



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة القادسية

كلية العلوم / قسم الكيمياء

الخلايا الشمسية المحفزة بالصبغة

بحث تقدم به الطالب:

محمد فؤاد كاظم

الى مجلس قسم الكيمياء كلية العلوم في جامعة القادسية

وهي من متطلبات نيل شهادة بكالوريوس في الكيمياء

بإشراف

د.حسن شمران

الآية القرآنية

{وَسَخَّرَ لَكُمْ اللَّيْلَ وَالنَّهَارَ وَالشَّمْسَ
وَالْقَمَرَ وَالنُّجُومَ مُسَخَّرَاتٍ بِأَمْرِهِ إِنَّ
فِي ذَلِكَ لَآيَاتٍ لِّقَوْمٍ يَعْقِلُونَ}

صدق الله العلي العظيم

سورة النحل 12

الشكر والإهداء

أتقدم بالشكر والامتنان إلى بلدي الحبيب العراق وجامعة القادسية لاسيما
كلية العلوم وقسم الكيمياء من رئاسة القسم والتدريسين فلهم مني كل
الشكر والتقدير .

كما أتقدم بالشكر والتقدير إلى مشرفي الدكتور حسن شمran
و الدكتور عبد الحسين عباس لجهودهم

كما اتوجه بالشكر والتقدير إلى زملائي متمنيا لهم الموفقية في حياتهم.

اهدي جهدي المتواضع هذا إلى من ربياني صغيرا أبي و أمي .

المحتويات

.....	الخلاصة
1.....	(1-1) تاريخ الخلايا الشمسية (solar cell)
1.....	(2-1) مقدمة عن الخلايا الشمسية
2.....	(3-1) العمليات الضوئية في الخلايا الشمسية (Photovoltaic Processes in Solar Cell)
4.....	(4-1) مكونات الخلايا الشمسية
4.....	(1-4-1) الألواح الشمسية
5.....	(2-4-1) منظمات الشحن
6.....	(3-4-1) البطاريات
7.....	(4-4-1) العاكس
8.....	(5-1) أنواع الخلايا الشمسية
8..	(1-5-1) الخلايا الشمسية من الجيل الأول على شكل ووفر (First Generation Solar Cell Wafer Based)
9.....	(2-5-1) الجيل الثاني من الخلايا الشمسية - الخلايا الشمسية للأغشية الرقيقة
12.....	(3-5-1) الخلايا الشمسية من الجيل الثالث Third Generation Solar Cells
15.....	(4-5-1) الخلايا القائمة على البيروفسكايت (Perovskites)
16.....	(6-1) بعض الصبغات المتحسسة للضوء
19.....	(1-2)-الخلايا الشمسية الصبغية (Dye Sensitized Solar Cells)
20.....	(2-2)الهدف من البحث
20.....	(1-3)- تحضير صبغة الازو ل 2 - امينو بنزاميدازول
22.....	(2-3)النتائج والمناقشة
22.....	(1-2-3)الانتقالات الالكترونية للصبغة المحضرة
23.....	(2-2-3)طيف الأشعة تحت الحمراء للصبغة المحضرة
24.....	(3-3)خصائص تيار فولتية للخلية الشمسية الصبغية
25.....	4-المصادر- References

الخلاصة

في هذه البحث تم تصنيع خلية شمسية المحفزة بالصبغة باستخدام اشباه موصلات (ZnO) كأنودات ضوئية و قطب موصل (الكاثودات) والمحلول الالكتروليتي هو (I₂/KI) . اشباه الموصلات (ZnO) تتضمن: دقائق ZnO النانوية (مطلية على الزجاج) . الأقطاب الموصلة تتضمن الكربون المتموقع أيضا على الزجاج. الصبغة المستخدمة: صبغة الازو.

تم تشخيص الصبغة بطيف الأشعة تحت الحمراء وكان امتصاص مجموعة الازو بحدود 1550 Cm^{-1} وان مجموعة C=N تمتص عند 1630 Cm^{-1}

طيف الامتصاص للصبغة أيضا تم تشخيصها بمطيافية الأشعة فوق البنفسجية المرئية للصبغة والتي تبين بأنها تمتص الضوء عند 620 nm

وتم إجراء قياس للخلية المصنعة بالطريقة الكهربائية فقط

(1-1) تاريخ الخلايا الشمسية (solar cell)

لقد تم تصنيع أول خلية ضوئية عام 1883م من قبل شارلز فريتز، الذي قام بتغليف السيلينيوم لأشباه الموصلات- بطبقة رقيقة جدا من الذهب لتشكيل التقاطعات p-n junction. وكانت كفاءة الخلية حوالي 1%. وفي عام 1888 بنى الفيزيائي الروسي الكسندرستوليتوف أول خلية كهروضوئية على أساس تأثير الكهروضوئي الخارجي الذي اكتشفه هاينريش هيرتز في وقت سابق من عام 1887⁽¹⁾. وقد وضح ألبرت آينشتاين التأثير الكهروضوئي في عام 1905 وقد حصل على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1921⁽²⁾. وقد حصل روسل أوهل على براءة اختراع لأشباه الموصلات في تقاطع الخلايا الشمسية الحديثة في عام 1946⁽³⁾، الذي تم اكتشافه في الوقت الذي تمت فيه سلسلة من التطورات التي عنيت بالترانزستور.

(2-1) مقدمة عن الخلايا الشمسية

(الخلايا الشمسية) أو الخلايا الفولتضوئية photovoltaic cells. من خلال هذه الخلايا يتم تحويل أشعة الشمس المباشرة إلى كهرباء، عن طريق استخدام أشباه الموصلات مثل السليكون الذي يستخرج من الرمل النقي. وبصفة عامة مواد هذه الخلايا إما مادة بلورية سميكة كالسيليكون البلوري Crystalline Silicon أو مادة لابلورية رقيقة كمادة السيلكون اللابلوري أو مواد مترسبة كطبقات فوق شرائح من شبه الموصلات تتكون من أرسنيد(زرنيخيد) الجاليوم Gallium Arsenide (GaAs)⁽⁴⁾.

وتعتبر طاقاتها شكلا من الطاقة المتجددة والنظيفة، لأنه لا يسفر عن تشغيلها نفايات ملوثة ولا ضوضاء ولا إشعاعات ولا حتي تحتاج لوقود. لكن كلفتها الابتدائية مرتفعة مقارنة بمصادر الطاقة الأخرى. والخلايا الشمسية تولد كهرباء مستمرة ومباشرة (كما هو في البطاريات السائلة والجافة العادية).

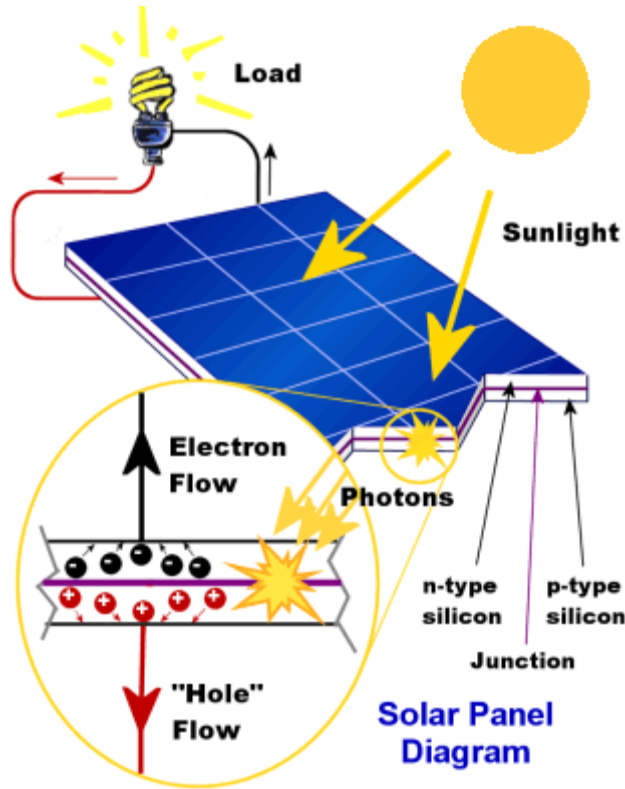
تعتمد شدة تيارها علي وقت سطوع الشمس وشدة أشعة الشمس، وكذلك على كفاءة الخلية الضوئية نفسها في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. يمكن لهذه الخلايا الشمسية إعطاء مئات الفولتات من التيار الكهربائي المستمر DC لو وصلت هذه الخلايا علي التوالي. كما يمكن تخزين الطاقة الناتجة في بطاريات الحامضية المصنوعة من الرصاص أو القاعدية المصنوعة من معدني النيكل والكاديوم. ويمكن تحويل التيار المستمر DC إلى تيار متردد AC بواسطة العاكسات ال Invertor للاستعمال وإدارة الأجهزة الكهربائية المنزلية والصناعية العادية. ⁽⁵⁾ من مميزات أنها ليس بها أجزاء متحركة تتعرض للعطل. لهذا تعمل فوق الأقطار الصناعية بكفاءة عالية، ولاسيما وأنها لا تحتاج لصيانة أو إصلاحات أو وقود، حيث تعمل في صمت، إلا أن اتساخ الخلايا الضوئية نتيجة التلوث أو الغبار يؤدي إلى خفض في كفاءتها مما يستدعي تنظيفها على فترات.

