الطاقة الشمسية والتنمية المستدامة
مجلة علمية محكمة تصدر عن مركز بحوث ودراسات الطاقة الشمسية

تجهيزات الخلايا الشمسية السيليكونية المصنعة بتقنية الأفلام الرفيعة

محمد نوري سبيطة

مركز بحوث ودراسات الطاقة الشمسية، طرابلس-ليبيا

بريد إلكتروني: sbita6@yahoo.com

الملخص: تقنية الأفلام الرفيعة هي إحدى أهم التقنيات، التي طورت لتكون تقنية بديلة لتقنية الرقاقات، لتصنيع الخلايا الشمسية بتكلفة منخفضة. فمقارنة بتقنية الرقاقات، تحتاج الخلايا الشمسية السيليكونية المصنعة بهذه التقنية إلى طاقة أقل أثناء عملية التصنيع، وتستهلك كمية أقل بكثير من مادة السيليكون بما نسبته واحد إلى ألف، وبالرغم من أن كفاءة الخلية الشمسية المصنعة بهذه التقنية لا تزال أقل من تلك المصنعة بتقنية الرقاقات، فإن نسبة القدرة المنتجة منها لوحدة الوزن أعلى بكثير.

تستعرض هذه الورقة تجهيزات التصنيع، على المستوى المعملي، للخلايا الشمسية السيليكونية ذات الأفلام الرفيعة، باستخدام طريقة الترسيب للبخار الكيميائي المعززة بالبلازما، وكذلك التجارب والقياسات المستخدمة في قياس أداء الخلية الشمسية، وقياس خواص الطبقات المختلفة لمادة السيليكون التي تتركب منها الخلية. كما تستعرض هذه الورقة الاتجاهات المستقبلية لتحسين كفاءة هذا النوع من الخلايا الشمسية.

كلمات استدلالية: الاستجابة الطيفية، الموصلية المظلمة، الموصلية الضوئية، الاستجابة الضوئية، ظاهرة ستابلر-رونسكي.

1. المقدمة

توجد حاليا تقنيتان أساسيتان تصنع بهما الخلية الشمسية على المستوى التجاري؛ هما تقنية الرقاقات وتقنية الأفلام الرفيعة. على مستوى السوق العالمي، تمثل الخلايا الشمسية المصنعة بتقنية الرقاقات، باستخدام السيليكون المتبلر، ما نسبته 80% من إجمالي ما يتم تسويقه من خلايا شمسية بمختلف أنواعها. وهذه التقنية، التي تمثل الجيل الأول للخلايا الشمسية، تعتمد أساسا على صناعة أشباه الموصلات (السيليكون بصفة خاصة)، حيث تستهلك حاليا حوالي 10% من الإنتاج العالمي من مادة السيليكون ذي الدرجة الإلكترونية، الأمر الذي يمكن أن يحد من نمو سوق هذه الخلايا مستقبلا، نظرا لمحدودية وارتفاع تكلفة الإنتاج العالمي للسيليكون إلكتروني الدرجة، إضافة إلى أن خفض تكلفة إنتاج هذا النوع من الخلايا قد وصل إلى حده الأدنى تقريبا، نظرا لأن النسبة العظمى لهذه التكلفة تتركز حاليا في مادة السيليكون المستخدمة.

لكسر الاعتماد على صناعة أشباه الموصلات، وخفض تكلفة الإنتاج للخلية الشمسية، اتجه البحث في مجال تصنيع الخلايا الشمسية نحو تطوير تقنيات أخرى بديلة. وتقنية الأفلام الرفيعة هي إحدى أهم التقنيات التي طورت لتكون تقنية بديلة لتصنيع الخلايا الشمسية بتكلفة منخفضة، والتي أصبحت تمثل الجيل الثاني للخلايا الشمسية. في هذه التقنية يتم استخدام أفلام رفيعة للمادة شبه الموصلة بدلا من رقاقات من مادة شبه موصلة عالية النقاوة، حيث تكون المادة الفعالة عبارة عن فلم رفيع – تقاس سماكته بالنانومتر – من مادة شبه موصلة ذات تركيب ذري عديد أوعديم التبلر، مرسب على قاعدة

حاملة يمكن أن تكون مصنعة من الزجاج، أو السيراميك، أو اللدائن، أو مادة شبه موصلة أخرى. ومقارنة بتقنية الرقاقات، تحتاج الخلايا الشمسية السيليكونية المصنعة بهذه التقنية إلى طاقة أقل أثناء عملية التصنيع، وتستهلك كمية أقل بكثير من مادة السيليكون بما نسبته واحد إلى ألف. وبالرغم من أن كفاءة الخلية الشمسية المصنعة بهذه التقنية لا تزال أقل من تلك المصنعة بتقنية الرقاقات، فإن نسبة القدرة المنتجة منها لوحدة الوزن أعلى بكثير (حوالي 80 وات/جرام مقابل 0.25 وات/جرام).

تم في هذه الورقة استعراض تجهيزات التصنيع، على المستوى المعملي، للخلايا الشمسية السيليكونية ذات الأفلام الرفيعة، باستخدام طريقة الترسيب للبخار الكيميائي المعززة بالبلازما، وكذلك التجارب والقياسات المستخدمة في قياس أداء الخلية الشمسية، وقياس خواص الطبقات المختلفة لمادة السيليكون التي تتركب منها الخلية، إضافة إلى استعراض الاتجاهات المستقبلية لتحسين كفاءة هذا النوع من الخلايا الشمسية.

