الفصل الرابع

تحويل الطاقة الشمسية

(نهدف إلى بناء عمارات تنتج الطاقة التي تستهلك)

الرئيس آوباما، إبريل 2009

obeikandl.com

obeikandl.com

الفصل الرابع

تحويل الطاقة الشمسية

(نهدف إلى بناء عمارات تنتج الطاقة التي تستهلك)

الرئيس آوباما، إبريل 2009

1 - مقدمة

من أهم التحديات التي تواجه الإنسانية في بداية هذا القرن الحفاظ على سلامة البيئة وتوفير الطاقة والماء الضروريين لاستمرار الحياة فوق الأرض. تؤكد الدراسات أننا استهلكنا خلال سنة 2002 ما يزيد على $4.25X10^{20}$ جول من الطاقة... قد لا يعني هذا الرقم كثيراً بالنسبة إلى كثير من الناس، ولكن ما يهمنا هنا هو مقارنته بكمية الطاقة الشمسية التي نستقبلها من ضوء الشمس على مدار السنة... يتلقى المربع الواحد من مساحة الأرض من الشمس ما يقارب ألف جول في الثانية (أي 1 كيلوواط في المتر المربع الواحد 1kW/m2). وعليه يمكن أن نبين بواسطة عملية حسابية يسيرة أن الأرض تستقبل من

obeikandl.com

الشمس في الساعة الواحدة كمية من الطاقة تعادل ما تستهلكه خلال سنة كاملة. إضافة إلى ذلك، تعد الطاقة الشمسية (طاقة نظيفة) لأن إنتاجها واستخدامها لا يؤدي إلى تلويث البيئة بالقدر الذي يكون عند استخدام المصادر التقليدية للطاقة مثل البترول والغاز والفحم. هذه الحقائق كافية لتفسير الحماس الكبير الذي يبديه الباحثون في مجال الطاقة الشمسية. وعلى الرغم من ذلك، تبقى المصادر الأساسية للطاقة اليوم هي البترول والغاز والفحم، وليست الشمس، حيث توفر هذه المصادر ما يزيد على (86%) من الطاقة التي نستهلكها. ولكن زيادة الوعي بالأخطار البيئية التي تنتج عن الاعتماد شبه الكلي على هذه المصادر لإنتاج الطاقة شجع على تطوير البحث عن مصادر أخرى للطاقة تكون (متجددة) ونظيفة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. ولكن العقبة الأساسية التي تحول دون زيادة كبيرة في إنتاج الطاقة من هذه المصادر هي كلفتها العالية. كلفة الطاقة الشمسية تزيد حالياً على أربعة أضعاف كلفة الطاقة المنتجة من الغاز والبترول.

يعني هذا أن التحدي الأساسي الذي يواجهنا اليوم هو تقليص سعر الطاقة الشمسية. ولكن صناعة تحويل الطاقة الشمسية في تطور سريع. فقد بلغت القدرة الإنتاجية للطاقة الشمسية الموجودة في مختلف الدول قيمة 6.85GW سنة 2008، أي ما يقارب 7 مليارات واط ، وهي قيمة تزايدت بأكثر من (110%) مقارنة بسنة 2007. وزاد دخل الدول من هذه الصناعة على 37 مليار دولار أمريكي. تتسابق الدول على تنمية حصتها من هذا السوق، حيث تتصدر الترتيب أوربا (82%). وكانت ألمانيا تتصدر ترتيب الدول حتى سنة 2007 ولكن إسبانيا أخذت الصدارة سنة 2008 بفضل نمو طاقتها الإنتاجية بما يقارب ثلاثة أضعاف (285%)، ثم تليها ألمانيا وأمريكا وكوريا الجنوبية وإيطاليا واليابان.

obeikandl.com

هنـاك تحـدٍّ آخر يتعلق بتخزيـن الطاقة. نحـن نواجه هذه المشـكلة يوميًّا حين نضـطر إلى شحن البطاريات الصغيرة لتشـغيل جهاز الهاتف الجوال أو الحاسوب المحمول. هل يمكن تصميم بطارية توفر الطاقة الكافية التي تسمح للهاتف الجوال أن يشـتغل شـهراً كاملاً بدلاً من بضـعة أيام؟ مشـكلة تخزين الطاقة مهمة جدًّا وحلها يسـمح بتصـميم أجهزة تحول الطاقة الشمسية إلى طاقـة كهربائية خلال النهار وتخزنها للاسـتخدام في الليـل أو في أوقات يقل فيها ضوء الشمس بسبب الأحوال الجوية مثلاً. ولكن ما علاقة النانوتكنولوجيا بتطوير اسـتخدامات الطاقة الشمسـية؟ نحاول الإجابة عن هذا السـؤال من خلال هذا الفصل.

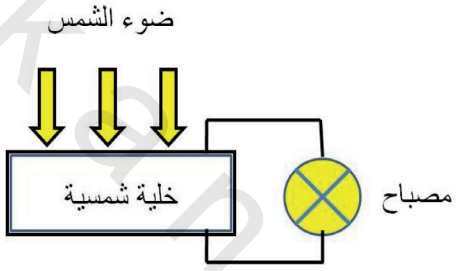
2 - تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية

بدايـة، لا بـد أن نفهم كيف تحـول الطاقة الشمسـية إلى طاقـة كهربائية بواسـطة الخلايا الشمسية. هذا ضروري؛ لأنه سيساعدنا على فهم استخدام النانوتكنولوجيا لتحسين تصـميم الخلايا الشمسية والتقليل من كلفة الطاقة التي تولدها هذه الخلايا. سـوف نحرص كالعادة على تيسـير العرض، بحيث يكـون مفهومـاً دون الحاجة إلى خلفية علمية متقدمـة. يبدو هذا تحدياً كبيراً ولكننا سنحاول.