(3-1) العمليات الضوئية في الخلايا الشمسية (Photovoltaic Processes in Solar Cell)

الخلايا الشمسية التقليدية المعروفة والتي تعتمد على أشباه الموصلات فإنها تصنع من بلورتين أحدهما مطعم بشوائب تجعل البلورة n-type أي تحتوي على عدد من الإلكترونات الحرة الإضافية والبلورة الأخرى تطعم بشوائب تجعلها من النوع p-type والتي تفتقد الإلكترونات الحرة. وعند توصيل البلورتين مع بعضهما البعض لتشكل وصلة p-n فإن بعض الإلكترونات في n-type سوف يتدفق إلى p-type لسد العجز في الإلكترونات الذي يحتويه، علما بان فقدان الإلكترونات في p-type يعرف باسم فجوة hole.

فان عدد كافي من الإلكترونات سوف يتدفق عبر الحد الفاصل بين البلورتين ليعمل على مساواة مستويات فيرمي Fermi levels في البلورتين. وتتكون منطقة فاصلة تعرف باسم وصلة (p-n junction)، حيث تستنزف حاملات الشحنة أو تتراكم على كلا جانبي الحد الفاصل. في مادة السليكون فان انتقال الإلكترونات سوف يعمل فرق جهد عند الحد الفاصل تتراوح قيمته بين 0.5 إلى 0.6 فولت.

عند تعرض الوصلة الآن لأشعة الشمس فان فوتونات الضوء سوف تصطدم بالالكترونات المرتبطة في n-type وتعطيها المزيد من الطاقة بعملية تعرف باسم الإثارة الضوئية photo excitation . وفي مادة السليكون، فان أشعة الشمس سوف تزود الالكترونات بالطاقة الكافية لتنتقل الالكترونات من حزمة التكافؤ (مستوى الطاقة المنخفض) إلى حزمة التوصيل (مستوى الطاقة الأعلى). والالكترونات في حزمة التوصيل تكون حرة الحركة. وعند توصيل وصلة (p-n) في دائرة كهربائية فان الالكترونات سوف تتدفق من n-type إلى p-type وتقوم هذه الالكترونات بملء الفراغات في حزمة التكافؤ التي تركت فارغة بدون الكترونات. وبهذه الطريقة تقوم أشعة الشمس بتوصيل التيار الكهربائي .



شكل يوضح العمليات الضوئية للخلية الشمسية

في أي مادة شبه موصلة semiconductor فان فجوة الطاقة band gap تعني أن الفوتونات التي تمتلك نفس قيمة فجوة الطاقة أو أكثر هي تلك التي تساهم في إنتاج التيار الكهربائي. وفي حالة مادة السليكون silicon ، فان معظم الضوء المرئي من الأحمر وحتى البنفسجي يمتلك الطاقة الكافية ليساهم في إنتاج التيار الكهربائي. ولكن لسوء الحظ فان الطاقة الإضافية التي تمتلكها فوتونات الضوء الأزرق والبنفسجي تفقد في شكل حرارة. كما انه لكي نحظى بفرصة معقولة لاقتناص الفوتون في طبقة n-type يجب أن تكون سميكة بشكل مناسب. وهذا أيضا سوف يزيد من فرصة انطلاق إلكترون آخر ليتحد مع فجوة في المادة قبل أن يصل إلى الحد الفاصل لوصلة p-n⁽⁶⁾(7) هذه التأثيرات تجعل أقصى كفاءة يمكن أن نحصل عليها محدودا في الخلايا الشمسية المصنعة من مادة السليكون، وحاليا فان الكفاءة تتراوح بين 12% إلى 15% في الأنظمة التجارية ويمكن أن تصل إلى 25% في المختبر.

حتى الآن فان المشكلة الأكبر في الخلايا الشمسية التقليدية هي التكلفة العالية لإنتاجها، فالخلايا الشمسية تتطلب طبقة سميكة من السليكون المطعم بالشوائب ليملك معدل امتصاص للفوتونات مقبولا، وعملية تصنيع السليكون مكلفة جدا. وقد وجد الكثير من الطرق المختلفة لتقليل التكلفة بما فيها تقنيات إنتاج الأغشية الرقيقة، ولكن حتى يومنا هذا فان تطبيقها لازال محدودا لوجود العديد من المشاكل العملية. ويوجد حاليا خط بحثي جديد نجح في زيادة كفاءة الخلايا الشمسية التقليدية يعتمد على إنتاج وصلات متعددة multi-junction إلا إن إنتاج هذه الخلايا مكلف للغاية ويمكن أن يكون مناسباً فقط لبعض المؤسسات الضخمة. وبصفة عامة فان الخلايا الشمسية المعدة للتثبيت على أسطح المنازل لم تتغير كفاءتها بشكل مناسب للاستخدام العملي بالرغم من انخفاض تكلفة الحصول عليها.⁽⁶⁾

(4-1) مكونات الخلايا الشمسية

(1-4-1) الألواح الشمسية

يمكن أن تستخدم DC عبارة عن خلايا شمسية مجمعة مع بعضها البعض تنتج كهرباء تيار مستمر لتشغيل بعض المعدات أو تخزينها في بطاريات يعاد شحنها واستخدامها أكثر من مرة وتؤاس

قوة تلك الخلايا بوحدة الواط، فهناك لوحات صغيرة تبدأ من 5 واط أو 15 واط حتى تصل إلي بلايين من الواط ل بنية الكبيرة والمصانع .وبالنسبة لغير المتخصصين فأحب أن أوضح قانونان فقط - مشهوران جدا - دون الدخول إلي معادلات معقدة في علوم الكهرباء يسموا بقانون أوم وقانون حساب القدرة وينص على التالي⁽⁵⁾⁽⁷⁾ :

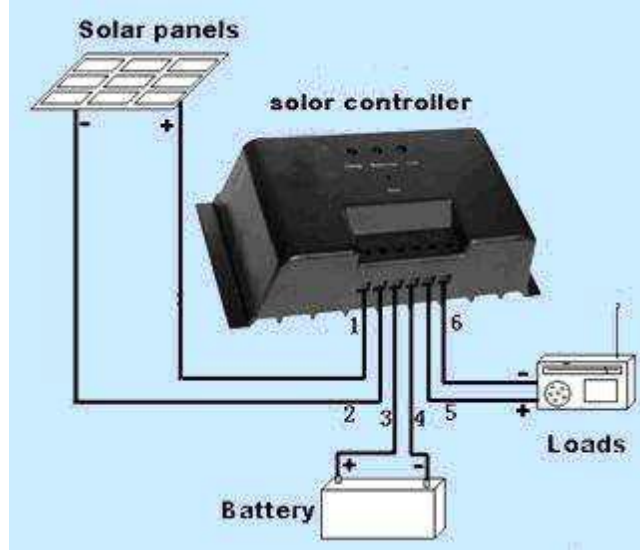
$$(1) \text{ الجهد الكهربائي} = \text{التيار الكهربائي} \times \text{المقاومة}$$

$$(2) \text{ القدرة} = \text{الجهد الكهربائي} \times \text{التيار الكهربائي}$$

(2-4-1) منظمات الشحن

تعد وظيفة هذا الجهاز التحكم في شحن البطاريات، فيقوم بحماية البطاريات من الشحن الزائد عن طريق التحكم بكمية التيار المتدفق نحوها من الألواح الشمسية، مما يطيل من عمرها ويحميها من التلف، ويعد من أهم مكونات النظام الشمسي⁽²⁾.

كما تقوم بتنظيم عملية شحن البطاريات حيث أن عملية الشحن تختلف في أليتها عن مجرد توفير مصدر للطاقة المستمرة موصل بالبطارية، حيث تكون قيمة جهد الشحن مساوي لقيمة البطارية وقيمة تيار الشحن تساوي تقريبا 15% من التيار الذي تسعه البطارية، وإذا زادت تلك النسبة بكثير فستحدث عملية شحن سريع للبطارية تؤدي إلي إضعافها وإستهلاكها بسرعة مع مرور الوقت، وإذا قلت تلك النسبة بدرجة كبيرة فسيتم شحن البطارية في وقت طويل وبشكل بطئ جدا⁽⁴⁾.

