقي .الوجه (111) هو وجه قطبي "غير مستقر" على عكس الوجه (100) هو وجه غير قطبي "مستقر" [51][54].و بما أن الايونات $Ni^{+2}$ و $O^{-2}$ تتناوب على طول الإتجاه [111] فإن المغنطة مرتبطة بالمستوي (111) .

الأشعة الأيونية : $R(O^{-2})$=1.40Å ،$R(Ni^{+2})$=0.72 Å [51].

بعض الخصائص البلورية لأكسيد النيكلNiO موضحة فالجدول التالي:

**جدول 2.6:**الخصائص البلورية لأكسيد النيكل NiO.

| | |
|---|---|
| الثوابت البلورية (Å) | a=4.117Å [49] |
| العدد الذري | 4 |
| الكثافة الحجمية$g/cm^3$ | 6.72، 6.67[46] [45] |

### 3.5.2.الخصائص الإلكترونية لأكسيد النيكل NiO :

يجذب NiO الغير متكافىء اهتماما متزايدا بسبب خصائصه من النوع P، طبقة موصلة شفافة [55][56][57]. وهو مادة واعدة و ناشئة تظهر إمكانيات عالية [59][58] نظرا لاستقراره الكيميائي الممتاز [60].

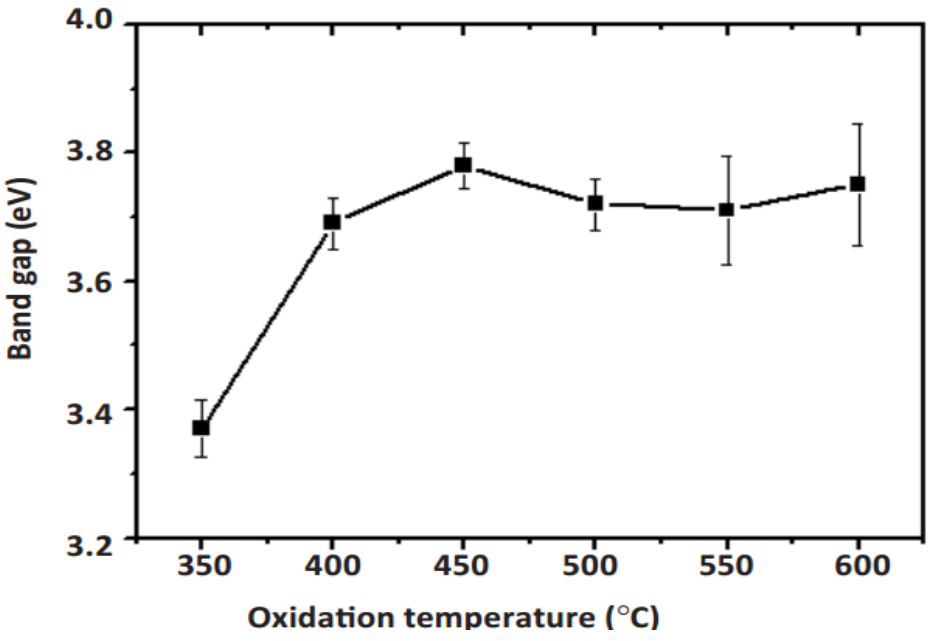
الهياكل الإلكترونية للأوكسجين و النيكل التي تشكل أشباه الموصلات هي : [61]

$O: 1S^2\ 2S^2\ 2P^4$

$Ni: 1S^2\ 2S^2\ 2P^6\ 3S^2\ 3P^6\ 3d^8\ 4S^2$

NiO هو نصف ناقل من النوع P ،مادة مضادة للمغناطيسية [62]. تم تصنيع أغشية أكسيد النيكل الرقيقة من خلال العديد من تقنيات الترسيب الفيزيائية و الكيميائية مثل التبخر التفاعلي [63] و الانحلال الحراري للرش [64] ،ترسبات البخار الكيميائية المحسنة بالبلازما [65] ،تبخر الحزمة الالكترونية [66] ،تقنية "nebulized spray pyrolysis"NSP [67].

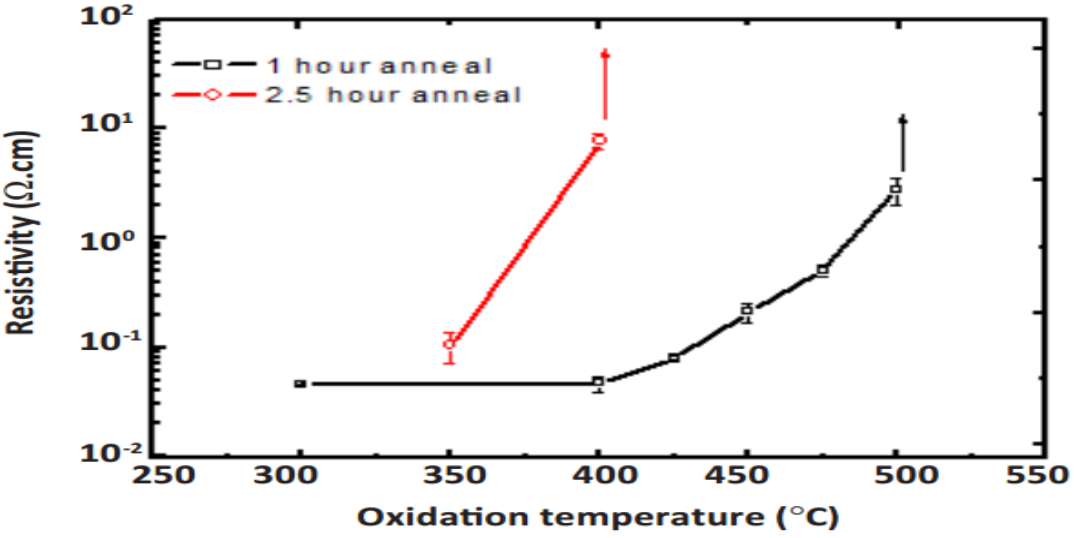
يتمتع أكسيد النيكل NiO بفجوة نطاق طاقي تتراوح مابين $E_g$=3.37$eV \rightarrow$3.54$eV$ ؛[62].




**الشكل.2.11:**فجوة النطاق لأغشية NiO كدالة لدرجة حرارة الأكسدة.

قيمة الحركية μ=0.1 $cm^2/V.s$ [56] ،طاقة التنشيط المقدرة من قياسات درجات الحرارة المنخفضة في النطاق بين 100k و 345 k هي $Ea$=0.19$eV$،كذلك يبلغ التقارب الإلكتروني $\chi$ =1.8$eV$،قدرت

النفاذية بنسبة 63.9% عند 550nm[70][69][68].كما يتمتع بمقاومة جيدة $\rho = 52.27\ \Omega.cm$ و ناقلية كهربائية تتغير ما بين $\sigma= 10^{-2}\ (\Omega.cm)^{-1}$ عند 500K و $\sigma=10^{-1}\ (\Omega.cm)^{-1}$ 30K [61].




**الشكل.2.12:** المقاومة كدالة لدرجة حرارة الأكسدة لأغشية أكسيد النيكل NiO بشكل متساو لمدة ساعة او 2.5 ساعة في نطاق درجة الحرارة 300 Cº - 600 Cº.

الجدول التالي يلخص بعض الخصائص الإلكترونية لأكسيد النيكل :

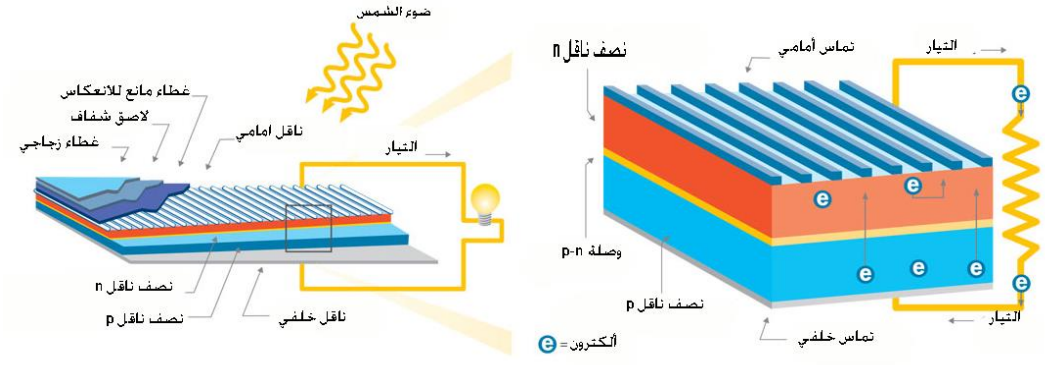
**جدول2.7:**الخصائص الإلكترونية لأكسيد النيكل NiO.

| | |
|---|---|
| الناقلية $\sigma(\Omega.cm)^{-1}$ | [72] 0.1-1 ; ≤10 [71] |
| الحركية $\mu(cm^2/V.s)$ | 0.1-1 [73] |
| الكثافة الإلكترونية $N(cm^{-3})$ | [73] $10^{18}$-$10^{19}$ |
| $E_g(eV)$ | [51]3.5-4 |
| السماحية النسبية$\varepsilon$ | [51] 11.9 |
| التقارب الإلكتروني $\chi(eV)$ | 1.8 |
| كثافة الحالات الفعالة(نطاق | $8.87\times10^{18}$ [74] |

| | |
|---|---|
| التوصيل)،$N_c(cm^{-3})$ | |
| كثافة الحالات الفعالة (نطاق التكافئ)،$N_v(cm^{-3})$ | $7.57\times10^{18}$ [75] |

**6.2.مبادئ عمل الخلايا الشمسية الغير المتجانسة "n-Si/أكسيد موصل- p"(الإمتصاص-التوليد الضوئي-النقل-التجميع):**

إذا كانت الخلية الشمسية متصلة بحمل و تتعرض للضوء كما هو موضح في **الشكل.2.13** ، فسيتم إنتاج فرق في الجهد عبر الحمل و سيتداول التيار .يخرج تيار الخلية من الطرف الموجب و يعود الى الطرف السالب ؛تعمل الخلية كمولد للطاقة و هذا ما يجعل الأمر مثيرا للإهتمام للغاية.

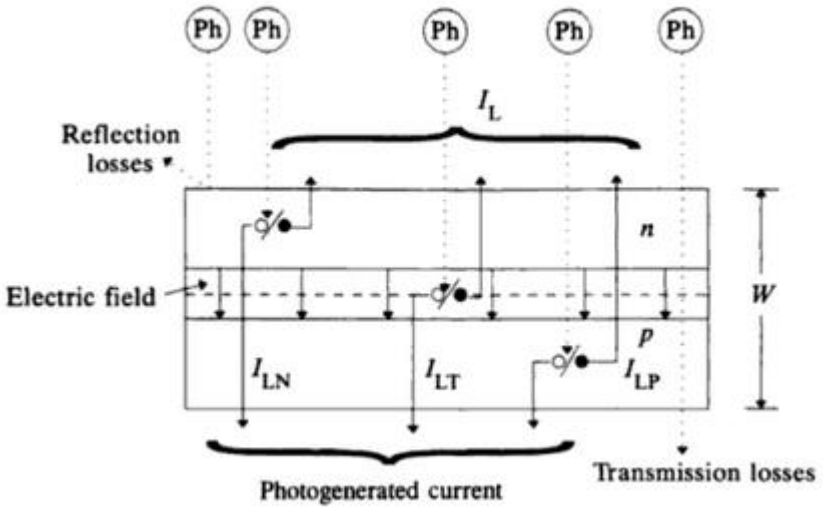



**الشكل.2.13:** مخطط توضيحي لمبدأ عمل خلية شمسية .

يمكن وصف العملية أو المراحل الأساسية لإشتغال الخلية الشمسية على النحو التالي :

❖ **الإمتصاص Absorption:**

تتكون الخلية الشمسية بشكل أساسي من مادة شبه موصلة لها فجوة نطاق معينة $E_g$ و سمك $W$ كما هو موضح في **الشكل.2.14** .




**الشكل.2.14:**توضيح لتوليد التيار في خلية شمسية.الدوائر التي تحمل علامة $Ph$ تمثل الفوتونات.

يتم إمتصاص الفوتونات الساقطة على الخلية بواسطة إلكترونات التكافئ ،و تنتقل إلى نطاق التوصيل (بحيث هذه الفوتونات لديها طاقة مساوية أو أكبر من طاقة فجوة النطاق).ثم يتم إعادة توليد الناقلات بواسطة إمتصاص الفوتونات ؛و لكن لا يتم إمتصاص جميع الفوتونات الواردة للطيف الشمسي فجزء منها ينعكس و جزء بطاقة أقل من النطاق الممنوع ينفذ أما الجزء الممتص فهو من يساهم في التوليد الضوئي [76].

❖ **التوليد الضوئي Photogeneration:**

بمجرد سقوط الفوتونات على الخلية الشمسية تتولد الحاملات "إلكترون-ثقب" في المنطقة N و P و في منطقة شحنة الفراغ (بمعنى تحويل طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية) .

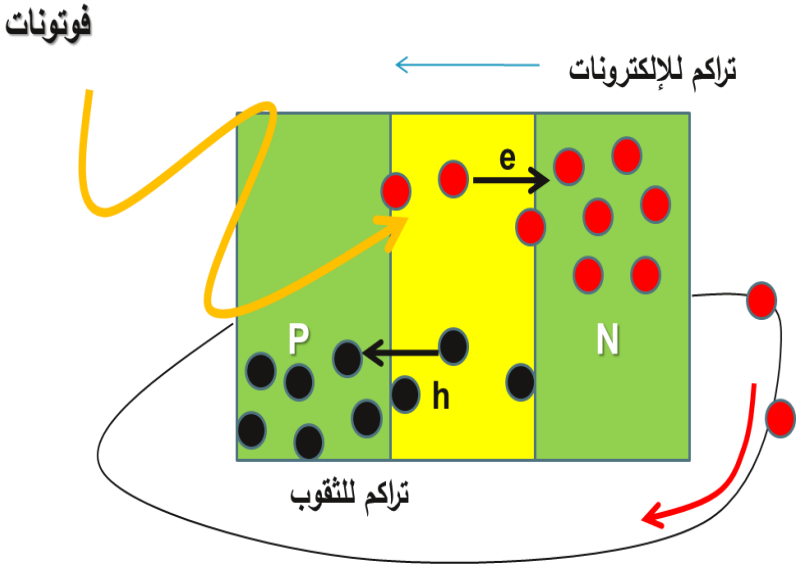
❖ **النقل Transport:**

الحاملات التي تولدت في المنطقة PوN هي حاملات الشحنة الأقلية المتولدة ضوئيا الأقل عددا تنتقل إلى حدود منطقة شحنة الفراغ بالإنتشار و من ثم تتأثر بالحقل الكهربائي الذي يقوم بنقل الإلكترونات إلى الجهة N و الثقوب إلى الجهة P.

❖ **التجميع Collection:**

في منطقة الشحنة الفراغية و تحت تأثير الحقل الكهربائي يتم تجميع الإلكترونات المتحررة في الخلية في الجهة N والثقوب في P . يكون المجال الكهربائي أو فرق الجهد الناتج عن الوصلة pn مسؤولا عن فصل الحاملات قبل أن تتاح لها فرصة الإلتحام ؛ و النتيجة هي فرق كمون و تيار في الدارة

الخارجية بما في ذلك الحمل. و من ثم إلتحام الإلكترونات مع الثقوب و التي تولد التيار الذي يسري عبر الدارة الخارجية[77].



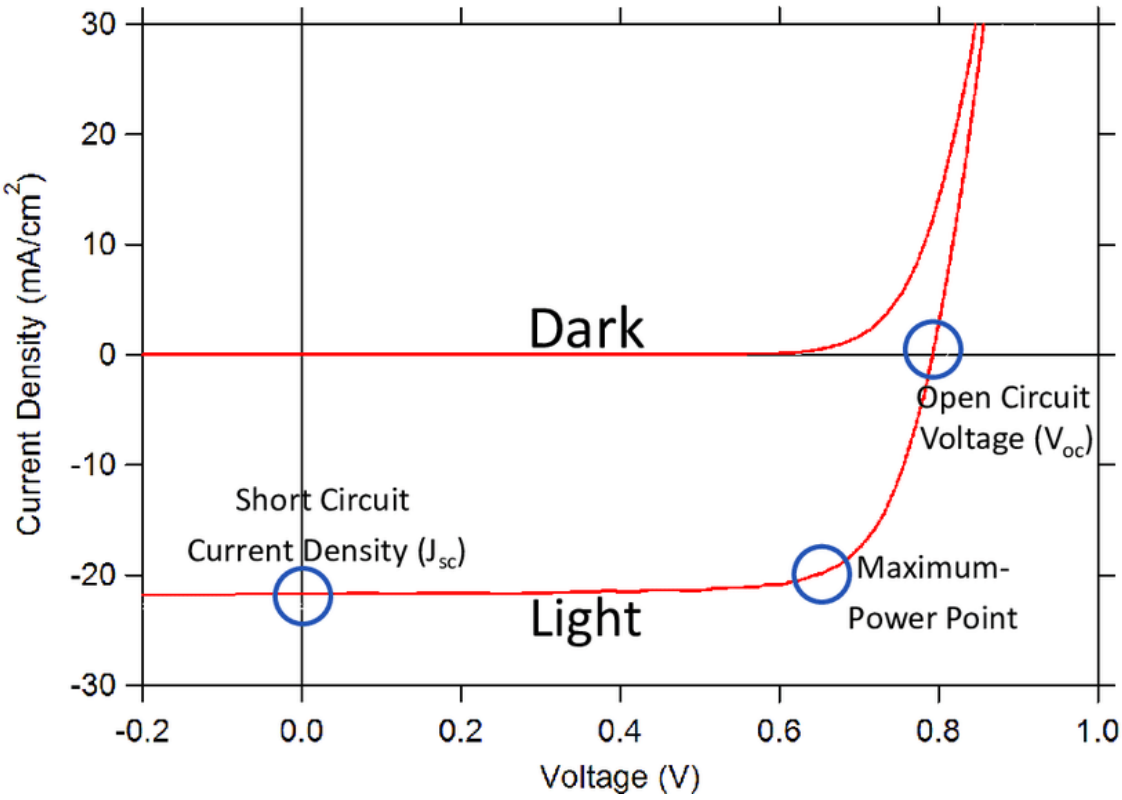

**الشكل.2.15:**فصل الإلكترونات عن الثقوب في المنطقة الناضبة بواسطة الحقل الكهربائي.

### 7.2.الخصائص المميزة $J-V$ (جهد- تيار) لبعض الخلايا الشمسية "p–أكسيد موصل /n-Si" (SnO/Si; CuO/Si; NiO/Si):

#### 1.7.2.الخاصية $J-V$ للخلية الشمسية :

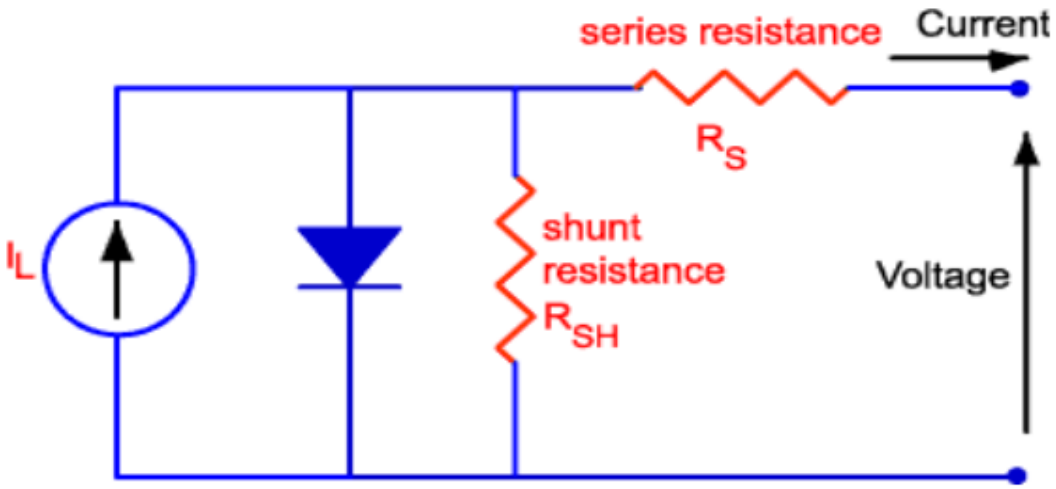
تسمى العلاقة مابين الجهد الناتج على أقطاب الخلية والتيار المار بها بالخاصية "تيار-جهد" $J-V$ characteristic.

هذه الأخيرة توفر قراءة واضحة للثوابت الكهروضوئية التي تميز الخلية الشمسية ، و التي تتمثل في تيار الدارة القصيرة Jsc، جهد الدارة المفتوحة Voc ، كفاءة الخلية η ومعامل التعبئة FF .وتتميز الخاصية "تيار-جهد" أنها تماثل الخاصية في العتمة منحازة بمقدار التيار الضوئي [78] كما هو موضح في **الشكل .2.16**.




**الشكل.2.16:** المنحنى المميز $J-V$ لخلية كهروضوئية.

يوضح **الشكل.2.17** الدارة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية بإعتبار الضياعات المقاومية، المقاومة التسلسلية والمقاومة الموازية:




**الشكل.2.17:**رسم تخطيطي للدارة المكافئة للخلية الشمسية [79].

توصف الخاصية المميزة تيار-جهد للخلية الشمسية بالمعادلة الآتية [80] :

$$I = I_{PH} - I_0\left(e^{\frac{q(V+R_SI)}{nKT}} - 1\right) - \frac{V+R_SI}{R_{Sh}} \qquad (2.1)$$

حيث:

$I_{PH}$:التيار الضوئي$[A]$.

