الفصل الثالث

الخلايا الشمسية الفولطاضوئيّة

1-3 مقدمة عن الخلايا الشمسية

2-3 المبادئ الأساسية لعمل الخلايا الشمسية

3-3 الخصائص الكهربائية للخلايا والألواح الشمسية السلكونية

4-3 بعض أنواع الخلايا الشمسية الفولطاضوئيّة
- الخلايا السلكونية احادية البلورية
- الخلايا السلكونية الشريطة
- الخلايا السلكونية متعددة البلورية
- خلايا الغاليوم ارسنايد

5-3 الخلايا ذات الأغشية الرقيقة
- الخلايا السلكونية العشوائية
- خلايا الكوبر انديوم ديسلنايد
- خلايا الكادميوم تليرايد

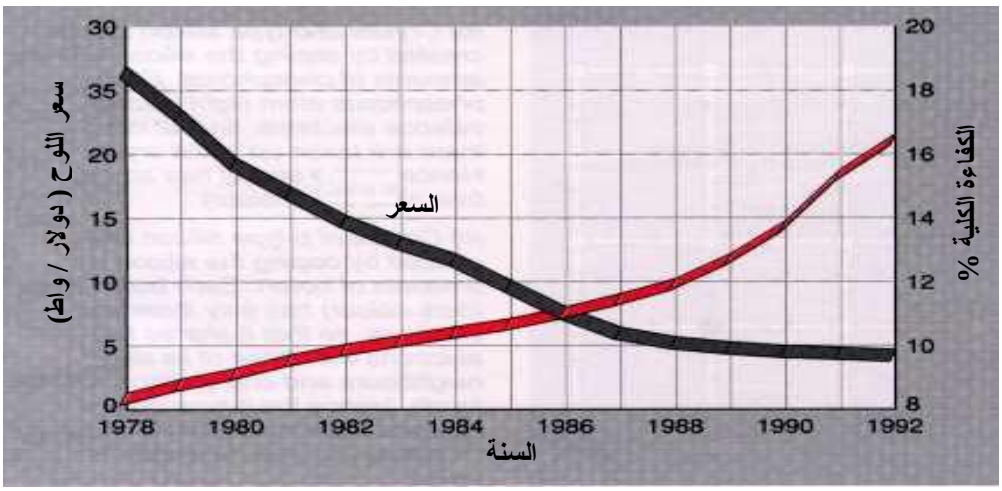
6-3 منظومات الخلايا الفولطاضوئيّة المركزة

7-3 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئيّة
- تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية
- تطبيقات الخلايا الفولطاضوئيّة في بعض البلدان النامية
- استخدام المنظومات الفولطاضوئيّة للربط مع الشبكة الكهربائية

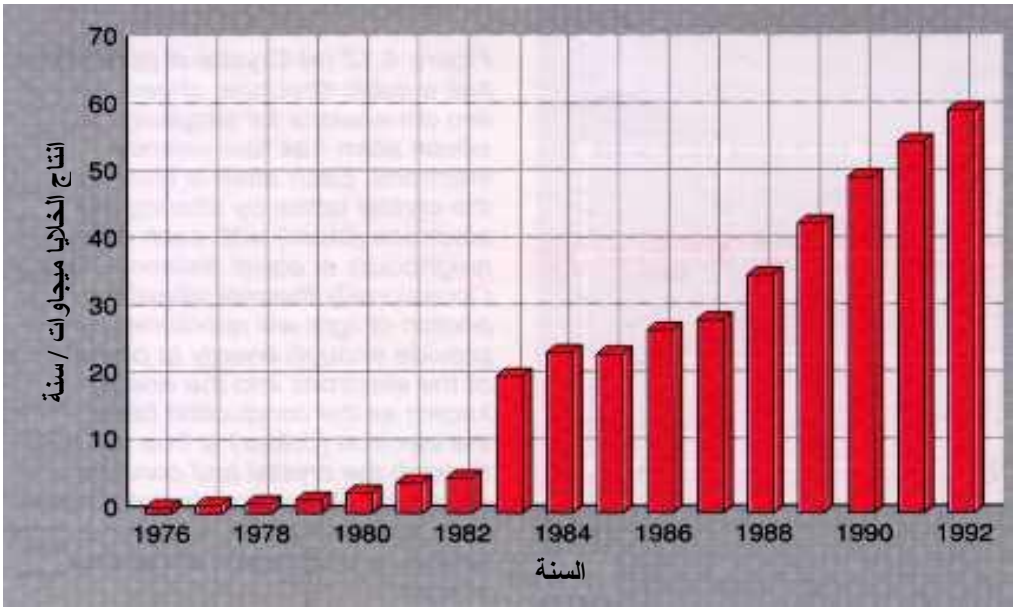
8-3 استخدام الخلايا الشمسية في الفضاء

1-3 مقدمة عن الخلايا الشمسية

إن تحويل أشعة الشمس المباشرة إلى طاقة كهربائية هو أحد المنجزات العلمية الكبرى في القرن العشرين والألفية الثانية ، وهو أفضل التقنيات المستخدمة حالياً في مجال الطاقة المتجددة . لقد بدأت هذه التقنية منذ عقود عديدة لكنها دخلت مرحلة الاستغلال الفعلي عند استخدامها في برامج الفضاء في نهاية الخمسينات من هذا القرن . ولكن العائق في استخدامها على نطاق واسع ومن قِبل عموم الناس هو كلفتها العالية . ولقد انخفض سعر الخلايا الشمسية (Photovoltaic Cells) مئات المرات في الوقت الحاضر عما كان عليه في بداية الستينات ، ولكنها لا تزال مكلفة نسبياً إلى حد الآن . والحقيقة هي عدم وجود أية صعوبات تقنية تمنع توسيع انتشار هذه المنظومات . فمدى انتشار استخدامها يعتمد على كلفة الإنتاج وزيادة الكفاءة . وخلال الأعوام المنصرمة حدث تقدم واسع في إنتاج الخلايا بكلفة معقولة ، وازدادت كفاءتها إلى أن وصلت حوالي 30% في الظروف المخبرية . ويبين الشكل (3-1) تناقص سعر إنتاج الخلايا وزيادة كفاءتها منذ نهاية السبعينات وحتى بداية التسعينات . وعلى الرغم من الكلفة العالية للطاقة الكهربائية المنتجة من الطاقة الشمسية عند مقارنتها بأسعار إنتاج الطاقة الكهربائية بالطرق التقليدية فإن سوق الخلايا الشمسية ما فتئ ينمو . وقد نصبت عشرات الآلاف من المنظومات في تطبيقات مختلفة كالإنارة والاتصالات ، وضخ المياه ، وشحن البطاريات ، وتشغيل ثلاجات الأدوية وغيرها من الاستخدامات . ويبين الشكل (3-2) زيادة كمية الإنتاج السنوي للأسطح الشمسية الفولطاضوئية منذ عام 1976 ولغاية 1992 . ومعظم تقنيات الخلايا الشمسية يتم تطبيقها في المناطق النائية حيث تبقى الخلايا الشمسية هي الأفضل استخداماً وذلك لسهولة نصبها وعدم حاجتها إلى صيانة مستمرة وعدم مساهمتها في تلوث البيئة .



شكل (3-1): تناقص سعر إنتاج الخلايا الشمسية وزيادة كفاءتها للفترة من 1978 ولغاية 1992



شكل (3-2): الإنتاج السنوي للأسطح الشمسية الفولطاضوئيّة للفترة من عام 1976 ولغاية عام 1992

المادة الأولية التي تصنع منها الخلايا هي السليكون ، وهو متوفر دائماً في الطبيعة . وسينمو سوق الخلايا الشمسية بصورة كبيرة عندما تصل كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية منها إلى كلفة مثيلتها الناتجة من المصادر الأخرى . وقد تم إلى حد الآن انخفاض سعر اللوح الشمسي الفولطاضوئي بالنسبة للواط من 4.5 دولار إلى 2.5 دولار (لاحظ أنه في الدول العربية تكون كلفة الواط بعد تركيب كافة الأنظمة المصاحبة من 8 إلى 10 دولار) . وإذا استمر هذا النقصان فستصبح منظومات الطاقة الشمسية منافسة لسعر مولدات الديزل، وعندما يصل سعر اللوح إلى 1.5 دولار للواط أو سعر منظومة الخلايا الشمسية بسعر 2.5 إلى 3.0 دولار لكل واط فإنه بذلك يمكن إنتاج طاقة كهربائية بكلفة 12 سنت أمريكي لكل كيلوواط ساعة ، علماً بأن الهدف الحالي المحدد هو إنتاج كهرباء بكلفة 6 إلى 9 سنت لكل كيلوواط – ساعة ويتطلب ذلك فترة زمنية طويلة .