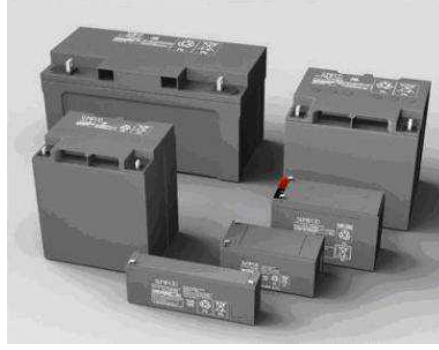


شكل يوضح منظمات الشحن للخلايا الشمسية

(3-4-1) البطاريات

وهي الوحدة المسؤولة عن تخزين الطاقة وتفريغها عند الحاجة - أي أن لها وظيفة مزدوجة - ويمكن أن تشبهها بالبالونة التي تستطيع إدخال الهواء بداخلها لتعبئتها تحت ضغط خارجي أو فتح فوهتها ليخرج الضغط الداخلي إلى الخارج مرة أخرى⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾.

وتعتبر مكون لنظام الطاقة الشمسية، حيث تستخدم في تخزين الكهرباء المتولدة من الألواح الشمسية، ولا يعد وجودها ضرورياً لعمل النظام، طالما أن ضوء الشمس موجود، بينما تكمن أهميتها في تخزين الكهرباء لاستخدامها عند غروب الشمس وحلول المساء. يمكن توصيل أكثر من بطارية واحدة للنظام الشمسي الواحد وذلك لتخزين أكبر قدر من الطاقة الكهربائية، حيث يتم توصيلها باستخدام أسلاك مع بعضها.



شكل يوضح البطاريات

(4-4-1) العاكس

وتأتي أهمية تلك المرحلة عند الحاجة إلى استخدام تلك الخلايا لتوليد كهرباء عالية متغيرة تستطيع لتشغيل الأجهزة الكهربائية والإلكترونية الكبيرة في المنازل أو المصانع. فهنا علينا باستخدام أجهزة والتي تقوم بتحويل التيار المستمر سواء كان 12 فولت أو 24 فولت تسمى عواكس (7)(20)



شكل يوضح العاكس

(5-1) أنواع الخلايا الشمسية

(1-5-1) الخلايا الشمسية من الجيل الأول على شكل ووفر (First Generation Solar Cell)

(Wafer Based)

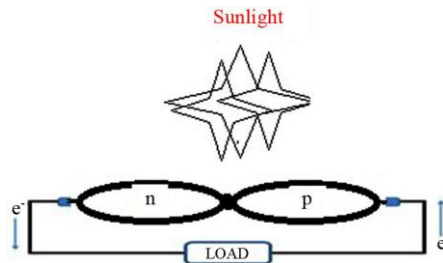
يتم إنتاج الخلايا الشمسية من الجيل الأول على رقائق السليكون. هو الأقدم والتكنولوجيا الأكثر شعبية بسبب كفاءة الطاقة العالية. يتم أيضاً تصنيف تقنية رقاقة السليكون القائمة إلى مجموعتين فرعيتين سميت⁽⁶⁾:

• خلية شمسية مفردة / أحادية البلورية السليكونية . (Single/ Mono-crystalline silicon solar cell)

• متعدد الخلايا السليكون البلورية. (Poly/Multi crystalline silicon solar cell).

(1-1-5-1) خلية شمسية مفردة / أحادية البلورية السليكونية . (Single/ Mono-crystalline silicon solar cell)

يتم تصنيع الخلايا الشمسية البلورية الأحادية ، كما يشير الاسم ، من بلورات واحدة من السليكون بعملية تسمى عملية (Czochralski)⁽⁷⁾⁽⁸⁾ خلال عملية التصنيع ، يتم تقطيع بلورات السليكون من سبائك كبيرة الحجم. تتطلب هذه المنتجات البلورية الكبيرة معالجة دقيقة حيث أن عملية "إعادة البلورة" تكون الخلية أكثر تكلفة وعملية متعددة. وتقع كفاءة الخلايا الشمسية البلورية أحادية البلورية الواحدة بين 17% و 18%.⁽⁹⁾



The semiconductor p-n junction solar

(2-1-5-1) خلايا متعدد السليكون البلورية (Poly/Multi crystalline silicon solar cell)

تتألف الوحدات الكهروضوئية متعددة البلورات بشكل عام من عدد من البلورات المختلفة ، إلى جانب بعضها في خلية واحدة. معالجة الخلايا الشمسية الكريستالات هي أكثر اقتصادية ، والتي يتم إنتاجها عن طريق تبريد قالب جرافيت مملوء يحتوي على السيليكون المصهور. الخلايا الشمسية الكريستالات هي حاليا الخلايا الشمسية الأكثر شعبية. ويعتقد أنها تحتل معظم ما يصل إلى 48 ٪ من إنتاج الخلايا الشمسية في جميع أنحاء العالم خلال عام 2008⁽¹⁰⁾. خلال عملية التصلب للسيليكون المنصهر ، يتم تكوين هياكل بلورية مختلفة. على الرغم من أنها أقل كلفة في تصنيع الألواح الشمسية السليكونية ، إلا أنها أقل كفاءة من 12٪ إلى 14٪⁽¹¹⁾

(2-5-1) الجيل الثاني من الخلايا الشمسية - الخلايا الشمسية للأغشية الرقيقة

معظم الخلايا الشمسية الرقيقة والسيليوم هي الجيل الثاني من الخلايا الشمسية ، وأكثر اقتصادا بالمقارنة مع الجيل الأول من الخلايا الشمسية السيليكونية. تتميز خلايا رقيقة السيليكون بطبقات ممتصة للضوء تصل سماكتها إلى 350 ميكرومتر ، بينما تحتوي الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة على طبقات امتصاص خفيفة للغاية ، وبصفة عامة من سمك 1 ميكرومتر⁽¹²⁾. يتم تصنيف الخلايا الشمسية الرقيقة على أنها:

1. Amorphous silicon (a-Si)
2. Cadmium Telluride (Cd-Te)
3. Copper-Indium-Selenide (CIS) and Copper-Indium-Gallium-Diselenide (CIGS)

(1-2-5-1) الخلايا الشمسية غير متبلور السيليكون رقيق الفيلم Amorphous Silicon (Thin Film)

الوحدات الكهروضوئية غير المتبلورة (Si - a) هي الخلايا الشمسية البدائية التي يتم تصنيعها صناعياً أولاً. يمكن تصنيع الخلايا الشمسية غير المتبلورة (a-Si) عند درجة حرارة معالجة منخفضة ، مما يسمح باستخدام مختلف الأنواع منخفضة التكلفة ، والبوليمر ، والركائز المرنة الأخرى. تتطلب هذه الركائز كمية أقل من الطاقة للمعالجة⁽¹³⁾. ولذلك ، فإن الخلايا الشمسية غير البلورية (a Si) أرخص نسبياً ومتاحة على نطاق واسع. تعني الكلمة "غير المتبلورة" فيما يتعلق بالخلية الشمسية أن مادة السيليكون المكونة للخلية تفتقر إلى ترتيب محدد للذرات في الشبكة أو بنية غير بلورية أو غير منظمة بشكل كبير. هذه هي ملفقة عن طريق طلاء مادة السيليكون المبلوط في المؤخرة من لوحة الركيزة / الزجاج. هذه الخلايا الشمسية عموماً بني داكن اللون على الجانب العاكس بينما الفضي على الجانب الجهة الموصلة⁽¹⁴⁾. إن الملف الرئيسي للخلية الشمسية للسيليكون هو الكفاءة المنخفضة وغير المستقرة تقريباً. تسقط كفاءة الخلية تلقائياً عند مستوى الوحدة الكهروضوئية. حالياً ، تختلف كفاءة وحدات PV التجارية في نطاق 4 % - 8 % . يمكن تشغيلها بسهولة في درجات حرارة مرتفعة ، وهي مناسبة للظروف المناخية المتغيرة حيث تشرق الشمس لبضع ساعات⁽¹⁵⁾.

(2-2-5-1) الخلايا الشمسية الرقيقة بتقنية (CdTe)

من بين الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة ، يعتبر الكادميوم تيلورايد (CdTe) أحد المرشحين الرئيسيين لتطوير أجهزة الفوتوفولطية (PV) ، وهو أيضاً أول تقنية PV بتكلفة منخفضة⁽¹⁶⁾،⁽¹⁷⁾. يحتوي CdTe على فجوة نطاق تصل إلى (1.5 eV) بالإضافة إلى معامل امتصاص بصري عالي واستقرار كيميائي. هذه الخصائص تجعل CdTe مادة جذابة لتصميم الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة. (CdTe) هو أشباه الموصلات المركزة البلورية ذات الفرق المباشر الممتاز الذي يجعل امتصاص الضوء أسهل ويحسن من الكفاءة. يتم بناؤها بشكل عام عن طريق الحصر (sandwiching) بين طبقات الكادميوم لتشكيل وصلة (p-n junction).