V:الجهد المولد في الخلية$[V]$.

$R_S$: المقاومة التسلسلية للديود الثنائي حيث تعطى ($R_S$=0.1$\Omega$).

$R_{Sh}$:المقاومة على التوازي للديود حيث تعطى ( $R_{SH}$=$10^4\Omega$).

T:درجة الحرارة المطلقة بالكلفن Kحيث (T=25Cº).

K:ثابت بولتزمان بحيث $K_B$ =1.38×$10^{-23}J/K$

$q$:شحنة الإلكترون ($q$=1.6 ×$10^{-19}$ C)

$I_0$:تيار التشبع و $n$ العامل المثالي للديود.

و من خصائص $J-V$ لخلية شمسية يتم تحديد وسائط الخروج سالفة الذكر :

- **تيار الدارة القصيرة $I_{SC}$:**

هو التيار المتدفق عبر الخلية الكهروضوئية عندما تكون الدارة قصيرة "القطب الموجب متصل بالقطب السالب". يمثل أكبر تيار ضوئي تولده الخلية يسري عبر سلك (معدوم المقاومة) وبالتالي بين طرفي الخلية يكون معدوم $V$=0،في هذه الحالة الإستطاعة التي توفرها الخلية معدومة أيضا $P = V \times I$ [81].

حيث:

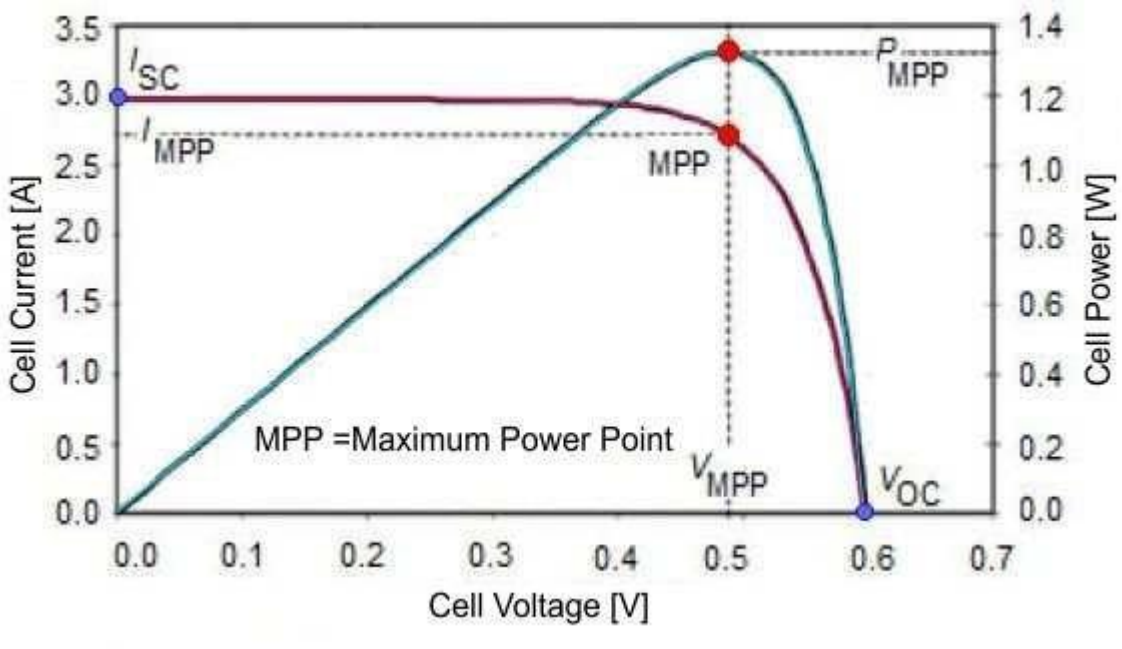
$$I_{sc} = \frac{I_{ph}}{[1+\left(\frac{R_S}{R_{Sh}}\right)]} \qquad (2.2)$$

- **جهد الدارة المفتوحة $V_{OC}$:**

هو أكبر جهد ممكن توفره الخلية أي عندما تكون في دارة مفتوحة ($I$=0)، "القطب الموجب و السالب معزولين كهربائيا" (مقاومة الحمل لا نهائية).

حيث:

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1) \quad (2.3)$$




**الشكل.2.18:**الإستطاعة الأعظمية لخلية شمسية.

- تؤخذ الإستطاعة من الخلية عند إستطاعة أعظمية ب :$P_{MPP}$و يكون التيار عندها $I_{MPP}$ و فرق الكمون$V_{MPP}$ حيث:

$$P_{MPP} = I_{MPP} \times V_{MPP} \quad (2.4)$$

$P_{MPP}$:الإستطاعة الأعظمية $[W]$.

$I_{MPP}$:التيار الموافق لأعظم إستطاعة$[A]$.

$V_{MPP}$:الجهد الموافق لأعظم إستطاعة $[V]$ [82].

- **معامل التعبئة FF :**

هو العلاقة بين الإستطاعة الأعظمية التي يمكن للخلية أن تقدمها و الإستطاعة المشكلة من المستطيل $I_{sc} \times V_{oc}$ :

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} \times V_{OC}} = \frac{I_{MPP} \times V_{MPP}}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (2.5)$$

هذا الثابت يتراوح مابين 0 و 1 يتم التعبير عنه بالنسبة المؤوية (%)،يصف الشكل المستطيل إلى حد ما الخاصية $J - V$ للخلية الشمسية .

- **المردود $\eta$:**

يتم تعريف كفاءة التحويل على أنها النسبة بين الإستطاعة الأعظمية التي تنتجها الخلية الكهروضوئية و إستطاعة الإشعاع الشمسي الوارد.

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_i} \quad (2.6)$$

و إنطلاقا من العبارة نجد أن :

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_i} = \frac{FF \times I_{SC} \times V_{OC}}{P_i} \quad (2.7)$$

حيث :

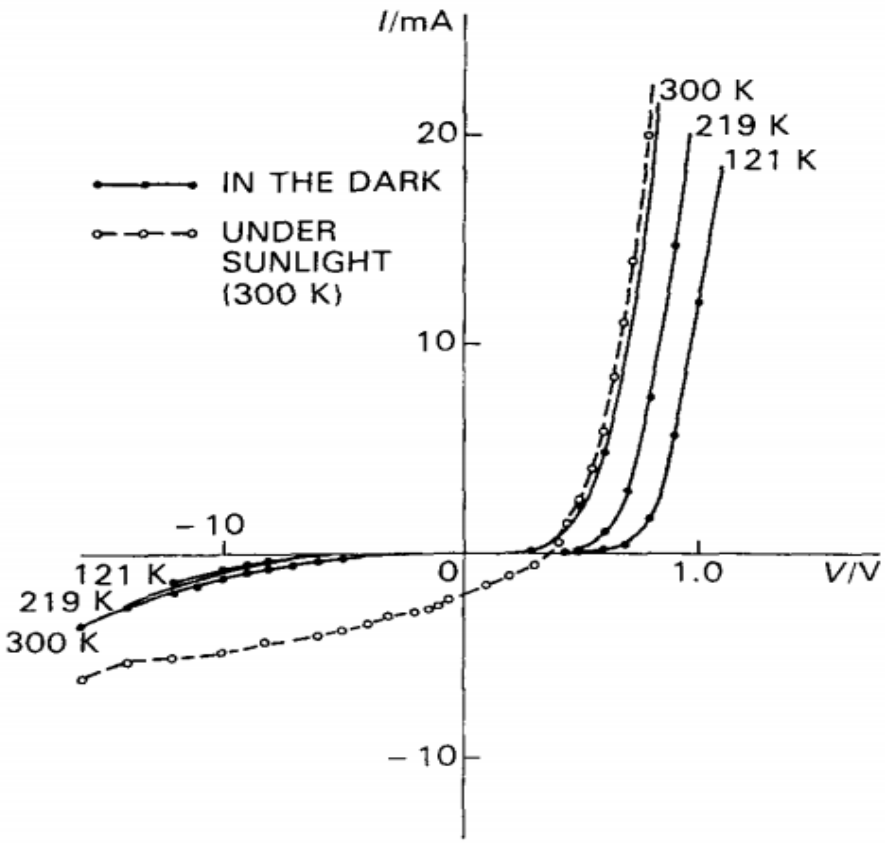
$P_i$ : الإستطاعة الواردة$[W]$ ،[81].

فيما يلي نستعرض بعض الأمثلة التجريبية لخاصية $I - V$ للخلايا الشمسية التي نود محاكاتها في الفصل الثالث.

### 2.7.2.الخاصية $J - V$ للخلية الشمسية (p-$SnO_2$/n-Si):

أظهرت جميع الوصلات الغير متجانسة $SnO_2/Si$ خصائص كهروضوئية جيدة. كانت أفضل الخلايا ذات جهد دارة مفتوحة حوالي $V_{OC}$ =0.450 $V$بينما كان تيار الدارة القصيرة$I_{SC}$= 6 $mA$ و هذا يعني أن كثافة تيار الدارة القصيرة هي 15.8 $mA/cm$ ،عامل التعبئة FF=48%،كفاءة تحويل الطاقة $\eta$=4%؛ حيث تم الحفاظ على منطقة الوصلة الغير متجانسة ثابتة و مساوية ل$0.38\ cm^2$.

تم الحصول على هذه الثوابت الكهروضوئية تحت ضوء الشمس بإضاءة $80Mw/cm^2$ ،و يعتقد أن الجزء الأكبر من خسائر التيار الضوئي كان بسبب الإنعكاس و كذلك تأثير التظليل في الإتصال الأمامي؛ و أن إتصال الشبكة المعدنية يمكن أن يحسن بشكل كبير كثافة تيار الدارة القصيرة[83].

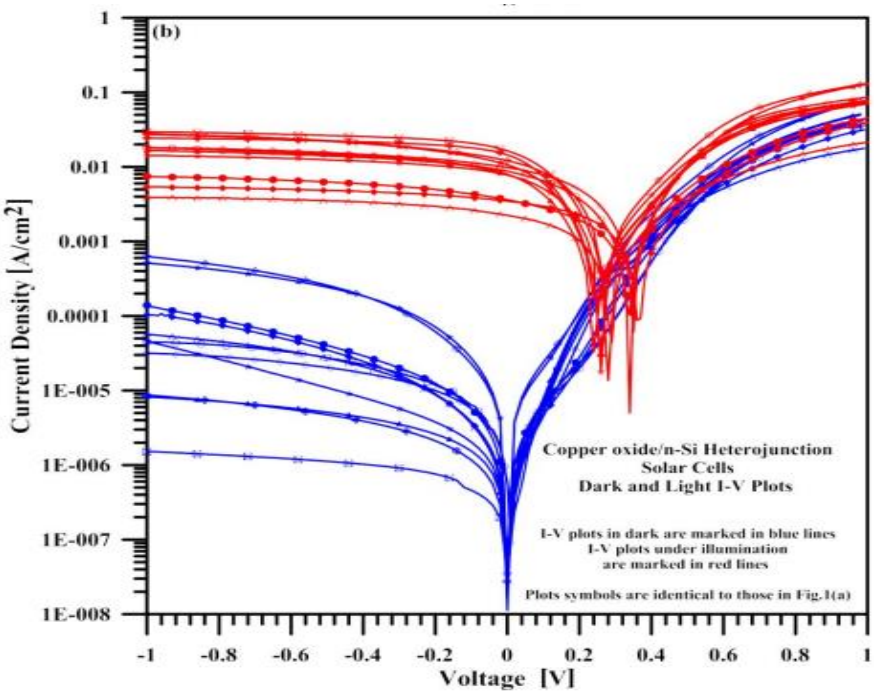



**الشكل.2.19:**خصائص "جهد-تيار" $J-V$ للوصلة الغير متجانسة $SnO_2$/n-Si تقاس في الظلام عند درجات حرارة مختلفة و تحت ضوء الشمس عند 300K [83]

### 3.7.2.الخاصية $J-V$ للخلية الشمسية ( p-CuO/n-Si):

قياسات الخاصية $J-V$ للبنية CuO/Si تؤخذ في الظلام من أجل دراسة الخصائص الكهربائية ،أما لتحديد الخصائص الكهروضوئية للخلية الشمسية الغير متجانسة CuO/Si المتمثلة في $I_{SC}$، $V_{OC}$ ، FF، $\eta$ ،تم اجراء قياسات $J-V$ تحت الإضاءة.

منحنيات $J-V$في الإضاءة ل CuO/Si موجودة في **الشكل.2.19**؛[84][85][86][87].




**الشكل.2.20:** منحنيات $J-V$ في الإضاءة و الظلام للخلايا الشمسية CuO/Si االمصنوعة بطريقة التبخر الحراري [88].

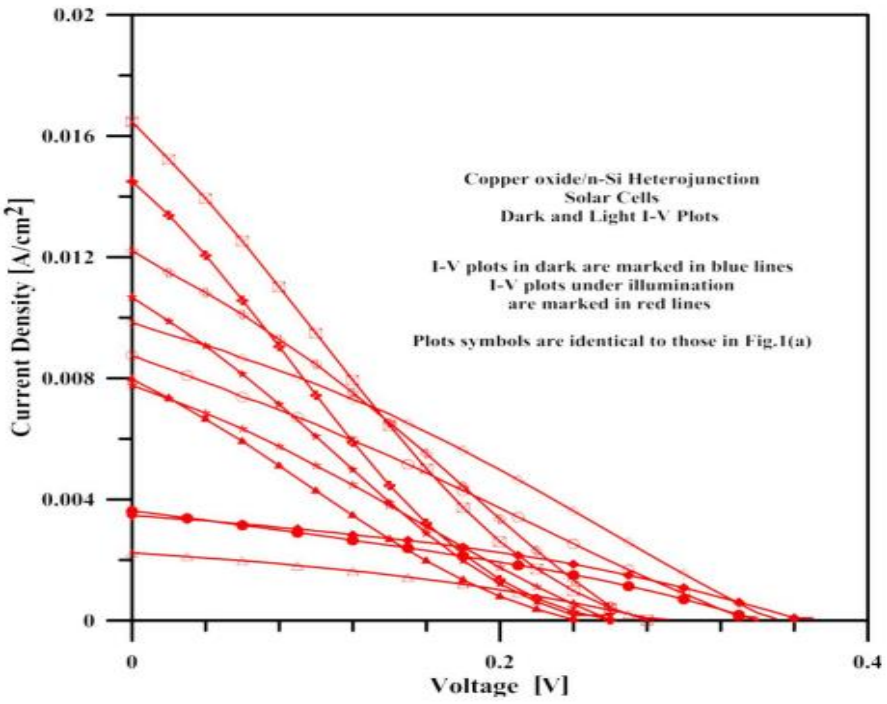
يوضح الشكل الخصائص الكهروضوئية للوصلة الغير متجانسة p-CuO/n-Si و التي تظهر منحنيات $J-V$ للعينات تحت الإضاءة [89].

**جدول2.8:** بعض الخصائص الكهروضوئية للخلية الشمسية الغير متجانسة CuO/Si الناتجة بالتبخر الحراري [90].

| Sample name | $V_{OC}[V]$ | $I_{SC}[A]$ | $P_{max}[W]$ | FF[%] | $\eta$[%] |
|---|---|---|---|---|---|
| D1 | 0.34 | 0.007658 | 0.00078 | 30 | 0.78 |
| D2 | 0.35 | 0.009860 | 0.0010 | 29 | 1.00 |
| D3 | 0.29 | 0.002239 | 0.00022 | 34 | 0.22 |
| D4 | 0.34 | 0.003607 | 0.00038 | 31 | 0.38 |
| D5 | 0.37 | 0.003472 | 0.00045 | 35 | 0.45 |
| D6 | 0.25 | 0.007966 | 0.00044 | 22 | 0.44 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| D7 | 0.27 | 0.007838 | 0.00055 | 26 | 0.55 |
| D8 | 0.27 | 0.010612 | 0.00060 | 21 | 0.60 |
| D9 | 0.27 | 0.012121 | 0.00092 | 28 | 0.92 |
| D10 | 0.27 | 0.014450 | 0.00074 | 19 | 0.74 |
| D11 | 0.28 | 0.016467 | 0.00097 | 21 | 0.97 |

أعلى إنتاج تم تحقيقه حتى الآن في الخلايا الشمسية الغير متجانسة p-CuO/n-Si هو 1.2%،قد تبدو الكفاءة البالغة 1% للخلايا p-CuO/n-Si الناتجة عن التبخر الحراري كقيمة صغيرة و لكنها قابلة للمقارنة مع القيم التي تم الحصول عليها من CuO/n-Si المنتجة من قبل .



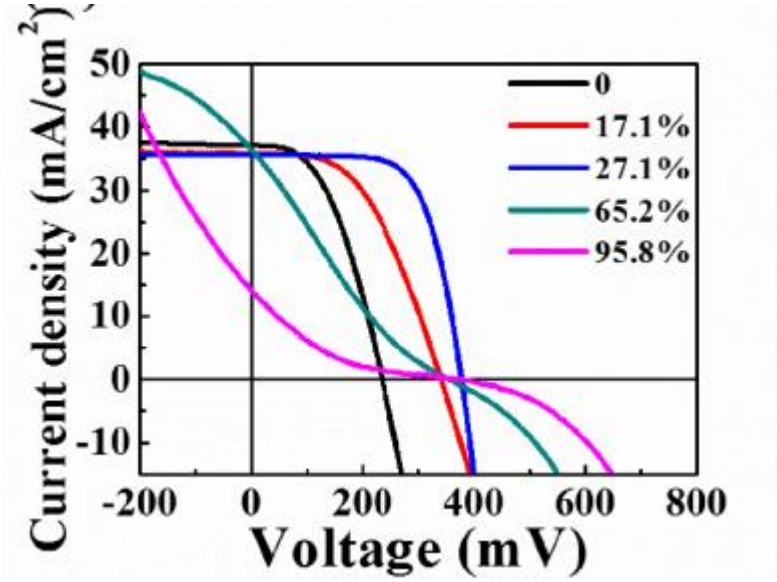

**الشكل.2.21:**الخصائص الكهروضوئية للخلايا الشمسية الغير المتجانسة CuO/Si الناتجة عن التبخر الحراري [88].

كما يتبين من **الشكل.2.20** الذي يعتمد على قياسات $J-V$ تحت الإضاءة فإن قيم FF صغيرة جدا. يمكن ملاحظة أن شكل المنحنى $J-V$ في الشكل يؤثر بشكل مباشر على قيم الحد $I_m$ و $V_m$ .

من ناحية أخرى في تشكيل البيان $J-V$ جهة إتصال التصحيح من المعروف أيضا أن الواجهة لها تأثير مهيمن؛ و هذا يشير إلى أن FFعامل التعبئة مرتبط بطبيعة واجهة جهة الإتصال[28][29][30] [31].

### 4.7.2.الخاصية $J-V$ للخلية الشمسية (p-NiO/n-Si):

نوضح مثالا على خصائص $J-V$ للخلية الشمسية الغير متجانسة p-NiO/n-Si تحت شروط الإضاءة كما هو موضح في **الشكل.2.21** [91].




**الشكل.2.22:**منحنيات J – V للخلية الشمسية p-NiO/n-Si. [92] [93]

نلخص قيم الخصائص الكهروضوئية في الجدول التالي :

**جدول2.9:**بعض الخصائص الكهروضوئية للخلية الشمسية p-NiO/n-Si.

| $V_{OC}[mV]$ | $I_{SC}[mA/cm^2]$ | FF[%] | $\eta$[%] |
|---|---|---|---|
| 260 | 36.6 | 45.4 | 4.3 |

كفاءة تحويل الطاقة (المردود) في الخلية الشمسية p-NiO/n-Si الغير متجانسة هي 4.3% و هي الحالة الأولى التي تم الإبلاغ عنها [91].

**8.2.الخلاصة:**

في هذا الفصل تناولنا دراسة حول خواص الأكاسيد التي سنعتمد عليها في الجانب التطبيقي و هي CuO،NiO،على خلاف $SnO_2$ الذي قمنا بدراسة نظرية عنه؛ أما في الجانب التطبيقي سنستخدم SnO (لسبب نذكره في الفصل التالي ).خواص هذه الأكاسيد سمحت لها بأن تدخل مجال الخلايا الشمسية و تطرح كفاءة تحويل طاقة صحيح أنها صغيرة ولكنها محفزة لإمكانية تطويرها .

الخلايا الشمسية الغير متجانسة أصبحت محل إهتمام بفضل المميزات التي تقدمها من ناحية تكلفة التصنيع المنخفضة نسبيا . مبدأ عمل الخلايا الشمسية الغير متجانسة لا يختلف كثيرا عن المتجانسة و بشكل مختصريعتمد على إمتصاص الفوتونات الساقطة على الخلية الشمسية و توليد زوج "إلكترون-ثقب" .من ثم إنتاج التيار و الجهد لتوليد الطاقة الكهربائية و هو مايعرف بالخاصية $J-V$ و التي من خلالها يمكننا تحديد الخصائص الكهروضوئية ألا و هي :جهد الدارة المفتوحة $V_{OC}$ ؛تيار الدارة القصيرة$I_{SC}$ ؛ FFمعامل التعبئة؛كفاءة تحويل الطاقة$\eta$ .