2-3 المبادئ الأساسية لعمل الخلايا الشمسية

تتكون الخلية الشمسية من خط اتصال يفصل بين طبقتين خفيفتين من مادة شبه موصلة إحداهما موجبة وتدعى (P) ، بينما الأخرى سالبة وتدعى نوع (N) . وللسهولة سنعتبر بأن المادة شبه الموصلة المستخدمة هي السليكون (بالرغم من أننا سنرى لاحقاً بعض الخلايا المصنوعة من مادة غير السليكون) . إن النوع (N) مصنوع من مادة السليكون البلوري المطلي بطبقة خفيفة من شوائب الفسفور (Phosphore) بطريقة تجعل طبقة الشوائب تسيطر

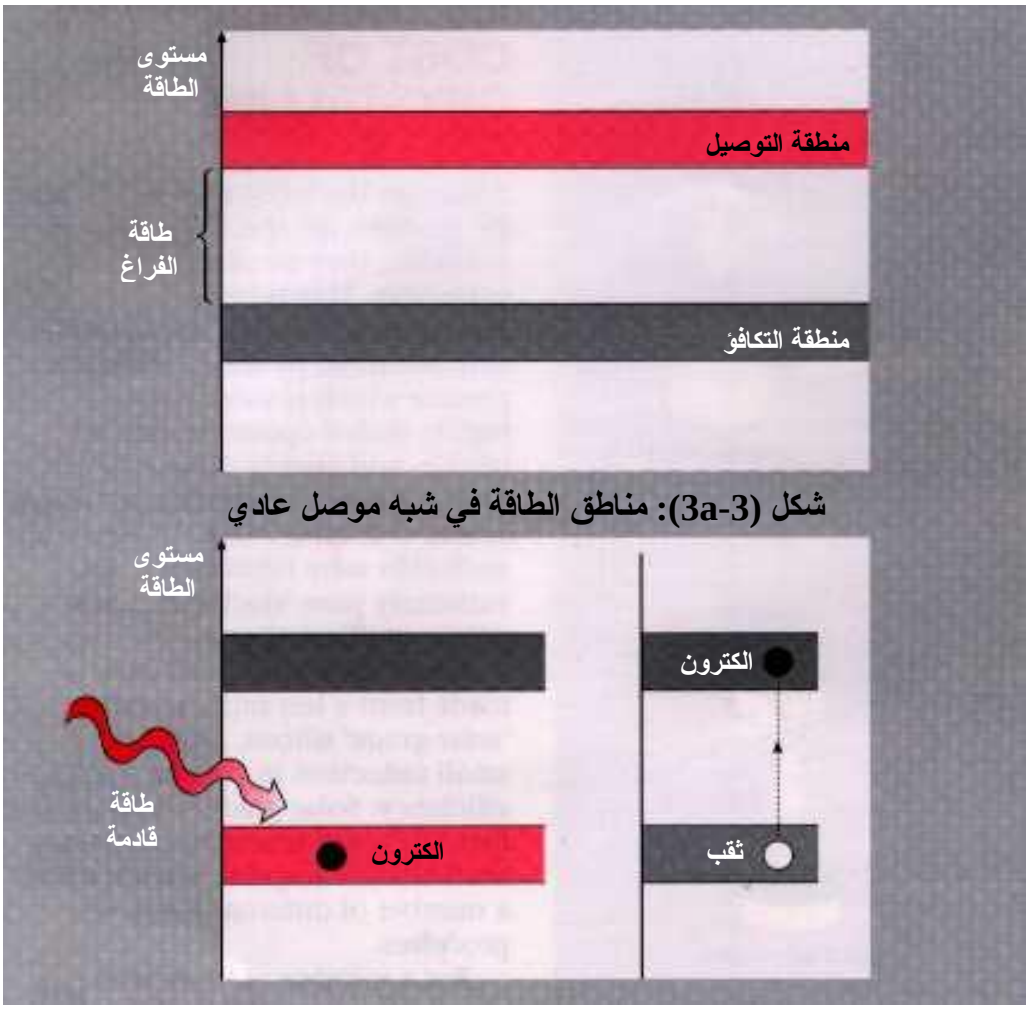
على الفائض من الإلكترونات الحرة . وبما أن الإلكترونات (Electrons) ذات شحنة سالبة فإن السليكون المطلي بهذه الطريقة يدعى نوع (N) السالب (Negative Charge) . أما النوع (P) فهو مصنوع أيضاً من مادة السليكون البلوري ولكنه مطلي بطبقة خفيفة من الشوائب تدعى البورون (Boron) تجعل المادة ذات عجز بالنسبة للإلكترونات الحرة . وهذه الإلكترونات المفقودة تدعى ثقوباً (Holes) ، وهذا يعني أن الشحنة الموجبة في هذه الطبقة أكثر من الشحنة السالبة ، فلذلك يعتبر السليكون المطلي بهذه الطريقة هو نوع (P) الموجب (Positive Charge) .

وعند ربط هاتين الطبقتين المختلفتين من المادة شبه الموصلة ببعضهما البعض سيظهر خط تماس بينهما يدعى خط الارتباط (P-N Junction) . ويتكون بذلك مجال كهربائي في منطقة خط التماس يقوم بتحريك الجسيمات السالبة الشحنة إلى اتجاه معين والجسيمات الموجبة الشحنة إلى اتجاه معاكس. ويكون المجال الكهربائي المتكون مشابهاً للمجال الذي يمكن توليده عند حك مشط بلاستيكي بمادة من القماش . فعند سقوط فوتونات (Photons) الإشعاع الشمسي على منطقة التماس (P-N Junction) ستنقل تلك الفوتونات طاقتها إلى بعض الإلكترونات في المادة مسببة رفعها إلى مستوى طاقة أعلى . ففي الظروف الاعتيادية تقوم الإلكترونات بالمساعدة على تماسك المواد مع بعضها بعضاً مكونة ربطاً متكافئاً مع الذرات القريبة ولكنها لا تستطيع الحركة . وفي هذه الحالة المتحفزة ، بعد سقوط الإشعاع الشمسي، فإن الإلكترونات تكون حرة لتوليد تيار كهربائي يمر خلال المادة . وعندما تتحرك الإلكترونات تترك وراءها ثقوباً (Holes) في المادة تتحرك أيضاً . فعند تكوّن منطقة الارتباط (P-N Junction) فإن بعض الإلكترونات المجاورة لها تنجذب من جهة (N) لتتحد مع الثقوب في جهة (P) . وبنفس الطريقة فإن الثقوب المجاورة (الموجبة) لمنطقة الارتباط تنجذب لتتحد مع الإلكترونات (السالبة) في جهة (N) القريبة .

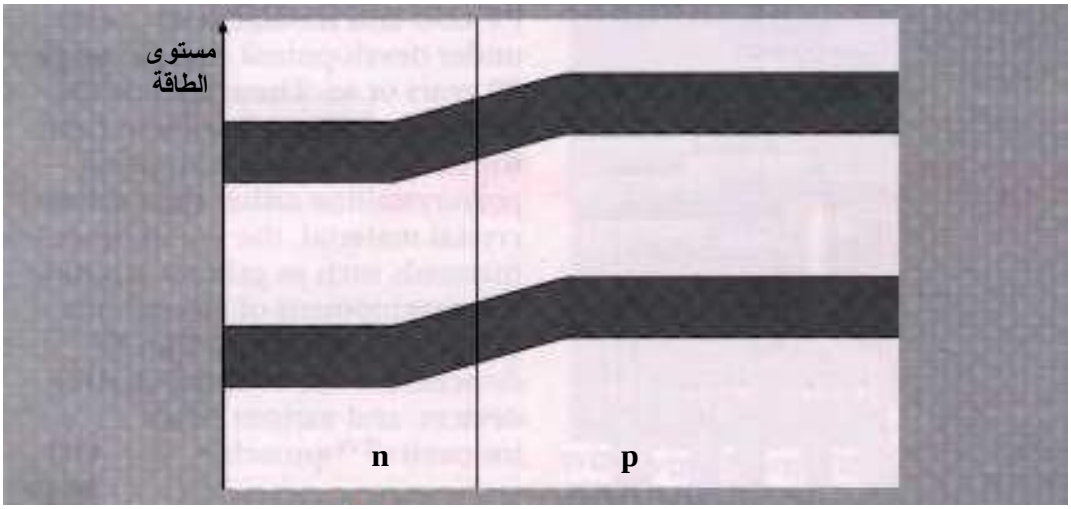
والتأثير النهائي الناتج من هذا الوضع حول منطقة الارتباط هو وجود شحنة موجبة أكثر من السابق على جهة (N) ووجود شحنة سالبة أكثر من السابق على جهة (P) . وهذا يعني وجود مجال كهربائي معاكس حول منطقة الارتباط يكون موجباً حول جهة (N) وسالباً حول جهة (P) . والمنطقة التي تقع حول منطقة الارتباط ستكون مفرغة من الشحنات (الإلكترونات والثقوب) وتسمى بذلك منطقة التفريغ أو الاستنزاف (Depletion Region) .

وعند تهيج الإلكترونات في منطقة الاتصال بواسطة فوتونات الإشعاع الشمسي ستقفز إلى منطقة التوصيل (Conduction Band) تاركة ورائها ثقوباً في منطقة التكافؤ (Valance Band) وبذلك ستتولد حوامل من الشحنة المزدوجة (زوج من الكترون وثقب) ، وتحت تأثير المجال الكهربائي المعاكس ستتجه الإلكترونات إلى جهة (N) وتتجه الثقوب إلى جهة (P) .