تتضمن عملية التصنيع ثلاث خطوات: أولاً ، يتم تصنيع الخلايا الشمسية القائمة على CdTe من مواد متعددة البلورات ، ويتم اختيار الزجاج على طبقة أساس. تتطوي العملية الثانية على الترسيب ، أي أن الطبقات المتعددة من الخلايا الشمسية CdTe هي عبارة عن كواتيدية إلى الركيزة باستخدام طرق اقتصادية مختلفة. سبق أن ذكرنا أن CdTe لديها فجوة في النطاق الأمثل المباشر (~ 1.45 eV) مع معامل امتصاص عالي على 5×10^{15} / سم¹⁸. لذلك ، فعاليتها عادة ما تعمل في نطاق 9% - 11%⁽¹⁹⁾ يمكن إجراء الخلايا الشمسية (CdTe) على الركائز (substrates) البوليمر والهرنة. ومع ذلك ، هناك العديد من القضايا البيئية مع مكون الكاديوم من الخلايا الشمسية. يعتبر الكاديوم معدناً ساماً وعاملاً ساماً يمكن أن يتراكم في الأجسام البشرية والحيوانات والنباتات. يمكن أن يكون التخلص من المواد السامة التي تحتوي على Cd بالإضافة إلى إعادة تدويرها مكلفاً للغاية ومضراً جداً لبيئتنا ومجتمعنا⁽¹⁵⁾. ولذلك ، فإن العرض المحدود من الكاديوم والمخاطر البيئية المرتبطة باستخدامه هي القضايا الرئيسية في هذه التكنولوجيا (CdTe)^{(17),(20)}

(3-2-5-1) الخلايا الشمسية القائمة على (CIGD)

CIGS هو أشباه الموصلات المركبة الرباعية المكونة من العناصر الأربعة ، وهي: النحاس ، الإنديوم ، الغاليوم والسيلينيوم⁽²¹⁾. CIGS هي أيضا نوع الفرق بللجوة ا المباشرة أشباه الموصلات. بالمقارنة مع الخلايا الشمسية الرقيقة CdTe ، فإن CIGS تمتلك كفاءة أعلى ~ 10% - 12%. نظراً لكفاءتها وحالتها الاقتصادية بشكل كبير ، تشكل تقنية الخلايا الشمسية القائمة على CIGS إحدى تقنيات الغشاء الرقيق الأكثر احتمالاً. تتم معالجة CIGS من خلال التقنيات التالية: التبخير ، التبخر ، تقنية الطلاء الكهروكيميائية ، الطباعة و ترسب الحزمة الإلكترونية^{(7),(22)}. بالإضافة إلى ذلك ، يمكن أن تكون عملية التبخير عملية ثنائية أو متعددة الخطوات تتضمن الترسيب والتفاعل التالي مع السيلينيوم لاحقاً ، أو يمكن أن تكون عملية تفاعلية ذات خطوة واحدة. ومع ذلك ، فإن التبخر يشبه التبخر ، بمعنى أنه يمكن استخدامه في خطوة واحدة ، أو خطوتين ، أو خطوات معالجة متعددة. يمكن اختيار ركائز مواد CIGS من الألواح الزجاجية وركائز البوليمرات والصلب

والألومنيوم إلخ. وتشمل مزايا الخلايا الشمسية الرقيقة من CIGS عمرها الطويل دون حدوث تدهور كبير. هذه الخصائص لـ CIGS تشير إلى حل سهل لتعزيز الكفاءة^{(19),(13)}

Third Generation Solar Cells الخلايا الشمسية من الجيل الثالث (3-5-1)

تعد خلايا الجيل الثالث هي التقنيات الواعدة الجديدة ولكن لا يتم بحثها بالتفصيل تجارياً. معظم أنواع الخلايا الشمسية المتطورة من الجيل الثالث⁽²³⁾ هي:

(1) الخلايا الشمسية القائمة على الفانو.

(2) الخلايا الشمسية القائمة على البوليمر.

(3) الخلايا الشمسية الصبغية.

(4) الخلايا الشمسية المركزة.

(1-3-5-1) الخلايا الشمسية النانوية

تعرف الخلايا الشمسية القائمة على البلورة النانوية عموماً بالخلايا الشمسية ذات النقاط الكمومية (QD). تتكون هذه الخلايا الشمسية من أشباه موصلات ، بشكل عام من مجموعات معدنية انتقالية والتي هي في حجم مجموعة من البلورات النانوية مصنوعة من مواد شبه موصلة. إن QD هو مجرد اسم لحجم البلورة يتراوح عادةً داخل بضعة نانومترات من حيث الحجم ، على سبيل المثال ، مواد مثل Si أو مسامي TiO₂ ، والتي تستخدم بكثرة في QD. يتم عرض هيكل الخلايا الشمسية⁽²⁴⁾ QD. مع تقدم تكنولوجيا النانو ، يتم استهداف هذه البلورات النانوية من المواد شبه الموصلة ليحل محل المواد شبه الموصلة في حالة السائبة مثل Si أو CdTe أو CIGS. استخدمت فكرة الخلية الشمسية القائمة على QD والمستخدمة نظرياً لتصميم خلية شمسية p-i-n فوق النظام الذاتي المنظم في نظام As / GaAs⁽²⁴⁾ عموماً ، يتم خلط البلورات النانوية في حمام ومطلي على

الركيزة سي. تدور هذه البلورات بسرعة كبيرة وتتدفق بسبب قوة الطرد المركزي. في الخلايا الشمسية التقليدية لأشباه الموصلات المركبة ، عادةً ما يفرز الفوتون الإلكتروني هناك عن طريق إنشاء زوج ثقب إلكترون واحد⁽²⁵⁾. ومع ذلك ، عندما يضرب الفوتون مادة QD مصنوعة من مادة شبه موصلة مشابهة ، يمكن تكوين العديد من أزواج الإلكترون ، عادةً 2 أو 3 ، كما لوحظ في حالات قليلة.^{(20),(23)}

(1-5-3-2) الخلايا الشمسية البوليمرية

الخلايا الشمسية البوليمر (PSC) هي خلايا شمسية مرنة بصفة عامة بسبب الركيزة البوليمرية. تم اختراع أول PSC من قبل مجموعة أبحاث Tang et al. في مختبر أبحاث كوداك.⁽²³⁾ يتكون PSC من طبقات رقيقة وظيفية متصلة متسلسلة مغلقة على رقائق بوليمر أو شريط. وهو يعمل عادةً كمزيج من المتبرع (بوليمر) ومستقبل (الفوليرين). هناك أنواع مختلفة من المواد لامتناس أشعة الشمس ، بما في ذلك المواد العضوية مثل البوليمرات المترافقة / الموصلة^{(26),(23)}. في عام 2000 ، حصل Heeger و MacDiarmid و Shirakawa على جائزة نوبل في الكيمياء لاكتشاف فئة جديدة من مواد البوليمر المعروفة باسم البوليمرات الموصلة^{(27),(28)}. تعمل PSC وغيرها من الخلايا الشمسية العضوية على نفس المبدأ المعروف باسم التأثير الضوئي ، أي حيث يحدث تحويل الطاقة في شكل إشعاعات كهرومغناطيسية إلى تيار كهربائي⁽²⁹⁾.

قام Yu et al بتطوير أول خلية شمسية بوليمر PPV وحصل على كفاءة تحويل طاقة عالية⁽³⁰⁾. وقد أدت هذه العملية إلى تطوير عصر جديد في مواد البوليمر لالتقاط الطاقة الشمسية. وبعد تحسين المعلومات إلى حد كبير ، حقق الباحثون كفاءة أعلى من 3.0% بالنسبة لـ PSCs من النوع PPV. هذه الخصائص الفريدة من PSCs فتحت بوابة جديدة للتطبيقات الجديدة في تشكيل الأجهزة الشمسية المطاطة بما في ذلك المنسوجات والأقمشة⁽³¹⁾. كما تم تطوير مفهوم إعادة التدوير الحديث المعروف باسم الاستقطاب الكهروضوئية العضوية (ZOPVs) لزيادة وظيفة شاشات الكريستال السائل باستخدام نفس المستقطب وجهاز فلتائي ضوئي وظروف الإضاءة المناسبة / الألواح الشمسية