**المراجع**

[1] G. M. Nam, M. S. Kwon, Al-doped ZnO via Sol-Gel Spincoqting as a Transparent Conducting Thin Film, Journal of Information Display, Vol. 10, N°1, March, (2009).

[2] S. Major, A. Banerjee and K. Chopra, "Highly transparent and conducting indium-doped zinc oxide films by spray Pyrolysis", Thin Solid Films, vol. 108, no. 3,p 333-340, (1983).

[3] A. Shaheen, W. zia, M. Sabieh Anwar, Band structure and electrical conductivity in semiconductors, LUMS School of Science and Engineering, (2010).

[4] N. Boufa, "Elaboration et caractérisation des nano poudres d'oxyde d'étain (SnO2)", Mémoire de Magistère, Univ Mentouri Constantine (2012).

[5] S. H. Jeong, J.W.Lee, S. B. Lee, J. H. Boo, "Deposition of aluminum doped zinc oxide films by RF magnetron sputtering and study of their structural, electrical and optical properties", Mémoire de Magistère, Univ de Constantine, vol. 435, pp. 78-82, (2003).

[6] G. Korotcenkov, V. Brinzari, J. Schwank, M. Di Battista, and A. Vasiliev, "Peculiarities of SnO2 thin film deposition by spray Pyrolysis for gas sensor application", Sensors and Actuators B:Chemical,vol. 77, no. 1–2 p. 244-252, (2001).

[7] S. Laghrib, "Synthèse des films minces des SnO2, SnO2 :In par deux procédés physique et chimique et étude de leur caractérisation", thèse de doctorat, univ de Sétif, (2010).

[8] E. Elongoval, Singh, M. P. Ramamurthi, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, P. 45-54, (2003).

[9] W. Hamd, "Elaboration par voie sol-gel et étude microstructurale de gels et de couches minces de SnO2", Thèse de doctorat, Univ de Limoges, (2009).

[10] Xiatao. Hao, Jin. Ma, Deheng. Zhang,Yingge.Yang, Xiangang. Xu,Feng.Chen, Honglei. Ma, Applied Surface Science 189(2002)157-161.

[11] Abdul Faheem Khan, Mazhar Mehmood, Muhammad Aslam, Muhammad Ashraf, Applied Surface Science 256 (2010) 2252–2258

[12] I. Saadeddin, B. Pecquenard , J.P. Manaud , R. Decourt , C. Labrugere,T. Buffeteau, G. Campet, Applied Surface Science 253 (2007) 5240–5249

[13] D. Dadoo "Production et application des nanostructures d'oxyde de cuivre",Thèse de doctorat, Université de Trento-Italie, (2010).

[14] Ueda,R.and Millin, J. B.(1975),Crystal growth and characterization, Mc.Graw-Hill.

[15] Tribble,A. (2002) Electrical Engineering Materials and Devices, University of Lowa.

[16] Ohya, Y., Ito, S., Ban, T. and Takahashi, Y. (2000) Prepa-ration of CuO thin films and their electrical conductivity. Eng. Mater, 181, 113-116.

[17] Balamurugan, B. and Mehta, B.R. (2001) Optical and structural properties of nanocrystalline copper oxide thin films prepared by activated reactive evaporation. Thin Solid Films, 396, 90-96.

[18] D.D. Arhin, Thèse de doctorat, Université de Trento, Italie, 2006.

[19] Gang Xiao et al ,Ultra sonochemical –Assisted synthesis of CuO nanorods with hight.

[20]A.A.Ogwu,E.Bouquerel,O.Ademosu,S.Moh,E.Crossan,F.Placido.Acta Materialia 53 (2005) 5151-5159.

[21] F. Marabelli, G.B. Parravicini, F. Salghetti-Drioli, “Optical gap of CuO”, Phys. Rev. B 52 (1995) 1433–1436.

[22] A.A. Ogwu, E. Bouquerel, O. Ademosu, S. Moh, E. Crossan, F. Placido, « An investigation of the surface energy and optical transmittance of copper oxide thin films prepared by reactive magnetron sputtering », Acta Materialia 53 (2005) 5151–5159.

[23] J. Sultana, A. Das, A. Das, N.R. Saha, A. Karmakar, S. Chattopadhyay, Thin Solid Films. 612 (2016) 331–336.

[24] E.M. Alkoy, P.J. Kelly, Vacuum 79 (2005) 221–230.

[25] Dangxin Wu and Qiming Zhang, Phys. Rev. B 73, 235206 (2006).

[26] L. Wang, Thèse de doctorat, Université de Texas Arlington, 2006.

[27] F. Bayansal, S. Kahraman, G. Çankaya, H.A. Çetinkara, H.S. Güder, H.M. Çakmak, Journal of Alloys and Compounds Volume 509, Issue 5, 3 February 2011, Pages 2094–2098.

[28] Masudy-Panah S., Dalapati G.K.,Radhakrishnan K., Kumar A., Tan H.R., J. Appl. Phys., 116 (2014), 074501-1.

[29] Masudy-Panah S., Dalapati G.K.,Radhakrishnan K., Kumar A., Tan H.R., Kumar E.N., Vijila C., Tan C.C., Chi D.Z., Prog. Photovoltaics, 23 (2015), 637.

[30] Masudy-Panah S., Radhakrishnan K., Tan H.R., Yi R., Wong T.I., Dalapati G.K., Sol. Energ. Mat. Sol. C., 140 (2015), 266.

[31] Gao F., Liu X-J., Zhang J-S., Song M-Z., Li N., J.Appl. Phys., 111 (2012), 084507-1.

[32] Jayathilaka C., Kapaklis V., Siripala W., Jayanetti S., Appl. Phys. Express, 8 (2015), 065503-1.

[33] Minami T., Miyata T., Nishi Y., Thin Solid Films,

559 (2014), 105.

[34] Minami T., Miyata T., Nishi Y., Sol. Energy, 105 (2014), 206.

[35] Razykov T.M., Ferekides C.S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H.S., Upadhyaya H.M., Sol.Energy, 85, (2011), 1580.

[36] Gao F, Liu X-J, Zhang J-S, Song M-Z, Li N. Photovoltaic properties of the p-CuO/n-Si heterojunction prepared through reactive magnetron sputtering. Journal of Applied Physics 2012; 111: 084507-4.

[37] D. Gopalakrishna, K. Vijayalakshmin, C. Ravidhas, « Effect of annealing on the properties of nanostructured CuO thin films for enhanced ethanol sensitivity », Ceramics International, 2013.

[38] Synthesis and caracterisation of CuO /Graphene oxide composite ,National institute of technologies ,page 3.

[39] Shishiyanu ST, Shishiyanu TS, Lupan OI. Sens Actuators B 2006;113:468.

[40] J. Herion, E. A. Niekisch, & G. Schari. (1980). Investigation of metal oxide/cuprous oxide heterojunction solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells, 4, 101-112. (80)90022-2.

[41] K. Woo, D. Kim, J. Sub Kim, S. Lim and J. Moon, Langmuir, 2009, 25 (1), pp 429–433.

[42] E.Burstein, Physical Review 93, p.632-633 (1954).

[43] T.S.Moss, Procedings of the Physical Society London B76 p.775-782 (1954).

[44] Guojia.Fang, Dejie.Li, Bao-Lun.Yao, Vaccum 68 363-372 (2003).

[45] B.A.Reguig, A.Khelil, L.Cattin, M.Morsli, J.C.Bernnède, Properties of NiO Thin films deposited by intermittent spray pyrolysis process, Applied Surface Science 253 4330-4334 (2007).

[46] H.Kamel, E.K, Elmaghraby, S.A.Ali, K.Abdel-Hady, Chracterisation of nickel oxide films deposited at different substrate temperatures using spray pyrolysis, Journal of Crystal Growth 262 424-434 (2004).

[47] J. L. Deschanvres, B. Bochu et J. C. Joubert Physic-s Absn.acts J. Phy.I. III Fiance 4 1243-1251(1994).

[48] H.Benzarouk, Mémoire de magister, Université d'Annaba (Algérie), (2008).

[49] S. Le PEVEDIC, thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-PARIS VI, (2007).

[50] S. Perusin, thèse de doctorat, Université Toulouse (2004).

[51] S. Pevedic, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-PARIS VI (France), 2007.

[52] C. Delmas, C. Faure, L. Gautier, L. Demourgues-Guerlou and A. Rougier, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., 354, Issue 1712, 1545 (1996).

[53] A. Delahaye-Vidal, B. Beaudoin, N. Sac-Epée, K Tekaia-Elhsissen, A. Audemer and M. Figlartz, Solid State Ionics, 84, 239 (1996).

[54] S.Kemach, Mémoire de Master, Université Larbi Tebessi-Tébessa (Algérie), 2014.

[55] A. N. Banerjee and K. K. Chattopadhyay, Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. 50, 52 (2005).

[56] M. L. Grilli, F. Menchini, T. Dikonimos, P. Nunziante, L. Pilloni, M. Yilmaz, A. Piegari, and A. Mittiga, Semicond. Sci. Technol. 31, 055016 (2016).

[57] F. R. Lamastra, F. Nanni, F. Menchini, P. Nunziante, and M.

L. Grilli, Thin Solid Films 601, 54 (2015).

[58] J.R. Manders, S.-W. Tsang, M.J. Hartel, T.-H. Lai, S. Chen, C.M. Amb, et al., Solution-processed nickel oxide hole transport layers in high efficiency polymer photovoltaic cells, Adv. Funct. Mater. 23 (2013) 2993–3001.

[59] Islam, R., Ramesh, P., Ju Hyung, N., Saraswat, K.C., 2015. Nickel Oxide Carrier Selective Contacts for Silicon Solar Cells. Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), IEEE 42nd 2015, pp. 1–4.

[60] J.A. Dirksen, K. Duval, T.A. Ring, Sens. Actuators B Chem. 80 (2001) 106.

[61] Esteban Damian Avendanosoto, Thèse de doctorat, Acta uninversitatis up Saliensis Uppsala (2004).

[62] Das NS, Saha B, hapa R, Das GC, Chattopadhyay KK. Band gap widening of nanocrystalline nickel oxide thin films via phosphorus doping, Band gap widening of nanocrystalline nickel oxide thin films via phosphorus doping.physics E, 2010, 42; 1377-1382.

[63] Zhou Y, Gu DH, Geng YY, Gan FX. Thermal, structural and optical properties of NiOx thin films deposited by reactive dc-magnetron sputtering. Mater Sci. Eng. B, 2006, 135; 125-128.

[64] Reguig BA, Khelil A, Cattin L, Morsli M, Bernede JC. Properties of NiO thin films deposited by intermittent spray pyrolysis process.Appl. Surf. Sci., 2007, 253; 4330 4334.

[65] Yeh WC, Matsumura M. Chemical vapor deposition of nickel oxide films from bis-π-cyclopentadienylnickel. Jpn. J. Appl. Phys., 1997, 36; 6884-6887.

[66] Subramanian B, Ibrahim MM, Murali KR, Vidhya VS, Sanjeeviraja C, Jayachandran M. Structural, optoelectronic and electrochemical properties of nickel oxide films.J. Mater Sci. Mater Electron., 2009, 20; 953-957.

[67] Gowthami V, Perumal P, Sivakumar R, Sanjeeviraja C. Structural and optical studies on nickel oxide thin film prepared by nebulizer technique. Physica B, 2014, 452; 1-6.

[68] M. Tucci, G. de Cesare, J. Non-Cryst. Solids 338-340, 663

(2004).

[69] M. Izzi, M. Tucci, L. Serenelli, P. Mangiapane, M. Della Noce, I. Usatii, E. Esposito, L. V. Mercaldo, and P. Delli Veneri, Appl. Phys. A 115, 705 (2014).

[70] M. Tucci, L. Serenelli, S. De Iuliis, M. Izzi, G. de Cesare, and D. Caputo, Phys. Status Solidi C 8, 932 (2011).

[71] B.A. Reguig, M. Regragui, M. Morsli, A. Khelil, M. Addouc, J.C. Bernède, Solar Energy Materials & Solar Cells. 2006,90, 1381–1392.

[72] R. L. Huffman, Thèse de master, Université Oregon state (2002).

[73] H. Sato, T. Minami, S. Takata, and T. Yamada, Thin Solid Films. 1993 vol. 236, pp. 27–31.

[74] Raisul Islam, Koosha Nassiri Nazif, and Krishna C. Saraswat. “Si Heterojunction Solar Cells: A Simulation Study of the Design Issues”. In: IEEE Transactions on Electron Devices 63.12 (2016), pp. 4788–4795. DOI: 10.1109/TED.2016.2613057.

[75] Morigaki, K., Kugler, S., & Shimakawa, K. (2017). Amorphous Semiconductors: Structural, Optical, and Electronic Properties. John Wiley & Sons.

[76] Lorenzo, E., G. Araujo, A. Cuervas, M. Egido, J. Minano, and R. Zilles,1994 . "Solar Electricity Engineering of Photovoltaic Systems" , pp.340.

[77] K.AMARA ; "Contribution à l'etude de concption d'une central photovoltique de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension ";Mémoire de magister ;Université mouloud mammeride de Tizi-ouzou (2014-2015).

[78] Mr.Abderrazek Mahfoude « modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement »,thèse de doctorat, université stif,2015.

[79] R. Théodulf;" Elaboration et caractérisation de cellules solaires organiques à base de nouvelles classes de matériaux actifs ";Thèse de doctorat; Université d'ANGERS (2011).

[80] B. Dalati;Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Basic Sciences Series Vol. (36) No. (3) (2014).

[81] N. Benaouda, R. Aiouaz et M. Abersi « Réponses spectrales et des caractéristiques I – V des cellules solaires au silicium », Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (2007) 145 – 150.

[82] Anne Kaminski, Mathieu Monville2" Energie photovoltaïque Filière Physique des Composants Nanostructurés Phelma "Septembre (2010).

[83] Peršin, M., Vlahović, B., & Urli, N. (1990). Some electrical and photovoltaic properties of poly-Si/SnO2 heterojunction. Vacuum, 40(1-2), 209-211.

[84] ZIEL A., Solid State Physical Electronics, 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, 1968.

[85] SZE S.M., Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed.,Wiley, New York, 1981.

[86] RHODERICK E.H., WILLIAMS R.H., MetalSemiconductor Contacts, Clarendon Press, Oxford,1988.

[87] NEAMEN D.A., Semiconductor Physics and Devices:Basic Principles, Mc Graw Hill, New York, 1992.

[88] OZKARTAL A., TEMIRCI C., Sol. Energy, 132 (2016),96.

[89] FONASH, S.J., Solar Cell Device Physics, 2nd ed., Elsevier, Burlington, MA 01803, USA, 2010.

[90] Özmenteş, R., Temirci, C., Özkartal, A., Ejderha, K., & Yildirim, N. (2018). Characterization of CuO/n-Si heterojunction solar cells produced by thermal evaporation. Materials Science-Poland, 36(4), 668-674.

[91] R. A. Sinton and A. Cuevas, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference,1-5 May Glasgow, UK.

[92] G.W. Pabst, L.W. Martin, Y.-H. Chu, R. Ramesh, Applied Physics Letters 90 (2007) 072902.

[93] E. Arslan, S. Bütün, E. Ozbay, Applied Physics Letters 94 (2009) 142106.

# الفصل 3

# مقارنة بين الخلايا الشمسية

# $SnO/Si, Cu_2O/Si, NiO/Si$

### 1.3.مقدمة:

تعد المحاكاة العددية للخلايا الشمسية طريقة ضرورية لإيجاد الوسائط أو المعايير المثالية للخلية،و إختبار تأثيرات الخصائص الفيزيائية على أدائها.

في هذا الفصل سنتناول أولا مفاهيم بسيطة حول برنامج المحاكاة **SILVACO-ATLAS** ثم نقدم نتائج المحاكاة للخلايا الشمسية المدروسة $SnO/Si,Cu_2O/Si,NiO/Si$ على التوالي بالترتيب. تنقسم الدراسة إلى 4 خطوات:

- في الخطوة الأولى سنحاكي الخلايا الشمسية الثلاث SnO/Si,Cu2O/Si,NiO/Si في الحالة الإبتدائية أي تحت القيم الإبتدائية لكل من سمك الأكسيد و Si و عمل الإنتزاع للأنود/الكاثود ،و كذلك التطعيم p و التطعيم n (قيم هذه الأخيرة سنتعرف عليها لاحقا).
- الخطوة الثانية تتمثل في دراسة تأثير كل من عمل الإنتزاع للأنود/الكاثود على كل من الخلايا الشمسية الثلاث بالترتيب.
- الخطوة الثالثة تتمثل في دراسة تأثير كل من سمك الأكسيد ($SnO-Cu_2O-NiO$) و Si على الخلايا الثلاث بالترتيب.
- الخطوة الرابعة تتمثل في دراسة تأثير كل من التطعيم p ثم التطعيم n (مع اعتبار التطعيم الخلفي ) على كل من الخلايا الثلاث بالترتيب.

بالإضافة إلى أنه ستكون هناك مقارنة بين الخصائص الكهربائية $J_{SC}$ ,$V_{OC},\eta,FF$ بين الخلايا الشمسية الثلاث بين كل خطوة و خطوة.

### 2.3. برنامج المحاكاة :

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

#### 1.2.3.تعريفات:

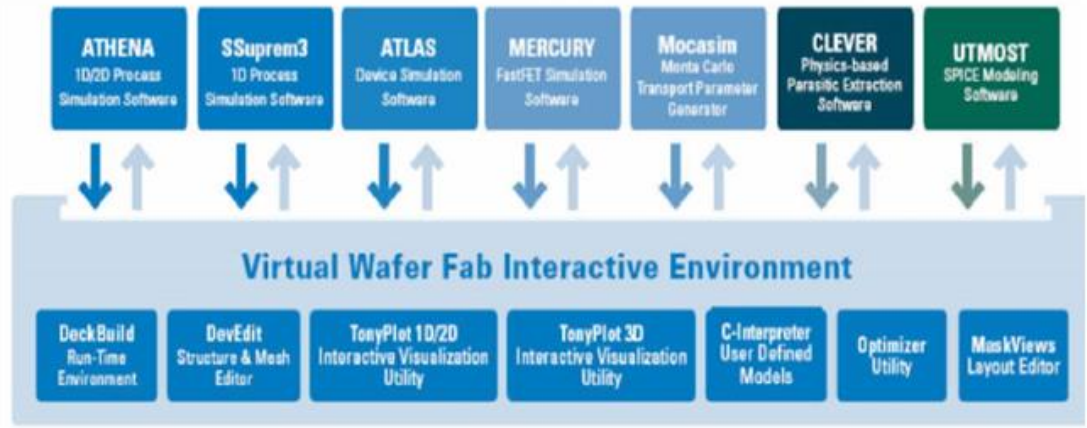
**"SILVACO International "** هي شركة برمجيات تقدم برامج لتصميم جميع مجالات الإلكترونيات ، بما في ذلك الدوائر التناظرية والرقمية. تمتلك هذه الشركة برامج تتراوح من نمذجة الأنواع البسيطة إلى مخططات الدوائر المتكاملة المتقدمة وأدوات الإستخراج [1].

برنامج **SILVACO-ATLAS** هو برنامج محاكاة أشباه الموصلات يعتمد على مبادئ فيزيائية ثنائية وثلاثية الأبعاد ، مما يعني أنه يمكنه التنبؤ بالخصائص الكهربائية المرتبطة بالبنى الفيزيائية المحددة جيدًا وظروف الإستقطاب. يتم الحصول على ذلك من خلال تقريب إشتغال المركب بـشبكة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد ، تشتمل على عدد معين من نقاط الشبكة تسمى العقد. من خلال تطبيق مجموعة من المعادلات التفاضلية ، المستمدة من قوانين ماكسويل"Maxwell" ، على هذه الشبكة ، يمكننا محاكاة إنتقال حاملات الشحنة الحرة من خلال البنية. هذا يعني أنه يمكن نمذجة الكفاءة الكهربائية للمركب في نظام التيار المباشر أو التيار المتناوب أو في أوضاع التشغيل العابرة[2].

تم تصميم **ATLAS** ليتم استخدامه مع الأدوات التفاعلية لتصنيع الرقاقة الافتراضية ( « vwf » VIRTUAL WAFER FAB).هذه الأدوات هي : DECKBUILD ، TONYPLOT، DEVEDIT ، MASKVIEWS ، OPTIMIZER:

- **DECKBUILD:** يوفر بيئة تشغيل تفاعلية .
- **TONYPLOT**: يوفر إمكانيات تمثيل نتائج المحاكاة إبتداءا من البنية إلى الخواص الكهربائية.
- **DEVEDIT:** هو أداة تفاعلية لتحديد البنية والشبكة بالإضافة إلى التحسين.
- **MASKVIEWS:** هو محرر قناع للدائرة المتكاملة IC.
- **OPTIMIZER:** يدعم التحسين عبر محاكيات متعددة.