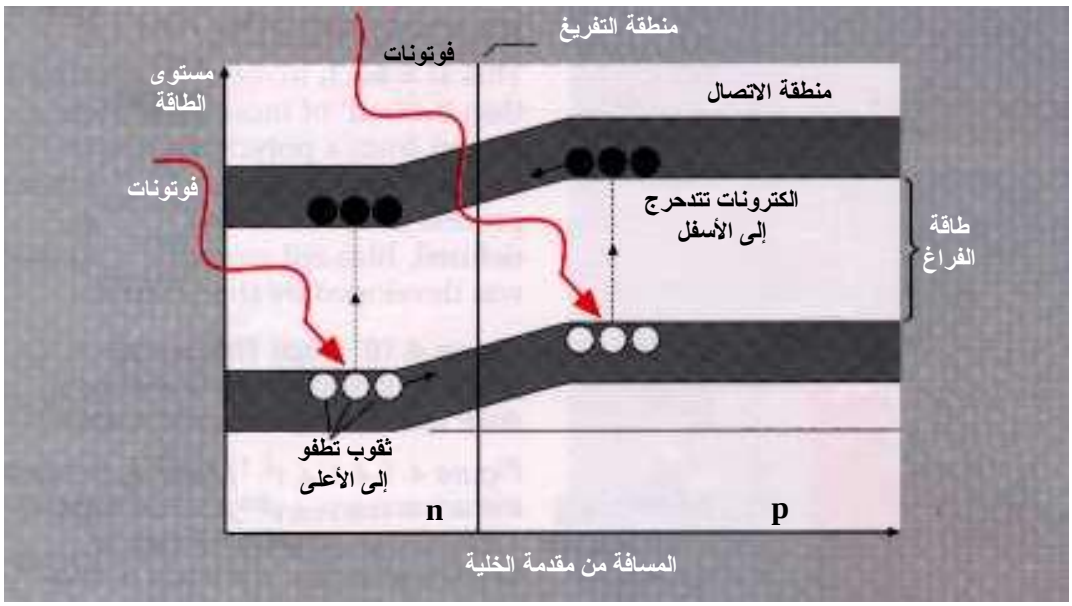
يمكن تصوير العملية كمستويات طاقة في المادة كما في الشكل (3-3) . تدخل الإلكترونات المتهيجة بواسطة الفوتونات منطقة الارتباط ، ويمكن تصورها متدحرجة إلى الأسفل تحت تأثير المجال الكهربائي في منطقة الاتصال . وكذلك يمكن تصوير الثقوب وكأنها تطفو إلى الأعلى تحت تأثير المجال في منطقة الارتباط إلى جهة (P) .



شكل (3a-3): مناطق الطاقة في شبه موصل عادي



شكل (3c-3): عند اتحاد أشباه موصلات من نوع p و n فان مناطق الطاقة المختلفة لهما تتحد وبذلك يتكون توزيع طاقة جديد



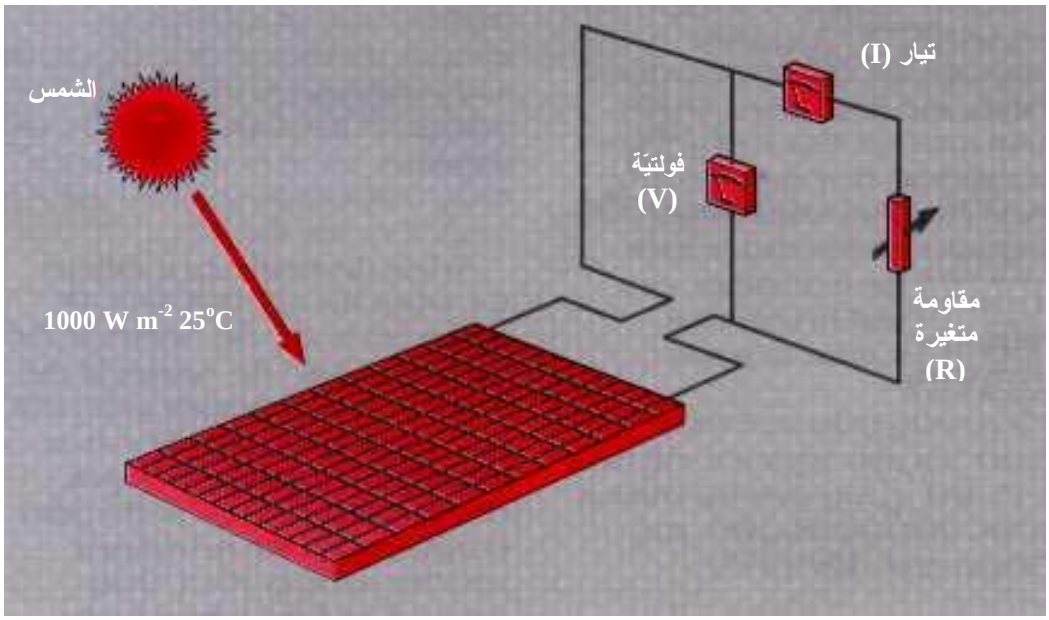
شكل (3d-3): في منطقة الاتصال تقوم فوتونات الضوء بتهّيج الالكترونات وانتقالها من منطقة التكافؤ إلى منطقة التوصيل فتتدحرج الالكترونات الى منطقة (n) وتطفو الثقوب إلى منطقة (p)

إن سريان الإلكترونات إلى جهة (N) هو ما يسمى بالتيار الكهربائي . فإذا كانت هنالك دائرة خارجية لمرور التيار فيها فإن الإلكترونات المتحركة تترك شبه الموصل إلى أحد الأسلاك الخارجية في أعلى الخلية وفي نفس الوقت تتجه الثقوب إلى اتجاه معاكس خلال المادة إلى أن تصل إلى السلك الخارجي الآخر في قاع الخلية ، وعندها ستمتلئ بواسطة الإلكترونات الداخلة في نصف الدائرة الخارجية الآخر .

إن توليد القوة الكهربائية يتطلب وجود فولتية وتيار ، ولهذا فإنه لإنتاج قوة كهربائية على الخلية يتطلب توليد فولتيّة ، بالإضافة إلى التيار المجهز بواسطة حركة الإلكترونات . أما الفولتية فتجهز بواسطة تأثير المجال الكهربائي الداخلي حول منطقة الاتصال (P-N Junction) . والخلية الشمسية الاعتيادية الواحدة تنتج نصف فولط (0.5V) وتياراً مقداره 2.5 أمبير ، وهذا يعادل طاقة عظمى تصل إلى 1.25 واط . ويمكن لبعض الخلايا إنتاج تيار أكبر وفولتيّة أعلى اعتماداً على نوعية التصميم .

3-3 الخصائص الكهربائية للخلايا والألواح الشمسية السليكونية

أبسط تعريف لخلية شمسية ذات مساحة مقدارها 100.0 سنتمتر مربع هو أنها بطارية شمسية تقوم بإنتاج فولتيّة مقدارها نصف فولط (0.5V) وتيار يتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي يصل إلى مقدار يتراوح بين 2.5-3.0 أمبيرفي حالة الإشعاع الشمسي الأقصى . وقبل استخدام الخلية الشمسية (Photovltaic) يجب التأكد من سلوكها عند ربطها إلى حمل معين. والشكل (3-4) يبين خلية شمسية مساحتها 100 سنتمتر مربع مربوطة إلى مقاومة متغيرة (R) بالإضافة إلى ربط جهازي الأميتر لقياس التيار والفولتميتر لقياس فرق الجهد أو الفولتيّة . (عادة يتم قياس أداء الخلية تحت ظروف قياسية ، وهي إشعاع شمسي مقداره 1000.0 واط في المتر المربع ودرجة حرارة ٢٥ درجة مئوية) . وعندما تكون المقاومة غير محدودة (ما لا نهاية) يكون التيار (I) في الدائرة صفراً ويكون فرق الجهد (V) أعلى ما يمكن ، (Open Circuit voltage – V_{oc}) وهذا ما يسمى بفولتيّة الدائرة المفتوحة . وفي الحالة المعاكسة تماماً ، أي عندما تكون المقاومة صفراً وتكون الخلية كدائرة مغلقة ، فإن التيار سيكون بحالته العظمى وهذا ما يسمى بتيار الدائرة المغلقة (Short Circuit Current Isc) . وإذا قمنا بتغير المقاومة بين الصفر والمالا نهاية فإن التيار والفولتية سيتغيران كما في الشكل (3-5) والذي يسمى منحنى خصائص الفولتية والتيار (I-V Curve) . ويمكن بعد النظر إلى المنحنى الاستنتاج بأن الخلية تنتج طاقتها القصوى (Maximum Power) عندما يتم تغيير المقاومة الخارجية حتى تكون قيمتها مساوية لنقطة الطاقة العظمى (Maximum Power Point) على المنحنى . وعندما يكون الإشعاع الشمسي أقل من 1000 واط بالمتر المربع فإن شكل المنحنى يكون مشابهاً للمنحنى الأول ولكن المساحة تحت المنحنى ستكون أقل ونقطة الطاقة العظمى ستتحرك إلى اليسار . إن تيار الدائرة المفتوحة I_{oc} يتناسب طردياً مع زيادة درجة حرارة الخلية T ($I_{0c} \propto T$) T .