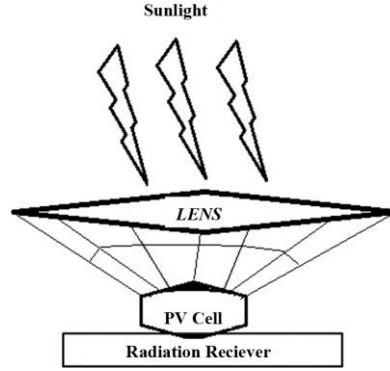
(3-3-5-1) الخلايا الشمسية الصبغية

تم تقديم أول خلية شمسية من DSSC من قبل Michel Gratzel في المعهد السويسري للتكنولوجيا الفدرالي⁽⁷⁾⁽³²⁾. تستخدم الخلايا الشمسية القائمة على DSSCs عموماً جزيئات الصبغ بين الأقطاب المختلفة. يتكون جهاز DSSC من أربعة مكونات هي: قطب أشباه الموصلات (TiO₂ من النوع n و NiO من النوع p)، ومحسس للأصباغ، ووسيط الأكسدة، وقطب كهربائي مضاد [46] (carbon or Pt). إن DSSCs جذابة بسبب طرق المعالجة التقليدية البسيطة مثل تقنيات الطباعة، تتسم بدرجة عالية من المرونة والشفافية ومنخفضة التكلفة أيضاً⁽³²⁾. وينشأ التجديد في الخلايا الشمسية DSSC بسبب التحسس الضوئي لطلاء TiO₂ الحبيبي النانوي إلى جانب الأصباغ النشطة بصرياً، مما يزيد من الكفاءة التي تزيد عن 10%⁽³³⁾⁽³⁴⁾. ومع ذلك، هناك تحديات معينة مثل تدهور جزيئات الصبغ وبالتالي قضايا الاستقرار⁽³²⁾. ويرجع ذلك إلى ضعف امتصاص المحسسات الضوئية مما يؤدي إلى ضعف كفاءة التحويل. وتتحلل جزيئات الصبغة بشكل عام بعد التعرض للأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء مما يؤدي إلى انخفاض عمر الخلايا واستقرارها. علاوة على ذلك، قد يؤدي الطلاء بطبقة حاجزة إلى زيادة التصنيع أيضاً أكثر تكلفة وخفض الكفاءة⁽⁹⁾.

(4-3-5-1) الخلايا الشمسية المركزة

وقد تم تأسيس الضوئية المركزة (CPV) منذ السبعينات⁽³⁵⁾. إنها أحدث تكنولوجيا في أبحاث الخلايا الشمسية وتطويرها. يتمثل المبدأ الرئيسي للخلايا المركزة في جمع كمية كبيرة من الطاقة الشمسية على منطقة صغيرة فوق الخلايا الشمسية الكهروضوئية، كما هو موضح في الشكل أدناه. ويستند مبدأ هذه التكنولوجيا على البصريات، وذلك باستخدام مرايا كبيرة وترتيب العدسات للتركيز أشعة الشمس على منطقة صغيرة على الخلية الشمسية⁽⁹⁾. وبالتالي فإن تقارب إشعاعات ضوء الشمس ينتج كمية كبيرة من الطاقة الحرارية. هذه الطاقة الحرارية مدفوعة بمحرك حراري يتحكم فيه مولد طاقة مدمج. وقد أظهرت CPVs طبيعتها واعدة في عالم الطاقة الشمسية⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾. يتم تصنيفها إلى خلايا شمسية منخفضة ومتوسطة وعالية التركيز اعتماداً على قوة أنظمة العدسات⁽³⁶⁾.

تتميز التقنية الضوئية المركزة بالمزايا التالية ، مثل كفاءات الخلايا الشمسية > 40% ، وغياب أي أجزاء متحركة ، ولا كتلة حرارية ، ووقت استجابة سريع ، ويمكن أن تكون قابلة للتوسع في نطاق من الأحجام.



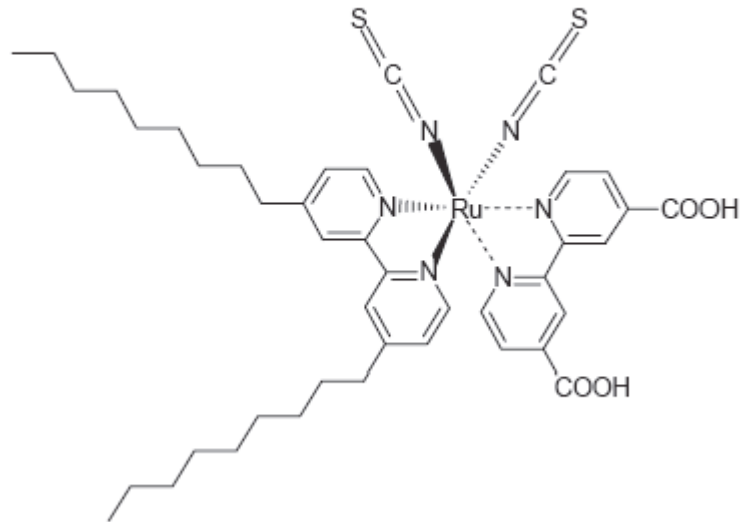
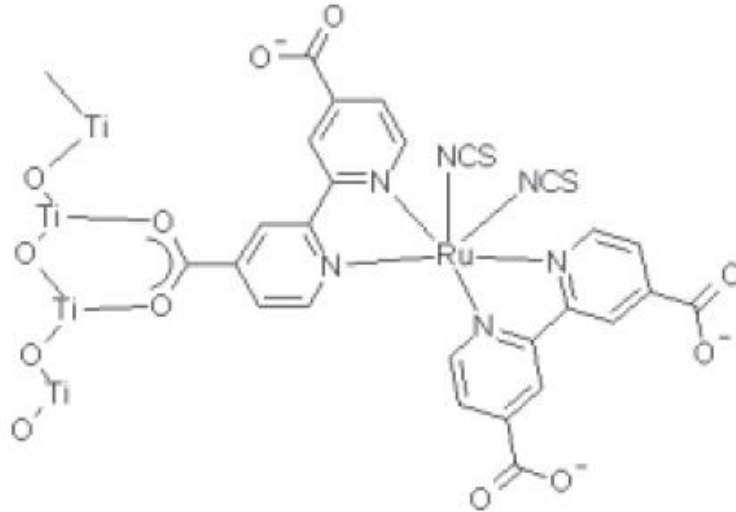
(36) Schematic of concentrated solar cell

(4-5-1) الخلايا القائمة على البيروفسكايت (Perovskites)

Perovskites هي فئة من المركبات التي تحددها الصيغة ABX_3 حيث X تمثل الهالوجين مثل I- ، Br- ، Cl- و A و B كاتيونات ذات أحجام مختلفة. الخلايا الشمسية Perovskite هي اكتشاف حديث بين مجتمع أبحاث الخلايا الشمسية وتمتلك العديد من المزايا على السيليكون التقليدي والخلايا الشمسية القائمة على طبقة رقيقة. تحتاج الخلايا الشمسية التقليدية القائمة على Si إلى خطوات معالجة متعددة ومكلفة وتتطلب درجات حرارة عالية (< 1000 درجة مئوية) ومرافق فراغ (38). يمكن للخلايا الشمسية القائمة على perovskites أن تحقق كفاءة تصل إلى 31%. ويمكن التنبؤ بأن هذه البيروفسكايت قد تلعب أيضاً دوراً هاماً في بطاريات السيارات الكهربائية من الجيل التالي ، وفقاً للتحقيقات المثيرة التي أجرتها فولكس واجن مؤخراً (39). ومع ذلك ، فإن القضايا الحالية مع الخلايا الشمسية perovskite هي الاستقرار والمتانة. المادة يتحلل مع مرور الوقت، وبالتالي انخفاض في الكفاءة الشاملة. لذلك هناك حاجة لمزيد من البحوث لجعل هذه الخلايا في السوق.