2. الخلايا الشمسية ذات الأفلام الرفيعة

في الخلايا الشمسية المصنعة بتقنية الأفلام الرفيعة، يجب أن يتوفر مطلبان أساسيان في مادة شبه الموصل المستخدمة كمادة فعالة؛ المطلب الأول أن تكون سماكة فلم مادة شبه الموصل أكبر من معكوس معامل الامتصاص (Absorption coefficient) لها عند التردد المنخفض لطيف الإشعاع الشمسي، لضمان امتصاص معظم الضوء الساقط على الخلية. المطلب الثاني أن طول الانتشار (Diffusion length) للشحنات المتولدة ضوئيا في مادة شبه الموصل يجب أن يكون أكبر من سماكة الفلم، حتى يمكن تجميع هذه الشحنات عند طرفي الخلية. لتحقيق هذين المطلبين فإن الخلايا الشمسية ذات الأفلام الرفيعة تصنع من مواد شبه موصلة ذات فجوة طاقة مباشرة (Direct energy band-gap)، ولها معامل امتصاص عال.

وتوجد العديد من المواد شبه الموصلة، كالكادميوم تالوريد (CdTe) والإنديوم نحاس جاليوم ديسالينيد (CIGS)، الجاري البحث لاستخدامها كأفلام رفيعة فعالة للخلية الشمسية، ويعتبر السيليكون عديم التبلر (Amorphous silicon) أهم مادة شبه موصلة مستخدمة حاليا، على المستوى التجاري، في صناعة هذا النوع من الخلايا الشمسية، والتي تمثل حاليا حوالي 13% من إجمالي ما يتم تسويقه من خلايا شمسية.

السيليكون عديم التبلر في صورته النقية غير صالح للاستخدام في الصناعات الإلكترونية بصفة عامة، نظرا لارتفاع نسبة العيوب في تركيبته الذرية التي تصل إلى حوالي 10^{21} عيب/سم^3، لذا يتم إضافة ذرات الهيدروجين لمادة السيليكون عديم التبلر لخفض نسبة العيوب به إلى حوالي 10^{16} عيب/سم^3، ليصبح صالحا للاستخدام في الصناعات الإلكترونية التي منها الخلايا الشمسية. لذا فإن السيليكون عديم التبلر ذا الدرجة الإلكترونية يسمى السيليكون عديم التبلر المهدرج (Hydrogenated amorphous silicon, a-Si:H).

يتميز السيليكون عديم التبلر المهدرج بأنه يمتلك معامل امتصاص يفوق حوالي 100 مرة معامل الامتصاص للسيليكون المتبلر، في النطاق المرئي لطيف الإشعاع الشمسي، حيث يمكن لفلم، سماكته 1 ميكرومتر، من السيليكون عديم التبلر المهدرج امتصاص حوالي 90% من طيف الإشعاع الشمسي المستخدم.

1.2. التركيبة القياسية للخلية الشمسية للسيليكون الأمورفي المهدرج (a-Si:H)

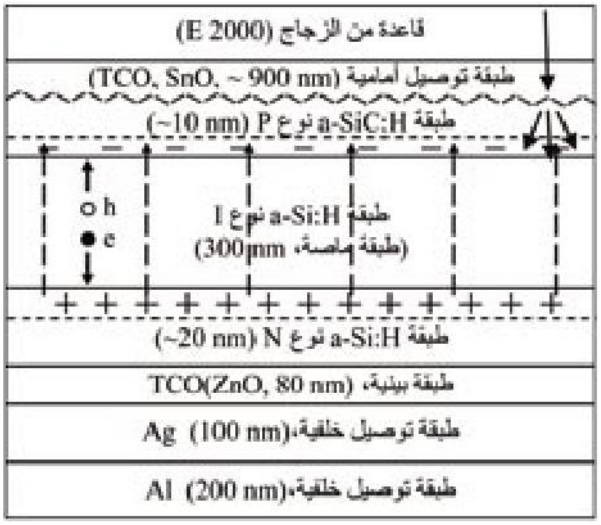
توجد تركيبتان أساسيتان للخلية الشمسية للسيليكون الأمورفي المهدرج أحادية الوصلة، هما تركيبة P-I-N وتركيبة N-I-P، التي تعكس تسلسل ترسيب طبقات السيليكون. ففي تركيبة P-I-N يتم أولا ترسيب طبقة السيليكون الأمورفي المشوب (نوع P)، يليها ترسيب طبقة السيليكون الأمورفي الأصيل (نوع I)، وأخيرا يتم ترسيب طبقة السيليكون الأمورفي المشوب (نوع N)،

ويعكس هذه التسلسل في ترسيب طبقات السيليكون في تركيبة P-I-N.