شكل (3-4): خلية شمسية مربوطة إلى مقاومة متغيرة ومقياس للفولتيّة ومقياس للتيار

شكل (3-5): منحنى خصائص الفولتيّة والتيار لخلية سلكونية تحت الظروف الاعتيادية

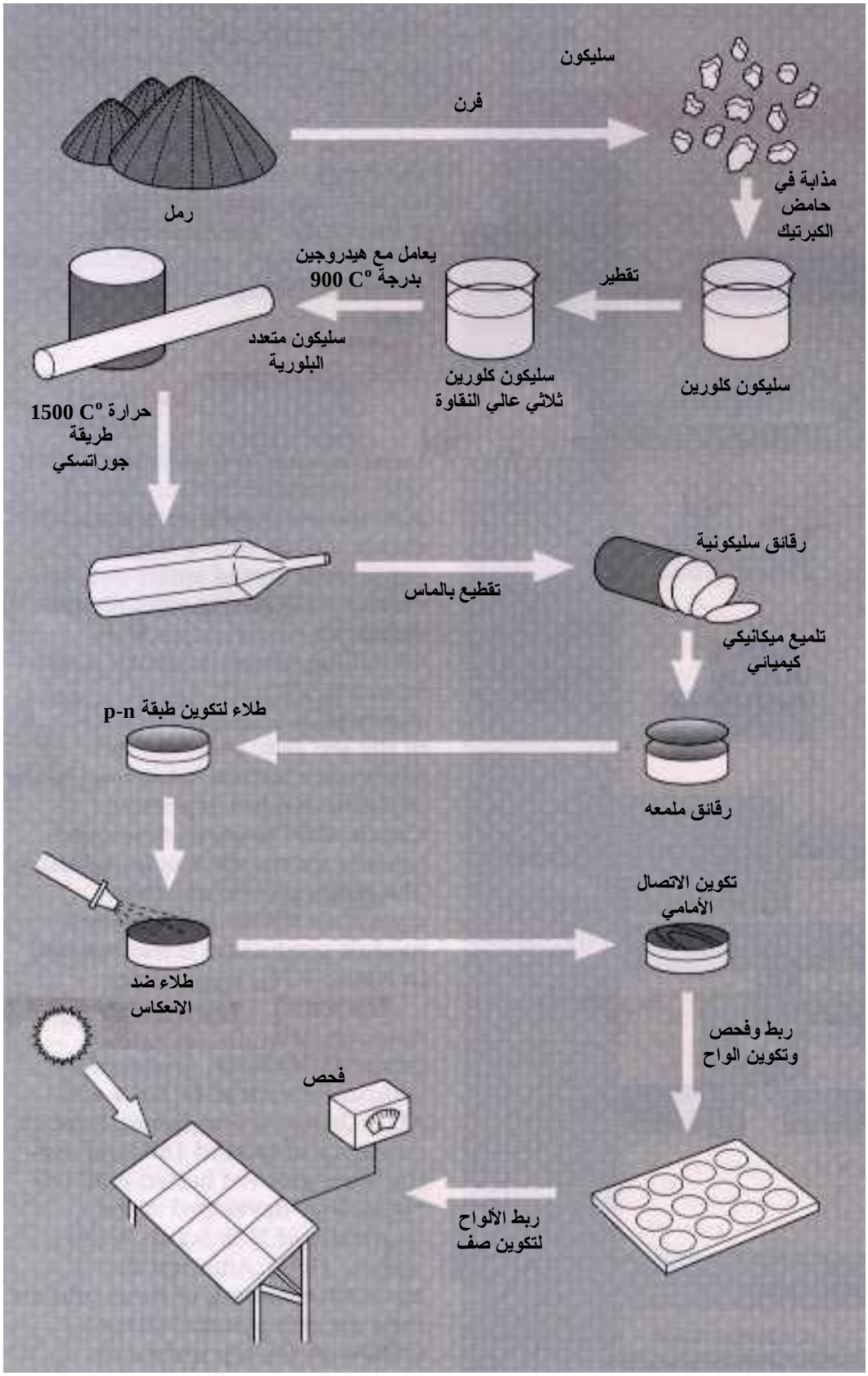
ويمكن أن نستنتج من النظر إلى الشكل (3-5) بأن خلية ذات مساحة 100 سنتمتر مربع يمكن أن تنتج جهداً كهربياً (فولتيّة) مقدارها نصف فولط وبتيار مقداره أقل من 3.0 أمبير. وبما أن معظم تطبيقات الخلايا الشمسية تقوم بشحن بطارية ذات 12 فولط فإن لوحاً شمسياً مكوناً من 26 خلية شمسية مربوطة على التوالي تؤمن الحصول على حوالي 13 فولط وهو كافٍ لشحن بطارية ذات 12 فولط حتى ولو كان الجو غير مشمس .

4-3 بعض أنواع الخلايا الفولطاضوئية

1-4-3 الخلايا السلكونية أحادية البلورية

معظم الخلايا الفولطاضوئية المصنعة لغاية فترة قريبة كانت من سليكون نقي ذي هيكل مستمر أحادي البلورية (Single Crystal) وبدون شوائب (Impurities). والسليكون أحادي البلورية يصنع عادة من حبوب صغيرة من البلور مسحوبة ببطء من كتلة مذابة من سليكون متعدد البلورية بطريقة متقدمة وغالية الثمن تدعى بعملية زوجرالسكي (Czochralski Process) طورت خصيصاً للصناعة الإلكترونية . والخطوات الكاملة لإنتاج الخلية السلكونية الأحادية البلورية واللوح الشمسي مبينة في الشكل (3-6) . ومعظم الخلايا السلكونية الأحادية البلورية المتوفرة في الأسواق ذات كفاءة تقارب16%. وبالرغم من ميزة الكفاءة العالية التي تختص بها الخلية الشمسية الأحادية البلورية فإن سعرها مرتفع جداً لكونها مصنوعة من سليكون متعدد البلورية وعالي النقاوة لكون طريقة التصنيع غالية وتحتاج إلى عمال مهرة . ويتم حالياً تصنيع بعض الخلايا من سليكون أقل نقاوة ، وهذه الخلايا تكون أرخص سعراً وتنتج بكلفة أرخص باستخدام عمليات مختلفة قليلة الكلفة ولكنها ذات كفاءة أقل وعمر زمني أقل .

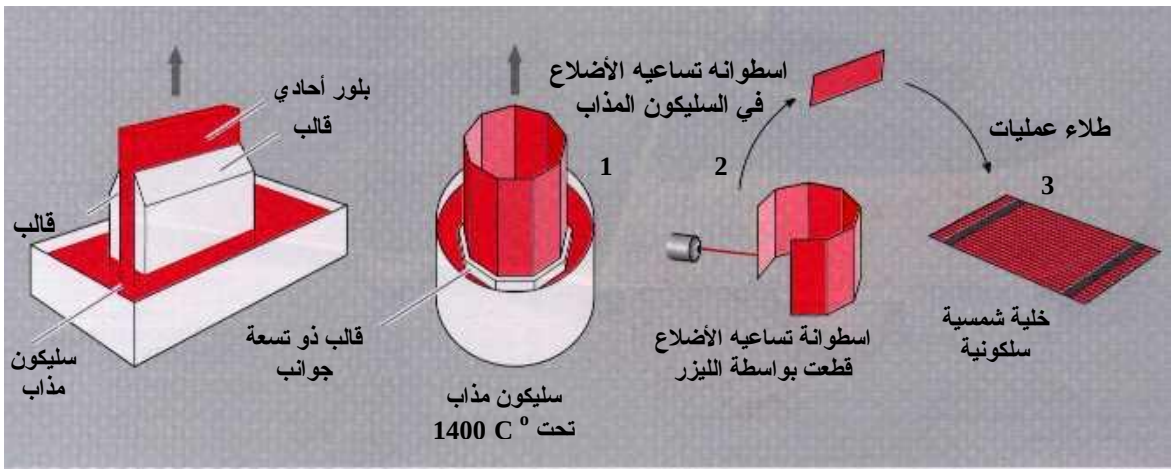
لقد تم خلال العشرين سنة الماضية تطوير طرق مختلفة لتقليل كلفة تصنيع الخلية الشمسية والألواح . من هذه الطرق تنمية السليكون على هيئة رقيقة أو شريط (Thin Film) أو استخدام سليكون متعدد البلورية بدلاً من أحادي البلورية (Polycrystalline Silicon) أو استخدام مواد أخرى مثل الغاليوم ارسنايد (Gallium arsenide) أو تصنيع خلايا غير بلورية كالخلايا السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon) .



شكل (3-6): خطوات إنتاج خلية سلكونية أحادية البلورية ولوح شمسي

2-4-3 الخلايا السلكونية الشريطية

يتم في هذه الطريقة إنتاج شريط من السليكون الأحادي البلورية من سليكون متعدد البلورية أو من سليكون بلوري أحادي مذاب . والعملية الرئيسية المستخدمة تعتمد على تحديد الحافة وعملية إنماء تغذية الرقيقة (Edge-defined, film-fed growth process)، وقد تم استخدامها من قِبل شركة سولار موبيل الأمريكية (Solar Mobile) . ويبين الشكل (3-7) خطوات عملية إنتاج هذه الخلايا .



شكل (3-7): خطوات إنتاج خلية سلكونيه شريطية

3-4-3 الخلايا السلكونية المتعددة البلورية

يتكون السليكون المتعدد البلورية (Polycrystalline Silicon Cells) من حبيبات صغيرة من البلور الأحادي . ويمكن إنتاج طبقة رقيقة من السليكون المتعدد البلورية بعدة طرق أحدها يتضمن تكوين سبيكة من السليكون المتعدد البلورية المذاب ، ومن ثم يتم تقطيع السبيكة بمنشار رقيق إلى رقائق مربعة خفيفة كما هو مبين بالشكل (3-8) ، ويتم بعد ذلك تصنيعها بنفس طريقة تصنيع السليكون الأحادي البلورية .