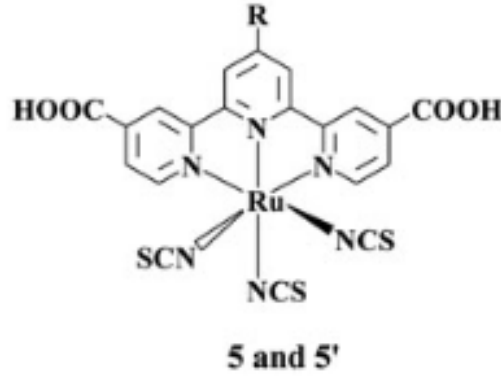
(6-1) بعض الصبغات المتحسسة للضوء

حضيت مركبات البولي بريديل للروثنيوم باهتمام واسع ودراسات عديده كصبغات متحسسه للضوء حيث تتميز بانتقال شحنة جيدة مناسبة للخلايا الشمسيه الصبغيه

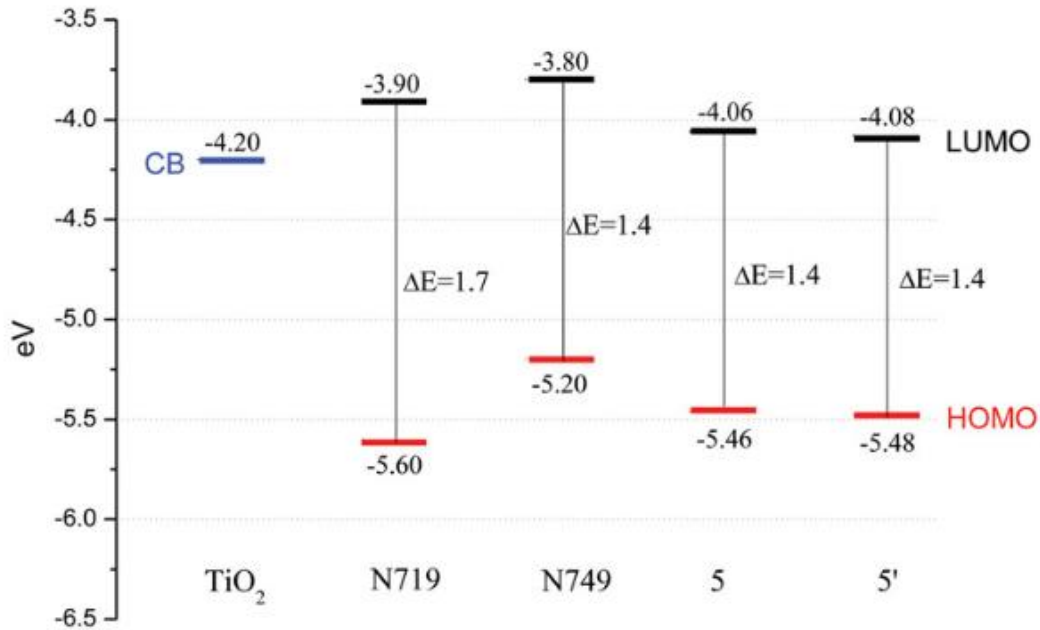


ان احتواء بعض من هذه الصبغات على مجموعة الكربوكسيل يزيد من كفاءة حقن الالكترونات الناتجة من الصبغة بالتحفيز بالضوء في اوكسيد التيتانيوم

كما حضرت صبغه جديده للروثنيوم كما في الشكل الاتي



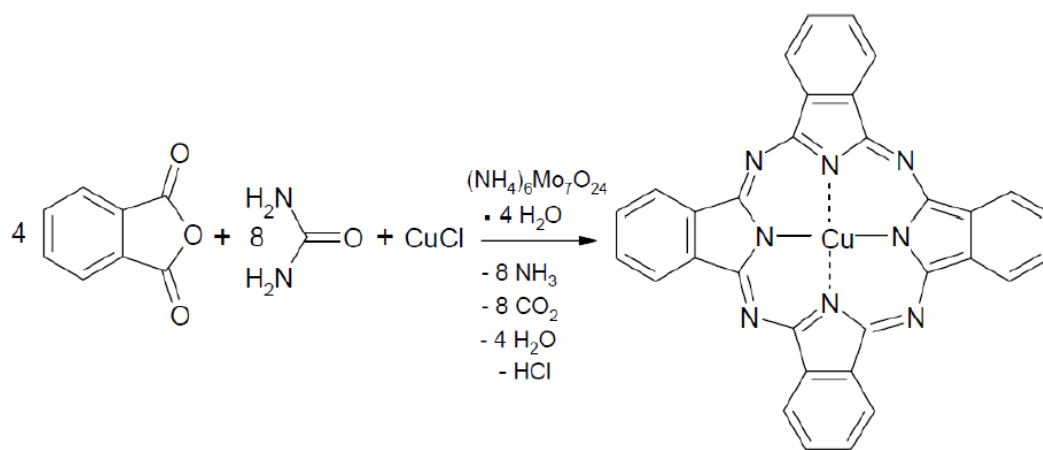
والتي تم حساب فرق الطاقة بين المستويات الطاقية HOMO و LOMO ومقارنتها مع صبغات اخرى للروثنيوم وقد تبين ان فرق الطاقه قليل وانها مرشح جيد كصبغه متحسسة للضوء لتعطي خلية شمسية عالية الكفاءة



Schematic diagram for HOMO and LUMO energy levels of 5, 5', N719 and N749 dyes.

كما اظهرت صبغة النحاس مع الفثالوسيانات كفاءه جيدة بحدود 8% للخلية الشمسية الصبغية

(40)



(1-2)-الخلايا الشمسية الصبغية (Dye Sensitized Solar Cells)

يتم تصنيف الخلايا الشمسية الحساسة للصبغة (DSSCs) كخلايا شمسية عضوية من الجيل الثالث لأنها توفر وظائف إضافية مثل المرونة والشفافية ، والتي لا يتم توفيرها بواسطة أول جيلين من الأجهزة المصممة باستخدام السيليكون أحادي البلورة (الجيل الأول) أو الأفلام الرقيقة (الثانية توليد). تحاكي DSSCs عملية التمثيل الضوئي حيث يقوم الضوء الذي تمتصه صبغة خضراء ، ويسمى الكلوروفيل ، ونقل الإلكترون المستحث بالصور ، بتوليد الوقود (النشا). في DSSCs ، يمتص جزيء الصبغة الضوء وتوليد الشحنة اللاحقة ينتج تأثير PV. يطلق على DSSCs الخلايا الشمسية ثنائية الوظائف بسبب شفافيتها ومرونتها، بحيث يمكن استخدامها كموافذ للمباني والسيارات، وتوليد الصور الحالية في وقت واحد⁽³⁵⁾.

علاوة على ذلك ، يمكن تصنيع DSSCs بتكلفة منخفضة ، بألوان مختلفة ، على زجاج شفاف وعلى ركائز مرنة لها إمكانات هائلة في السوق التجارية ، وخاصة بالنسبة للتطبيقات "منخفضة الكثافة" مثل مجمّع الطاقة الشمسية على السطح وغيرها من الأدوات الإلكترونية الصغيرة . ميزة أخرى مهمة هي ساعات عملها في كل من الإضاءة المحيطة وحالة الشمس الكاملة دون تأثير كبير على الكفاءة وكذلك قدرتها على العمل في زوايا أوسع ؛ في حين أن الخلايا الشمسية التقليدية الأخرى ستفشل في الإضاءة تحت نطاق معين . وبالتالي، DSSCs لديها قطع منخفضة للغاية مما يجعلها مجال أكثر جاذبية في تكنولوجيا الخلايا الشمسية. يمكن أن تعمل DSSCs بين 10 إلى 14 ساعة في يوم ، في حين أن الخلايا الشمسية التقليدية للسيليكون تعمل فقط لمدة 6 إلى 8 ساعات. ويكون الحد الأعلى لكفاءتها مقارب 10%⁽⁷⁾

(2-2) الهدف من البحث

يهدف البحث الى تحضير صبغة ازو جديدة واختبار كفاءته افي الخلايا الشمسية الصبغية

الجزء العملي

(1-3)- تحضير صبغة الازو له- 2 - امينو بنزاميدازول

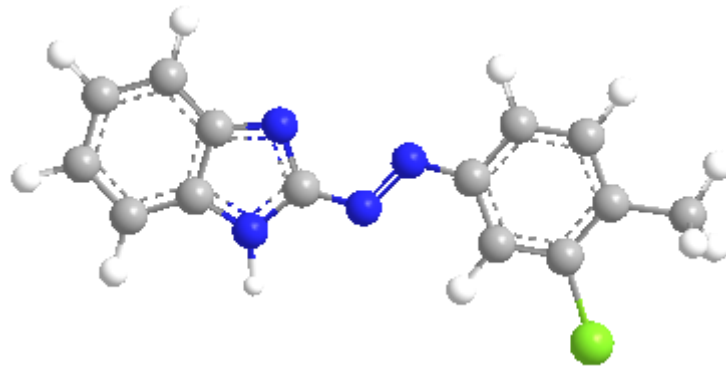
1- أذيب 0.003 مول من 2 - امينو بنزاميدازول في 20 مل ماء مقطر ثم أضاف إليه 5 مل من حامض الهيدروكلوريك المركز. برد المحلول إلى الصفر المئوي.

2 - أذيب 0.003 مول من نتريت الصوديوم في 5 مل ماء مقطر ثم برد في حمام ثلجي إلى الصفر المئوي.

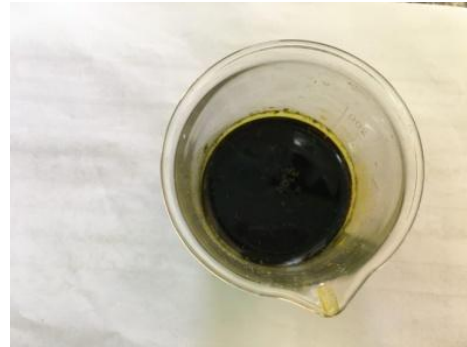
3 أضيف محلول نتريت الصوديوم بالتدريج الى محلول الأمينوبنزاميدازول وتغير اللون إلى الأصفر.