يوضح الشكل 1 البنية القياسية لتركيبة P-I-N. التركيبة الفعالة في هذه البنية هي طبقتا السيليكون الأمور في المشوب (نوع P ونوع N) وطبقة السيليكون الأمورفي الأصيل (نوع I) التي تكون وصلة P-I-N. وطبقتا السيليكون الأمور في المشوب تكونان عادة غاية في النحافة؛ 10 نانومتر للنوع P و20 نانومتر للنوع N، وهاتان الطبقتان تقومان بتأدية وظيفتين أساسيتين؛ الأولى، تكوين مجال كهربائي عبر طبقة السيليكون الأمورفي الأصيل، وهذا المجال الكهربائي يجب أن يكون عاليا بما يكفي لضمان تجميع الشحنات المتولدة ضوئيا في طبقة السيليكون الأصيل، وتعتمد شدة المجال الكهربائي على كل من مستوى التشويب لطبقات السيليكون المشوب وسماكة طبقة السيليكون الأصيل. أما الوظيفة الثانية فهي تكوين وصلة كهربائية ذات فقد قدرة منخفض بين طبقة السيليكون الأمورفي الأصيل والطبقات المعدنية للخلية، لذا يتطلب أن تكون الطبقتان نوع N ونوع P ذواتي موصلية كهربائية عالية بما يكفي الحصول على جهد داخلي عال لوصلة P-I-N، ومقاومة توصيل منخفضة بين طبقة السيليكون الأمورفي الأصيل والطبقات المعدنية للوصلات الخارجية للخلية.

طبقة السيليكون الأمورفي الأصيل في وصلة P-I-N لها فجوة طاقة قيمتها حوالي 1.75 إلكترون-فولت، وهي الطبقة التي يتم فيها امتصاص الضوء الساقط على الخلية وتوليد أزواج إلكترون- فجوة، ولهذا يطلق عليها اسم الطبقة الماصة. أزواج الإلكترون- فجوة المتولدة ضوئيا داخل هذه الطبقة الماصة يتم فصل بعضها عن بعض (منعا لإعادة اتحادهما) بحيث تتحرك الإلكترونات نحو الطبقة N وتتحرك الفجوات نحو الطبقة P بتأثير المجال الكهربائي المتولد داخل وصلة P-I-N، وهذه الشحنات يتم تجميعها بواسطة الأقطاب الكهربائية عند طرفي الخلية للحصول على التيار الكهربائي. ولأن الشحنات المتولدة ضوئيا تنتقل إلى طرفي الخلية نتيجة دفعها بواسطة المجال الكهربائي، فإن الخلية الشمسية للسيليكون الأمورفي تعرف بأنها خلية دفع (drift device) وليست خلية انتشار (diffuse device) كما هو الحال للخلية الشمسية للسيليكون المتبلر.

تحتاج وصلة P-I-N إلى قاعدة حاملة شفافة، التي تكون عادة صفيحة من الزجاج مطلية بطبقة من أوكسيد شفاف موصل للكهرباء تعمل كقضيب كهربائي علوي (Transparent Conductive Oxide, TCO). هذه الطبقة يجب أن يتوفر فيها عدد من المواصفات، أهمها أن تكون لها شفافية عالية لطيف الضوء (350–800 نانومتر) الذي تمتصه طبقة السيليكون الأمورفي الأصيل، ومقاومتها السطحية منخفضة، ولها استقرارية عالية كيميائيا وحراريا، ويعتبر أوكسيد القصدير مركبا جيداً لصناعة هذه الطبقة. طبقة TCO هذه يتمخدشها لتعزيز إمكانية امتصاص الخلية للضوء الساقط عليها.



الشكل 1: التركيبة القياسية للخلية الشمسية للسيليكون

يتكون القطب الكهربائي السفلي للخلية من طبقة معدنية من الألومونيوم أو الفضة أو كليهما. وبالإضافة إلى الوظيفة الأساسية كموصل كهربائي، تعمل هذه الطبقة أيضا كسطح عاكس للضوء يقوم بعكس الضوء النافذ من وصلة P-I-N إلى داخل الوصلة ثانية لتعزيز إمكانية امتصاص الخلية للضوء الساقط عليها. هذه الطبقة المعدنية ترسب على طبقة أخرى من أوكسيد

شفاف موصل للكهرباء (TCO) تفصل بينها وبين طبقة السيليكون نوع N. تعمل طبقة TCO هذه على مواءمة معامل الانكسار بين الطبقة المعدنية وطبقة السيليكون نوع N لتحسين انعكاسية الأولى. أعلى كفاءة مستقرة تم الحصول عليها للخلية الشمسية للسيليكون الأمورفي أحادية الوصلة على المستوى المعملي كانت 9.47% للخلية التي تم إنتاجها بجامعة نيوكاتل(Neuchatel) [3].

3. تقنيات ترسيب طبقات الخلية الشمسية للسليكون الأمورفي

كما هو موضح بالشكل 1، يتطلب تصنيع الخلية الشمسية للسليكون الأمورفي ترسيب طبقات للسيليكون الأمورفي وطبقات أخرى معدنية، هذه الطبقات المختلفة يتم ترسيبها أيضا بتقنيات مختلفة. طبقات السيليكون يتم عموما ترسيبها بتقنيات متقدمة لضمان الحصول على أفلام السيليكون ذات جودة عالية، في حين تستخدم تقنيات أكثر بساطة لترسيب الطبقات المعدنية.

1.3. ترسيب أفلام السيليكون الأمورفي المهدرج بتقنية الترسيب للبخار الكيميائي المعززة بالبلازما

يوجد العديد من الطرق المطورة لترسيب أفلام السيليكون المهدرج عالية الجودة، هذه الطرق يمكن تقسيمها إلى مجموعتين؛ المجموعة الأولى تشمل الطرق التي تقوم بترسيب أفلام السيليكون من غاز حامل للسليكون(silicon bearing gas)، والتي تعرف بطرق ترسيب البخار الكيميائي (Chemical Vapor Deposition).