شكل (3-8): سبيكة سليكونية كبيرة ورقائق مربعة خفيفة

بالرغم من كون الخلايا الكهروضوئية (Polycrystalline Photovollaic Cells) المتعددة البلورية أرخص وأسهل تصنيعاً من الخلايا الأحادية البلورية (Single Crystal Cells) إلاّ أنها أقل كفاءة وذلك لكون حاملات الشحنة (كالالكترونات والثقوب) المولدة من قِبل فوتونات الإشعاع الشمسي يمكن أن تتجمع على الحدود بين الحبيبات داخل السليكون المتعدد البلورية . وقد وجد بأنه عند عملية تصنيع المادة بطريقة تكون فيها الحبيبات كبيرة الحجم ويتم توجيهها من الأعلى إلى الأسفل ، وذلك للسماح للإشعاع الشمسي بالتغلغل بعمق خلال الحبيبات ، فإن كفاءة هذه الخلايا تتحسن . والألواح السليكونية المتعددة البلورية والمتوفرة في الأسواق الحالية تصل إلى كفاءة مقدارها 10% أو أكثر بقليل . ولامتصاص معظم الإشعاع الشمسي الساقط يجب أن يكون سمك الخلية السليكونية المتعددة البلورية عدة مئات من المايكرونات (واحد على المليون) ، ولكن إحدى الشركات الأمريكية (Astro power Inc) أثبتت بأنه يمكن استخدام تقنيات مختلفة لالتقاط الإشعاع الشمسي ، وبهذا يمكن أن يكون سمك الخلية ما يقارب 20 مايكرونا، وقد تصل كفاءة هذه الصفائح الرقيقة إلى حوالي 15%. وبالرغم من كون هذه الصفائح رقيقة جداً إلاّ أنها أكثر سمكاً من الصفائح المستخدمة في بعض الخلايا الأخرى كالخلية السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon Cells) ولهذا تدعى أحياناً بالصفائح السميكة للخلايا المتعددة البلورية (Thick Polycrystalline Cells) . وفي عام 1994 تم نصب محطة في منطقة ديفز (Davis) بولاية كاليفورنيا ذات قدرة مقدارها 18 كيلوواط وتتكون من 312 لوحاً شمسياً تم تصنيعها من هذا النوع من الرقائق الخفيفة.

4-4-3 خلايا الغاليوم أرسنايد (Gallium Arsenide Cell)

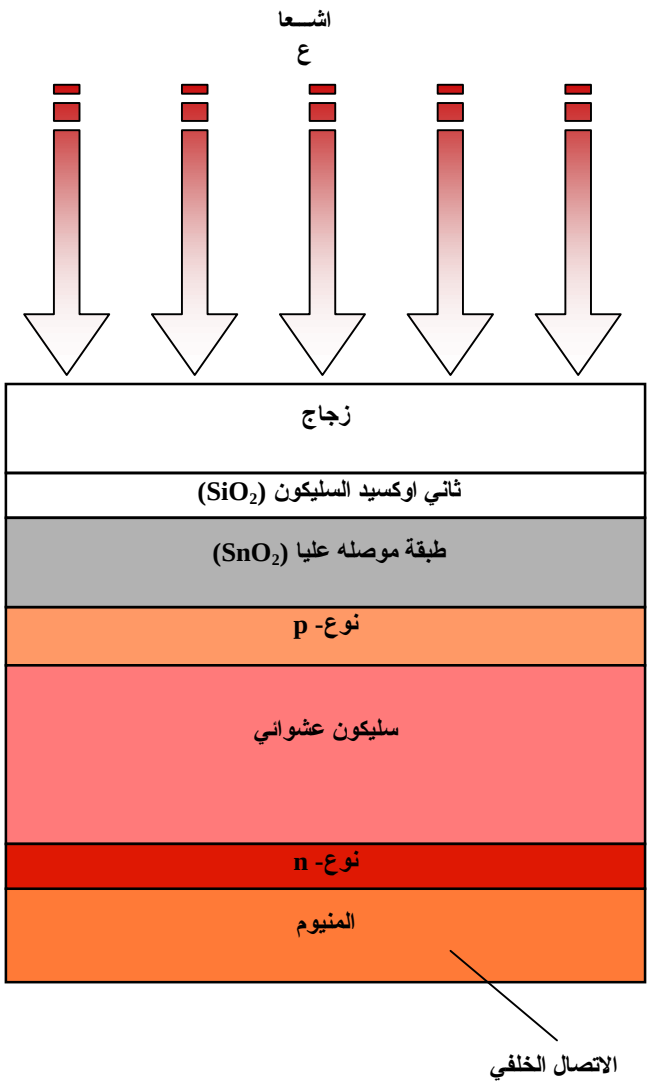
السليكون ليس المادة الوحيدة الملائمة للاستخدام في تصنيع الخلايا الكهروضوئية، فهناك مواد أخرى يمكن استخدامها كالغاليوم أرسنايد (Gallium Arsenide Cell) التي تمتلك هيكلا بلورياً مشابهاً للسليكون ، وهي تتكون من ذرات متعاقبة من الغاليوم والأرسنايد . ولكونها ذات معامل امتصاص عالٍ للضوء فإنها ملائمة جداً للاستخدام في تطبيقات الخلايا الشمسية ، وهي تتمتع بكفاءة جيدة ، ويمكن أن تعمل تحت ظروف درجة حرارة عالية نوعا ما بدون تناقص في أدائها كالخلايا السليكونية وبعض أشباه الموصلات التي تعاني من هذه المشكلة . وبهذه المواصفات يمكن استخدام خلايا الغاليوم أرسنايد في منظومات الخلايا الشمسية المركزة . ومن الأمور الأخرى التي يجب معرفتها هي أن كلفة تصنيع هذه الخلايا أعلى من كلفة تصنيع الخلايا السليكونية وذلك لكون عمليات إنتاجها غير متطورة حالياً . وتستخدم هذه الخلايا عند الحاجة إلى خلايا ذات كفاءة عالية كما هو الحال في تطبيقات الفضاء . وقد استخدمت أيضاً في تشغيل سيارة أنتجتها شركة جنرال موتورز أطلق عليها إسم صن ريسير (Sun Racer) وفازت عام 1987 بسباق عالمي للسيارات المسيرة بالطاقة الشمسية عندما قطعت مسافة 3000 كيلو متر بسرعة 66 كيلو متر في الساعة .

5-3 الخلايا ذات الأغشية الرقيقة (Thin Film Photovollaic Cells)

1-5-3 الخلية السليكونية العشوائية (Amorphous Silicon Cells)

يمكن تصنيع الخلايا الشمسية بطريقة أرخص من طرق تصنيع الخلايا البلورية الأحادية والمتعددة . وهذه الخلايا تدعى خلايا السليكون العشوائي (A-Si) وتكون ذرات السليكون فيها أقل ترتيباً من النوع البلوري . ففي السليكون العشوائي لا ترتبط كل ذرة ارتباطاً كاملاً مع الذرات المجاورة وإنما تترك ما يسمى بالرباط المتدلي (Dangling Bands) وتستطيع امتصاص إلكترونات إضافية عند إجراء عملية الطلاء . وعملية التصنيع تتم بواسطة خليط من غاز يحتوي على السليكون والهيدروجين (SiH_4) وكمية قليلة من الشوائب مثل البورون التي تتحلل كهربائياً بطريقة يمكن أن تكون طبقة رقيقة من السليكون العشوائي على قاعدة من مادة مناسبة كالفولاذ المرن (Elastic Stainless Steel) . إن الهيدروجين في هذا الغاز يقوم بتوفير إلكترونات

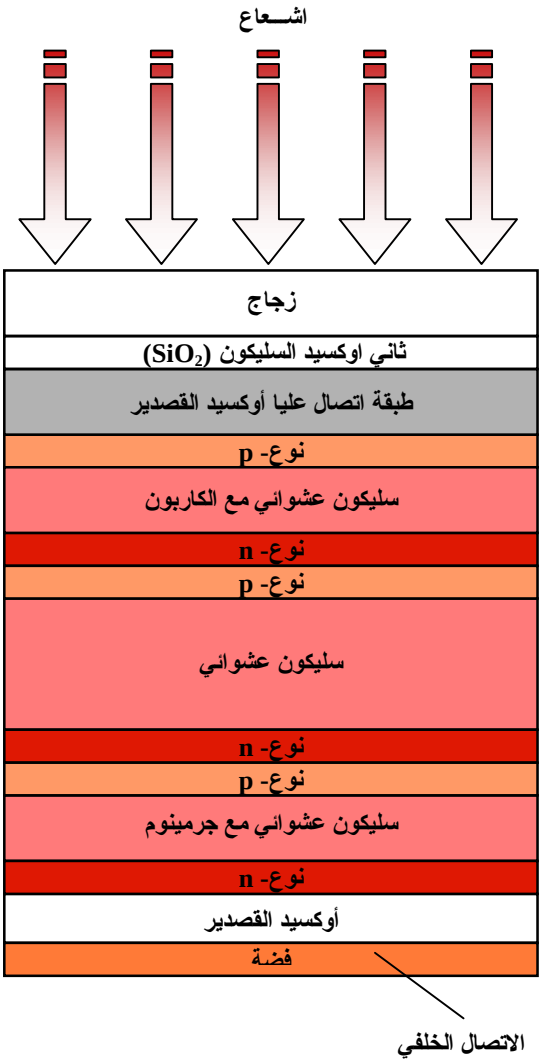
إضافية تتحد مع روابط السليكون المتدلية (Dangling Silicon Bands) لتكوين طبقة من السليكون والهيدروجين. والشوائب الموجودة في الغاز لها تأثيرها الاعتيادي بتوزيع حاملات الشحنة لتحسين القابلية التوصيلية للمادة . وتختلف خلايا السليكون العشوائي عن الخلايا المصنعة بطرق أخرى بالنسبة لمنطقة الارتباط (P-N Junction) إن تتكون في هذا النوع من الخلايا منطقة تسمى (P-I-N) وهي طبقة رقيقة جداً من نوع (P) من السليكون العشوائي تأتي بعدها طبقة داخلية (I) أكثر سمكاً من مادة السليكون العشوائي الخالي من الشوائب ، ثم طبقة رقيقة جداً نوع (N) من السليكون العشوائي . ويوضح الشكل (3-9) هيكلية هذه الخلية . والتأثير الكهروضوئي على الخلية السليكونية العشوائية مشابه لما في الخلايا السليكونية البلورية باستثناء أن سمك حيز الارتباط (Band Gap) أكبر لكنه غير محدد بصورة واضحة .