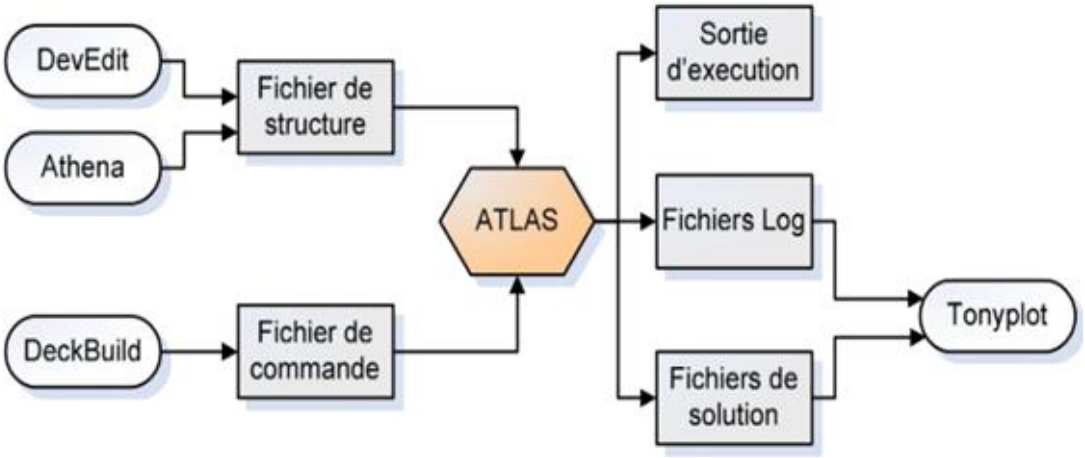
يساعد تصنيع الرقاقة الإفتراضية **(VWF)**على أداء المحاكاة بكفاءة دون الحاجة إلى برامج تابعة لجهات خارجية. من **الشكل.3.1** ، نرى أن Silvaco مع **VWF** يقدم برنامج محاكاة قوي.




**الشكل.3.1:**بيئة تصنيع الرقاقة الافتراضية [3].

### 2.2.3.المداخل و المخارج في SILVACO-ATLAS :

**الشكل.3.2** يوضح أنواع المعلومات التي تدخل وتخرج من **ATLAS**. تستخدم معظم عمليات المحاكاة على **ATLAS** مدخلين: ملف نصي يحتوي على أوامر لتنفيذ **ATLAS** وملف هيكلي يحدد الهيكل الذي سيتم محاكاته. ينتج **ATLAS** ثلاثة أنواع من المخارج. 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 إستقطاب [4].




**الشكل.3.2:**مداخل ومخارج Atlas [4].

### DeckBuilD.1.2.2.3 :

DeckBuilD هي بيئة تشغيل رسومية تفاعلية ، لتطوير العمليات ومدخلات نظام المحاكاة. يتكون من نافذة لإنشاء منصة الإدخال ونافذة لإستخراج وسائط و نتائج المحاكاة ومجموعة من النوافذ المنبثقة التي توفر لغة كاملة و دعما للتنفيذ [5].

### Tonyplot.2.2.2.3 :

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.3.3** [6].

**الشكل.3.3 :**النافذة الأساسية TonyPlot.

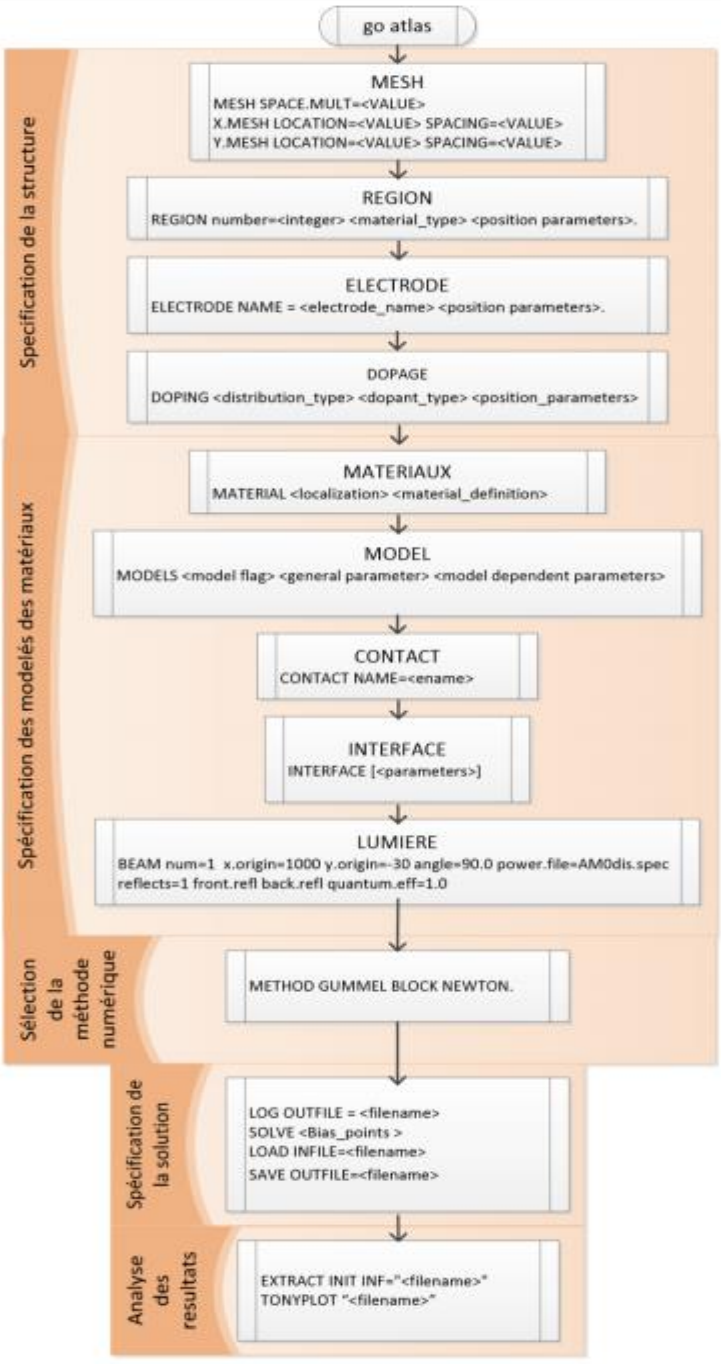
### 3.2.3. بنية الإدخال في SILVACO-ATLAS :

ملف أوامر ATLAS هو عبارة عن قائمة بأوامر ATLAS ليتم تنفيذها. يتم تخزين هذه القائمة كملف نصي ASCII والذي يمكن تحضيره في DECKBUILD أو باستخدام أي محرر نصوص. يفضل إعداد ملف الإدخال في DECKBUILD ، ويمكن تسهيل ذلك من خلال الاستخدام المناسب لقائمة أوامر DECKBUILD. يحتوي ملف الإدخال على سلسلة من التعليمات. تتكون كل عبارة من كلمة أساسية تحدد التعليمة ومجموعة من الإعدادات المكملة لها. التنسيق العام هو:

**<STATEMENT> <PARAMETER>=<VALUE>**

### 4.2.3. مخطط البناء العام لـATLAS :

في هذه المحاكاة ، يتم تعريف الخلية الشمسية بشكل رسومي في ATLAS عبر واجهة Deckbuild. من أجل تحديد الخلية بشكل صحيح ، من الضروري إدخال خصائص المواد ليس فقط الأبعاد.




**الشكل.3.4:**مخطط انسيابي لمراحل بناء نموذج في ATLAS.

**:Mesh.1.4.2.3**

الخطوة الأولى في تصميم المركب بعد الأمر go atlas هي تحديد الشبكة ، الشبكة 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 بينها [4] .

وتلعب الشبكة دورًا مهمًا في الحصول على محاكاة جيدة. يجب أن يتم ذلك بعناية فائقة لضمان موثوقية النتائج، يجب أن يتم اختيار الشبكة بطريقة تؤدي إلى حل وسط بين سرعة التنفيذ و دقة النتائج [7].

### Régions.2.4.2.3 (المناطق ) :

يتم استخدام أمر المنطقة لفصل التعليمات من الشبكة الأولية إلى كتل مميزة وتحديد إعدادات المواد الأولية التي يمكن تعيينها لاحقًا بواسطة أرقام المنطقة. يجب تعيين جميع مجالات الشبكة الخاصة بالبنية بمنطقة ويجب ترتيب المناطق من الأدنى إلى الأعلى. على سبيل المثال ، لا يمكن تحديد المنطقة 5 قبل المنطقة 4 [8].

### Electrode.3.4.2.3 (القطب الكهربائي) :

يسمح تعريف الأقطاب الكهربائية بتكوين اتصالات الشبكة والأنود والكاثود [9] ، ومع ذلك فإن SILVACO ATLAS له حد 50 قطبًا يمكن تعريفه [3].

### Dopage.4.4.2.3 (التطعيم) :

إن الجانب الأخير من إنشاء البنية هو التطعيم . يمكن أن يكون التطعيم من النوع n أو p ، كما يمكن أن يكون التوزيع منتظما ، Gaussian ، إلخ ... [9].

### Matériel.5.4.2.3 (المواد) :

بمجرد تجميع البنية بالكامل ، يجب تحديد المواد المستخدمة في بناء المركب. يسمح أمر الأجهزة بتحديد بعض المعلمات الأساسية. يمكن أن تنطبق هذه القيم على مادة أو منطقة [2].

إن القدرة الأكثر أهمية التي تسمح بها أوامر المواد هي إنشاء مواد يحددها المستخدم. يمكن للمستخدم استخدام أي مادة بشكل تحكمي عند تعريف بنية ، ثم تعديل جميع خصائصه لتتوافق مع تلك الموجودة في المادة المطلوبة. على الرغم من تسمية المادة على اسم المادة المختارة إلا أنها ستعمل وظيفيا مثل أي مادة يرغبها المستخدم [10].

### 3.4.2.6. Modèles physiques ( النماذج الفيزيائية) :

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.

**نماذج SRH FLDMOB CONMOB**

- **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 [3].

### 3.4.2.7. Contacts(جهات الإتصال):

تشير إلى الخصائص الفيزيائية للقطب الكهربائي (المقاومة ، أعمال الإنتزاع...) [9].

### 3.4.2.8. Interface (الواجهة) :

يشير إلى معلمات الواجهة في حدود أشباه انصاف النواقل أو العوازل على العقد الحدودية [9].

### 3.4.2.9. Lumière (الضوء) :

عندما تكون الإضاءة مهمة للمركب (كما هو الحال في الخلايا الشمسية) ، هناك إمكانية لاستخدام عدد من مصادر الضوء وتعديل موقعها واتجاهها وشدتها . يمكن وصف طيف الضوء بكل التفاصيل الضرورية [11].

### 3.4.2.10. Méthode de la solution (طريقة الحل) :

يحتوي ATLAS على العديد من الطرق العددية لتحديد الحلول في مركبات أشباه الموصلات ، وهناك ثلاثة أنواع رئيسية من الطرق العددية. الطريقة الأولى هي طريقة GUMMEL وهي مفيدة عندما يكون نظام معادلات مستقلة ولكن له تقارب خطي فقط. الطريقة الثانية هي طريقة نيوتن ، وهي مفيدة عندما يقترن نظام المعادلات بقوة ولديه تقارب تربيعي. تستغرق هذه الطريقة مزيدًا من الوقت

لتحديد الحلول التي تكون مستقلة وتتطلب أيضًا أن تكون التقديرات الأولية للحلول مقاربة للحلول الفعلية لضمان للحصول على التقارب. الطريقة الأخيرة تمزج بينهما هي طريقة الكتلة التي يمكن أن توفر أوقات محاكاة أسرع [4].

### 3.4.2.11.Spécification de la solution (تحديد وتخصيص الحل ) :

هذا القسم من منصة الإدخال هو المكان الذي تجري فيه المحاكاة حساباتها لحل المركب المحدد. وهي مقسمة إلى أربعة أجزاء: **Log ، Solve ، Load ، Save**.

الأمر log يقوم بإنشاء ملف حفظ لحالة التوازن ،أو الحالة الديناميكية ، DC (التيار المباشر أو التيار المستمر (يرمز له باللاتينية DC أي Direct Current)). أي البيانات المحددة من خلال الأمر solve بعد الأمر log.

الأمر solve يتبع بأمر log ويحسب المعلومات المتعلقة بنقطة أو أكثر من نقاط الاستقطاب ، الأوامر load و Save تستعمل معا للمساعدة على إنشاء أفضل التقديرات الأولية من اجل نقاط الاستقطاب . يتم استخدام الأمر Save أولا لتخزين جميع المعلومات حول نقاط الاستقطاب، وبعد ذلك يتم استخدام الأمر load لاسترداد هذه المعلومات والمساعدة في الحل [4].

### 4.4.2.12.Extraction des données et traçage (استخراج البيانات وتعقيبها) :

بمجرد العثور على الحلول التي تحاكي المركب ،يمكن عرض المعلومات بشكل رسومي باستخدام Tonyplot .بالإضافة إلى ذلك يمكن استخراج وسائط الأجهزة عن طريق الأمر EXTRACT.

## 3.3.مناقشة و تحليل النتائج:

### 1.3.3.وسائط المحاكاة :

**جدول 3.1 :**المدخلات الفيزيائية المستخدمة في المحاكاة.

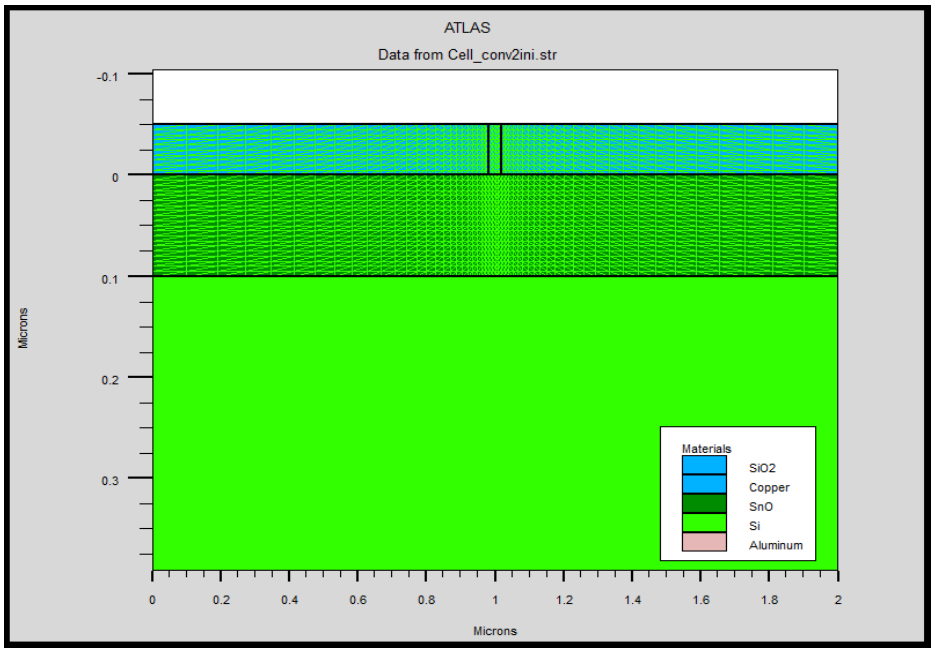
| Parameter | Designation | SnO | Cu2O | NiO | Si |
|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $E_g(eV)$ | **Gap energy** | **2.8** | **2.17** | **3.8** | **1.08** |
| $q\chi_i\,(eV)$ | **Affinity** | **2.4** | **3.2** | **1.46** | **4.17** |
| $N_c(cm^{-3})$ | **Effective density of Conduction band ($\times 10^{19}$)** | **1** | **0.02** | **2.8** | **2.8** |
| $N_v(cm^{-3})$ | **Effective density of Valence band ($\times 10^{19}$)** | **2.8** | **1.1** | **1** | **1.04** |
| $\mu_n(cm^2V^{-1}s^{-1})$ | **Electron mobility** | **10** | **200** | **12** | **1000** |
| $\mu_p(cm^2V^{-1}s^{-1})$ | **Hole mobility** | **2.3** | **80** | **2.8** | **500** |
| $\varepsilon_r$ | **Relative dielectric constant** | **9** | **7.11** | **10.7** | |

منطلق دراستنا كان على خلية شمسية غير متجانسة من النوع Oxide (p-type)/ Si (n-type)، هذه الأخيرة تتكون في الجزء العلوي من طبقة $SiO_2$ المضادة للإنعكاس، استخدمنا أنود واحد من مادة النحاس ثم أضفنا طبقة أكسيد موصل شفاف (p-type) تليها طبقة من Si (n-type) ثم طبقة من الكاثود ألا و هي الألمنيوم . الهدف كما أسلفنا المقارنة بين ثلاث أكاسيد تستخدم من جهة كنافذة ضوئية ومن جهة أخرى كطبقة مجمعة للثقوب.

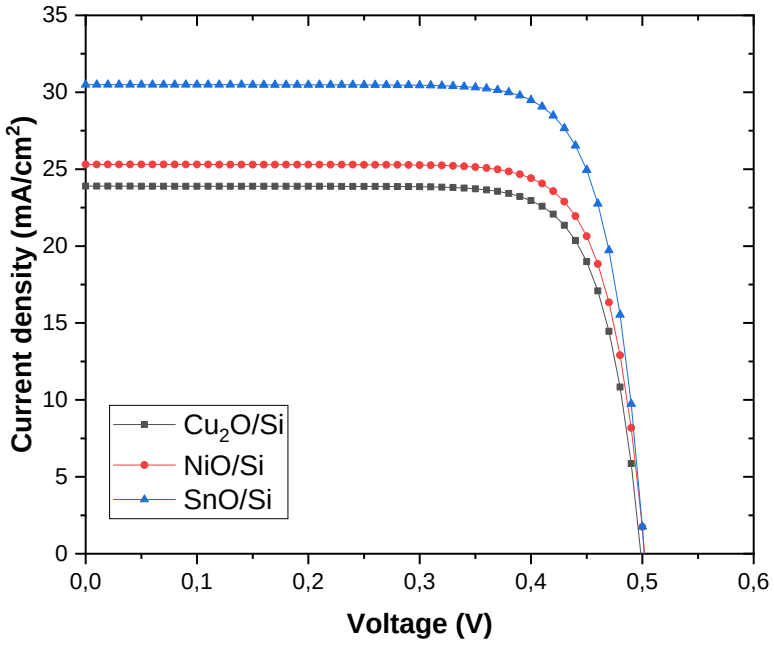
### 2.3.3.مقارنة الخاصية $(J-V)$ بين الخلايا الثلاث $SnO/Si, Cu_2O/Si, NiO/Si$ في الحالة الإبتدائية:

لم نعتبر وجود العيوب، الدراسة تعتبر في الحالة المثلى، السمك الإبتدائي للأكاسيد $0.1\ \mu m$ ولطبقة السيليكون $100\ \mu m$، التطعيم الإبتدائي على الترتيب: $10^{14}cm^{-3}; 10^{17}cm^{-3}$، و عمل الإنتزاع أنود/كاتود: $5.1/4.2\ eV$.




**الشكل.3.5:**بنية الخلية الشمسية SnO (p-type) / Si(n-type) في الحالة الإبتدائية مع أنود واحد من النحاس.

كملاحظة إستعملنا الأكسيد SnO عوض $SnO_2$(المتحدث عنه في الجانب النظري) لأن الثاني لم يعطي مردودا للتحويل و ذلك بسبب نطاقه الكبير مع الألفة الإلكترونية الكبيرة نسبيا .**الشكل.3.6** يظهر خصائص $(J-V)$ المحسوبة. بالمقارنة بين الخلايا الشمسية الثلاث نستنتج أن البنية SnO(p-type)/Si(n-type) تقدم أحسن نتائج من حيث $J_{SC}/V_{OC}$/FF و كفاءة التحويل التي تصل إلى 11.96% . أفضلية التيار الواضحة قد تعود لملاءمة قيمة نطاق الطاقة للأكسيد SnO و الألفة الإلكترونية .




**الشكل.3.6:**الخاصية $(J-V)$ مقارنة بين SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si في الحالة الإبتدائية.

يتم تلخيص الوسائط الكهربائية المتحصل عليها في الجدول التالي .

**جدول3.2:**مقارنة بين االوسائط الكهربائية للخلايا الشمسية SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si في الحالة الإبتدائية.

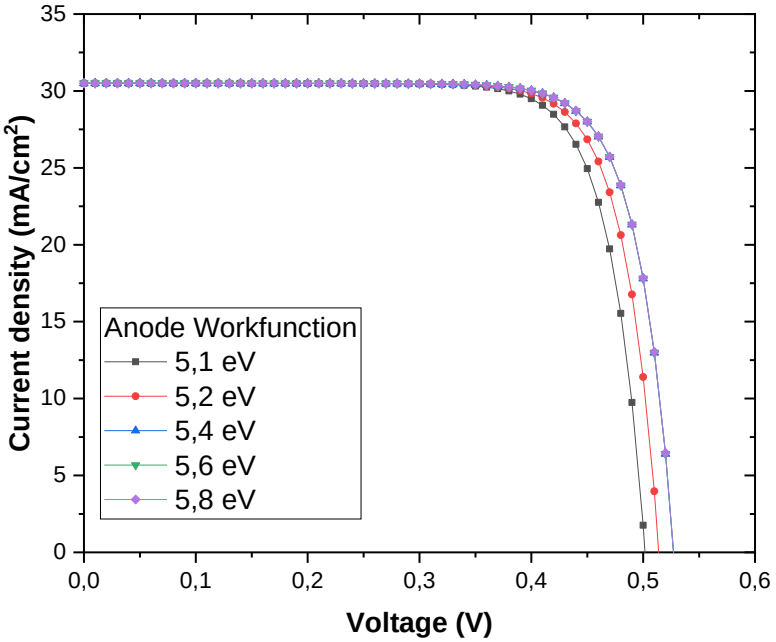
| **Cell thickness 100$\mu m$** | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | **FF** | **η%** |
|---|---|---|---|---|
| SnO/Si | 30.4976 | 0.501612 | 0.782034 | 11.9635 |
| $Cu_2O$/Si | 23.8949 | 0.498647 | 0.778016 | 9.27016 |
| NiO/Si | 25.3042 | 0.501996 | 0.77933 | 9.89953 |

### 3.3.3.دراسة تأثير عمل الإنتزاع الأنود/الكاثود:

في هذه المرحلة نتطرق إلى دراسة تأثير عمل الإنتزاع للأنود الذي يتراوح من 5.1 $eV$ إلى 5.8 $eV$ و تأثير عمل الإنتزاع للكاثود الذي يتراوح من 4.2 $eV$ إلى 3.4 $eV$ على الخلايا الثلاث بحيث سيتم عرض نتائج كل خلية على انفراد.