المجموعة الثانية تشمل الطرق التي تعتمد الترسيب الفيزيائي، التي يتم فيها تنمية أفلام السيليكون باستخدام رذاذ ذرات السيليكون المتحصل عليه من قذف مادة السيليكون الصلبة بأيونات معجلة لغاز خامل (Sputtering technique).

التقنية الأكثر استخداما حاليا، على المستويين المعملي والصناعي، هي التقنية المعروفة باسم الترسيب للبخار الكيميائي المعززة بالبلازما المولدة بموجات الراديو (R. F. Plasma Chemical Vapor Deposition).

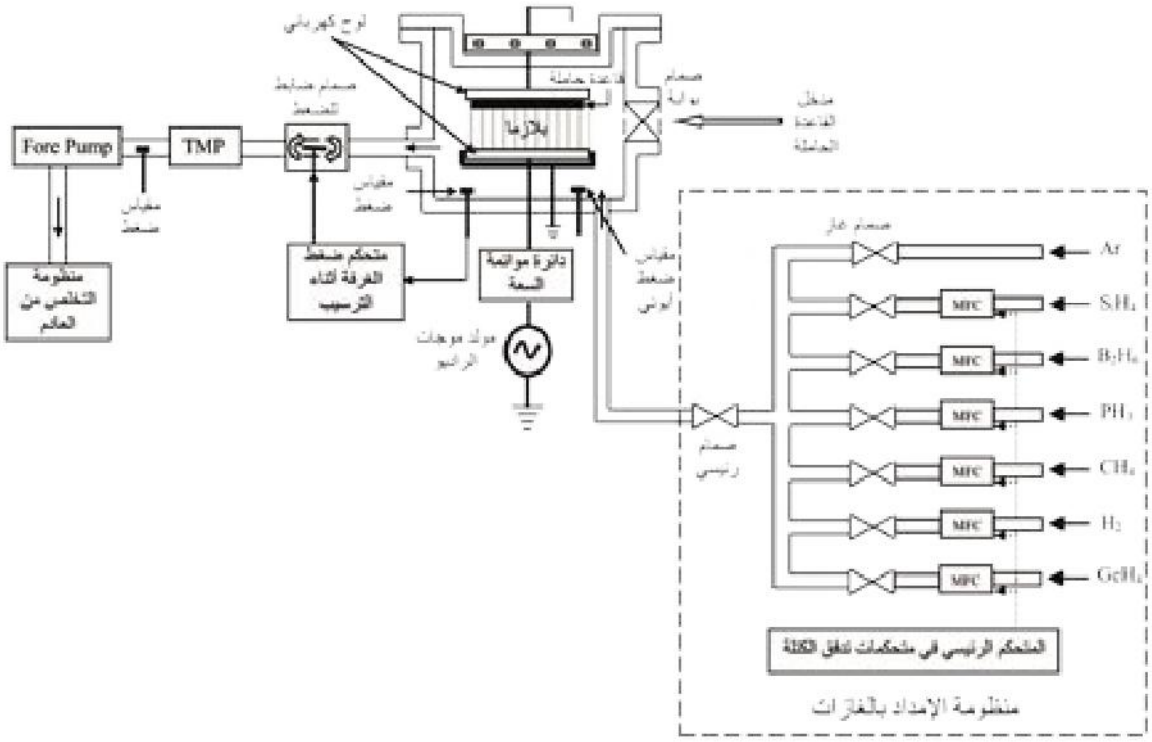
في هذه الطريقة، يتم داخل غرفة الترسيب تحويل الغاز الحامل للسيليكون، الذي يكون عادة غاز السيلين (Silane, S_iH_4)، إلى حالة البلازما بتطبيق موجات كهرومغناطيسية بتردد 3.56 ميجاهرتز، ونتيجة التصادم بين الإلكترونات المعجلة بالمجال الكهربائي وأيونات غاز السيلين، يتكفك الأخير على مراحل إلى سيليكون وهيدروجين، فيتم التخلص من غاز الهيدروجين، ويترسب السيليكون مع نسبة من ذرات الهيدروجين على قاعدة حاملة لينكون فلم السيليكون الأمورفي المهدرج.

أهم ميزة لهذه التقنية هي أن عملية الترسيب تتم تحت درجة حرارة منخفضة تتراوح بين 180 إلى 250 درجة مئوية. انخفاض درجة حرارة عملية الترسيب تسمح باستخدام أنواع متعددة من المواد رخيصة الثمن كقاعدة حاملة مثل الزجاج، والصلب الذي لا يصدأ، والدائن، مما يسهم في خفض تكلفة الخلية الشمسية ككل.

نظام الترسيب لهذه التقنية يعتبر نوعا ما بسيطاً، وهو يتكون من خمسة أجزاء رئيسة (أنظر الشكل 2):

- غرفة ترسيب مصنعة من الصلب الذي لا يصدأ عالية التفريغ، تحتوى على لوحين كهربائيين يغذيهما مولد إشارة الراديو الكهرومغناطيسية، وحامل قاعدة مجهز بآلية تسخين.
- منظومة الإمداد بالغازات، تحتوي على متحكمات في معدل تدفق الغازات، وصمامات للتحكم في تدفق الغاز المطلوب.
- منظومة التفريغ من الهواء تتكون عادة من مضخة ميكانيكية دوارة (Fore pump)، ومضخة جزيئات (Turbomolecular pump, TMP).
- منظومة التخلص من عادم عملية الترسيب.
- منظومة تحكم رئيسية، للتحكم في تشغيل كامل النظام.