شكل (3-9): هيكلية خلية سليكونية عشوائية

وللخلية السليكونية العشوائية إيجابيات وسلبيات . ومن إيجابياتها أنها اقل سمكاً وأرخص سعراً من الخلايا السليكونية البلورية ، وهي أيضاً أكثر امتصاصاً للإشعاع الشمسي، كما أن عمليات تصنيعها تجري تحت ظروف درجة حرارة قليلة جداً مقارنة بالخلايا السليكونية البلورية ، ولهذا فهي تحتاج إلى طاقة أقل . وهي ملائمة جداً للإنتاج المستمر ويمكن طلاؤها على مواد مختلفة صلدة ومرنة كالحديد والزجاج والبلاستيك . ومن سلبيات الخلايا السليكونية العشوائية قلة كفاءتها مقارنة بالخلايا السليكونية البلورية الأحادية والمتعددة . إن أعلى كفاءة تم الحصول عليها في المختبر من هذا النوع من الخلايا الكهروضوئية لا تتجاوز 12% ، وإن كفاءتها تتناقص مع مدة تعرضها للشمس من 8% إلى ما يقارب 4% بعد عدة أشهر من الاستخدام أي أن عمرها الزمني قليل . كما أن مخلفاتها التي تحول إلى الأرسانيد (الزرنيج) ضارة بالبيئة .

وتجري محاولات كثيرة جادة لتحسين كفاءتها وحل مشكلة نقصان كفاءتها مع الاستخدام . إن إحدى الطرق المستخدمة لتحسين كفاءة التحويل هي وضع طبقتين من الأغشية الرقيقة واحدة فوق الأخرى بحيث إن كلا من هاتين الطبقتين تمتص جزءاً من الطول الموجي للإشعاع الساقط . وحيز الارتباط (Band Gap) يمكن توسيعه بواسطة استخدام طبقة من الكربون تجعل المادة أكثر امتصاصاً للضوء على النهاية الزرقاء للحزمة الضوئية . وبالطلاء بمادة الجرمنيوم (Germanium) فإن حيز الربط يقل مما يجعل المادة أكثر استجابةً للضوء على النهاية الحمراء من الحزمة . لذا فإن حيز الارتباط يكون عريضاً (Wide Band Gap) في منطقة الجزء العلوي للسيلكون العشوائي فيمتص فوتونات الضوء ذات الطاقة العالية في النهاية الزرقاء من الحزمة الضوئية التي يتبعها غشاء رقيق آخر من السليكون العشوائي ، وكل من هذين الغشائين مصمم لامتصاص جزء من الذبذبات الضوئية القصيرة القريبة من النهاية الحمراء للحزمة الضوئية (الشكل 3-10) . وبالإضافة إلى زيادة كفاءة الخلية من هذه الطريقة فإن وضع طبقات متعددة له فائدة أخرى وهي تقليل النقصان في الكفاءات التي تحدث في الخلية السليكونية العشوائية ذات طبقة الارتباط الواحدة .



شكل (3-10): استخدام طبقتين من الأغشية الرقيقة لتحسين كفاءة الخلية الشمسية العشوائية مع الاستخدام

بالرغم من الكفاءة الحالية المتدنية للخلايا السليكونيّة العشوائية فإنها تستخدم بصفة واسعة تجارياً وذلك لرخص أسعارها. وقد بلغت نسبة استخدامها في عام 1990 حوالي 30% من مجموع الخلايا المستخدمة في التطبيقات المختلفة .

والخلية السليكونية العشوائية ليست الوحيدة المناسبة بل هنالك بعض الخلايا المصنعة من تقنيات الأغشية الرقيقة (Thin Films) المتكونة من عدة شبه موصلات (Semiconductor) من بينها كوبر انديم ديسلنايد (CuIn Se_2 or CIS) وكادميوم تيلرايد (CdTe) وقد وصلت الخلايا المصنعة من هذه التقنيات إلى مرحلة الإنتاج التجاري في الوقت الحاضر .

2-5-3 خلايا الكوبراندیوم دیسلناید (Copper Indium diselenide)

وهي مواد شبه موصلة مركبة من النحاس والانديوم والسلينايد (CIS) . وقد استخدمت في تصنيع خلايا وصلت كفاءتها مختبرياً إلى 12% . وقد قامت شركة سيمنس (Simens) الألمانية بتصنيع ألواح من نوع (CIS) ذات مساحة 30 سنتمتر مربع وبكفاءة تعادل 10% . وفي عام 1994 أعلنت بأنها يمكن أن تقوم بتصنيع هذه الخلايا على النطاق التجاري بالتعاون مع إحدى شركات الزجاج الأمريكية . وهذا النوع من الخلايا لا يعاني من مشكلة نقصان الكفاءة عند الاستخدام والذي ظهر في الخلايا السليكونية العشوائية ولكن مشكلته تنحصر في سمك الغشاء الرقيق لهذه الخلايا ، فهو أكبر من الخلايا السليكونية العشوائية . وبما أن مادة الانديوم مادة غالية الثمن ، وبالرغم من أن الكمية المستخدمة قليلة فإن ذلك يؤثر على سعرها . ومن مساوئ طريقة تصنيع هذه الخلايا هو استخدام غازي الهيدروجين والسيلناید وهو سام جداً ويسبب مشاكل صحية كبيرة في حالة حدوث خلل عند التصنيع .

3-5-3 خلايا الكادميوم تليراید (CdTe)

وهي مواد أخرى شبه موصلة مناسبة لاستخدام الخلايا الفولطاضوئية تتألف من الكادميوم والتيلراید . ومن محاسن خلايا الكادميوم تيلراید هو إمكانية صنعها باستخدام عملية بسيطة ورخيصة من الطلاء الكهربائي . وقد وصلت كفاءة الخلايا من هذا النوع إلى 10% وبدون تناقص في الكفاءة عند الاستخدام . ومن مساوئ هذه الخلايا هو أن الكادميوم مادة سامة جداً ولهذا يجب أخذ الاحتياطات اللازمة أثناء عملية التصنيع .

6-3 منظومات الخلايا الفولطاضوئية المركزة

من الطرق الأخرى المستخدمة للحصول على طاقة أكثر من الخلايا الشمسية الفوتوضوئية هو تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام مرايا أو عدسات أذ يمكن استخدام عدد أقل من الخلايا الشمسية للحصول على نفس كمية الطاقة عند استخدام المركزات، وهذا يعتمد على نسبة التركيز التي تتراوح من عدة مرات إلى مئات أو آلاف المرات . والأنظمة ذات التركيز العالي تستخدم متحسسات معقدة وغالية ومحركات وأجهزة سيطرة لتعقب حركة الشمس على محورين (الارتفاع وزاوية السمت) ، بحيث تتمكن

الخلية من استقبال أعلى إشعاع شمسي ممكن . إن المنظومات ذات نسبة التركيز القليلة تتعقب الشمس على محور واحد وتكون بذلك أقل تعقيداً .