4- اذيب 0.003 مول من 2 - كلوروتولوين في 10 مل ايثانول ثم أضافه 10 هل هيدروكسيد الصوديوم 10 ٪ في إلى الصفر المئوي.

5- أضيف محلول ملح الزانسيوم إلى محلول 2-كلوروتولوين تدريجيا فتلون المحلول باللون الماروني الغامق. في اليوم التالي رشح المحلول وجفف في الهواء. نسبة الناتج 60%



الصبغة الفراغية والتركيبية للصبغة المحضرة



صور تحضير الصبغة

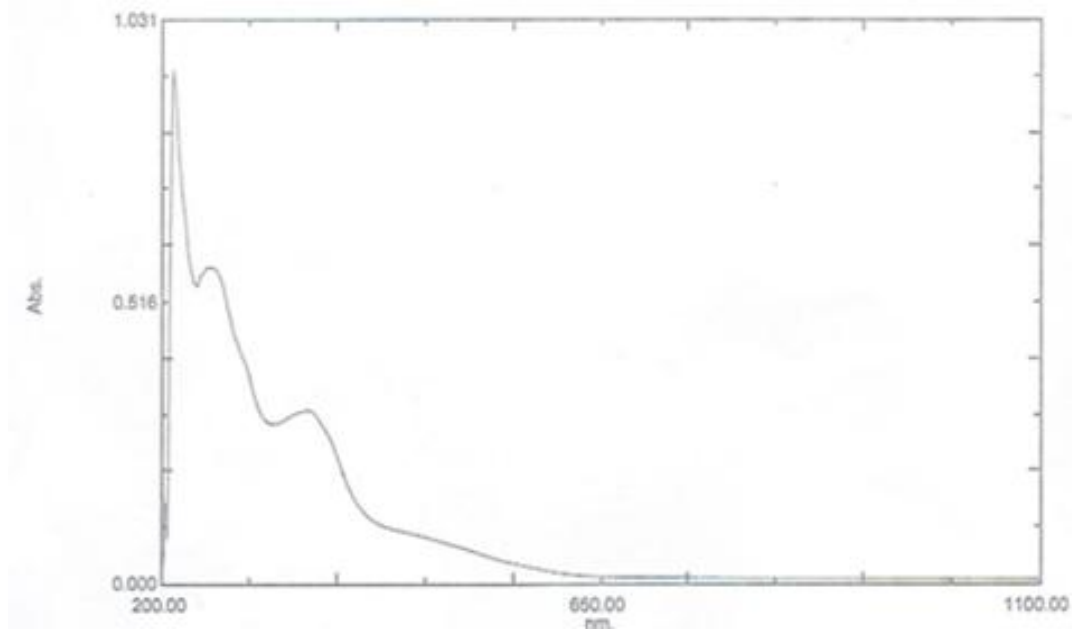


شكل الخلية الشمسية الصبغية المصنعة

(2-3) النتائج والمناقشة

(1-2-3) الانتقالات الالكترونية للصبغة المحضرة

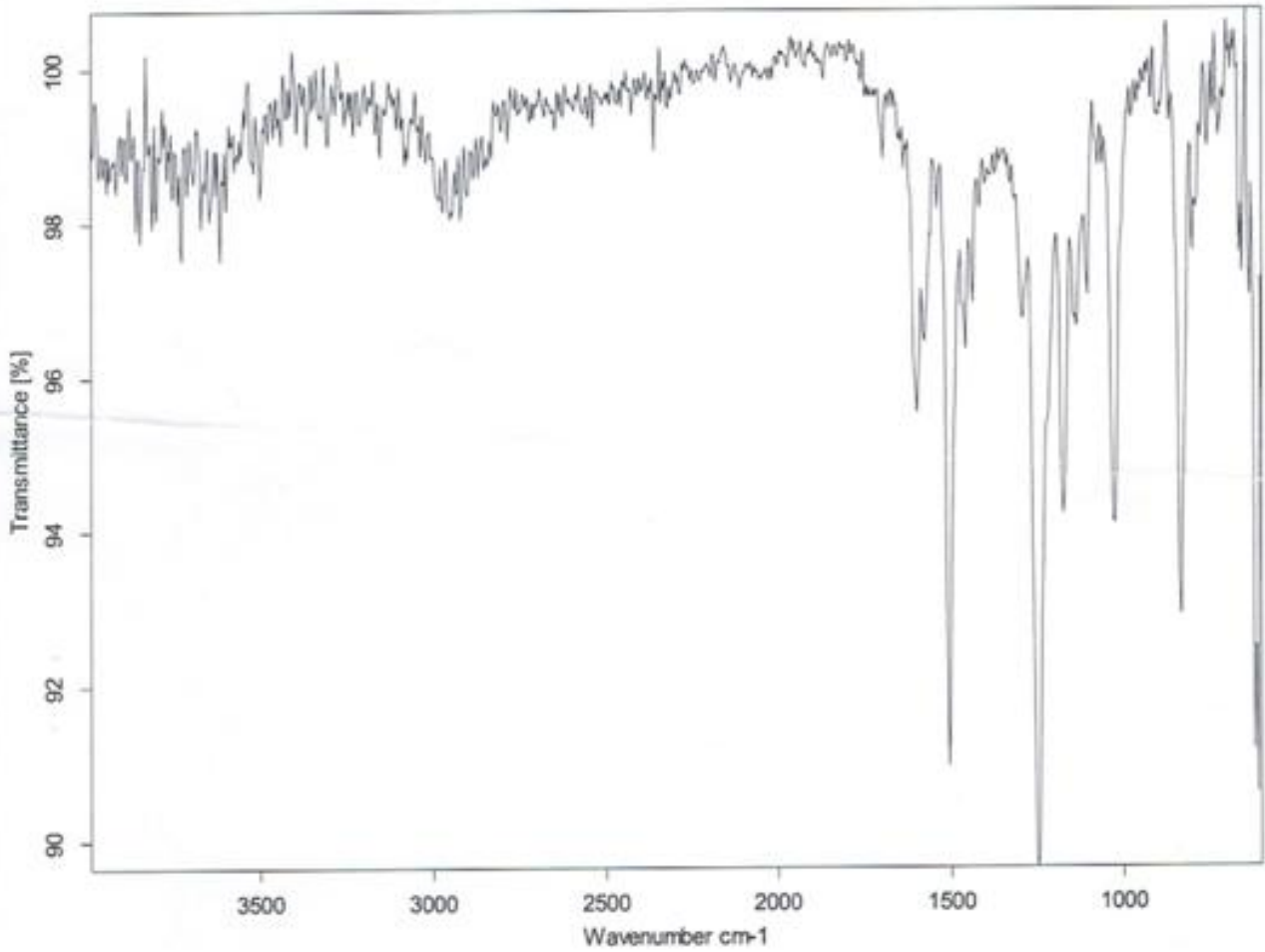
أن طيف الاشعة فوق البنفسجية - المرئية يبين بشكل واضح ان هناك امتصاص قوي يغطي منطقة واسعة من الطيف المرئي حيث تصل الى 670 نانومتر والذي يساعد على امتصاص ضوء الشمس حتى عندما تكون الغيوم ملبدة للجو حيث الخلية الصبغية سو تمتص احد أطوال الموجية لضوء الشمس.