خطوات الترسيب لطبقات السيليكون الأمورفي المهدرج يمكن وصفها كالتالي:



الشكل 2: مخطط لمنظومة الترسيب للبخار الكيميائي المعززة بالبلازما المولدة بموجات الراديو.

1- بعد إدخال القاعدة الحاملة لغرفة الترسيب، يتم تفريغ الغرفة إلى أقل من 10^{-7} ملي بار، وتسخين القاعدة الحاملة إلى 180 درجة مئوية.

2- بعد تحقق الشروط في الخطوة السابقة يتم إدخال الغاز حسب نوع طبقة السيليكون المراد ترسيبها. لترسيب السيليكون الأمورفي الأصيل يتم إدخال غاز السيلين فقط. ولترسيب طبقة السيليكون الأمورفي نوع P يتم إدخال غاز السيلين مع غاز الفوسفين (PH_3). أما لترسيب طبقة السيليكون الأمورفي نوع N فيتم ادخال غاز السيلين مع غاز الديبورين (B_2H_6).

3- بعد تدفق الغازات بالمعدل المطلوب إلى داخل غرفة الترسيب، يتم تطبيق موجات الكهرومغناطيسية بتردد 13.56 ميجاهيرتز، وقدرة 4 وات، على اللوحين الكهربائيين داخل غرفة الترسيب.

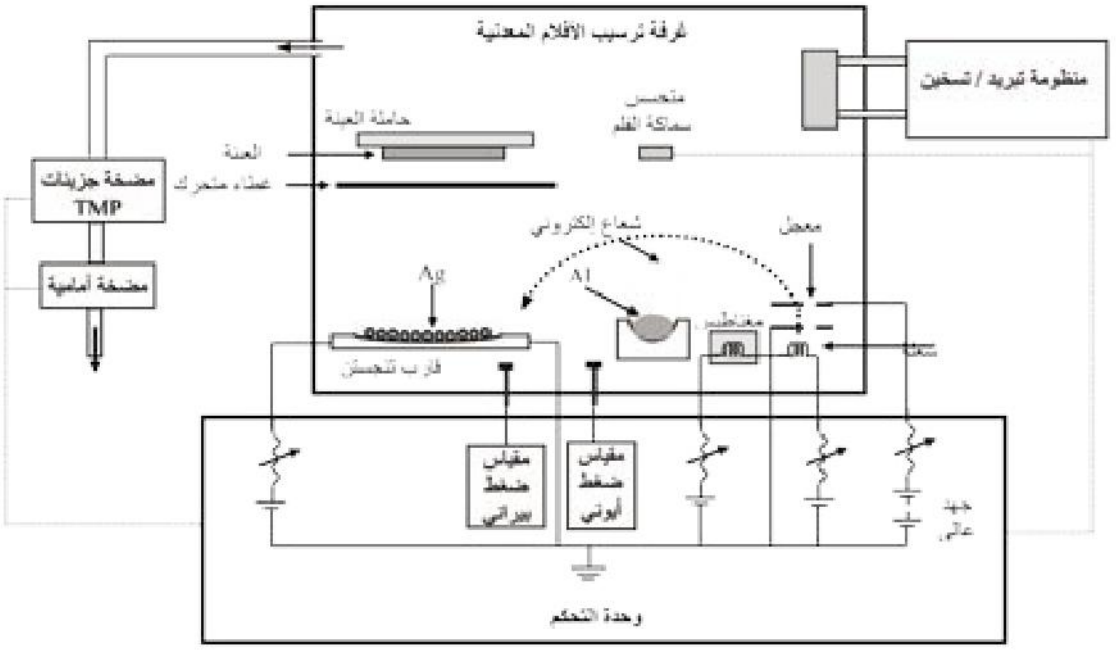
4- يتم استخدام قادح لبدء توليد البلازما، حيث يبدأ التوقيت لفترة الترسيب التي تستمر حسب سماكة ونوع الفلم المراد ترسيبه، ويبلغ معدل الترسيب لفلم السيليكون الأمورفي الأصيل حوالي 1.6 أنجستروم/ثانية، هذا المعدل يرتفع عند ترسيب فلم السيليكون نوع P، بينما ينخفض هذا المعدل عند ترسيب فلم السيليكون نوع N.

2.3. تقنية ترسيب الأفلام المعدنية

يتم استخدام طريقة التبخير الحراري لترسيب الطبقات المعدنية (الألومونيوم، والفضة) داخل غرفة ترسيب مفرغة من الهواء. يعرض الشكل 3 أحد أنظمة الترسيب المستخدمة، حيث يتم في هذا النظام تبخير مادة الألومونيوم الصلبة باستخدام شعاع إلكتروني، بينما يتم استخدام التسخين الحراري لتبخير مادة الفضة. عملية الترسيب يمكن تلخيصها في الخطوات التالية:

1- تثبت العينة أعلى غرفة الترسيب، وتغطى بالغطاء المتحرك.

2- يتم تفريغ الغرفة من الهواء إلى حوالي $5x10^{-5}$ ملي بار.



الشكل 3: مخطط لنظام التبخير الحراري لترسيب أفلام الطبقات المعدنية

3- يبدأ في تسخين وتبخير المادة المراد ترسيبها، وعندما يصل معدل التبخير إلى المستوى المطلوب، يزال الغطاء المتحرك عن العينة لتبدأ عملية الترسيب.