يمكننا أن نصـف الخلية الشمسـية بأنهـا جهاز إلكتروني لـه القدرة على امتصـاص الأشـعة الشمسـية السـاقطة عليه، وينتج عن ذلك تيار كهربائي. (الشـكل 4.1) قد لا يثير هذا اسـتغراباً عند كثير منا؛ لأن الخلايا الشمسـية أصـبحت مألوفة وجميع الناس يعرفون أنها تولد كهرباء. وربما لا يعرف كثير

obeikandl.com

أن معظم الخلايا الشمسية مصنعة من مادة السليكون... المادة نفسها شبه الموصلة التي يصنع منها الترانزيستور (مسفيت) الذي تحدثنا عنه بإسهاب في الفصل الأول. ولكن ليس كل مادة شبه موصلة توضع تحت نور الشمس تولد كهرباء، حتى لو كانت مادة السليكون نفسها... فالخلية الشمسية أكثر من مجرد قطعة سليكون.. ترى، كيف يتم توليد التيار الكهربائي؟



(الشكل 4.1) خلية شمسية تحول طاقة الضوء الساقط عليها إلى تيار كهربائي يستخدم للإضاءة.

تصنع الخلايا الشمسية من مواد شبه موصلة، وهي كما يدل عليه اسمها مواد تقع بين المواد الموصلة للكهرباء، مثل الذهب والفضة والنحاس وغيرها من الفلزات والمواد العازلة للكهرباء، مثل الخشب وكثير من المواد الخزفية. ولكن الخلية في الحقيقة ليست مكونة من قطعة واحدة، بل من طبقتين من السليكون مختلفتين من حيث نوعية الإشابة (doping) أي طبيعة العنصر الخارجي الذي يضاف لمادة السليكون لتغيير توصيليتها الكهربائية. فالخلية عبارة عن صمام ثنائي أو (دايود Diode) يتكون من طبقتين من نوع p و n. ما يهمنا معرفته هنا هو أن المنطقة الفاصلة بين الطبقتين يتكون فيها مجال

كهربائي هو المسؤول المباشر عن توليد التيار الكهربائي، حين تتعرض الخلية لضوء الشمس، كما سيتضح فيما يأتي:

يؤدي امتصاص الضوء الساقط على الخلية إلى تحرير عدد كبير من الإلكترونات الموجودة في المدارات الخارجية للذرات. وكل إلكترون محرر يترك وراءه فراغاً شحنيًّا يطلق عليه اسم (ثقب). هذه الثقوب تتحرك بحرية مثل الإلكترونات ذات الشحنة السالبة. ولكنها تحت تأثير مجال كهربائي تتحرك في الاتجاه المعاكس للإلكترونات... وعليه، يمكننا أن ننظر إلى هذه الثقوب على أنها شحن حرة موجبة تتحرك في اتجاه المجال الكهربائي. يمكننا الآن أن نفهم ماذا يحدث داخل الخلية عند تعرضها لضوء الشمس. لا بد أن نتذكر أن التيار الكهربائي يتولد نتيجة للتدفق الشحني. وهذا يعني أنه لو كانت الإلكترونات تتحرك بصفة عشوائية يميناً ويساراً، لا ينتج عن ذلك أي تيار كهربائي. وهذا هو الحال إذا عرضنا قطعة سليكون للضوء. ولكن وجود المجال الكهربائي داخل الخلية يدفع كل الإلكترونات في اتجاه واحد وكل الثقوب في الاتجاه المعاكس، فينتج التيار الكهربائي.

أهم ما يميز الخلية الشمسية نسبة الطاقة الشمسية التي تحولها إلى طاقة كهربائية، وهو ما يعبر عنه بمردود الخلية. زيادة مردود الخلية يؤدي إلى التقليل من كلفة الطاقة الكهربائية المنتجة، وهو ما تسعى إلى تحقيقه كل الجهود والبحوث الجارية حالياً من أجل التحول من عصر طاقة الفحم والمحروقات الملوثة إلى عصر طاقة الشمس والمصادر النظيفة والمتجددة. لكننا نحتاج إلى التدقيق أكثر في آلية امتصاص الضوء وتوليد التيار؛ حتى نفهم العوامل التي تتحكم في مردود الخلية الشمسية.

obeikandi.com

3 - مردود الخلية الشمسية

مردود الخلية Cell Efficiency هو نسبة الطاقة الكهربائية المُولدة إلى كمية الطاقة الضوئية الساقطة على الخلية. لنعطِ مثالاً. إذا كانت لدينا خلية شمسية يسقط على سطحها 1 كيلوواط (1kW) من الطاقة الشمسية، فتولد عشرها على شكل طاقة كهربائية، نقول: إن مردود الخلية هو (10%).

ترى ما العوامل التي تجعل قسماً كبيراً من طاقة الضوء يضيع، ولا يتحول إلى طاقة كهربائية... ؟ هناك أسباب يمكن لكل قارئ أن يدركها: أولها انعكاس الضوء على سطح الخلية. فالضوء المنعكس لا يمتص، ولا يحرر إلكترونات داخل الخلية، وعليه فهو يمثل طاقة ضائعة. وأما السبب الثاني فهو تبدد قسط من الطاقة الشمسية داخل الخلية في شكل حرارة كما يدل عليه ارتفاع درجة حرارة الخلية. تختلف الكمية الضائعة في شكل حرارة حسب طبيعة المادة التي صنعت منها الخلية. سوف نفصل أكثر في شرح هذه الحقيقة فيما يأتي. ولكن قبل ذلك لا بد من ذكر سبب ثالث مهم يحد من مردود الخلايا الشمسية، وهو يتعلق بإمكانية استرجاع الذرات نسبة من الإلكترونات المحررة، وهو ما يقلل من التيار الكهربائي المولد. يطلق على عودة الإلكترون إلى الثقب اسم (إعادة -التحام- الإلكترون والثقب electron- hole recombination). هذه النسبة تتغير من مادة إلى أخرى، ولا نريد التوسع في شرح ذلك؛ حرصاً منا على تيسير العرض. لكن من المهم أن نذكر أن وجود شوائب في المادة شبه الموصلة (مثل ذرات حديد في مادة السليكون) يزيد كثيراً في ظاهر التحام الإلكترونات والثقوب وتقليل التيار المولد في الخلية. يعني هذا أنه يجب الحرص على نقاوة المادة التي تصنع منها الخلية وخلوها من مختلف العيوب. وهنا تتضح إحدى

obeikandl.com

المعضلات التي تواجه مصممي الخلايا الشمسية... نحن نحتاج إلى مواد شبه موصلة خالية من الشوائب والعيوب لزيادة مردود الخلايا، ولكن كلفة هذه المواد عالية.