7-3 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئية

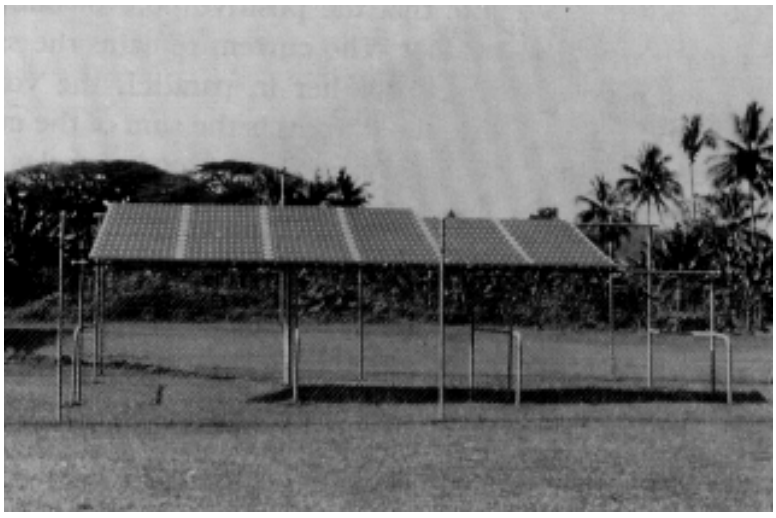
1-7-3 تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية

يزداد استخدام الخلايا الشمسية الكهروضوئية أو الفوتوفولطائية حالياً في الكثير من التطبيقات في مناطق بعيدة عن مناطق وجود الشبكة الكهربائية . وتوجد أمثلة على هذه التطبيقات موضّحة في الشكل(3-11) . وتتراوح هذه التطبيقات بين محطة تقوية راديوية على أحد الجبال أو تزويد الوحدات التلفونية الخارجية أو شاحنات بطاريات لبعض القوارب والكرفانات أو كهربة السياجات الخارجية أو إنارة الشوارع وغيرها. ولمعرفة كمية الألواح الشمسية أو سعة البطاريات اللازمة لتزويد منطقة ما بالطاقة الكهربائية يجب أن يتم تزويد مصمم منظومات الخلايا الشمسية بالمعلومات التالية :

1- الاستهلاك اليومي والأسبوعي والسنوي للطاقة الكهربائية .

2- كمية الإشعاع الشمسي اليومي والأسبوعي والشهري والسنوي الواصل إلى المنطقة التي توجد فيها المنظومة .

3 - عدد الأيام الغائمة المتكررة التي يجب أن تقوم البطارية بها بتزويد الحمل .



شكل (3-11): إحدى تطبيقات الخلايا الشمسية في المناطق النائية

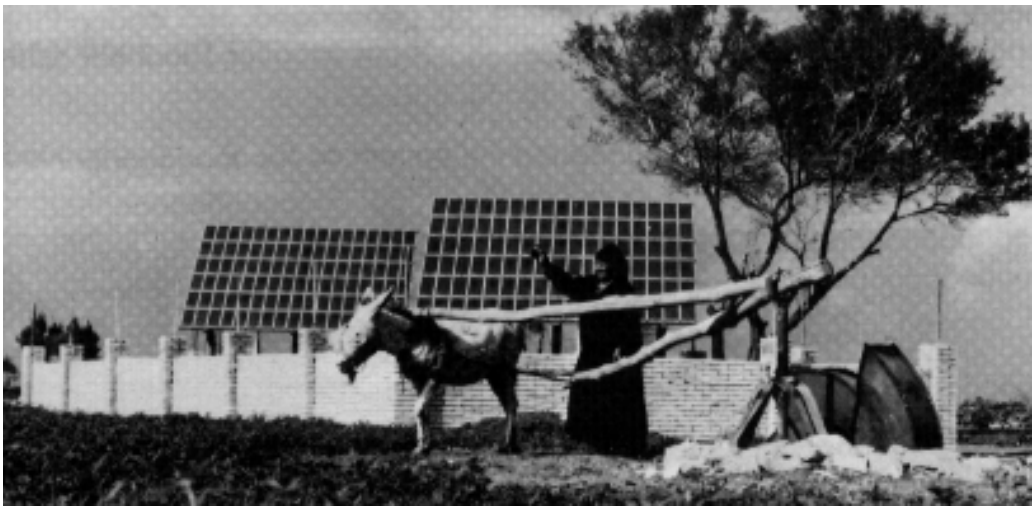
فمعرفة مكونات منظومة الخلايا الشمسية اللازمة لتزويد حمل ما معقدة ، ولهذا فإن معظم الشركات المنتجة للخلايا الشمسية أنتجت برامج حاسوبيّة لمساعدة المهندسين المصممين لحساب مساحات وسعات مكونات المنظومة وأسعارها بدقة كافية لتغطية متطلبات الأحمال في المناطق المختلفة .

2-7-3 تطبيقات الخلايا الفولطاضوئية في بعض البلدان النامية

في معظم البلدان المتقدمة تكون الشبكة الكهربائية موزعة بصورة كاملة والطاقة الكهربائية المولدة من الطاقة التقليدية ذات كلفة قليلة مقارنة بكلفة إنتاج الطاقة من منظومات الطاقة المتجددة ، ولهذا فإنه من الصعب على الطاقة المتجددة خصوصاً الخلايا الفولطاضوئية التنافس مع المصادر التقليدية .

وفي الدول النامية وبالأخص في المناطق القروية والنائية نجد أن الطاقة الكهربائية غير متوفرة، ولهذا فإن توليد الطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية يكون منافساً قوياً لتوليد الطاقة من الوسائل الأخرى كاستخدام الديزل، خاصة في البلدان التي تنعم بإشعاع شمسي عالٍ. وإن استخدام الخلايا الشمسية يتوسّع باستمرار وبصورة سريعة في مختلف التطبيقات خاصة في مجالات ضخ المياه ، ومنظومات الري ، ومنظومات مياه الشرب، وتشغيل ثلاجات الأدوية ، وفي الأعمال المنزلية والعامة كالإنارة وتشغيل الراديو والتلفزيون والفيديو وغيرها من وسائل الراحة ، وإنارة الشوارع ومنظومات الاتصالات . ويبين الشكلان (12a, b-3) بعض التقنيات المستخدمة في عدد من البلدان النامية .

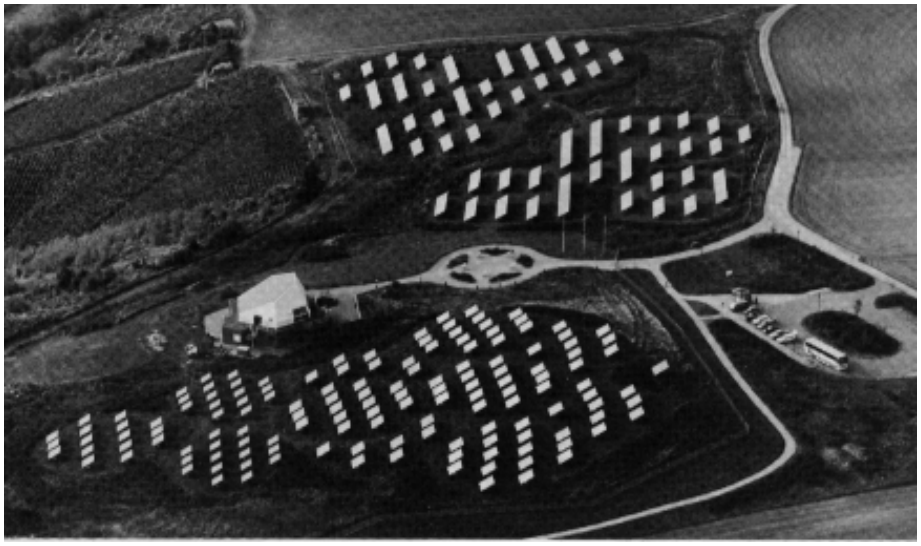
شكل (12a-3): بعض تطبيقات الخلايا الشمسية في الدول النامية



شكل (3-12b): بعض تطبيقات الخلايا الشمسية في الدول النامية

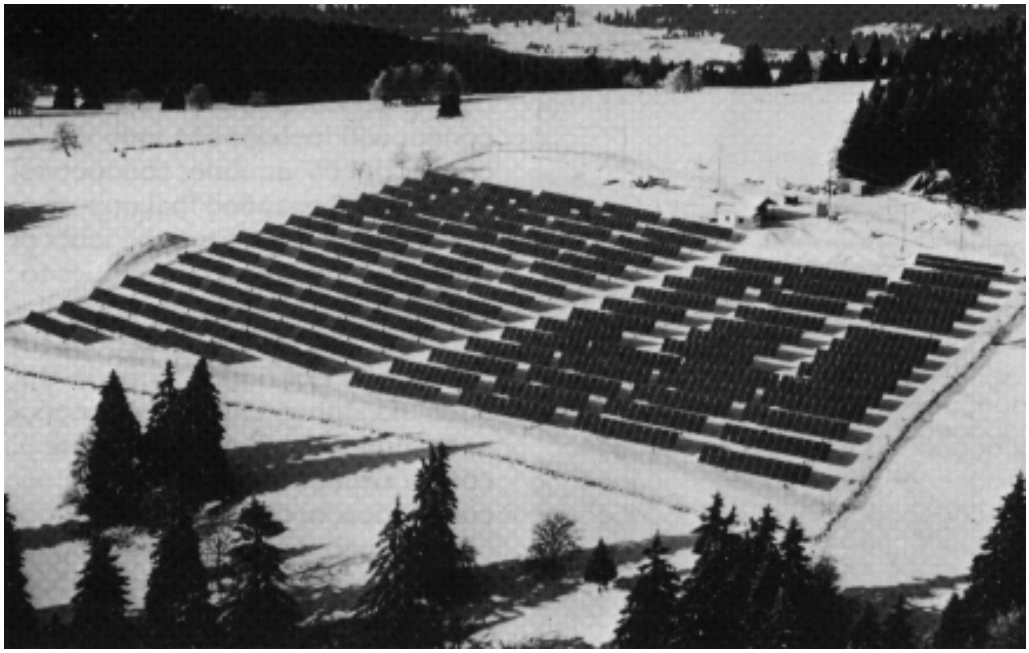
3-7-3 استخدام المنظومات الفولطاضوئية للربط مع الشبكات الكهربائية