طيف الاشعة فوق البنفسجية المرئية للصبغة المحضرة

(2-2-3) طيف الأشعة تحت الحمراء للصبغة المحضرة

يشير طيف الأشعة تحت الحمراء للصبغة المحضرة إلى امتصاص مجموعة الأزو بحدود 1550 سنتيمتر⁻¹ وان مجموعة C=N تمتص عند 1630 سم⁻¹



طيف الاشعة تحت الحمراء لصبغة الأزو

(3-3) خصائص تيار فولتية للخلية الشمسية الصبغية

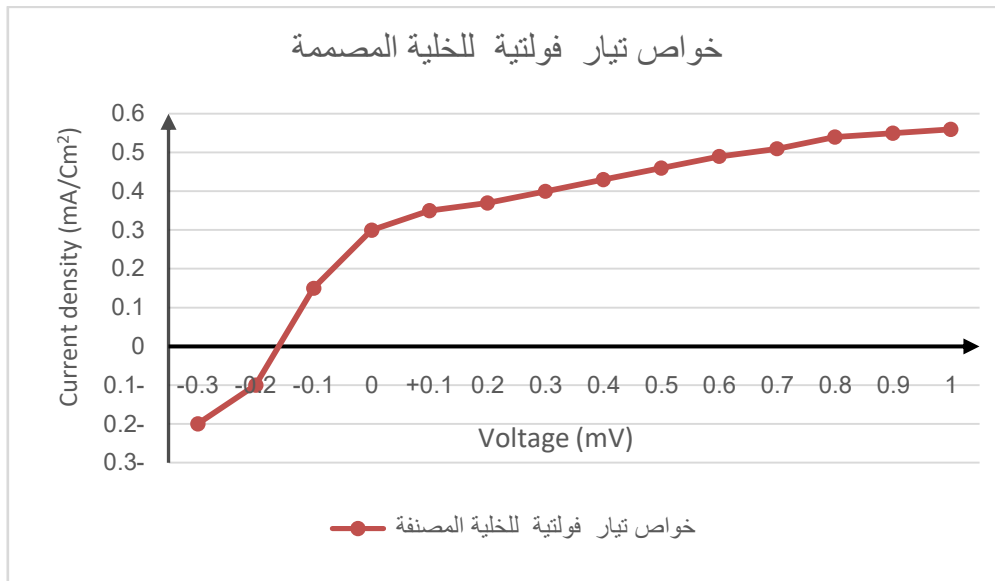
يوضح الجدول أدناه القياسات الكهربائية للخلية المصنعة ويتمثل بقياس الفولتية والتيار حيث

يمثل محور Y قياس كثافة التيار ومحور V يمثل قياس الفولتية

يوضح المخطط قياس الفولتية الموجب بالانزياح الأمامي أما السالب يتمثل بالانزياح العكسي

أما ال Curve فيوضح كثافة التيار للخلية المصنعة

voltage(mV)	Current density (mA/Cm ²)
-0.3	0.2-
-0.2	0.1-
-0.1	0.15
0	0.3
+0.1	0.35
0.2	0.37
0.3	0.4
0.4	0.43
0.5	0.46
0.6	0.49
0.7	0.51
0.8	0.54
0.9	0.55
1	0.56



References - 4-المصادر

1. Gevorkian, Peter (2007). Sustainable energy systems engineering: the complete green building design resource. McGraw Hill Professional. ISBN 978-0-07-147359-0.
2. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/.
3. "Light sensitive device" U.S. Patent 2,402,662 Issue date: June 1946
4. Shockley 'William' Queisser 'Hans J. (1961). "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells . 32 (3): 510.
5. Kumar, Ankush (2017-01-03). "Predicting efficiency of solar cells based on transparent conducting electrodes . 121 (1): 014502. Bibcode
6. K. Kalyanasundaram, "Dye-Sensitized Solar Cells", EPFL Press, Lausanne (2010).
7. Srinivas, B., Balaji, S., Nagendra Babu, M. and Reddy, Y.S. (2015) Review on Present and Advance Materials for SolarCells. International Journal of Engineering Research-Online, 3, 178-182
8. Dmitrijev, S. (2006) Principles of Semiconductor Devices. Oxford University Press, Oxford.
9. Bertolli, M. (2008) Solar Cell Materials. Course: Solid State II. Department of Physics, University of Tennessee, Knoxville.
10. Saga, T. (2010) Advances in Crystalline Silicon Solar Cell Technology for Industrial Mass Production. *NPG Asia Materials*, 2, 96-102
11. Jayakumar, P. (2009) Solar Energy Resource Assessment Handbook. Renewable Energy Corporation Network for the Asia Pacific.
12. Chopra, K.L., Paulson, P.D. and Dutt, V. (2004) Thin-Film Solar Cells: An Overview. *Progress in Photovoltaics*,
13. Imamzai, M., Aghaei, M., Hanum Md Thayoob, Y. and Forouzanfar, M. (2012) A Review on Comparison between Traditional Silicon Solar Cells and Thin-Film CdTe Solar Cells. Proceedings of National Graduate Conference (Nat-Grad 2012), Tenaga Nasional Universiti, Putrajaya Campus, 8-10 November 2012, 1-5.
14. Types of Solar Panels, Grein Energy. Published 22 April 2015.
15. Maehlum, M.A. (2015) Energy Informative The Homeowner's Guide To Solar Panels, Best Thin Film Solar Panels - Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS? Last updated 6 April 2015.
16. Yogi Goswami, D. and Kreith, F. (2007) Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. CRC Press, BocaRaton.
17. Luque, A. and Hegedus, S. (2003) Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2nd Edition, John Wiley&Sons, Ltd., Hoboken
18. Elsabawy, K.M., El-Hawary, W.F. and Refat, M.S. (2012) Advanced Synthesis of Titanium-Doped-Tellurium-Cadmium Mixtures for High

- Performance Solar Cell Applications as One of Renewable Source of Energy. *International Journal of Chemical Sciences*, 10, 1869-1879.
19. Badawy, W.A. (2015) A Review on Solar Cells from Si-Single Crystals to Porous Materials and Quantum Dots. *Journal of Advanced Research*, 6, 123-132.
 20. Sethi, V.K., Pandey, M. and Shukla, P. (2011) Use of Nanotechnology in Solar PV Cell. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2, 77-80.
 21. Andorka, F. (2014) CIGS Solar Cells Simplified. *Solar Power World*.
 22. Razykov, T.M., Ferekides, C.S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H.S. and Upadhyaya, H.M. (2011) Solar Photovoltaic Electricity: Current Status and Future Prospects. *Solar Energy*, 85, 1580-1608.
 23. Choubey, P.C., Oudhia, A. and Dewangan, R. (2012) A Review: Solar Cell Current Scenario and Future Trends. *Recent Research in Science and Technology*
 24. Hoppe, H. and Sariciftci, N.S. (2008) Polymer Solar Cells. *Advances in Polymer Science*, 214, 1.
 25. Dubey, S., Sarvaiya, J.N. and Seshadri, B. (2013) Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World: A Review. *Energy Procedia*, 33, 311-321.
 26. Ganesh, B.N.V.S. and Supriya, Y.V. (2013) Recent Advancements and Techniques in Manufacture of Solar Cells: Organic Solar Cells. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, 2, 565-573.
 27. Jassen, R. Introduction to Polymer Solar Cells. Eindhoven University of Technology, The Netherlands
 28. Leroy, F. (2003) A Century of Nobel Prize Recipients: Chemistry, Physics, and Medicine. CRC Press, Hoboken.
 29. Alex, C., Mayer, Shawn, R., Scully, Brian, E., Hardin, Michael, W., Rowell and Michael, D. McGehee (2007) Polymer-Based Solar Cells: A Review. *Materials Today*, 10, 28-33. [http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70276-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70276-6)
 30. Wudl, F. and Srdanov, G. (1993) Conducting Polymer Formed of Poly (2-Methoxy-5-(2'-Ethylhexyloxy)-P-PhenyleneVinylene). US Patent 5,189,136.
 31. Li, G., Zhu, R. and Yang, Y. (2012) Polymer Solar Cells. *Nature Photonics*, 6, 153-161.
 32. Bagher, A.M., Vahid, M.M.A. and Mohsen, M. (2015) Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3, 94-113.
 33. Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P. and Qiu, Y. (2006) Review of Recent Progress in Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 549-573.
 34. Graetzel, M., Janssen, R.A.J., Mitzi, D.B. and Sargent, E.H. (2012) Materials Interface Engineering for Solution-Processed Photovoltaics. *Nature*, 488, 304-312.
 35. Nozik, A.J. (2010) Nanoscience and Nanostructures for Photovoltaics and Solar Fuels. *NANO Letters*, 10, 2735-2741.

36. Philipps, S.P., Bett, A.W., Horowitz, K. and Kurtz, S. (2015) Current Status of Concentrator Photovoltaics (CPV)Technology. Report Version 1.2, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (NREL), September 2015.
37. Mohanta, P. R., Patel, J., Bhuva, J. and Gandhi, M. (2015) A Review on Solar Photovoltaics and Roof Top Application of It. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology, 2, 2394-2444.
38. Ahn, N., Son, D.-Y., Jang, I.-H., Kang, S.M., Choi, M. and Park, N.-G. (2015) Highly Reproducible Perovskite SolarCells with Average Efficiency of 18.3% and Best Efficiency of 19.7% Fabricated via Lewis Base Adduct of Lead(II)Iodide. Journal of the American Chemical Society, 137, 8696-8699.
39. Shi, D., Zeng, Y. and Shen, W. (2015) Pervoskite/c-Si Tandem Solar Cell with Inverted Nanopyramids: Realizing High Efficiency by Controllable Light Trapping. *Scientific Reports*, 5, Article No. 16504.
40. Hoyer, P. & Könenkamp, R., (1995). Photoconduction in porous TiO₂ sensitized by PbS quantum dots. *Appl. Phys. Lett.* Vol. 66, Issue 3, pp. 349-351.