تتراوح فاعلية الخلايا الشمسية السليكونية بين (6%) و(25%) حسب مواصفات المادة السليكونية المستخدمة من حيث نقاوتها من الشوائب وخلو بنيتها من مختلف العيوب. ما يزيد على (90%) من الخلايا الشمسية مصنعة من مادة السليكون Silicon. ولكن البحوث متواصلة من أجل التقليل من كلفة الطاقة المنتجة بواسطة الخلايا الشمسية من خلال تحسين مردود هذه الخلايا أو استحداث بدائل عن مادة السليكون.

نتج عن هذه البحوث في السنوات الأخيرة ظهور خلايا شمسية مصنعة من مواد أخرى غير مادة السليكون سميت بخلايا الجيل الثالث، ومنها الخلايا العضوية organic cells والخلايا المحسسة بجزيئات صبغية Dye Sensitized Solar cells DSSC التي يطلق عليها كذلك اسم مخترعها السويسري جراتزيل Graetzel. وهناك خلايا مصنعة من مادة كاديوم تلورايد cadmium telluride CdTe بلغ مردودها (26.5%) لكن سمية عنصر الكاديوم جعلت بعض المختصين يشكون في مستقبل هذا النوع من الخلايا.

وفي المقابل يعكف عدد من الباحثين على تطوير خلايا مصنعة من عناصر عدة، هي: النحاس والأنديوم والجاليوم والسلينيوم Cu(InGa)Se2 تختصر في الحروف الأولى لكل عنصر CIGS. وقد استطاع المختبر الوطني الأمريكي للطاقات المتجددة NREL تصنيع خلايا CIGS بمردود (19.9%). وأما الخلايا العضوية، فهي لا تزال في بداية الطريق، حيث إن قدرتها علي تحويل الطاقة الشمسية إلى

obeikandl.com

طاقة كهربائية ضعيفة نسبيًّا مقارنة بالخلايا المصنعة من السليكون. ولكن جهود الباحثين سمحت بتحسين فاعلية هذه الخلايا بصفة متواصلة خلال السنوات الأخيرة، حيث تزايدت من (3%) سنة 2000 إلى نحو (6%) سنة 2007.

يمكن أن نتساءل: ما المردود الأقصى للخلايا الشمسية الذي يمكن أن نحققه؟ هذا سؤال مهم. وهو نموذج من الأسئلة الأساسية التي يطرحها المهتمون بتطوير التكنولوجيا في مختلف المجالات. والإجابة عنها يتولاها الفيزيائيون؛ لأنهم أدرى بالقوانين التي تحكم الظواهر الكونية التي تحدد الممكن والمستحيل. لنتذكر ما كان يقوله فاينمان في منتصف القرن الماضي: (يمكن تطوير المجهر الإلكتروني مئة ضعف...؛ لأن ذلك لا يتعارض مع قوانين الفيزياء التي تحكم الحيود الإلكتروني...). وصدق قوله.

4 - المردود الأقصى للخلايا الشمسية

في بداية الستينيات من القرن العشرين، نشر العالمان شوكلي وكوايسر Shockley-Queisser بحثاً يقدم حسابات تبين أن القيمة القصوى لمردود الخلايا السليكونية لا يمكن أن تتجاوز (31%). نحاول فيما يأتي تناول بعض المفاهيم الأساسية التي ارتكزت عليها هذه الحسابات.

تأكد للعلماء منذ بداية القرن العشرين أن الضوء عبارة عن (حبيبات) من الطاقة أطلق عليها اسم (الفوتونات Photons) وهي ذات طاقة محددة تتغير بتغير لون الضوء. فمثلاً طاقة الفوتونات الحمراء تساوي نصف طاقة الفوتونات الزرقاء تقريباً، وطاقة الفوتونات تحت الحمراء أقل بكثير من طاقة الفوتونات

obeikandl.com

فوق البنفسجية. وكذلك نعرف أن تحرير الإلكترونات من المدارات الخارجية للذرات يتطلب طاقة محددة تختلف من مادة إلى أخرى. نفهم من هذا أن المواد التي يمكن استخدامها لتصنيع الخلايا الشمسية لا بد أن تكون طاقة الفوتونات الساقطة عليها أكبر من الطاقة الدنيا لتحرير الإلكترونات. ففوتونات الضوء الشمسي التي تقل عن هذه الطاقة الدنيا لا تحرر إلكترونات، ومن ثم لا يستفاد منها لإنتاج تيار كهربائي في الخلية. أما الفوتونات التي تساوي أو تزيد طاقتها عن الطاقة الدنيا لتحرير الإلكترونات فتمتص، وينتج عن كل فوتون ممتص إلكترون محرر واحد يسهم في توليد التيار الكهربائي في الخلية.

أول ملاحظة مهمة يمكننا الإشارة إليها هي أن الفوتون الواحد الذي يمتص يحرر إلكتروناً واحداً حتى لو زادت طاقة الفوتون كثيراً عن الطاقة الدنيا لتحرير الإلكترون . لنأخذ مثلاً مادة السليكون. فالطاقة الأدنى لتحرير الإلكترونات تساوي إلكترون فولت واحداً تقريباً (1.1 eV) . وعليه، فإن كل فوتون ذا طاقة أقل من هذه القيمة لا يمكنه أن يحرر إلكترونات من ذرات السليكون. المشكلة هي أن ما يقارب نصف طاقة الضوء الوارد من الشمس تحمله فوتونات تحت الحمراء ذات طاقة ضعيفة. يعني هذا أن نصف الطاقة الضوئية التي تستقبلها الخلية لا يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية. بعبارة أخرى لا نتوقع من مردود الخلية السليكونية أن يتجاوز (50%) بوصفه قيمة قصوى. ولكن هناك عوامل أخرى تحول دون تحقيق هذه القيمة.