### 1.3.3.3.الخلية الشمسية SnO(p-type)/Si (n-type):

- **تأثير عمل الإنتزاع للأنود:**



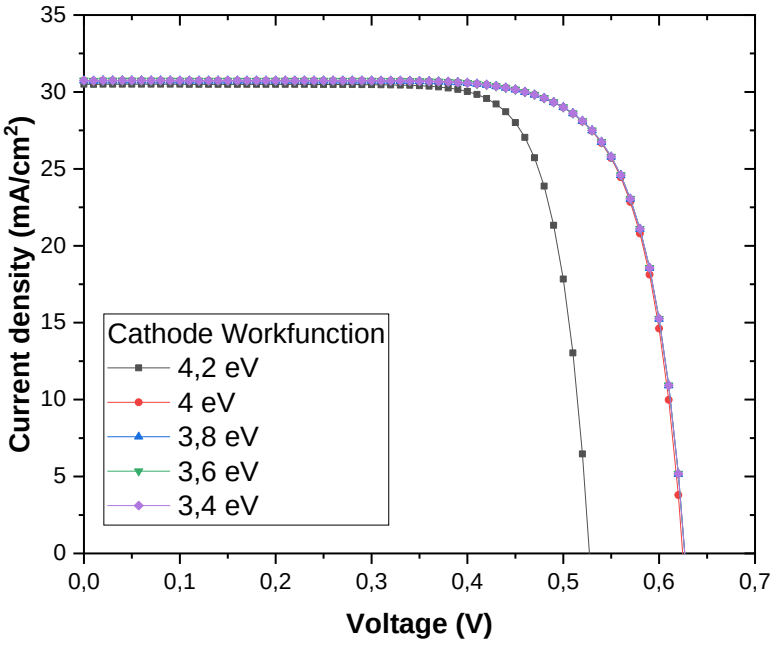

**الشكل.3.7:** الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود .

**جدول3.3:**الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود.

| Anode Work function ($eV$) | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 5.1 | 30.4976 | 0.501612 | 0.782034 | 11.9635 |
| 5.2 | 30.5019 | 0.513881 | 0.785483 | 12.3119 |
| 5.4 | 30.5045 | 0.527155 | 0.785423 | 12.6301 |
| 5.6 | 30.5045 | 0.527243 | 0.78539 | 12.6317 |
| 5.8 | 30.5045 | 0.527246 | 0.785388 | 12.6317 |

من النتائج التي تم الحصول عليها نلاحظ أن جميع الوسائط الكهربائية تتحسن بالتدريج كلما زدنا في تغير عمل الإنتزاع للأنود بحيث تصل كفاءة التحويل إلى 12.63%.

**تأثير عمل الإنتزاع للكاثود:**




**الشكل.3.8:** الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود .

**جدول3.4:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود.

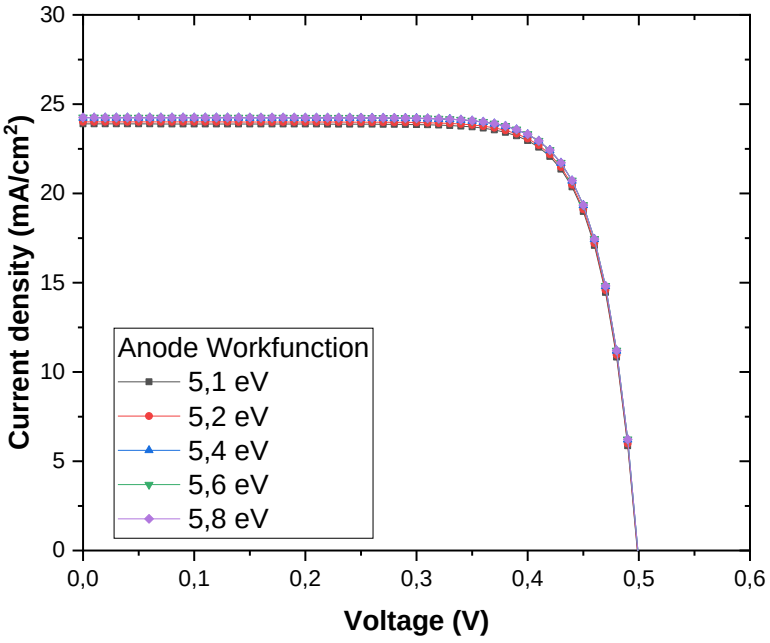
| Cathode Work function ($eV$) | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 4.2 | 30.5045 | 0.527246 | 0.785388 | 12.6317 |
| 4 | 30.7381 | 0.624557 | 0.760765 | 14.6049 |
| 3.8 | 30.7383 | 0.626736 | 0.758935 | 14.6207 |
| 3.6 | 30.7384 | 0.626738 | 0.758933 | 14.6208 |
| 3.4 | 30.7384 | 0.626739 | 0.758935 | 14.6208 |

مع اعتبار القيمة المثلى لعمل الإنتزاع للأنود 5.8 نلاحظ أن جميع الخصائص الكهربائية تتحسن كلما زدنا في تغير عمل الإنتزاع للكاثود إلى أن تصل كفاءة التحويل إلى 14.62%.

إذن كلما كان عمل الإنتزاع أكبر للأنود وأصغر للكاتود، يساعد ذلك على فصل أحسن بين الثقوب و الإلكترونات مما يحسن بشكل ملحوظ في جهد الدارة المفتوحة.

### 3.3.3.2.الخلية الشمسية $Cu_2O$ (p-type)/Si (n-type):

**تأثير عمل الإنتزاع للأنود:**




**الشكل.3.9:** الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية $Cu_2O$ (p-type)/Si (n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود .

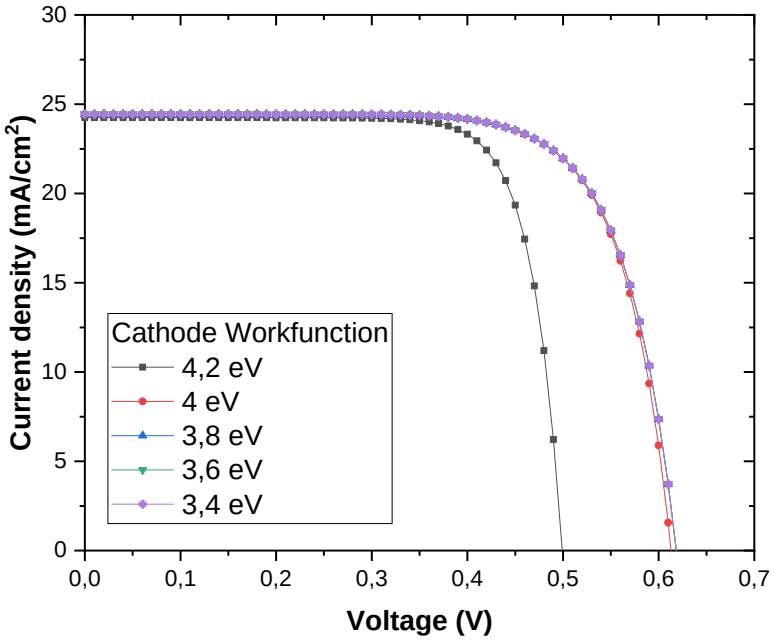
**جدول3.5:** الوسائط الكهربائية المحسوبة للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود.

| Anode Work function ($eV$) | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 5.1 | 23.8949 | 0.498647 | 0.778016 | 9.27016 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 5.2 | 24.0083 | 0.498812 | 0.778174 | 9.31913 |
| 5.4 | 24.2381 | 0.499145 | 0.778236 | 9.41535 |
| 5.6 | 24.2494 | 0.499161 | 0.778237 | 9.42005 |
| 5.8 | 24.2495 | 0.499161 | 0.778237 | 9.4201 |

من خلال **الجدول3.5** و النتائج المتحصل عليها نلاحظ أن جميع الوسائط الكهربائية تتحسن بزيادة تغير عمل الإنتزاع للأنود بحيث تصل كفاءة التحويل إلى 9.42%.

**تأثير عمل الإنتزاع للكاثود:**




**الشكل3.10:** الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية $Cu_2O$ (p-type)/Si (n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود .

**جدول3.6:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود.

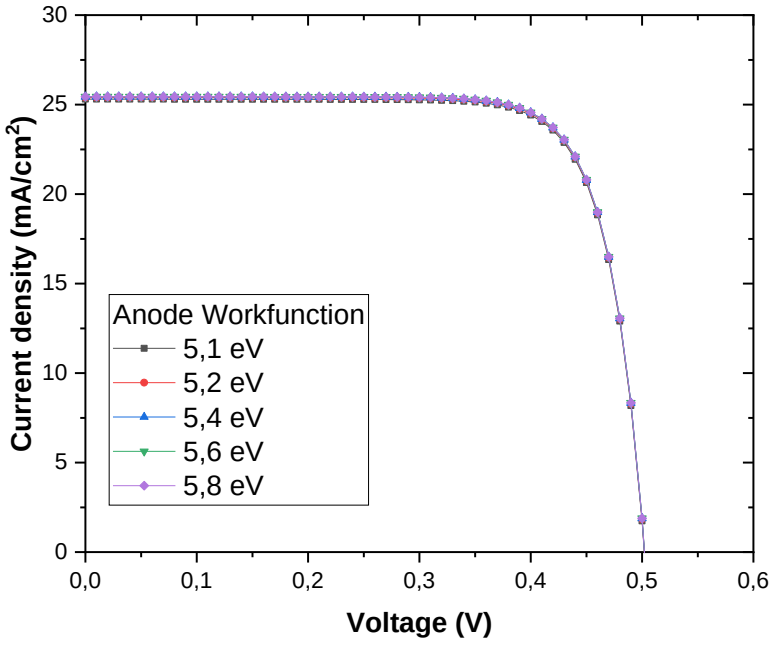
| Cathode Work function ($eV$) | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 4.2 | 24.2495 | 0.499161 | 0.778237 | 9.4201 |
| 4 | 24.4387 | 0.612879 | 0.732381 | 10.9696 |
| 3.8 | 24.4389 | 0.618421 | 0.726809 | 10.9847 |
| 3.6 | 24.4389 | 0.618428 | 0.726804 | 10.9847 |
| 3.4 | 24.4389 | 0.618429 | 0.726806 | 10.9848 |

في هذه الحالة أيضا نأخذ بعين الإعتبارالقيمة المثلى لعمل الإنتزاع للأنود 5.8 ونلاحظ أن جميع الوسائط الكهربائية تتحسن بزيادة تغير عمل الإنتزاع للكاثود بحيث تصل كفاءة التحويل إلى 10.98%.

### 3.3.3.3.الخلية الشمسية NiO (p-type)/Si (n-type):

**تأثير عمل الإنتزاع للأنود:**

من خلال **الجدول3.7** و النتائج المتحصل عليها نلاحظ أن جميع الوسائط الكهربائية تتحسن بزيادة تغير عمل الإنتزاع للأنود بحيث تصل كفاءة التحويل إلى 9.96%؛نستنتج أن إختيارنا لمادة النحاس كأنود كان وجيها و ذلك لدورها في تحسين كفاءة التحويل.




**الشكل.3.11:** الخاصية$(J-V)$ للخلية الشمسية NiO (p-type)/Si (n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود .

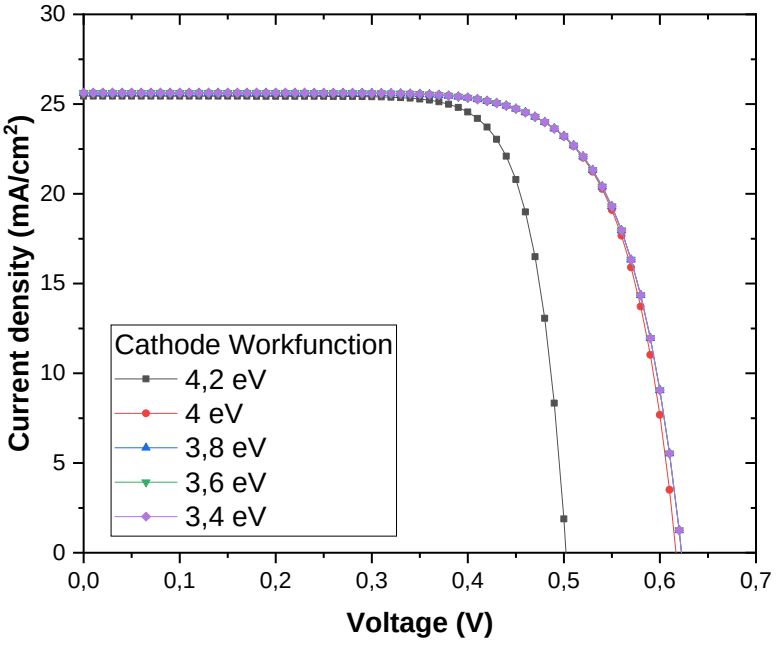
**جدول3.7:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO (p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للأنود.

| **Anode Work function ($eV$)** | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | **FF** | **η%** |
|---|---|---|---|---|
| 5.1 | 25.3042 | 0.501996 | 0.77933 | 9.89953 |
| 5.2 | 25.3933 | 0.502096 | 0.779511 | 9.93867 |
| 5.4 | 25.4437 | 0.502152 | 0.77956 | 9.96013 |
| 5.6 | 25.4446 | 0.502153 | 0.779567 | 9.96059 |
| 5.8 | 25.4451 | 0.502154 | 0.77957 | 9.96085 |

**تأثير عمل الإنتزاع للكاثود:**

مع اعتبار القيمة المثلى لعمل الإنتزاع للأنود 5.8 نلاحظ أن جميع الوسائط الكهربائية تتحسن كلما زدنا في تغير عمل الإنتزاع للكاثود بحيث تصل كفاءة التحويل إلى 11.60%.

و منه نشير هنا أيضا إلى مادة الكاثود "الألمنيوم" تحسن و تعطي كفاءة تحويل أفضل.




**الشكل.3.12:** الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية NiO (p-type)/Si (n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود.

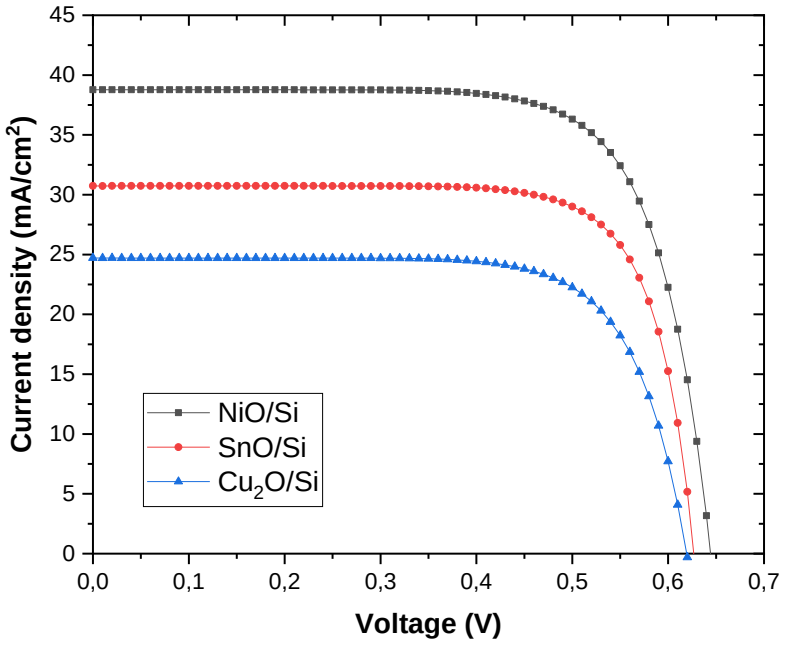
**جدول3.8:** الوسائط الكهربائية المحسوبة للخلية الشمسية NiO (p-type)/Si(n-type) من أجل مختلف قيم عمل الإنتزاع للكاثود.

| Cathode Work function $(eV)$ | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 4.2 | 25.4451 | 0.502154 | 0.77957 | 9.96085 |
| 4 | 25.6201 | 0.61672 | 0.733781 | 11.594 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 3.8 | 25.6203 | 0.622424 | 0.727991 | 11.6091 |
| 3.6 | 25.6203 | 0.62243 | 0.727987 | 11.6091 |
| 3.4 | 25.6203 | 0.622431 | 0.727989 | 11.6092 |

**4.3.3.3.مقارنة الخاصية $(J-V)$ بين الخلايا الثلاث $SnO/Si, Cu_2O/Si, NiO/Si$ عند عمل الإنتزاع للأنود 5.8/للكاثود 3.4:**

نأخذ بعين الإعتبار القيم المثلى لكل من عمل الإنتزاع للأنود 5.8/ للكاثود 3.4 ،بالمقارنة بين النتائج المتحصل عليها في **الجدول3.9** بالنسبة للخلايا الشمسية الثلاث نلاحظ أن البنية SnO(p-type)/Si(n-type) تقدم أفضل وسائط كهربائية حيث تصل كفاءة التحويل إلى 14.62%.




**الشكل3.13 :** الخاصية $(J-V)$ ؛مقارنة بين SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si عند عمل الإنتزاع للأنود 5.8/ للكاثود 3.4.

**جدول3.9:** مقارنة بين الوسائط الكهربائية للخلايا الشمسية SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si عند عمل الإنتزاع للأنود 5.8/ للكاثود 3.4.

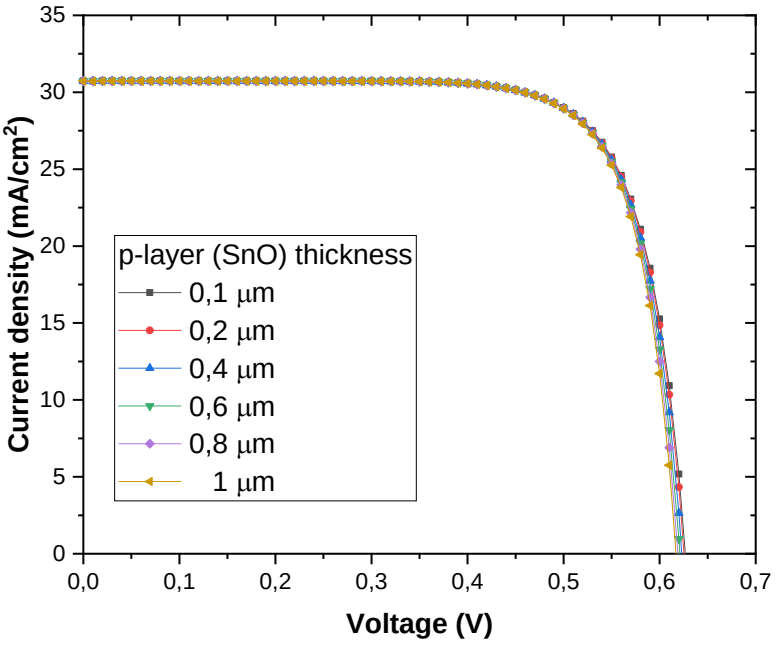
| **Cell thickness $100\mu m$** | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | **FF** | **η%** |
|---|---|---|---|---|
| SnO/Si | 30.7384 | 0.626739 | 0.758935 | 14.6208 |
| $Cu_2O$/Si | 24.4389 | 0.618429 | 0.726806 | 10.9848 |
| NiO/Si | 25.6203 | 0.622431 | 0.727989 | 11.6092 |

### 4.3.3.دراسة تأثير السمك :

يتغير سمك طبقة الأكسيد (p-type) (SnO-$Cu_2O$-NiO) من $0.1\mu m$إلى $1\mu m$،و يتغير سمك طبقة (n-type) Si من $100\mu m$ إلى $500\mu m$.

#### 1.4.3.3.تأثير سمك طبقة SnO:

في هذه المرحلة ندرس تأثير سمك طبقة SnO(p-type) ، الخاصية $(J-V)$ لمختلف قيم سمك الأكسيد SnOموضحة في **الشكل.3.14**.