4- عندما يصل سمك الطبقة المرسبة إلى المستوى المطلوب، تغطى العينة بالغطاء المتحرك، وتوقف عملية الترسيب.

4. تجارب قياس خصائص أفلام السيليكون وأداء الخلية

نستعرض في هذا البند القياسات الأساسية التي يتم إجراؤها لتحديد مستوى الجودة لأفلام السيليكون الأمورفي المهدرج، وكذلك القياسات الخاصة بتحديد مستوى الأداء للخلية:

1.4. قياسات خصائص أفلام السيليكون الأمورفي المهدرج

تحديد مستوى الجودة لأفلام السيليكون يتم بقياس الموصلية المظلمة (Dark conductivity)، والموصلية الضوئية (Photoconductivity)، التي تحدد الخواص الكهربائية، وقياس منحنى معامل الامتصاص (Absorption coefficient curve)، ومعامل الانكسار (Refractive index)، التي تحدد الخواص البصرية لأفلام السيليكون.

1.1.4. قياس الموصلية المظلمة

يتم إجراء القياس داخل غرفة معتمة على عينات لها قضيبان معدنيان بطول 1 إلى 2 سم تفصلهما مسافة أقل من 1 مم مرسبان على فلم السيليكون الأمورفي المهدرج المرسب بدوره على قاعدة من الزجاج ذي مقاومة نوعية عالية. بتطبيق جهد كهربائي بقيمة 100 فولت على القضيبين المعدنيين، يتم الحصول على تيار كهربائي في مدى البيكوأمبير. وبقياس التيار يتم استخدام المعادلة (1) لحساب الموصلية المظلمة.

$$\sigma_d = \frac{I}{V}\frac{w}{ld} \qquad (1)$$

حيث:

σ_d: الموصلية المظلمة، I: التيار المقاس، V: الجهد المطبق، l: طول القضيبين المعدنيين، w: المسافة الفاصلة بين القضيبين الكهربائيين، d: سماكة فلم السيليكون.

بقياس الموصلية المظلمة عند قيم مختلفة لدرجات الحرارة (عادة من 60 إلى 130 درجة مئوية) يتم تقييم طاقة التفعيل للموصلية المظلمة (Activation Energy)، توصف إعتمادية الموصلية المظلمة على درجة الحرارة بالمعادلة الآتية:

$$\sigma_d(T) = \sigma_0 \exp(-E_A / kT) \qquad (2)$$

حيث:

σ_0: معامل الموصلية، T: درجة الحرارة المطلقة، k: ثابت بولتزمن، E_A: طاقة التفعيل.

طاقة التفعيل مع فجوة الطاقة تعتبر مقياسا مهما لتقييم نسبة العيوب في فلم السيليكون.

2.1.4. قياس الموصلية الضوئية

قياس الموصلية الضوئية (σ_{ph}) يتم بإضاءة نفس العينة، المستخدمة لقياس الموصلية المظلمة، بضوء مكافئ لضوء الشمس بالتوزيع الطيفي AM1.5 وبشدة 1000 واط/م^2 عند درجة حرارة الغرفة. يتم استخدام المعادلة (1) لحساب الموصلية الضوئية.

نسبة الموصلية الضوئية إلى الموصلية المظلمة تمثل الاستجابة الضوئية التي تعتبر مؤشرا لمدى مناسبة المادة للاستخدام في تصنيع الخلية الشمسية. لفلم السيليكون جيد الجودة تكون هذه النسبة أكبر من 10^5.

3.1.4. قياس منحنى معامل الامتصاص

يتم قياس معامل الامتصاص $\alpha(\lambda)$ لفلم السيليكون لنطاق الطول الموجي من 0.4- 2.5 ميكرومتر، وكامل النطاق لمنحنى معامل الامتصاص يتم قياسه باستخدام نوعين من تجارب القياس. تستخدم تجربة القياس للضوء المنعكس والنافذ لتحديد معامل الامتصاص (Reflection - Transmission spectroscopy) لنطاق الطول الموجي القصير. بينما تستخدم تجربة قياس أخرى تعتمد على قياس التيار الضوئي (Photocurrent spectroscopy) لتحديد معامل الامتصاص لنطاق الطول الموجي الطويل.

من منحنى معامل الامتصاص المتحصل عليه، يمكن حساب نسبة العيوب، N_d للفلم باستخدام المعادلة التالية:

$$N_d = 5\times10^{16}\alpha(1.2eV) \qquad (3)$$

الجدول 1 يوضح القيم النموذجية لبعض المعالم الأساسية للسيليكون الأمورفي المهدرج الأصيل جيد الجودة الصالح للاستخدام في الخلية الشمسية.

2.4. قياسات أداء الخلية الشمسية

يتم تحديد أداء الخلية عن طريق قياس منحنى جهد-تيار (I-V curve)، والاستجابة الطيفية (Spectral response)، واضمحلال الكفاءة بتأثير الضوء (Light-Induced degradation).

الجدول 1: المواصفات المطلوبة للسيليكون الأمورفي المهدرج الأصيل جيد الجودة [3].