أول هذه العوامل انعكاس الضوء على سطح الخلية. فالضوء المنعكس ضائع؛ لأنه لا يولد كهرباء. وتبين الدراسات أن مادة السليكون تعكس ما يقارب ثلث الضوء الساقط عليها. نفهم من هذا كله سر تدني فاعلية الخلايا الشمسية

obeikandl.com

المصنعة من السليكون. ثلث الضوء ينعكس دون توليد كهرباء، ونصفه ينفذ إلى داخل الخلية دون أن يقدر على تحرير إلكترونات.

هناك سبب إضافي وراء ضعف مردود الخلايا المصنعة من مادة السليكون أو غيرها، وهو ناتج عن طبيعة ضوء الشمس نفسه الذي يتكون من فوتونات ذات طاقات مختلفة. ذكرنا أن الشرط لامتصاص الفوتونات هو أن تكون طاقتها أكبر من الطاقة الضرورية لتحرير الإلكترونات من ذراتها، وهي 1.1 eV في مادة السليكون. ولكن امتصاص الفوتون الأحمر ذي الطاقة 1.6eV يحرر إلكتروناً واحداً ويتبدد الفائض من الطاقة أي ما قدره 0.5eV في شكل حرارة بدلاً من كهرباء. وكذلك الحال بالنسبة إلى الفوتون الأزرق ذي الطاقة 3eV حيث تكون الطاقة المبددة في شكل (حرارة ضائعة) أكبر.

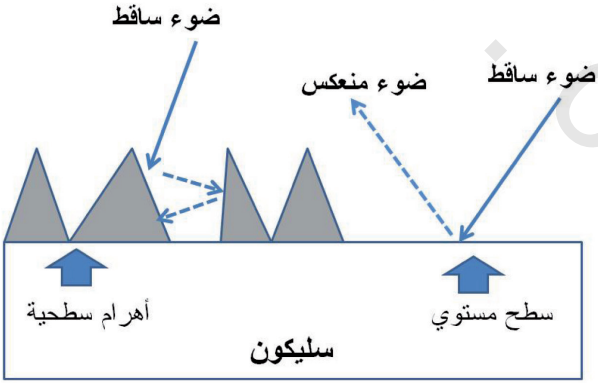
هذه العوامل مجتمعة هي التي قام العالمان شوكلي وكوايسر Shockley-Queisser بحساب تأثيرها على مردود خلية السليكون، فوجدا أن القيمة القصوى لا تتجاوز (31%). تجدر الإشارة إلى أن أعلى قيمة لمردود الخلايا الشمسية المصنعة من مادة السليكون أنجزت حتى كتابة هذه السطور هي (25%). تحقق هذا الإنجاز علي يد الأستاذ مارتين جرين Martin Green وفريقه بمركز التميز في الكهرضوئيات بأستراليا في نهاية سنة 2008.

يبدو أن تجاوز هذا الحد الأقصى لمردود الخلايا السليكونية تحدٍّ يصعب رفعه؛ لأنه ناتج عن طبيعة الضوء وخواص مادة السليكون التي تمتصه أو تعكسه. ولكن الباحثين لا يسلمون بسهولة بالعجز عن تحقيق ما يبدو شبه مستحيل... سوف نرى فيما يأتي كيف استطاع الباحثون بفضل الهندسة النانوية أن يقلصوا من انعكاس الضوء على سطح الخلية السليكونية ومن تحسين امتصاصه والتقليل من نسبة الطاقة الضوئية المحولة إلى حرارة ضائعة.

5 - هندسة نانوية لتقليص انعكاس الضوء على سطح الخلايا الشمسية

تعكس المواد المختلفة الضوء الساقط عليها بنسب متفاوتة. هذه ظاهرة عامة. سبق أن ذكرنا أن مادة السليكون التي تصنع منها اليوم معظم الخلايا الشمسية تعكس ما يقارب ثلث الضوء الساقط عليها. ولكن الحاجة الماسة إلى تحسين مردود الخلايا الشمسية دفعت الباحثين إلى استحداث طرق للتقليل من نسبة الضوء المنعكس على سطح الخلية. إحدى هذه الطرق تتمثل في تغليف سطح الخلية بطبقة رقيقة من مركب نايترايد السليكون Si3N4 الذي يؤدي إلى تقليص انعكاس الضوء من (30%) إلى (17%) تقريباً.

ومن بين الأفكار التي طبقت بنجاح منذ بداية الثمانينيات إنشاء أشكال هرمية صغيرة على سطح مادة السليكون، يوضح الشكل 4.2 كيف تساعد هذه الأشكال الهرمية على زيادة احتمال امتصاص الضوء من خلال انعكاسات متتالية للضوء على سطح الأهرام.

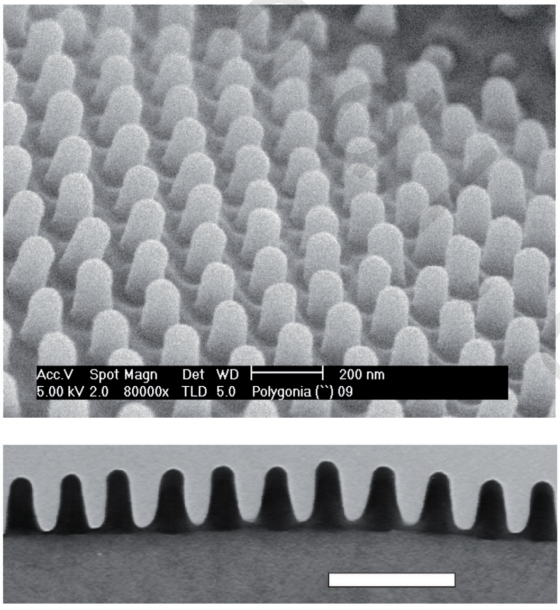


(الشكل 4.2) الأشكال الهرمية على سطح السليكون، زيادة احتمال امتصاص الضوء من خلال انعكاسات متتالية، بينما ينعكس الضوء مرة واحدة على السطح المستوي، فلا تكون له فرصة أخرى ليمتص ويولد شحنات حرة.

obeikandl.com

طورت تقنيات مختلفة من أجل تشكيل السطح السليكوني، بحيث يمتص أكبر قدر من الضوء منها طرق كيميائية، ومنها ما يستخدم الليزر أو القصف بأيونات ذات طاقة مختارة (يمكن للقارئ المهتم أن ينظر في المرجع والمراجع المذكورة فيه).