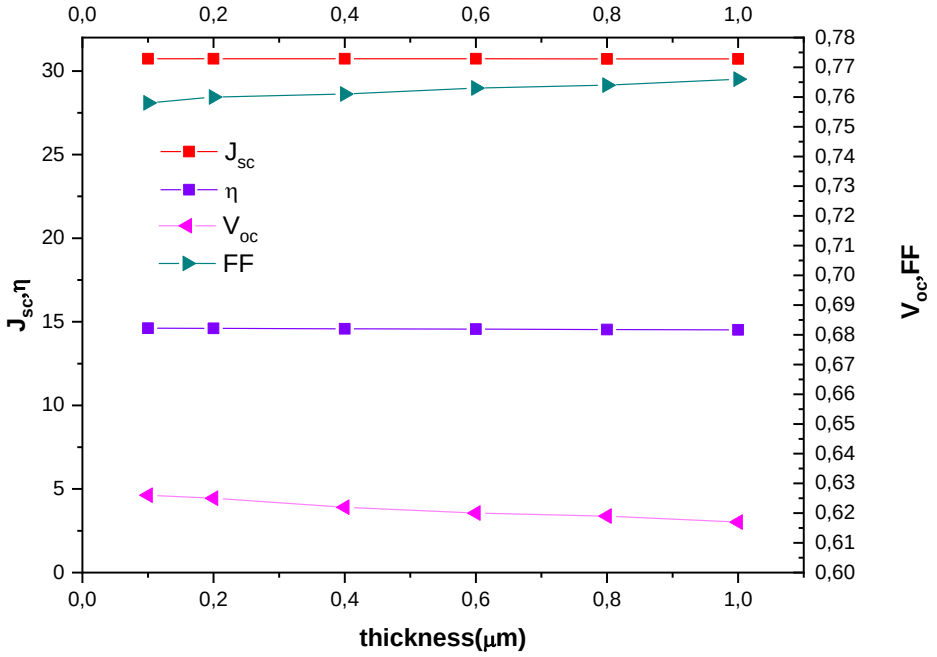



**الشكل.3.14:**تأثير سمك طبقة SnO(p-type) على الخاصية $(J-V)$.

**جدول 3.10:**الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة SnO.

| **SnO Thickness** | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | **FF** | **η%** |
|---|---|---|---|---|
| 0.1 | 30.7384 | 0.626739 | 0.758935 | 14.6208 |
| 0.2 | 30.7368 | 0.625355 | 0.760107 | 14.6103 |
| 0.4 | 30.7335 | 0.622984 | 0.761998 | 14.5896 |
| 0.6 | 30.7303 | 0.620993 | 0.763428 | 14.5687 |
| 0.8 | 30.727 | 0.619053 | 0.76481 | 14.5479 |
| 1 | 30.7238 | 0.617071 | 0.766257 | 14.5273 |

من خلال **الشكل.3.14** نلاحظ أن كل من $FF, J_{SC}, V_{OC}$ تتغير بشكل طفيف أثناء المحاكاة ؛ وتتناقص كفاءة التحويل بشكل طفيف من 14.62% إلى 14.52% .



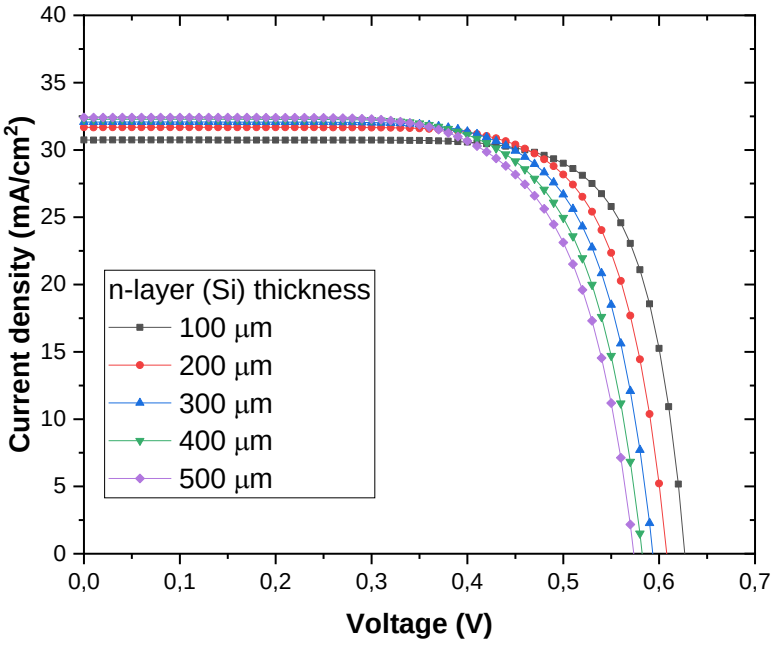

**الشكل.3.15:**تأثيرتغيرات سمك طبقة SnO(p-type) على الوسائط الكهربائية .

### 2.4.3.3.تأثير سمك طبقة Si للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type):

تم الإحتفاظ بسمك طبقة SnO(p-type) عند $0.1\mu m$. الخصائص $(J-V)$ لمختلف قيم سمك Si موضحة في **الشكل.3.16**.

من **الشكل.3.16** نلاحظ زيادة في $J_{SC}$ من $(mA/cm^2)$ 30.73 إلى $(mA/cm^2)$ 32.41 ، على عكس $V_{OC}$,FF تتناقص كما هو موضح في **الجدول 3.11**.أما بالنسبة لكفاءة التحويل سجلنا انخفاضا يتراوح من 14.62% إلى 12.67%.

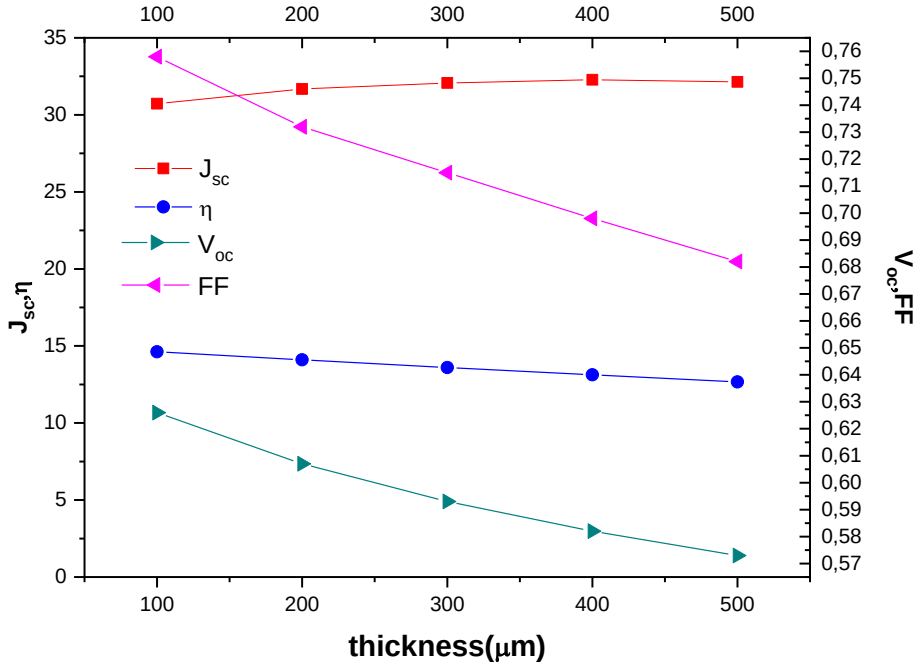
يمكن تفسير ذلك بأن زيادة سمك Si يعمل على تحسين الإمتصاص وتوالد الحاملات الحرة، لكن قد يزيد في تأثيرات مقاومة التسلسل للخلية ككل والتي تؤثر على قيمة الجهد ومعامل الإمتلاء.




**الشكل.3.16:**تأثير سمك طبقة Si (n-type) على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type).

**جدول 3.11:**الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة Si.

| Si Thickness | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 30.7384 | 0.626739 | 0.758935 | 14.6208 |
| 200 | 31.6857 | 0.607956 | 0.73247 | 14.1099 |
| 300 | 32.0776 | 0.593351 | 0.715038 | 13.6095 |
| 400 | 32.2854 | 0.582296 | 0.698917 | 13.1394 |
| 500 | 32.4117 | 0.573595 | 0.682 | 12.6792 |

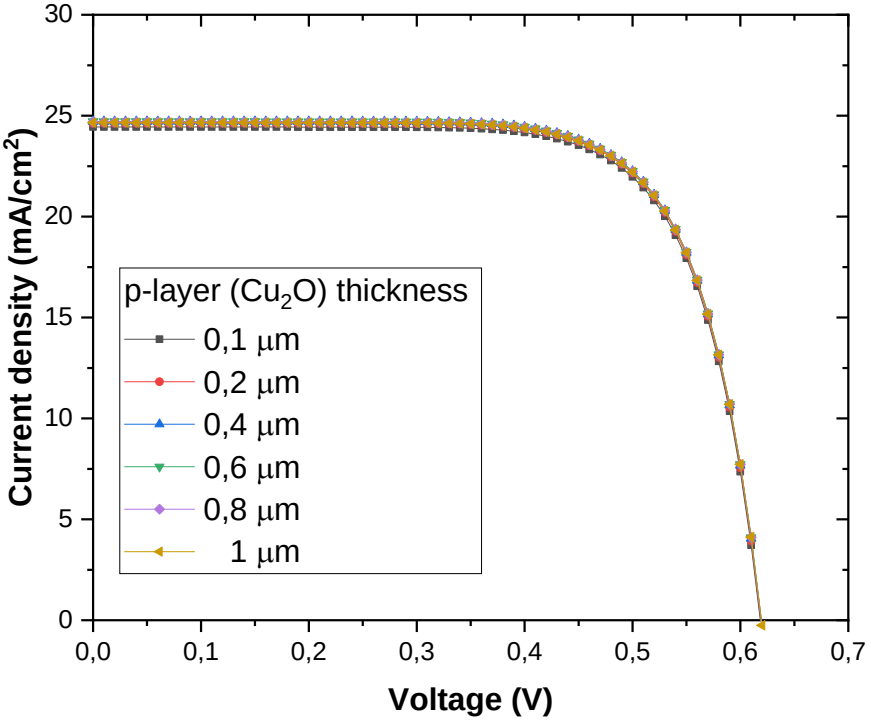



**الشكل.3.17:** تأثيرتغيرات سمك طبقة Si (n-type) على الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si (n-type).

### 3.4.3.3.تأثير سمك طبقة $Cu_2O$:

يوضح **الشكل.3.18** تأثير سمك طبقة $Cu_2O$(p-type) على الخاصية $(J-V)$. بشكل مشابه لسلوك SnO، سمك Cu2O أيضا ذو تأثير ضعيف.

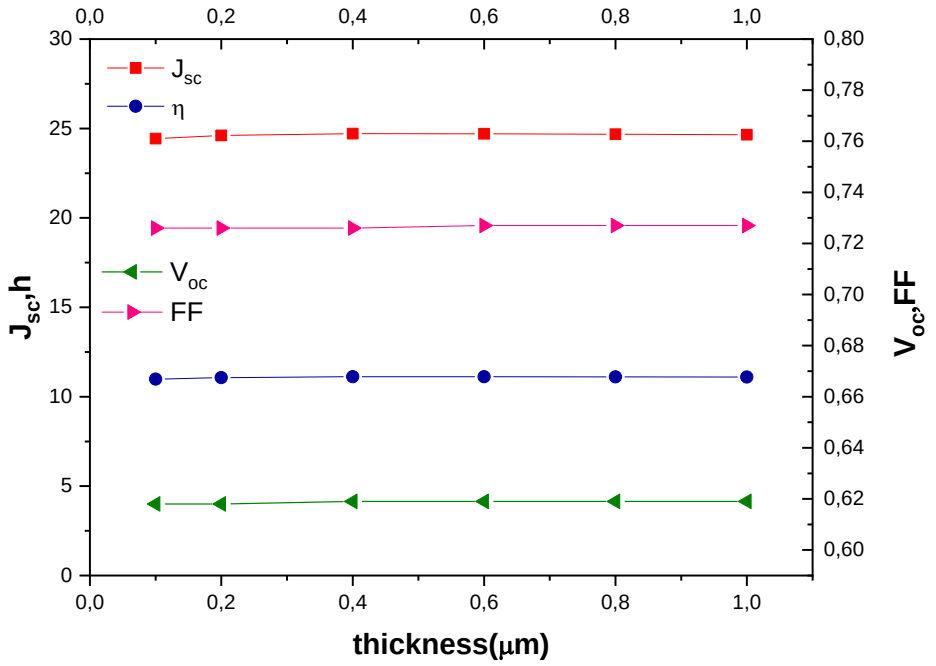
نلاحظ أن FF,$V_{OC}$ تضل ثابتة اثناء المحاكاة بينما هناك زيادة طفيفة في $J_{SC}$ من 24.43 $mA/cm^2$ إلى 24.65 $mA/cm^2$. تتحسن كفاءة التحويل تدريجيا بزيادة السمك من 10.98% إلى 11.10%،النتائج ملخصة في **الجدول 3.12** أسفله.




**الشكل.3.18:**تأثير سمك طبقة $Cu_2O$(p-type) على الخاصية $(J-V)$.

**جدول 3.12:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة $Cu_2O$.

| Cu2O Thickness | $J_{sc}(mA/cm^2)$ | $V_{oc}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 0.1 | 24.4389 | 0.618429 | 0.726806 | 10.9848 |
| 0.2 | 24.6191 | 0.61889 | 0.726921 | 11.0757 |
| 0.4 | 24.7127 | 0.619213 | 0.726999 | 11.1249 |
| 0.6 | 24.7097 | 0.619318 | 0.727029 | 11.1259 |
| 0.8 | 24.684 | 0.619372 | 0.727049 | 11.1156 |
| 1 | 24.6529 | 0.619413 | 0.72707 | 11.1026 |

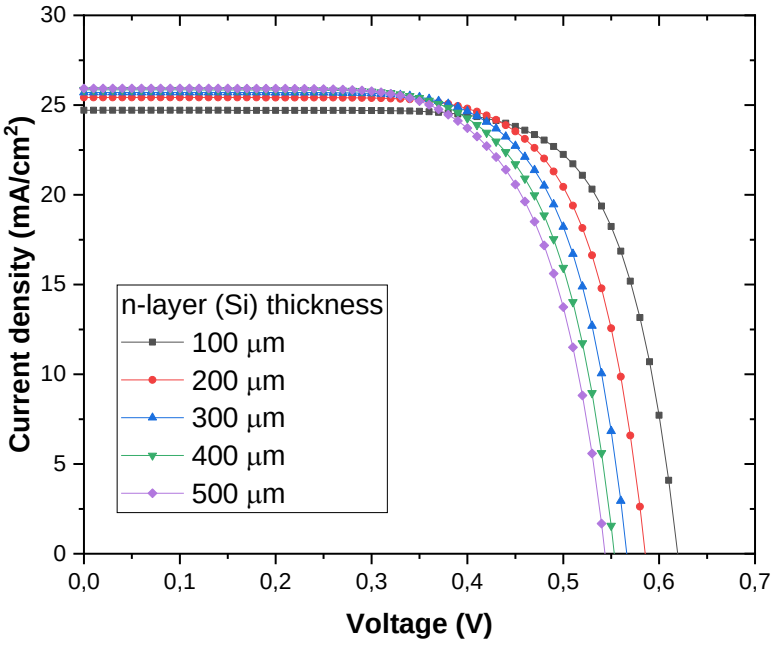



**الشكل.3.19:**تأثيرتغيرات سمك طبقة $Cu_2O$(p-type) على الوسائط الكهربائية .

### 4.4.3.3.تأثير سمك Si للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type):

تم الإحتفاظ بسمك طبقة $Cu_2O$ (p-type) عند $0.6\mu m$ ، **الشكل.3.20** يوضح تأثير سمك طبقة Si (n-type) على الخاصية $(J-V)$.

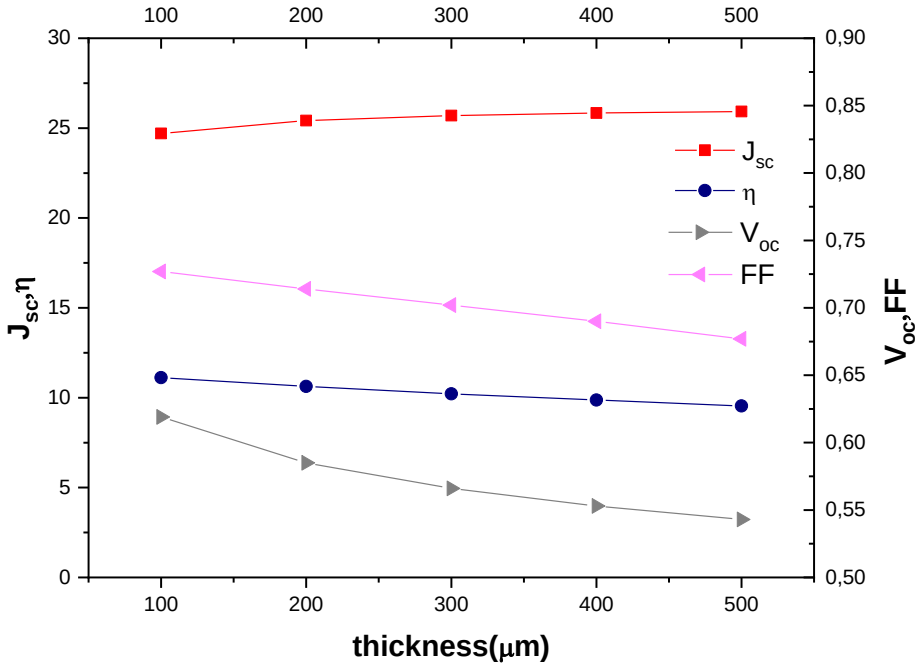
من الشكل لوحظ أن $J_{SC}$ يسجل زيادة قليلة من $24.70\ mA/cm^2$ إلى $25.92\ mA/cm^2$ و هذا إبتداءا من السمك $200\mu m$ ؛بينما تتناقص باقي الوسائط الكهربائية $V_{OC}$ من $0.61\ V$ إلى $0.54\ V$،FF من 0.72 إلى 0.67 ، أيضا بالنسبة لكفاءة التحويل كلما زاد السمك تتناقص من 11.12% إلى 9.54% .النتائج ملخصة في **الجدول3.13** أسفله. قد يعود ذلك للتأثيرات المقاومية على التسلسل كما أسلفنا سابقا.




**الشكل.3.20:**تأثير سمك طبقة Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type).

**جدول3.13:**الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة Si.

| Si Thickness | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 24.7097 | 0.619318 | 0.727029 | 11.1259 |
| 200 | 25.4257 | 0.585447 | 0.714268 | 10.6322 |
| 300 | 25.7086 | 0.56625 | 0.702637 | 10.2286 |
| 400 | 25.8491 | 0.553188 | 0.690663 | 9.87607 |
| 500 | 25.9283 | 0.543571 | 0.677081 | 9.54269 |

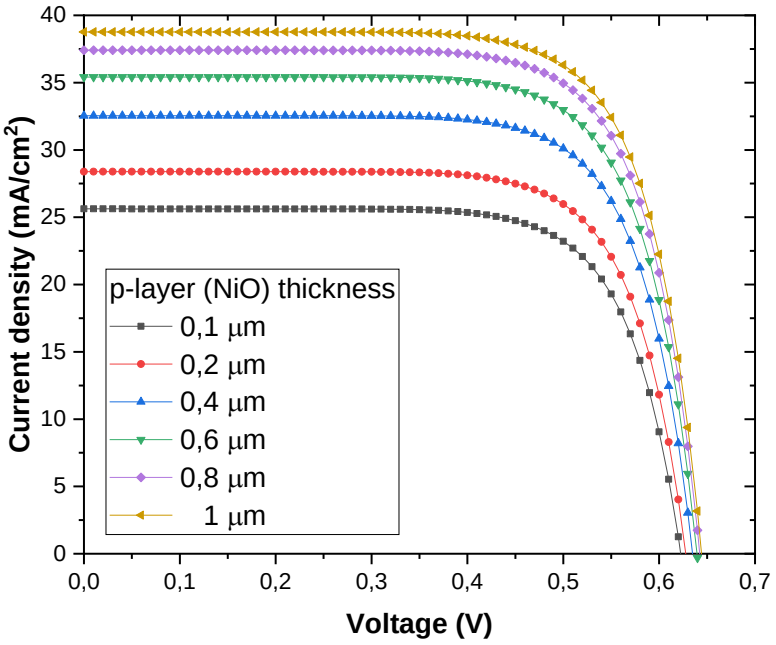



**الشكل.3.21:** تأثيرتغيرات سمك طبقة Si (n-type) على الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si (n-type).

### 5.4.3.3.تأثير سمك طبقة NiO :

خلافا مع الأكسيدين السابقين ومن خلال **الشكل.3.22** لوحظ زيادة كبيرة في $J_{SC}$ من 25.62 $mA/cm^2$ إلى 38.76 $mA/cm^2$، تعود إلى إمتصاص الفوتونات الساقطة على الخلية الشمسية بالتالي تولد عدد كبير من الحاملات،كذلك سجلنا تحسن في باقي الوسائط الكهربائية $V_{OC}$ من 0.62 $V$ إلى 0.64 $V$، FF من 0.72 إلى 0.73؛ أما بالنسبة لكفاءة التحويل يوجد تحسن كبير من 11.60%إلى 18.29% مما يؤكد أن زيادة السمك تحسن من المردود .يلخص **الجدول3.14** أعلاه الوسائط الكهربائية المتحصل عليها.