المعلم	القيمة
الموصلية المظلمة [Ω^{-1} cm^{-1}]	$<5\times10^{-10}$
الموصلية الضوئية [Ω^{-1} cm^{-1}]	$>1\times10^{-5}$
الاستجابة الضوئية	$>10^5$
طاقة التفعيل [eV]	~0.8
فرجة الطاقة [eV]	<1.8
معامل الامتصاص (600 nm) [cm^{-1}]	$>3.5\times10^4$
تركيز العيوب [cm^{-3}]	$<1\times10^{16}$

1.2.4. قياس منحنى جهد-تيار

تستخدم منظومة قياس تتكون من محاكي شمسي بالتوزيع الطيفي AM1.5، وحمل إلكتروني للقياس الآلي لمنحنى جهد- تيار للخلية الشمسية. تعتمد آلية القياس على تسليط الضوء لحظيا على العينة، وفي الأثناء يتم القياس آليا للجهد والتيار بين طرفي الخلية التي تكون متصلة بالحمل الإلكتروني الذي تتغير مقاومته آليا أيضا أثناء القياس من المقاومة صفر إلى المقاومة ما لا نهاية.

2.2.4. قياس الاستجابة الطيفية

يختلف التيار الضوئي الناتج من الخلية الشمسية باختلاف الطول الموجي للضوء الساقط. ولتحديد استجابة الخلية الشمسية لطيف الضوء الساقط، يتم استخدام منظومة قياس الاستجابة الطيفية التي يتم فيها تسليط ضوء أحادي الطول الموجي، للنطاق من 300 إلى 800 نانومتر، على الخلية الشمسية وقياس كفاءة الكم الخارجية للخلية لكل طول موجي. منحنى الاستجابة الطيفية المقاس للخلية الشمسية يبين كفاءة استجابة الخلية لكل طول موجي لنطاق ضوء الإشعاع الشمسي الساقط.

3.2.4. قياس اضمحلال الكفاءة

ينخفض أداء الخلية الشمسية للسليكون الأمورفي، أثناء المرحلة الأولى من عملها، بتأثير الضوء (Light-Induced degradation) وهو ما يعرف بتأثير ستابلر-رونسكي (Steabler-Wronski effect). هذا الانخفاض في الكفاءة يستمر إلى حد معين يستقر بعده أداء الخلية، وتبلغ كفاءة الخلية بعد الاستقرار حوالي 70-80% من كفاءتها الابتدائية. حسب المواصفات اليابانية، تعرف الكفاءة المستقرة للخلية بأنها الكفاءة المقاسة للخلية بعد 310 ساعة من تعريضها لضوء مكافئ للشمس بشدة 250 وات/م^2، عند درجة حرارة 48 درجة مئوية تحت شروط الدائرة المفتوحة. حسب المواصفات الأمريكية، تعرف بأنها الكفاءة المقاسة بعد تعريض الخلية لضوء مكافئ للشمس بشدة 1000وات/م^2، لمدة 600 ساعة متواصلة، عند درجة حرارة 50 درجة مئوية، تحت شروط الدائرة المفتوحة.

5. الاتجاهات المستقبلية لتحسين كفاءة الخلية

لرفع أداء الخلية الشمسية الأمورفية، يتركز البحث حاليا على التحسين في جانبين أساسيين للخلية هما: تحسين الاستقرارية، وتحسين المواصفات البصرية للخلية. التحسين في هذين الجانبين يتطلب نوعا من الموازنة للحصول على أداء أفضل للخلية ككل. إلى جانب هذا، يجري البحث كذلك على تطوير الخلايا عديدة الوصلة، التي تتكون من أكثر من طبقة ماصة واحدة.

تحسين استقرارية أداء الخلية يتمثل في تفادي أو التقليل من ظاهرة ستابلر-رونسكي. هذه الظاهرة يمكن تفاديها جزئيا بخفض سماكة الطبقة الماصة للخلية (طبقة السيليكون الأمورفي نوع I). بخفض سماكة هذه الطبقة، يصبح المجال الكهربائي داخلها أعلى، مما يقلل من حساسيتها لأي تشوه يحدث بتركيبتها الذرية بتأثير الضوء. كما أظهرت بعض الأبحاث أنه يمكن الحد من هذه الظاهرة باستخدام غاز السيلين المخفف بالهيدروجين بنسبة معينة لترسيب طبقة السيليكون الأمورفي المهدرج الأصيل (الطبقة الماصة) [4]. النتائج الأولية في هذا الاتجاه أثبتت تحسن استقرارية الخلية، إلا أنها سجلت انخفاضا في الكفاءة الابتدائية للخلية. والبحث في هذا الاتجاه لا يزال جاريا لتحسين الاستقرارية مع الحفاظ على الكفاءة.

خفض سماكة الطبقة الماصة يؤدي إلى تقليل نسبة الضوء الممكن امتصاصه داخل هذه الطبقة، مما يعني انخفاض التيار الضوئي الناتج من الخلية. إحدى الطرق للموازنة بين خفض سماكة الطبقة الماصة وزيادة التيار الضوئي هي استخدام تقنيات اصطياد الضوء (Light trapping techniques) التي تحسن من قدرة الخلية على الاستفادة من الضوء الساقط عليها. وبما أن الضوء الذي يسهم في توليد التيار الضوئي هو الضوء الذي يتم امتصاصه داخل الطبقة الماصة للخلية، فإن هذه التقنيات تهدف أساسا إلى وصول أكبر كمية ممكنة من الضوء الساقط إلى الطبقة الماصة للخلية. يتجه البحث حاليا إلى تطوير تقنيات اصطياد الضوء المستخدمة حاليا والمتمثلة في بعثرة الضوء الساقط على الخلية باستخدام فواصل خشنة بين الطبقات المختلفة للخلية (انظر الشكل 1)، واستخدام طبقة خلفية عالية الانعكاسية لعكس الضوء النافذ من الخلية إلى داخل المنطقة الماصة مرة أخرى. كلا هذين الأمرين يؤدي في النهاية إلى زيادة نسبة الضوء الواصل إلى الطبقة الماصة، مما يعني زيادة التيار الضوئي.