ذكرنا في الفصل الثالث أن البنية النانوية لقرنية عين الفراشة تقلل من انعكاس الضوء عليها، وتحسن قدرة الفراشة على الإبصار في ظروف يكون فيها الضوء ضعيفاً. يبين الشكل 4.3 صورة لعين فراشة، كما يوضحها المجهر الإلكتروني. يمكننا أن نرى بوضوح التوزيع المنتظم لما يشبه حلمة زجاجة الإرضاع يتراوح علوها بين 50 و250 نانومتر.

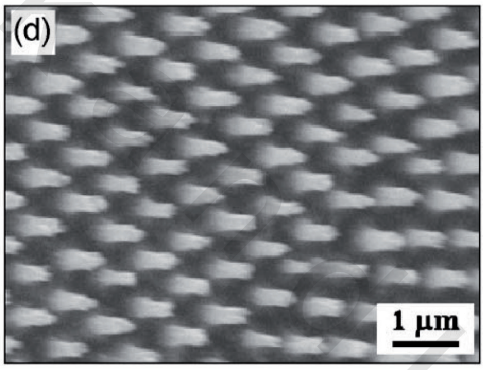


(الشكل 4.3) صورتان بالمجهر الإلكتروزني لقرنية عين فراشة من نوع بوليجونيا س- أوريوم Polygonia c-aureum

بترخيص دون مقابل من صاحب البحث D.G Stavenga والناشر Copyrights Royal Society 2010.

obeikan.com

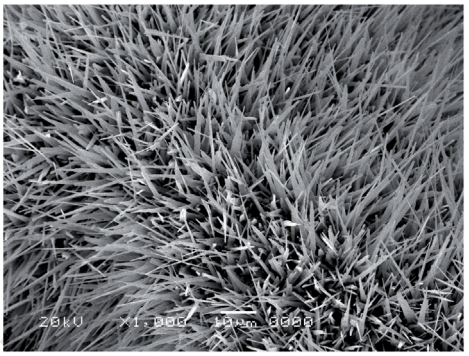
كانت البنية النانوية لقرنية الفراشة مصدر إلهام لبعض الباحثين، حيث حاولوا محاكاتها من أجل تحسين مردود الخلايا الشمسية. ونجح بعضهم في تحضير سطح سليكوني ذي بنية نانوية تشبه إلى حد كبير بنية قرنية الفراشة (انظر الشكل 4.4). وقد بينت الدراسة أن هذه البنية تقلل من انعكاس الضوء على السطح السليكوني بقدر كبير، حيث يتناقص متوسط عامل الانعكاس من (30%) تقريباً إلى (25.5%).



(الشكل 4.4) توزيع منتظم لقضبان نانوية شكلت على سطح السليكون.
لاحظ التشابه مع بنية عين الفراشة المبين في الشكل 3. المرجع 8.
بترخيص دون مقابل من المعهد الأمريكي للفيزياء Copyrights American Institute of Physics 2010.

هناك عدد من الطرائق يجري اختبارها من أجل الوصول إلى تجنب ضياع أقل نسبة ممكنة من الضوء على سطح الخلايا الشمسية. تتمثل إحدى هذه الطرائق في إنماء طبقة من أسلاك نانوية لأكاسيد شفاف كأكسيد الزنك ZnO تمكن من تقليص انعكاس الضوء بشكل كبير. الشكل 4.5 يبين صورة للبنية المجهرية لطبقة من أكسيد الزنك مكونة من أشكال إبرية ذات قطر نانوي تم تحضيرها عن طريق أكسدة شريحة من الزنك عند درجة حرارية عالية.

obeikan.com



(الشكل 4.5) أشكال (إبرية) من أكسيد الزنك نمت سطح قطعة من الزنك وضعت في فرن تحت درجة حرارة 600°C مدة ثلاثة أيام.

ومن الدراسات الحديثة في هذا المجال ما نشره فريق بالمعهد الأمريكي رانسلير بوليتكنيك Rensselaer Polytechnic Institute الذي استخدم سبع طبقات بسمك يتراوح بين 50 و 100 نانومتر تتكون كل واحدة منها من قضيبات نانوية من أكسيد السليكون وأكسيد التايتانيوم (SiO_2, TiO_2). وبينت الدراسة أن سطح الخلية الشمسية المكون من السليكون دون هذه الطبقات يمتص (67.4%) من ضوء الشمس الساقط عليه، بينما ترتفع هذه النسبة إلى (96.21%) عند وجود الطبقات ذات البنية النانوية، وذلك نتيجة تقليص انعكاس الضوء.