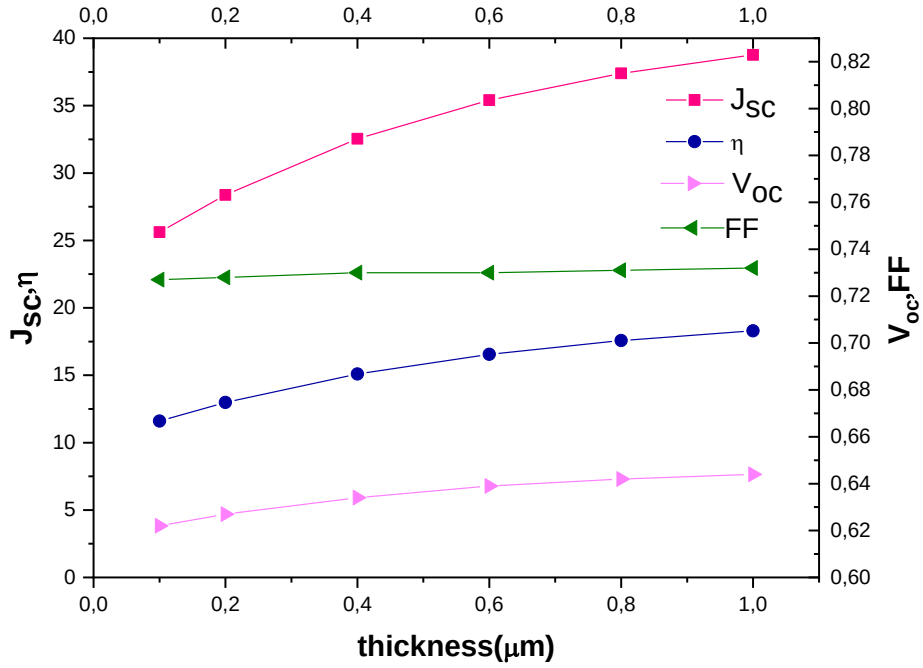
بما أن أكسيد النيكل يتميز بنطاق طاقي كبير نسبيا (3.8 $eV$) مقارنة مع الأكسيدين السابقين، وألفة إلكترونية أصغر، يبدو أن زيادة سمكه وإعتباره كنافذة ضوئية، تحسن من الخواص الضوئية للخلية بدليل الزيادة المعتبرة في التيار، والألفة الألكترونية الصغيرة مع نطاق الطاقة الكبير تشكل حاجزا جيدا أمام الإلكترونات المتولدة في السيليكون وبالتالي فصل جيد للثقوب وتجميعها وتخفيض في الالتحامات عند مستوى الوصلة.




**الشكل.3.22:** تأثير سمك الطبقة NiO(p-type) على الخاصية $(J-V)$.

**جدول3.14:**الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقةNiO .

| NiO Thickness | $J_{sc}(mA/cm^2)$ | $V_{oc}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 0.1 | 25.6203 | 0.622431 | 0.727989 | 11.6092 |
| 0.2 | 28.3865 | 0.627785 | 0.728695 | 12.9858 |
| 0.4 | 32.5453 | 0.634853 | 0.730558 | 15.0944 |
| 0.6 | 35.4158 | 0.639513 | 0.730886 | 16.5537 |
| 0.8 | 37.4058 | 0.642304 | 0.731938 | 17.5855 |
| 1 | 38.7695 | 0.644197 | 0.732458 | 18.2933 |

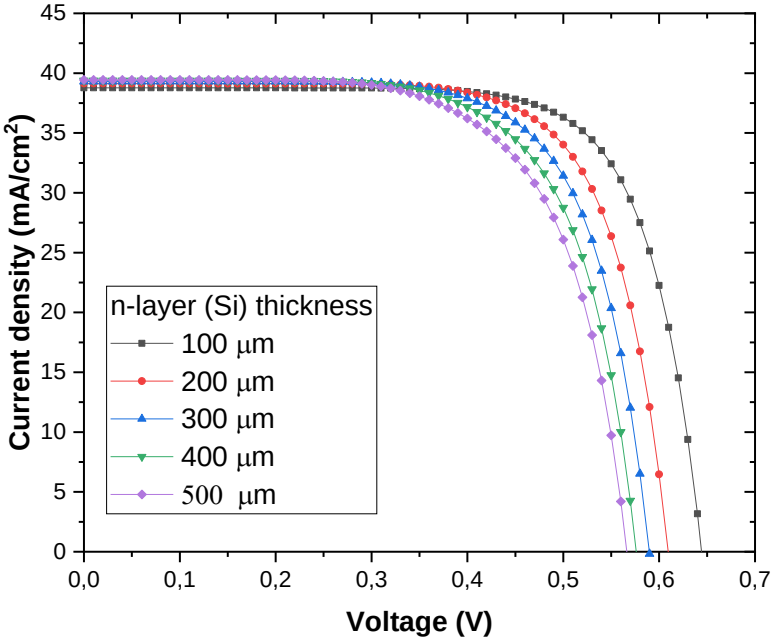



**الشكل.3.23:** تأثيرتغيرات سمك طبقة NiO(p-type) على الوسائط الكهربائية .

### 6.4.3.3.تأثير سمك طبقة Si للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type):

إحتفظنا بسمك طبقة NiO (p-type) عند $1\mu m$؛إنطلاقا من **الشكل.3.24** يزداد $J_{SC}$ بداية من السمك $200\mu m$ من38.76 $mA/cm^2$ إلى$mA/cm^2$ 39.43 على عكس باقي الوسائط الكهربائية التي سجلت إنخفاض $V_{OC}$ من 0.64 $V$ إلى 0.56 $V$،FF من 0.73 إلى 0.66؛كفاءة التحويل كذلك كلما زدنا في السمك كلما إنخفضت بنسبة كبيرة من 18.29%إلى 14.84%،بالتالي نستنتج أن الزيادة في سمك طبقة Si يؤثر سلبا على كفاءة التحويل.

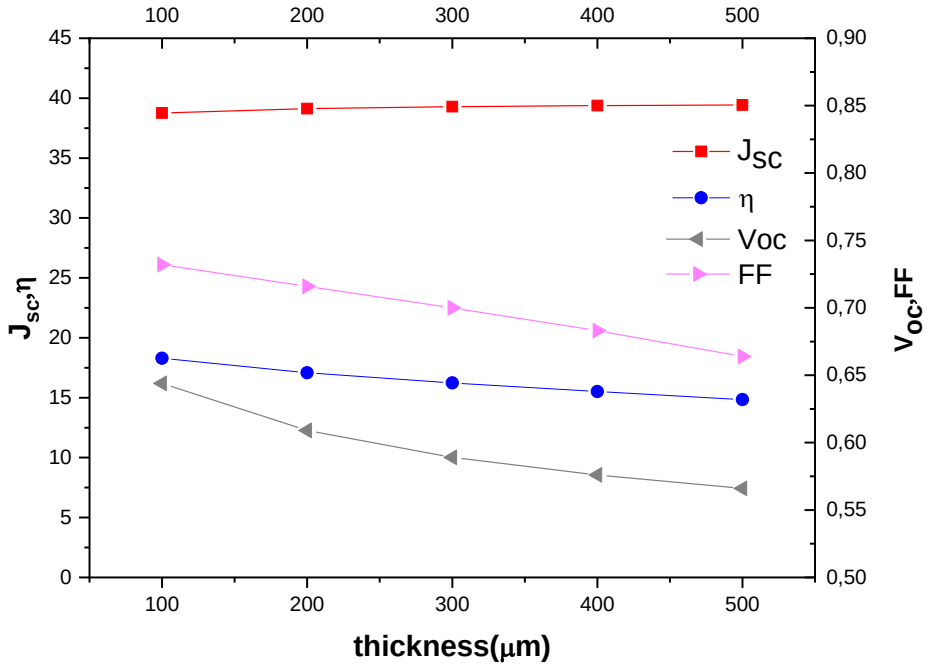
إذن تأثير طبقة السيليكون هنا لا يختلف عن الحالتين السابقتين لكن حدته أكثر.على الجهد ومعامل الإمتلاء.




**الشكل.3.24:** تأثير سمك طبقة Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية NiO(p-type)-Si(n-type).

**جدول3.15:**الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات سمك طبقة Si.

| Si Thickness | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 38.7695 | 0.644197 | 0.732458 | 18.2933 |
| 200 | 39.1383 | 0.609472 | 0.716193 | 17.0839 |
| 300 | 39.2963 | 0.589741 | 0.700569 | 16.2354 |
| 400 | 39.3831 | 0.576147 | 0.683806 | 15.5159 |
| 500 | 39.4368 | 0.566307 | 0.664799 | 14.8472 |

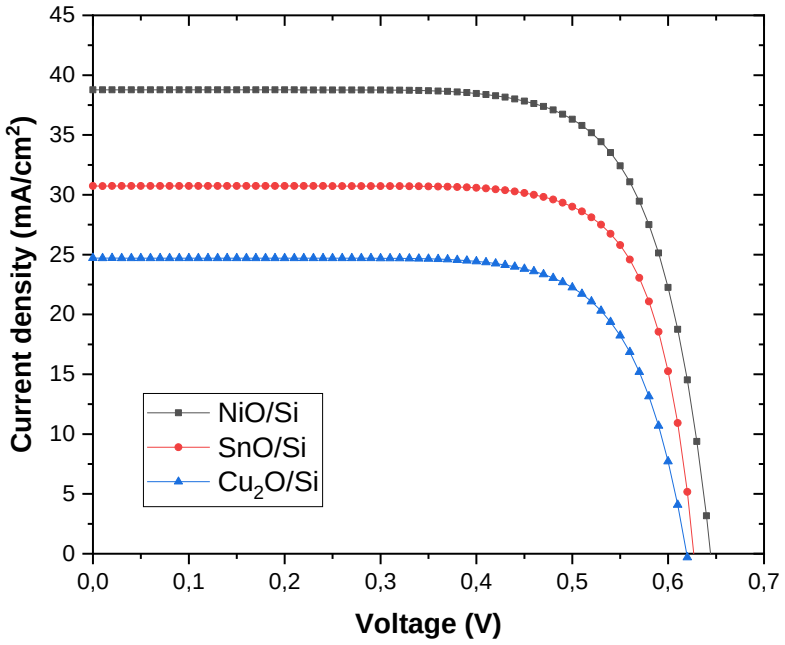



**الشكل.3.25:**تأثيرتغيرات سمك طبقة Si (n-type) على الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si (n-type).

### 7.4.3.3.مقارنة الخاصية $(J-V)$ بين الخلايا الثلاث $SnO/Si,Cu_2O/Si,NiO/Si$ عند القيم المثالية للسمك لكل خلية:

من النتائج المتحصل عليها نجد أن الخلية الشمسية NiO/Si تحتوي على أفضل الوسائط الكهربائية مقارنة بالخلية الشمسية $Cu_2O/Si$؛ SnO/Si.

بالنسبة للخلية الشمسية NiO/Si سمك طبقة الأكسيد NiO يؤثر إيجابا على كفاءة التحويل من 11.60% قبل دراسة تأثير السمك إلى 18.29% بعد تطبيق تأثير السمك ، أيضا نفس الشيء بالنسبة للخلية الشمسية $Cu_2O/Si$ تزداد كفاءة التحويل من 10.98% إلى 11.12% .على عكس الخلية الشمسية SnO/Si التي تأثيرات السمك لم تحسن في كفاءة التحويل 14.62% بالعكس أدت لإنخفاض طفيف إلى 14.52% .




**الشكل.3.26:** الخاصية $(J-V)$؛مقارنة بين SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si عند القيم المثالية للسمك لكل خلية.

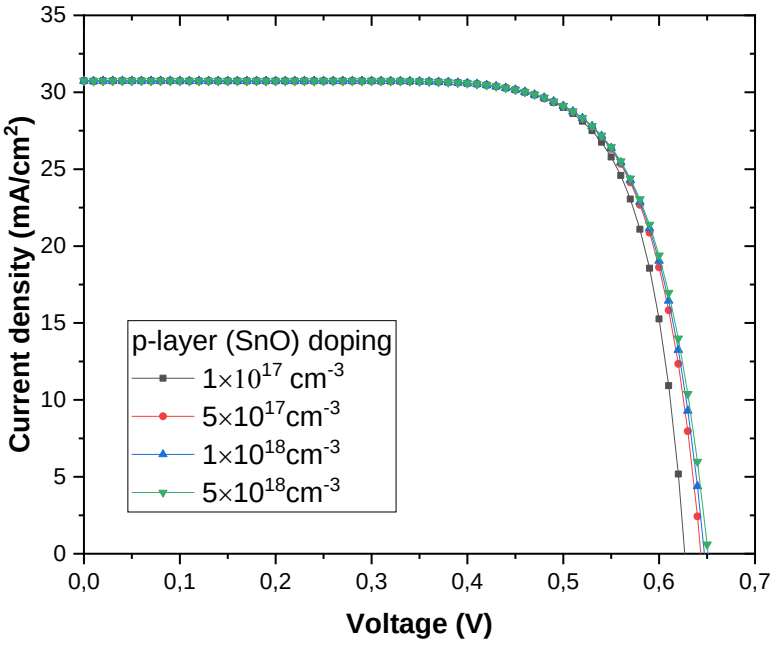
**جدول3.16:** مقارنة بين الوسائط الكهربائية للخلايا الشمسية SnO/Si, $Cu_2O$/Si ,NiO/Si عند عند القيم المثالية للسمك لكل خلية.

| Cell thickness 100 $\mu m$ | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| SnO/Si | 30.7384 | 0.626739 | 0.758935 | 14.6208 |
| Cu2O/Si | 24.7097 | 0.619318 | 0.727029 | 11.1259 |
| NiO/Si | 38.7695 | 0.644197 | 0.732458 | 18.2933 |

### 5.3.3.دراسة تأثير التطعيم SnO(p-type)/Si(n-type):

### 1.5.3.3.تأثير تطعيم الأكسيد SnO(p-type) :

في هذه المرحلة ندرس تأثيرتطعيم طبقة الأكسيد SnO(p-type) حيث قمنا بزيادة التطعيم تدريجيا خلال المحاكاة .كما هو موضح في **الجدول3.17** .



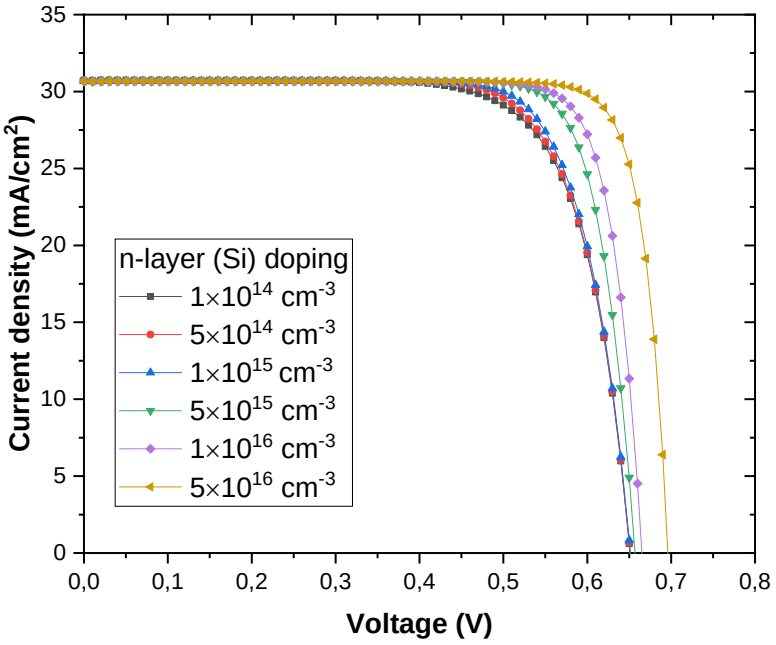

**الشكل.3.27:**تأثير تغيرات تطعيم الأكسيد SnO(p-type) على الخاصية$(J-V)$ .

**الجدول3.17:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم الأكسيد SnO(p-type).

| Doping of SnO $cm^{-3}$ | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 1e17 | 30.7384 | 0.626739 | 0.758935 | 14.6208 |
| 5e17 | 30.7385 | 0.643447 | 0.743792 | 14.7112 |
| 1e18 | 30.7385 | 0.647173 | 0.740343 | 14.7277 |
| 5e18 | 30.7385 | 0.65092 | 0.73676 | 14.7413 |

من خلال **الشكل.3.27** نلاحظ أن $J_{SC}$ يضل ثابتا أثناء المحاكاة على عكس باقي الوسائط الكهربائية ؛يزداد $V_{OC}$ قليلا من $(V)$ 0.62إلى $(V)$ 0.65 .أما FF تناقص طفيف جدا من 0.75إلى 0.73،تتحسن كفاءة التحويل قليلا من 14.62% إلى 14.74% .على العموم الزيادة في تطعيم الأكسيد SnO(p-type) تحسن و لو بنسبة قليلة من كفاءة التحويل ومعروف أن أكثر الوسائط تأثرا به هو جهد الدارة المفتوحة.

### 2.5.3.3.تأثير تطعيم السيليكون Si(n-type) للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type):




**الشكل.3.28:** تأثير تغيرات تطعيم السيليكون Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type).

نغير تطعيم السيليكون Si من 1e14 $cm^{-3}$ إلى 5e16 $cm^{-3}$مع إضافة التطعيم الخلفي 5e18 $cm^{-3}$ لاحقا؛نحتفظ بتطعيم الأكسيد SnO عند5e18 $cm^{-3}$،نلاحظ أن $J_{SC}$ يتناقص قليلا من 30.73 $(mA/cm^2)$ إلى 30.66 $(mA/cm^2)$ يعود هذا التناقص لزيادة الإلتحامات بشكل طفيف بين الثقوب الأغلبية في هذه الطبقة و الإلكترونات المتولدة والمتجمعة فيها .الزيادة في تطعيم Si تفيد و تحسن في $V_{OC}$من 0.65$(V)$ إلى 0.69$(V)$،FF من 0.73 إلى 0.84 ،أيضا كفاءة التحويل تسجل تحسن ملحوظ جداا من 14.74% إلى 18% بفضل معامل الإمتلاء.النتائج ملخصة في **الجدول3.18**.

زيادة التطعيم تخفض من مقاومية هذه المنطقة، وبالتالي يتحسن كل من الجهد ومعامل الإمتلاء.

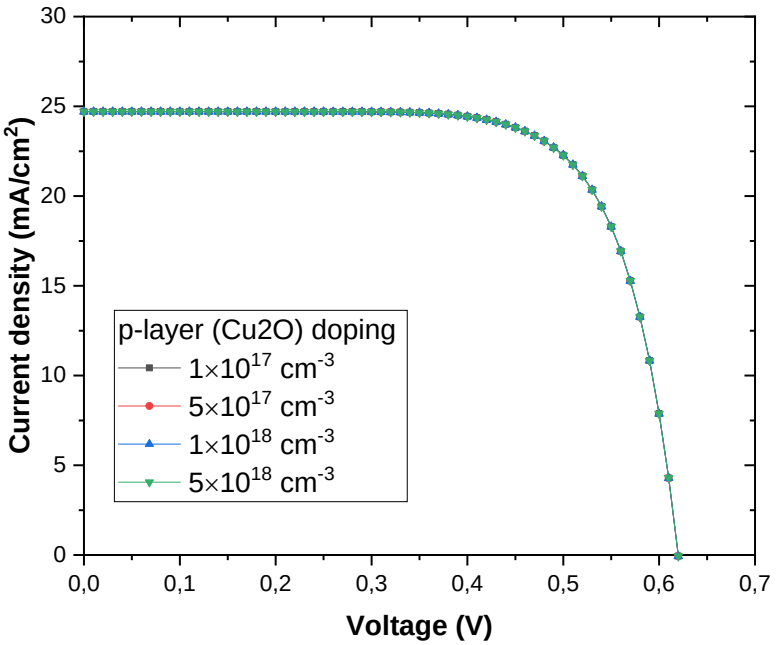
الملاحظ أيضا أن التطعيم الخلفي لم يضف تحسينا ملحوظا هنا خلافا مع الخلية الشمسية السليكونية المتجانسة، ويمكن أن يعود ذلك للدور الفعال الذي يلعبه الأكسيد في عملية التجميع المنتقاة للثقوب. إذن يمكن الإستغناء عنه ، فهو مكلف تجريبيا وقد يؤثر كذلك على البنية.

**جدول3.18:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم السيليكون Si و التطعيم الخلفي .

| Doping of Si $cm^{-3}$ | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 1e14 | 30.7385 | 0.65092 | 0.73676 | 14.7413 |
| 5e14 | 30.6931 | 0.651008 | 0.748863 | 14.9634 |
| 1e15 | 30.6821 | 0.651256 | 0.765252 | 15.2912 |
| 5e15 | 30.6687 | 0.656931 | 0.811884 | 16.3572 |
| 1e16 | 30.6658 | 0.665252 | 0.825648 | 16.8436 |
| 5e16 | 30.662 | 0.695996 | 0.843256 | 17.9956 |
| Front and back doping of 5e18 $cm^{-3}$ | 30.6642 | 0.696231 | 0.843239 | 18.0026 |

### 6.3.3.دراسة تأثير التطعيم $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type):

### 1.6.3.3.تأثير تطعيم الأكسيد $Cu_2O$ (p-type) :



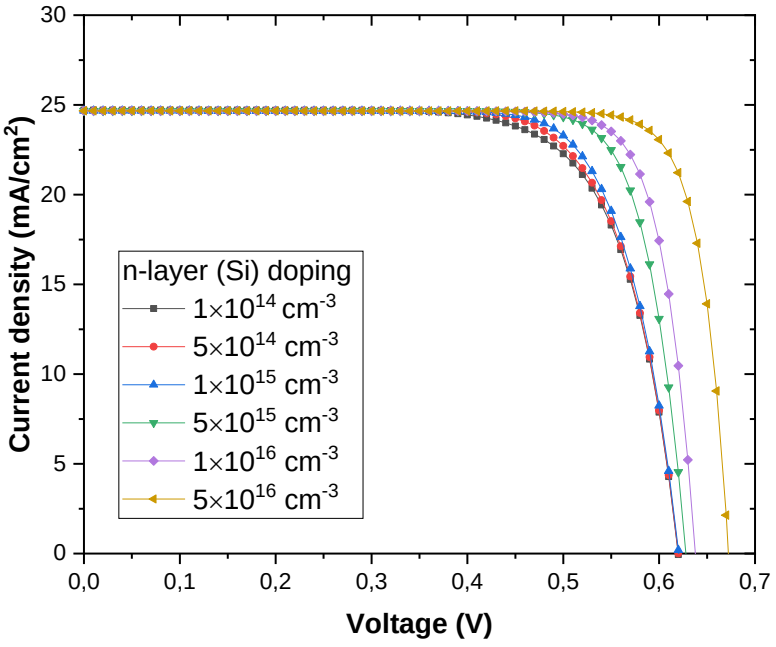

**الشكل3.29:** تأثير تغيرات تطعيم الاكسيد $Cu_2O$ على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type).

لوحظ أن الزيادة في تطعيم الأكسيد $Cu_2O$ لم يغير شيئا بحيث أن كل الوسائط الكهربائية تحافظ على ثباتها أثناء المحاكاة .**الجدول3.19** يلخص النتائج المتحصل عليها.