تم تشييد عدد من المنظومات الكبيرة السعة في عدد من دول العالم . نجد في أوربا إحدى أكبر المحطات التي نصبت ، وكان ذلك في عام 1988 من قِبل أكبر شركة توزيع كهربائية ألمانية (RWF) بالقرب من مدينة كويلنز على إحدى التلال القريبة من نهر موسيلي . وبلغت سعة المحطة 340 كيلو واط وبطاقة سنوية مقدارها 250000 كيلو واط – ساعة . وخضعت المحطة لمراقبة مستمرة وتم تقييم أدائها ، وعلى ضوء ذلك تم تصميم الجزء الثاني من المشروع البالغ 300 كيلو واط على ضفاف بحيرة تيورات وبدأ في العمل عام 1991 (الشكلان 3-13a, b) . كما شاركت شركة (RWF) أيضاً في تشييد محطة بقدرة 1 ميغاوات بالقرب من طليطلة في إسبانيا . وفي سويسرا تم إنشاء محطة بقدرة 500 كيلوواط ربطت بالشبكة ، كما في (الشكل 3-14) . وبلغت تكاليف المحطة 3.8 مليون جنيه إسترليني وشيدت على مساحة 20 ألف متر مربع، وتتكون من 110 مجموعات من الألواح الشمسية الأحادية البلورية من إنتاج شركة سيمنس ، سعة كل منها 5 كيلو واط وبمساحة 4574 متراً مربعاً من الخلايا لكل مجموعة. وتبلغ الطاقة السنوية للمحطة 700 ميغاوات – ساعة .



شكل (13a-3): محطة سعة 340 كيلوواط منصوبة على نهر موسيلي في ألمانيا

شكل (13b-3): محطة سعة 300 كيلوواط في ألمانيا



شكل (3-14): محطة سعة 500 كيلوواط في سويسرا

ومن البلدان الأخرى التي اهتمت باستغلال الخلايا الكهروفولطائية في إنتاج الكهرباء إيطاليا ، فقد تم نصب محطة بقدرة 300 كيلوواط بالقرب من مدينة فوجيا في جنوب إيطاليا . وقد تم توسيع المحطة إلى 600 كيلوواط عام 1991 (الشكل 3-15) . كما تم بناء محطة أخرى أكبر بسعة 3.3 ميغاواط بالقرب من مدينة نابولي الإيطالية أيضاً .

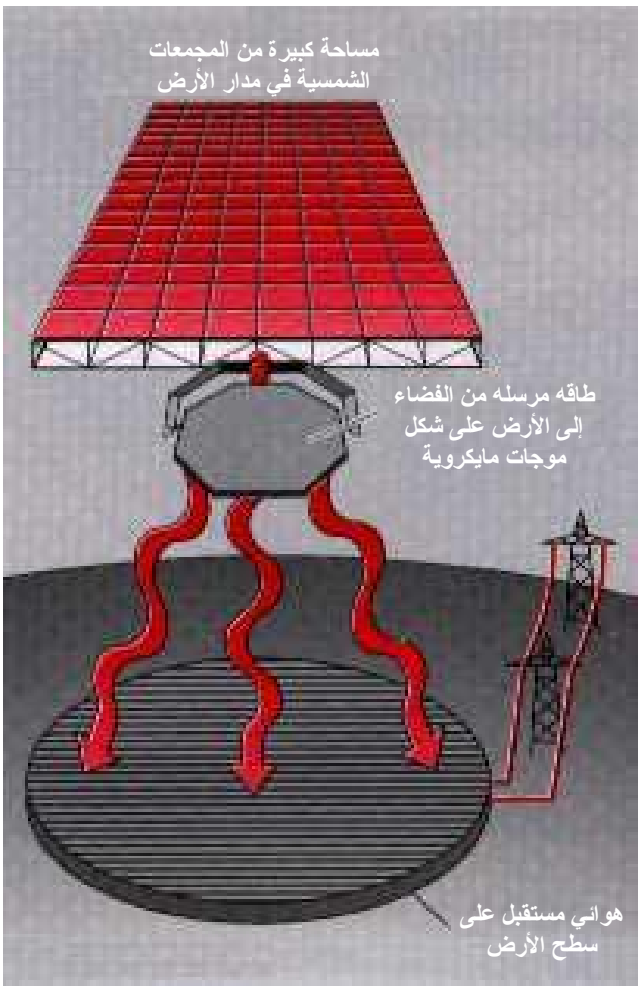
شكل (3-15): محطة بسعة 600 كيلوواط في بريطانيا

وفي الولايات المتحدة تم نصب عدد كبير من المحطات ذات السعة العالية منها منظومتان رائدتان نصبتا في كاليفورنيا من قِبل شركة آركو (Arco) في بداية الثمانينات سعة الأولى 1 ميغاواط والثانية 6.5 ميغاواط ، وقد استخدمت كلا المحطتين منظومة تعقيب على محورين لتركيز الطاقة على الخلايا يعادل ضعف شدة الإشعاع، ونتيجة لدرجة الحرارة العالية على الخلايا فقد تناقصت كفاءة قسم منها . وقد تم تفكيك المحطتين وبيعت أجزاؤها للاستخدام في منظومات صغيرة لمناطق نائية . وهنالك بعض المحطات الكبيرة الأخرى التي تم نصبها في مناطق متعددة منها محطة بسعة 1 ميغاواط تستخدم منظومة تعقيب أحادية المحور نصبت في ولاية كاليفورنيا ، ومحطة أخرى نصبت في تكساس بسعة 300 كيلوواط . ونصبت أيضاً محطات عديدة في أنحاء مختلفة من الولايات المتحدة بسعات تتراوح بين 200 إلى 400 كيلوواط كل منها يستخدم تقنية مختلفة من تقنيات الخلايا الفولطاضوئية . وقد تم تقديم مقترح لبناء محطة بسعة 100 ميغاواط تنصب في صحراء نيفادا وتستخدم المحطة خلايا شمسية من نوع السليكون العشوائي . وقد تم تقدير كلفة المحطة بـ 150 مليون دولار ، ويمكنها أن تنتج طاقة كهربائية بكلفة 5.5 سنت لكل كيلوواط – ساعة .

8-3 استخدام الخلايا الشمسية في الفضاء

تم اقتراح نصب محطة فضائية لتوليد الطاقة الكهربائية بسعة عدة جيغاواط (1 جيغاواط = 1000 ميغاواط = 10^9 واط) تنصب على مدار حول الأرض وبمساحة تعادل 30 كيلو متر مربع . ويتم تحويل التيار المستمر الذي تنتجه الخلايا إلى إشعاع مايكرو ويف بذبذبة مقدارها 2.45 جيغا هيتز وتوجه بكثافة قدرة مقدارها 250 وات/م^2 من1 كيلو متر قطر هوائي في الفضاء إلى 100 كيلو متر مربع هوائي على سطح الأرض . ويتم بعدها تحويل الطاقة المستلمة إلى تيار متناوب ، وتربط مع الشبكة (الشكل 3-16) . ومن مزايا نصب هذه المنظومة أن الإشعاع الشمسي في الفضاء الخارجي يصل إلى 1367 واط لكل متر مربع بدلا من 1000 واط لكل متر مربع على سطح الأرض . وهذه الطاقة متوفرة دائماً ، ويمكن كذلك اختيار هياكل واسعة وذات متانة قليلة لانعدام الرياح ومشاكل الجو الأخرى . ولكن المشكلة الرئيسية التي تواجه نصب هذه المحطة هي الكلفة . لقد أجريت دراسة في الولايات المتحدة تبين منها أن كلفة نصب محطة تنتج 5 ميغاواط تقدر بحوالي 15 بليون دولار ، وهذا المبلغ مرتفع

ولا يمكن أن تنفقه أغنى دول العالم إلاّ إذا آثرت التخلي عن جزء من ميزانيات الإنفاق العسكري على الأسلحة .



شكل (3-16): فكرة محطة شمسية فضائية

أسئلة تقويمية

١. ما هي مبادئ عمل الخلية الشمسية الفلطاضوئية ؟
٢. ما هي المراحل التي تمر بها الطاقة الشمسية حتى تصبح طاقة كهربائية ؟
٣. ما هي أنواع الخلايا الشمسية الفلطاضوئية ؟
٤. ما الفرق بين الخلية الشمسية الأحادية البلورية والمتعددة البلورية ؟
٥. ما الفرق بين الخلية السلكونية البلورية والخلية السلكونية العشوائية ؟
٦. ما هي المواد الأخرى بالإضافة إلى السليكون التي يمكن منها إنتاج خلية شمسية ؟
٧. لغرض تصميم منظومة توليد كهربائية تعمل بالخلايا الشمسية ، ما هي المتطلبات التي يجب أن تتوفر لدى المصمم لاختبار مكونات ومواصفات المنظومة ؟
٨. ما هي التطبيقات الأكثر استخداماً في الوقت الحالي في مجال توليد الطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية الفلطاضوئية ؟
٩. ما هي الأسباب التي تحول دون نصب محطات توليد كهربائية كبيرة السعة وربطها مع الشبكة الكهربائية ؟
١٠. هل يمكن نصب محطة توليد كهربائية في الفضاء الخارجي واستلام الطاقة على سطح الأرض ؟ وما هي المعوقات التي تحول دون ذلك ؟
١١. ما هي التأثيرات البيئية الناتجة عن استخدام الخلايا الشمسية ؟