تشهد صناعة الخلايا الشمسية تطوراً مستمرًّا تدفعه الحاجة إلى تقليل كلفة الخلايا الشمسية. يمثل سعر مادة السليكون التي تصنع منها معظم الخلايا اليوم (50%) من تكلفة الخلايا الشمسية. ولذلك تجرى حالياً بحوث مكثفة تهدف إلى التقليل من كمية مادة السليكون المستخدمة في صناعة الخلايا. أدت هذه الدراسات إلى ظهور ما سمي بخلايا الجيل الثاني Second generation cells التي تتكون من شرائح رقيقة من السليكون ذات

obeikandl.com

سمك لا يتجاوز ميكرومترات عدة. في حين يطلق اسم خلايا الجيل الأول على الخلايا السليكونية التقليدية التي تحتوي على طبقات بسمك يبلغ مئات عدة من الميكرومترات. تدل الدراسات أنه يمكن نظريًّا تصنيع خلايا سليكونية ذات سمك لا يتجاوز الميكرومتر الواحد (1μm) تبلغ فعاليتها (25%). وبلغت الطاقة الشمسية المنتجة خلال عام 2008 باستخدام رقائق السليكون 0.89 GW. ولكن هناك مشكلات تواجه المهتمين بتطوير الخلايا الشمسية المكونة من رقائق السليكون منها صعوبة استخدام بعض التقنيات التقليدية لمعالجة سطح الشرائح الرقيقة لتحسين امتصاصها للضوء. وتشير بعض البحوث إلى أن استعمال جسيمات نانوية قد يقدم حلاً للمشكلة. فقد بينت الدراسات أن وجود جسيمات فضية أو ذهبية ذات أبعاد نانوية يتراوح قطرها بين (20nm -10nm) على سطح شريحة السليكون يؤدي إلى امتصاص أكبر للضوء وإلى تحسين مردود الخلية.

هذه بعض الأمثلة من استخدامات النانوتكنولوجيا التي سمحت بتحسين مردود الخلايا الشمسية السليكونية من الجيل الأول والثاني. ولكن جهود الباحثين لم تقتصر على التقليل من ظاهرة انعكاس الضوء لتصميم خلايا شمسية ذات فاعلية تقترب فعاليتها من الحد النظري الأقصى للخلايا السليكونية، وهو (31%) (حد شوكلي وكوايسر Shockley-Queisser). فقد تمكن بعضهم من تصميم خلايا تزيد فعاليتها على هذا الحد، وهي ما تعرف بخلايا الجيل الثالث كما سيأتي ذكره. قد يبدو النجاح في تصميم خلايا ذات فاعلية تفوق الحد النظري الأقصى غريباً، ولكنه لا يعني أن الحسابات النظرية لشوكلي وكوايسر خاطئة. أولاً، لا بد أن نتذكر أن هذه القيمة القصوى تخص الخلايا المصنعة من مادة السليكون فقط. ثانياً، علينا أن نذكر بالعوامل التي

تتسبب في ضياع نسبة من الطاقة الضوئية الساقطة على سطح الخلية، وتتمثل أساساً فيما يأتي:

أولاً: انعكاس الضوء.

ثانياً: عدم جدوى الفوتونات ذات الطاقة الأقل من 1.1eV؛ لأنها غير كافية لتحرير الإلكترونات من الذرات.

ثالثاً: ضياع طاقة الفوتونات الزائدة على 1.1eV في شكل حرارة.

تتمثل الفكرة الأساسية وراء تصميم خلايا ذات مردود عالٍ في البحث عن وسيلة للتحكم في هذه العوامل الثلاثة من أجل تحقيق فاعلية تتجاوز الحد النظري الأقصى.

6 - خلايا الجيل الثالث

يصنف المختصون الخلايا الشمسية إلى ثلاثة أجيال. يشمل الجيل الأول الخلايا التي تصنع في شكل صمام ثنائي (أو دايود) من مادة السليكون البلوري. ويشمل الجيل الثاني الخلايا المصنعة من طبقات رقيقة thin films التي تتميز بأقل تكلفة لقلة كمية المادة شبه الموصلة المستخدمة في صناعتها. تصنع هذه الخلايا من مادة مكونة من عنصر واحد، مثل مادة السليكون أو من مواد مركبة من عناصر عدة مثل خلايا الكادميوم تيلورايد CdTe والخلايا المكونة من عناصر النحاس Cu والجاليوم Ga، والإنديوم In، والسلينيوم Se وهي المعروفة بخلايا CGIS.

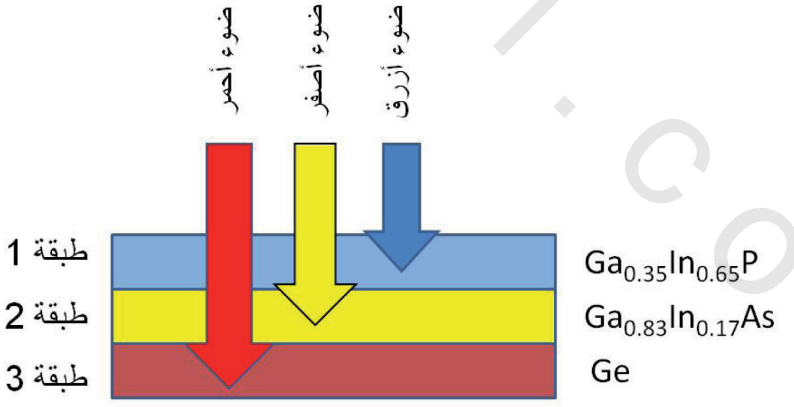
obeikandl.com

أما الجيل الثالث فيشـمل الخلايا الحديثة التـي حققت مردوداً يزيد على (31%) وهو الحد الأقصى للخلايا السليكونية من الجيلين الأول والثاني. وقد أضـاف بعض المختصـين الخلايا التي ظهـرت حديثاً مثل الخلايا العضـوية والخلايا المحسسة بجزيئات صبغية DSSC إلى قائمة خلايا الجيل الثالث.