**جدول3.19:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم الأكسيد $Cu_2O$.

| Doping of Cu2O $cm^{-3}$ | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 1e17 | 24.7106 | 0.619859 | 0.727188 | 11.1384 |
| 5e17 | 24.7062 | 0.619852 | 0.727192 | 11.1364 |
| 1e18 | 24.7049 | 0.61985 | 0.727193 | 11.1358 |
| 5e18 | 24.7028 | 0.619846 | 0.727191 | 11.1347 |

### 2.6.3.3.تأثير تطعيم السيليكون Si(n-type) للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type) :




**الشكل3.30:** تأثير تغيرات تطعيم السيليكون Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type).

نحتفظ بتطعيم الأكسيد $Cu_2O$ عند $1e17 \quad cm^{-3}$ من خلال **الشكل.3.30** نلاحظ تحسن في الوسائط الكهربائية التالية $V_{OC}$ من $0.61(V)$إلى $0.67(V)$ ، FF من 0.72 إلى 0.83 ؛تتحسن كفاءة التحويل أيضا من 11.13%إلى 13.90% ، ويعود ذلك لتناقص التأثيرات المقاومية على التسلسل. بالمقابل يتناقص Jsc بشكل طفيف من $(mA/cm^2)$ 24.71 إلى $(mA/cm^2)$ 24.66 بسبب قليل من الإلتحامات.

الملاحظ أيضا أن التطعيم الخلفي لم يضف تحسينا ملحوظا هنا خلافا مع الخلية الشمسية السليكونية المتجانسة، ويمكن أن يعود ذلك للدور الفعال الذي يلعبه الأكسيد في عملية التجميع المنتقاة للثقوب. إذن يمكن الإستغناء عنه ، فهو مكلف تجريبيا وقد يؤثر كذلك على البنية.

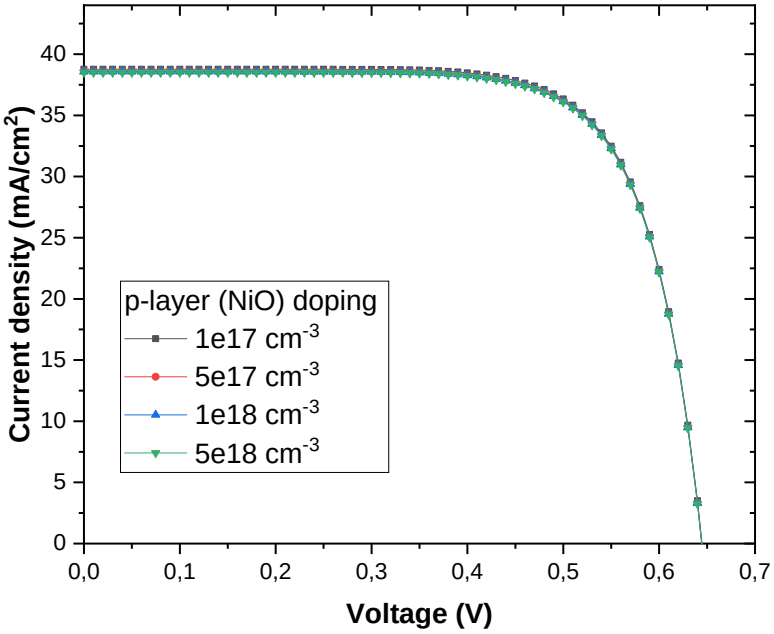
**جدول3.20:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية Cu2O(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم السيليكون Si (مع إعتبار التطعيم الخلفي B-D $5.10^{18}cm^{-3}$).

| Doping of Si $cm^{-3}$ | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 1e14 | 24.7106 | 0.619859 | 0.727188 | 11.1384 |
| 5e14 | 24.6808 | 0.620009 | 0.74212 | 11.3562 |
| 1e15 | 24.674 | 0.620367 | 0.760819 | 11.6458 |
| 5e15 | 24.6662 | 0.627922 | 0.808425 | 12.5213 |
| 1e16 | 24.6649 | 0.637789 | 0.822385 | 12.9369 |
| 5e16 | 24.666 | 0.672202 | 0.838894 | 13.9093 |
| **Without B-D** | 24.6643 | 0.671969 | 0.83883 | 13.9025 |

### 7.3.3.دراسة تأثير التطعيم NiO(p-type)/Si(n-type):

#### 1.7.3.3.تأثير تطعيم الأكسيد NiO (p-type) :

من خلال **الشكل.3.31** نلاحظ أن كل من $V_{OC}$ و FF ثابتة أثناء المحاكاة ، $J_{SC}$ يتناقص من 38.76 $mA/cm^2$إلى 38.51 $mA/cm^2$ (القليل من الإلتحامات)؛كذلك كفاءة التحويل تنخفض بنسبة قليلة من 18.31% إلى 18.18% .

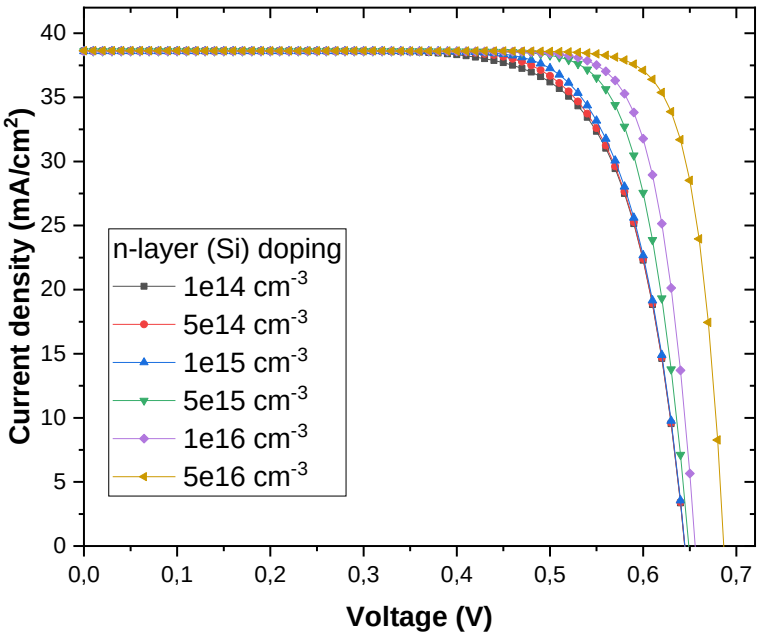



**الشكل.3.31:** تأثير تغيرات تطعيم الاكسيد NiO على الخاصية $(J-V)$ للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type).

**جدول3.21:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم الأكسيد NiO.

| **Doping of NiO $cm^{-3}$** | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | **FF** | **η%** |
|---|---|---|---|---|
| 1e17 | 38.7699 | 0.64469 | 0.73264 | 18.312 |
| 5e17 | 38.6243 | 0.644485 | 0.732805 | 18.2415 |
| 1e18 | 38.5806 | 0.644426 | 0.732819 | 18.2196 |
| 5e18 | 38.5103 | 0.644333 | 0.732821 | 18.1888 |

### 2.7.3.3.تاثير تطعيم السيليكون Si (n-type) للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) :



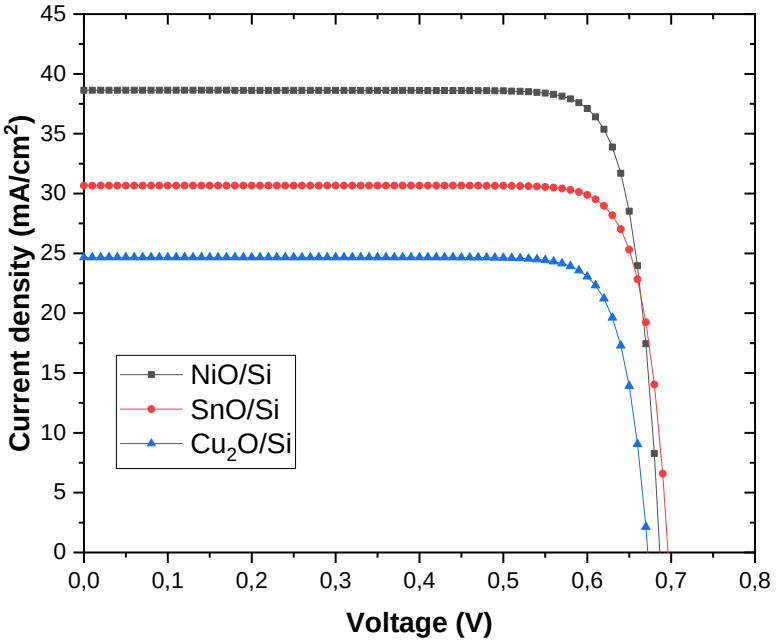

**الشكل.3.32:** تأثير تغيرات تطعيم السيليكون Si(n-type) على الخاصية $(J-V)$للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type).

نحتفظ بتطعيم الأكسيد NiO عند $5e17cm^{-3}$،معظم الوسائط الكهربائية تزداد و تتحسن كالتالي $J_{SC}$ من $38.62(mA/cm^2)$ إلى$38.63(mA/cm^2)$ ؛ $V_{OC}$ من $0.64(V)$ إلى $0.68(V)$؛FF من 0.73 إلى 0.83.تسجل كفاءة التحويل تحسن كبير من 18.24% إلى% 22.26 . هنا أيضا دوما التحسن في الجهد و معامل الإمتلاء يعود غالبا لإنخفاض الضياعات بتأثيرات مقاومية الطبقة.
الملاحظ أيضا أن التطعيم الخلفي لم يضف تحسينا ملحوظا هنا خلافا مع الخلية الشمسية السليكونية المتجانسة، ويمكن أن يعود ذلك للدور الفعال الذي يلعبه الأكسيد في عملية التجميع المنتقاة للثقوب. إذن يمكن الإستغناء عنه ، فهو مكلف تجريبيا وقد يؤثر كذلك على البنية.

**جدول3.22:** الوسائط الكهربائية للخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type) من أجل تغيرات تطعيم السيليكون Si.

| Doping of Si $cm^{-3}$ | $J_{SC}(mA/cm^2)$ | $V_{OC}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| 1e14 | 38.6243 | 0.644485 | 0.732805 | 18.2415 |
| 5e14 | 38.6058 | 0.644548 | 0.741094 | 18.4409 |
| 1e15 | 38.6021 | 0.644719 | 0.755045 | 18.7912 |
| 5e15 | 38.6005 | 0.648909 | 0.802331 | 20.0969 |
| 1e16 | 38.6038 | 0.655718 | 0.819215 | 20.737 |
| 5e16 | 38.636 | 0.686508 | 0.839423 | 22.2648 |
| **Without B-D** | 38.6351 | 0.686229 | 0.839452 | 22.256 |

### 8.3.3.مقارنة الخاصية $(J-V)$ بين الخلايا الثلاث $SnO/Si, Cu_2O/Si, NiO/Si$ في الحالة النهائية:




**الشكل.3.33:** الخاصية $(J-V)$ مقارنة بين $SnO/Si, Cu_2O/Si, NiO/Si$ في الحالة النهائية.

بالمقارنة بين الخلايا الشمسية الثلاث $SnO/Si, Cu_2O/Si, NiO/Si$ في الحالة النهائية ،نجد أن أحسن النتائج تقدمها الخلية $NiO(p\text{-}type)/Si(n\text{-}type)$ بكفاءة تحويل 22.26% مما يعكس جودة

الخلية و تميز الأكسيد بالشفافية و التحسين في جودة الإمتصاص التي تجسد بالقيمة الجيدة للتيار الضوئي.

**جدول3.23:** مقارنة بين الوسائط الكهربائية للخلايا الشمسية $NiO/Si$, $Cu_2O/Si$ ,SnO/Si في الحالة النهائية.

| | $J_{sc}(mA/cm^2)$ | $V_{oc}(V)$ | FF | η% |
|---|---|---|---|---|
| SnO/Si | 30.6642 | 0.696231 | 0.843239 | 18.0026 |
| Cu2O/Si | 24.666 | 0.672202 | 0.838894 | 13.9093 |
| NiO/Si | 38.636 | 0.686508 | 0.839423 | 22.2648 |

### 4.3.الخلاصة:

في هذا الفصل قدمنا محاكاة عددية لخلية شمسية p/n غير متجانسة باستخدام برنامج SILVACO-ATLAS.بعد دراسة التحسينات إستنتجنا أن القيم المثالية لكل من عمل الإنتزاع للأنود/الكاثود، سمك (الأكسيد/Si)، التطعيم (p/n) (يمكن الإستغناء عن النطعيم الخلفي) لكل خلية كالتالي :

- الخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type):عمل الإنتزاع للأنود (5.8)/للكاثود (3.4)،سمك الأكسيد SnO (0.1 $\mu m$)/سمك Si(100$\mu m$)،تطعيم الأكسيد SnO(p-type) ($5e18\ cm^{-3}$)/ تطعيمSi(n-type) ($5e16\ cm^{-3}$).
- الخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type):عمل الإنتزاع للأنود (5.8)/للكاثود (3.4)،سمك الأكسيد SnO (0.6 $\mu m$)/سمك Si(100$\mu m$)،تطعيم الأكسيد $Cu_2O$ (p-type) ($1e17\ cm^{-3}$)/ تطعيمSi(n-type) ($5e16cm^{-3}$).
- الخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type):عمل الإنتزاع للأنود (5.8)/للكاثود (3.4)،سمك الأكسيد SnO (1 $\mu m$)/سمك Si(100$\mu m$)،تطعيم الأكسيد NiO (p-type) ($5e17\ cm^{-3}$ )/ تطعيمSi(n-type)($5e16\ cm^{-3}$).

نلفت الإنتباه هنا أن الدراسة أجريت في الحالة المثالية حيث تم الأخذ بعين الإعتبار كثافة منخفضة من العيوب.بالمقارنة بين الحالة الإبتدائية و النهائية و في ظل التحسينات التي قمنا بها تحصلنا على أفضل

النتائج و الوسائط الكهربائية بالنسبة للخلية SnO/Si في الحالة الإبتدائية بمردود تحويل يقارب 12 في المئة، وأفضل النتائج بعد التحسينات للخلية NiO/Si بمردود تحويل بحدود 22 في المئة .

يعزى الفرق بين الحالة الإبتدائية والنهائية إلى تأثير السمك مع شفافية أكسيد النيكل وتميزه بألفة إلكترونية صغيرة مقارنة مع الأكسيدين الآخرين.

**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] S. Daniel, Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas", Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.

[5] TonyPlot User's Manual, Device simulation software", SILVACO International, California. 2012.

[6] DeckBuild User's Manual, Device simulation software", SILVACO International, California. 2013.

[7] 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.

[8] J. Lavery, Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco", Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008.

[9] D. Wassila Née KAZI-TANI, Modelisation des Structures Photovoltaiques : Aspects Fondamantaux et Appliques", Thèse Doctorat, Université Abou Bakr Belkid- Tlemcen. 2011.

[10] G, Adam. R, modeling heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software", Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012.

[11] P. Michalopoulos, A noval approach for the development and optimization of stateof- the-art photovoltaic devices using silvaco", Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2002.

# الخلاصة العامة

تنقسم أنواع الخلايا الشمسية إلى وصلة pn متجانسة (homojunction)/ وصلة pn غير متجانسة (heterojunction).الإنعكاسات الناظمية على سطح مستوي للبلور للخلية الشمسية المتجانسة يؤدي إلى ضياع في الضوء و الفوتونات و هذا يعد من أهم العوامل المتسببة في انخفاض كفاءة التحويل للخلية ؛بالتالي للتقليل من اثر هذه العوامل نلجأ إلى استخدام بنية وصلات غير متجانسة (heterojunction) هذا مايعطي الأفضلية للخلايا الشمسية السيليكونية الغير متجانسة مقارنة مع المتجانسة.

ترجع الأهمية المتزايدة لمحاكاة أشباه الموصلات في المقام الأول إلى التعقيد المتزايد لعمليات تصنيع أشباه الموصلات ، وأبعاد الجهاز المتقلصة ، ومن ثم الحاجة إلى تقليل الوقت وتكلفة التصنيع إلى مستويات تنافسية. يمكن تقليل تكلفة البحث والتطوير التجريبي والوقت لتطوير المنتجات الإلكترونية من خلال الاستفادة من أدوات TCAD ، مما يجعل TCAD لا غنى عنه للأجهزة الحديثة وتقنيات المعالجة.

في هذه المذكرة قدمنا محاكاة عددية لخلية شمسية p/n غير متجانسة باستخدام برنامج SILVACO-ATLAS.بعد دراسة التحسينات إستنتجنا أن القيم المثالية لكل من عمل الإنتزاع للأنود/الكاثود، سمك (الأكسيد/Si)، التطعيم (p/n) لكل خلية كالتالي :

- الخلية الشمسية SnO(p-type)/Si(n-type):عمل الإنتزاع للأنود (5.8)/للكاثود (3.4)،سمك الأكسيد SnO $(0.1\ \mu m)$/سمك Si$(100\mu m)$،تطعيم الأكسيد SnO(p-type) $(5e18\ cm^{-3})$/ تطعيمSi(n-type) $(5e16cm^{-3})$.
- الخلية الشمسية $Cu_2O$(p-type)/Si(n-type):عمل الإنتزاع للأنود (5.8)/للكاثود (3.4)،سمك الأكسيد SnO $(0.6\ \mu m)$/سمك Si$(100\mu m)$،تطعيم الأكسيد $Cu_2O$ (p-type) $(1e17\ cm^{-3})$/ تطعيمSi(n-type) $(5e16\ cm^{-3})$.
- الخلية الشمسية NiO(p-type)/Si(n-type):عمل الإنتزاع للأنود (5.8)/للكاثود (3.4)،سمك الأكسيد SnO $(1\ \mu m)$/سمك Si$(100\mu m)$،تطعيم الأكسيد NiO (p-type) $(5e17\ cm^{-3})$/ تطعيمSi(n-type) $(5e16\ cm^{-3})$.

بالمقارنة بين الحالة الإبتدائية و النهائية و في ظل التحسينات التي قمنا بها تحصلنا على أفضل النتائج و الوسائط الكهربائية بالنسبة للخلية SnO/Si في الحالة الإبتدائية بمردود تحويل يقارب 12 في المئة، وأفضل النتائج بعد التحسينات للخلية NiO/Si بمردود تحويل بحدود 22 في المئة .

**الملخص:**

في هذا العمل قمنا بمحاكاة الخلايا الشمسية (SnO/Si , $Cu_2O$/Si , NiO/Si) بإستعمال برنامج **SILVACO-ATLAS** و الذي يستخدم لمحاكاة الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية المقترحة.

الحالة الإبتدائية كانت باعتبار كل من سمك (0.1 $\mu m$) Si،سمك الأكاسيد ($Cu_2O$/NiO) (100$\mu m$ /SnO)،تطعيم الأكاسيد p (1e17 $cm^{-3}$)،تطعيم السيليكون n (1e14 $cm^{-3}$)،عمل الإنتزاع للأنود (5.1)،عمل الإنتزاع للكاثود (4.2) لكل من (SnO/Si,Cu2O/Si,NiO/Si). و كانت أحسن النتائج لSnO/Si ،بكفاءة تحويل تقارب 12 في المئة.بعد الدراسة التحسينية بكل الوسائط سالفة الذكر ،وجدنا أن أحسن النتائج كانت للخلية NiO/Si بكفاءة تحويل في حدود 22 في المئة.وفسرنا ذلك بشفافية الأكسيد وقيمة ألفته الإكترونية الملائمة لفصل فعال وتجميع للثقوب ضمن منطقة الأكسيد.

**الكلمات المفتاحية**: خلية شمسية سيليكونية غير متجانسة الوصلة، محاكاة، أكسيد ناقل نوع p .

**Abstract:**

In this work we have simulate three heterojunction solar cells (Cu2O / Si, NiO / Si), (SnO / Si), using the SILVACO-ATLAS software, which is used to extract the electrical properties of the proposed solar cells.

The initial case has been given by considering the Si thickness of (0.1 $\mu m$), the oxides (SnO/$Cu_2O$/NiO) thickness of (100 $\mu m$) , p- doping (1e17 $cm^{-3}$) , n- doping (1e14 $cm^{-3}$) ,anode workfunction (5.1) ,cathode workfunction (4.2) . The best results in the primary study obtained was for SnO / Si , with a conversion efficiency of about 12 %. After the optimization study based on thicknesses, work-function and doping , the NiO / Si cell has shown the best conversion efficiency of 22 %. We interpreted this by the transparency of the oxide and its electronegativity value appropriate for efficient separation and collection of holes within the oxide region.

**Keyword**: heterojunction Si solar cell, simulatio, Conductive oxide p-type.