الطريقة الأخرى للموازنة بين خفض سماكة الطبقة الماصة وزيادة التيار الضوئي تتمثل في استخدام أكثر من طبقة ماصة للخلية، وهو ما يعرف بالخلية عديدة الوصلة (Multi-junction cell). الطبقات الماصة للخلية عديدة الوصلة تملك فجوات طاقة مختلفة، بحيث تقوم كل طبقة بامتصاص جزء من طيف الإشعاع الشمسي الساقط، هذا الأمر يسمح بخفض سماكة كل طبقة دون التقليل من نسبة الضوء الممتص للخلية ككل. حاليا يتم في الخلية ثنائية الوصلة استخدام السيليكون الأمورفي المهدرج الأصيل (a-Si:H, Eg = 1.8 eV) كطبقة ماصة عليا لامتصاص جزء طيف الإشعاع الشمسي ذي الموجة القصيرة، بينما يستخدم السيليكون الأمورفي المهدرج المطعم بالجرمانيوم (a-SiGe:H, Eg =1.4 eV) كطبقة ماصة سفلى لامتصاص جزء طيف الإشعاع الشمسي ذي الموجة الطويلة [2]. على المستوى المعملي تم الحصول على كفاءة مستقرة 13% لخلية ثلاثية الوصلة [3]. وبالرغم من ارتفاع تكلفة إنتاج هذا النوع من الخلايا، فإنها تمثل الخيار الفني الأفضل لرفع كل من الكفاءة والاستقرارية للخلية الشمسية الأمورفية.

6. الخلاصة

تم في هذه الورقة استعراض تقنية التصنيع، على المستوى المعملي، للخلايا الشمسية السيليكونية ذات الأفلام الرفيعة، باستخدام طريقة الترسيب للبخار الكيميائي المعززة بالبلازما. وأهم ميزة لهذه الطريقة – الأوسع انتشارا على المستويين المعملي والصناعي– هي أن عملية الترسيب تتم تحت درجة حرارة منخفضة تتراوح بين 180 إلى 250 درجة مئوية، مما يسمح باستخدام أنواع متعددة من المواد رخيصة الثمن كقاعدة حاملة مثل الزجاج، والصلب الذي لا يصدأ، والدائن، مما يسهم في خفض تكلفة الخلية الشمسية ككل.

جودة أفلام السيليكون الأمورفي المهدرج تحدد بقياس منحنى معامل الامتصاص، ومعامل الانكسار، لنطاق الطول الموجي للضوء المرئي، التي تحدد الخواص البصرية للفلم، وقياس الموصلية المظلمة، والموصلية الضوئية، التي تحدد الخواص الكهربائية للفلم، والنسبة بين المعلمين الأخيرين تمثل الاستجابة الضوئية التي تحدد مدى ملاءمة مادة الفلم للاستخدام في تصنيع الخلايا الشمسية. ويحدد أداء الخلية الشمسية بقياس منحنى جهد– تيار، والاستجابة الطيفية، واضمحلال الكفاءة بتأثير الضوء.

تعاني الخلايا الشمسية للسيليكون الأمورفي المهدرج من ظاهرة اضمحلال الكفاءة بتأثير الضوء أثناء فترة التشغيل الأولى، حيث تصل كفاءة الخلية بعد الاستقرار إلى حوالي 70– 80% من كفاءتها الابتدائية. ولتحسين استقرارية الخلية، يتجه البحث نحو خفض سماكة الطبقة الماصة للخلية (طبقة السيليكون الأمورفي المهدرج الأصيل،a-Si:H) واستخدام غاز السيلين المخفف بنسبة معينة بالهيدرجين لترسيب هذه الطبقة. لتعويض الفقد في التيار الضوئي للخلية نتيجة خفض سماكة الطبقة الماصة، يتجه البحث نحو تحسين تقنيات اصطياد الضوء الساقط على الخلية، واستخدام أكثر من طبقة ماصة للخلية، أو ما يعرف بالخلية عديدة الوصلة. على المستوى المعملي أمكن تصنيع خلية شمسية ثلاثية الوصلة وصلت كفاءتها المستقرة إلى 13%.

7. المراجع

[1] C. R. Wronski, J. M. Pearce, R. J. Koval, A. S. Ferlatuo, "Progress in amorphous silicon based solar cell technology", world climate & energy event, Jan. 6-11, 2002.

[2] R. Schropp, M. Zeman, "New developments in amorphous thin film silicon solar cells", IEEE transaction on electronic devices, vol. 46, No. 10, Oct. 1999.

[3] J. Poortmans, V. Arkhipov, "Thin Film Solar Cells", John Wiley & Sons, 2006.

[4] G. van Elzakker, V. Nadazdy, F.D. Tichelaar, J.W. Metselaar, M. Zeman, "Analysis of structure and defects in thin silicon films deposited from hydrogen diluted silane", Elsevier Publisher, 2005.

[6] M. Sbeta, A. Abugalia, "Thin film silicon solar cell equipment", Internal Report, Research Center Of Renewable Energy And Water Desalination, Libya, 2006.

[5] H. J. Mollar, "Semiconductors for solar cell", Artech House Inc.1993.