يتطلب تصميم خلايا ذات مردود يزيد على الحد النظري استحداث طرق للاسـتفادة القصـوى من الفوتونات الأقل طاقة في طيف الضوء وتجنب ضياع بعض من طاقة الفوتونات التي تزيد على الحد الأدني لتحرير الإلكترونات. تم تحقيق هذا بتصميم خلايا تتكون من طبقات رقيقة عدة من مواد شبه موصلة مختلفة. فسنة 2007 استطاع فريق من الباحثين أن يحقق إنجازاً كبيراً، حيث صـمم أول خلية شمسـية يفوق مردودها (40%). تحـوي الخلية ثلاث طبقات رقيقة من مواد شبه موصلة مختلفة. ولكن لم يدم هذا الرقم القياسي طويلاً، حيث أعلن فريق من الباحثين بمؤسسة فرانهاوفر الألمانية Fraunhofer في بداية 2009 عن نجاحهم في تصميم خلية شمسية ذات مردود أكبر بقليل (41.1%). تتكون هذه الخلية كذلك من ثلاث طبقات شـبه موصلة مختلفة، كما هو مبين في الشـكل 4.6 . تم إنمـاء الطبقـات الثلاثـة بدقـة كبيرة من حيـث تركيبتها الكيميائية وسمكها. فالطبقة الثانية مكونة في الحقيقة من سبع طبقات بسمك يبلغ نحو 200nm فقط . وقد سمح هذا التصميم النانوي بـ(هندسة) الخواص الكهربائيـة للطبقـات عن طريق التقليل من العيوب البنيوية التي تنشـأ خلال عمليـة الإنماء، وهو ما سـمح برفع مـردود الخلية. الطبقـة الأولى مكونة من ثلاثة عناصـر هي الجاليـوم (Ga) والإنديوم (In) والفوسـفور (P) والثانية تحوي عناصـر الجاليوم والإنديوم والزرنيخ (As) بنسب معينة، كما هو مبين في الشـكل4.6. وأما الطبقة الثالثة فهي مكونة من عنصـر الجرمانيوم فقط.

الطاقة االدنيا الضـرورية لتحرير إلكترونات تتغير مـن طبقة إلى أخرى؛ لأن التركيبة الكيميائية تتغير. فهي تسـاوي 1.67eV في الطبقة العلوية و1.18eV في الطبقة الوسطى و0.66eV في الطبقة السفلى المكونة من الجرمانيوم.

الميزة الرئيسـة لهذه الطبقات الرقيقة بتركيبتهـا الكيميائية المختلفة هي التقليـل من ضـياع الطاقة الضـوئية في شـكل حـرارة داخل الخليـة. تمتص الطبقـة الأولى الفوتونات التي تزيد طاقتها على 1.67eV فقط وتمر الفوتونات الأقل طاقة إلى الطبقة الثانية، حيث يتم امتصـاص القسم الذي تزيد طاقته علـى 1.18eV. أما الفوتونـات الباقية ذات الطاقة الأقل (بـين 0.66 و1.18eV) فهي تمتص في الطبقة الثالثة. وهكذا كل طبقة تمتص قسماً معيناً من الضوء الساقط على الخلية، وهو ما يحسن من مردود الخلية.



(الشكل 4.6) خلية شمسية من الجيل الثالث مكونة من 3 طبقات.
تمتص الطبقة الأولى الفوتونات ذات الطاقة العالية، وتمتص الطبقة فوتونات ذات طاقة أقل،
بينما تمتص الطبقة الثالثة المكونة من عنصر الجرمانيوم الفوتونات الأقل طاقة. مساحة الخلية 5.09mm2.

obeikandl.com

وبعد إعلان المعهد الألماني عن إنجازه بشهور قليلة، سارعت شركة spectrolab التابعة للشركة الأم بوينغ Boeing والمتخصصة في صناعة الخلايا الشمسية للتطبيقات الفضائية إلى الإعلان عن تصنيع خلية بمردود (41.6%) لتتصدر السباق العالمي في هذا المجال.

لا بد من الإشارة إلى أن مثل هذه الخلايا عالية التكلفة، ولا يمكن استعمالها لتصنيع لوحات شمسية solar panels تغطي مساحات كبيرة كما هو الشأن بالنسبة إلى خلايا السليكون. ولكن هناك أنظمة تستخدم مرايا خاصة لتركيز ضوء الشمس بنسبة عالية على مساحات صغيرة يطلق عليها اسم أنظمة (الطاقة الشمسية المركزة Concentrated Solar Power CSP) لذلك، قد يكون مجدياً من الناحية الاقتصادية أن تستعمل هذه الخلايا في مثل هذه الأنظمة؛ لأن مردودها المرتفع يقلل من المساحة المطلوبة لإنتاج قدر معين من الطاقة.

هناك أفكار نجحت في استقطاب اهتمام عدد من الباحثين في السنوات الأخيرة تتعلق باستخدام جسيمات نانوية يطلق عليها اسم (نقاط الكم quantum dots) سبق أن أشرنا إليها في الفصل السابق لتصنيع خلايا شمسية ذات مردود عالٍ. ما يهمنا هنا هو خاصيتان: أولاهما، قدرتها على امتصاص فوتونات ذات طاقة محددة تتغير بتغير أبعاد الجسيمات. يعني هذا أنه يمكننا إدخال جسيمات ذات أبعاد مختلفة في الخلية تقوم بامتصاص فوتونات ذات طاقات مختلفة، وهو ما يقلل من كمية الطاقة التي تضيع على شكل حرارة، كما شرحنا أعلاه. وثانيتهما، الإمكانية النظرية لتحرير إلكترونين اثنين بواسطة فوتون واحد في الجسيمات النانوية، وهو غير ممكن في غيرها؛ حيث يحرر الفوتون الواحد إلكتروناً واحداً فقط. ولكن يجب أن نشير إلى أن هذه الفكرة

مـا زالت لم تختبر تجريبيًّا واسـتعمال (نقاط الكم) من أجل تحسـين مردود الخلايـا لا يـزال فكرة نظرية تحتاج إلى تصـديق التجربـة. إلى جانب ذلك، هناك جدل يدور بين الباحثين حول مدى التحسين الذي يمكن إنجازه بواسطة هذه الجسيمات. يمكن للقارئ المهتم أن ينظر في المرجع للمزيد من التفاصيل.

هناك تجارب وحسـابات نظرية حديثة تهدف إلى تحسـين مردود الخلايا الشمسـية باسـتخدام جسـيمات نانوية من الذهب أو الفضـة. وقد بينت هذه الحسـابات والتجارب أن وجود هذه الحبيبات على سـطح الخلايا السليكونية يزيد في نسبة امتصاص الضوء، وقد يؤدي ذلك إلى زيادة فاعلية الخلايا.

وإن هناك دراسـات حديثة في مجال الخلايا العضـوية بينت أن استخدام مواد نانوية مثل أنابيب الكربون النانوية يمكن من تحسين مردودها بقدر كبير، وذلك من خلال تسـهيل توصـيل الشـحن الكهربائية الناتجة عن امتصـاص الضـوء إلى طرفي الخلية. إدخال أنابيب كربون نانوية وسـط المادة العضـوية يوفـر ما يشـبه قنوات تسـهل عملية انتقال الشـحنات. وقد بينت الدراسـات أن أنابيـب الكربون النانوية تحسـن كثـيراً من مردود الخلايا العضـوية التي كانت لا تتجاوز (3%) وبلغت بفضـلها (6%). يبدو على ضـوء تسارع البحوث والسـباق بين المختبرات المختلفة أن الخلايا العضوية قد تصبح قريباً منافساً حقيقيًّا للخلايا السليكونية. وحينها يصبح ممكناً بفضل مرونة المواد العضوية تغليف واجهات المباني بطبقات رقيقة تكفي لتوليد الطاقة التي تسـتهلكها هذه المبـاني. غير أنه ما زالت هناك عقبات كبـيرة أمام تحقيق هذه الرؤية أهمها تغير خواص المواد العضوية عند تعرضها لضوء الشمس! هناك جهود وعقبات كثيرة تنتظر الباحثين في هذا المجال.

obeikandl.com

7 - الخلاصة

من الواضح أن كثيراً من الطرائق التي يجري استحداثها من أجل تحسين مردود الخلايا الشمسية تعتمد على النانوتكنولوجيا. بعضها تمثل في الهندسة النانوية لسطح الخلية (surface nanoengineering) بحيث يقل انعكاس ضوء الشمس عليه، أو إنماء طبقات رقيقة يضبط سمكها بدقة النانومتر وأخرى استخدمت فيها حبيبات نانوية أو أنابيب كربونية نانوية. كل هذه الجهود مستمرة من أجل أن تصبح الطاقة الشمسية أقل تكلفة، ونتمكن من تجنب الكارثة البيئية التي تهددنا نتيجة إفراطنا في استهلاك الطاقة المستخرجة من الفحم والمحروقات. بعض هذه البحوث نجحت في تحقيق نتائج مشجعة. وقد يصبح ممكناً في مستقبل غير بعيد تصميم مبان تنتج الطاقة التي تغطي حاجات المباني، ومن يسكن فيها! قد يبدو هذا طموحاً مبالغاً فيه، ولكنه في الواقع هدف يمكن تحقيقه في مدة زمنية قد تكون أقصر مما نتصور؛ لأن هناك آلافاً من الباحثين في شرق الأرض وغربها يعملون على تحقيقه.

obeikandl.com

obeikandl.com

مراجع الفصل الرابع

(1) http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy

(2) Polymer-based solar cells» Alex C. Mayer, Shawn R. Scully, Brian E. Hardin, Michael W. Rowell, and Michael D. Mc Gehee , Materials Today, 10, (2007) 28

(3) Material Today, 10, 11 (2007) 31

(4) "Nanostructured multilayer graded-index antireflection coating for Si solar cells with broad band and omnidirectional characteristics» Sameer Chhajed, MartinF.Schubert, Jong Kyu Kim, and E.Fred Schubert, Appl. Phys.Lett.93, (2008) 251108.

(5) M.A. Green, Solar Cells: Operating principles, Technology and System Applications. vol.1. Kensington new South Wales: University of New South Wales, 1982.

(6) 29th IEEE Photovoltaic specialists conference, New Orleans, Louisiana, USA. 2002

(7) "Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies» D.G Stavenga, S Foletti, G Palasantzas , and K Arikawa, Proc Biol Sci. 273(1587) (2006) 661–667

(8) "Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon" Chih-Hung Sun, Peng Jiang, and Bin Jiang, Appl.Phys.Lett.92, (2008) 061112

(9) «ZnO Nanostructures as Efficient Antireflection Layers in Solar Cells» Yun-Ju Lee,* Douglas S. Ruby, David W. Peters, Bonnie B. McKenzie, and Julia W. P. Hsu, Nano Letters, Vol. 8, No. 5 (2008) 15011505-

openkanal.com

(10) 'Surface textured ZnO films for thin film solar cell applications by expanding thermal plasma CVD" R. Groenena,, J. Lofflerb, P.M. Sommelingc, J.L. Lindend, E.A.G. Hamersa, ¨ R.E.I. Schroppb, M.C.M. van de Sandena. Thin Solid Films 392 (2001) 226 .

(11) "Realization of a near-perfect antireflection coating for silicon solar energy utilization, M. Kuo, D. J. Poxson, Y. S. Kim, F. W. Mont, J. K. Kim, E. F. Schubert, and S. Lin Optics Letters, Vol. 33, Issue 21, (2008) pp. 2527-2529

(12) "Surface plasmon enhanced silicon solar cells " S. Pillai, K. R. Catchpole, T. Trupke, and M. A. Green, J. Appl. Phys. 101, (2007) 093105

(13) "40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells»R. R. King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, and N. H. Kara , Appl. Phys. Lett. 90,)2007(183516.

(14) Phys. Lett. 93,)2008) 251108

(15) "Long-range absorption enhancement in organic tandem thin-film solarcells containing silver nanoclusters «Barry P. Rand, PeterPeumans, and Stephen R. Forrest, J. Appl. Phys., 96, 12, (2004) 7519.

(16) «Plasmonic Solar Cells,» K.R. Catchpole and A. Polman, Optics Express, Vol. 16, Issue 6, December 22, 2008, Focus Issue on Solar Energy edited by Alan Kost, University of Arizona.

(17) R.E. Camacho et al., JOM, p39 (2007)

obeikandl.com