جامعه بابل

كليه التربية للعلوم الصرفة

القسم الفيزياء

تطوير كفاءة الخلايا الشمسية

بحث مقدم الى

مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة/ جامعة بابل و هو جزء من متطلبات

نيل درجة البكالوريوس في الفيزياء

اعداد الطالبة

نور رياض حسين حسان

اشراف

م.م. هاله محمد عزيز

٢٠٢٦م

١٤٤٧هـ

﴿يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ﴾

((صدق الله العلي العظيم))

(سورة المجادلة: ١١)

الأهداء

إلى من علّمني أن العلم رسالة ومسؤولية...

إلى والديّ العزيزين، عرفانًا بفضلهما ودعمهما المستمر.

إلى أساتذتي الأفاضل الذين كان لتوجيههم الأثر الكبير في إنجاز هذا البحث.

وإلى كل من شجّعني وساندني في مسيرتي العلمية،

أهدي هذا الجهد المتواضع.

شكر وتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.

أتقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى المشرفة الفاضلة (م.م. هاله محمد عزيز) لما قدّمته من توجيه علمي وملاحظات قيّمة كان لها الأثر الكبير في إنجاز هذا البحث.

كما أتقدّم بالشكر والتقدير إلى جميع أساتذتي الأفاضل الذين لم يبخلوا بعلمهم ونصحهم.

ولا يفوتني أن أعبّر عن خالص شكري وامتناني إلى عائلتي الكريمة على دعمهم وتشجيعهم المستمر.

وأخيرًا، الشكر موصول إلى كل من قدّم لي المساعدة ولو بكلمة، فلكم جميعًا خالص الشكر والتقدير.

قائمة المحتويات

الموضوع	رقم الصفحة
الاهداء	II
الشكر	III
قائمة المحتويات	Iv
قائمة الصور	VI
الخلاصة	VII
الفصل الأول: مقدمة البحث	
المقدمة	١
١-١ مفهوم الطاقة الشمسية	١-٢
١-٢ لمحة عن تطور تكنولوجيا الخلايا الشمسية :مراحل التطور من السيليكون البلوري إلى الابتكارات الحديثة.	٣
١-٣ الهدف من البحث	٤
الفصل الثاني: مبدأ الخلايا الشمسية وأنواعها والكفاءة	
المقدمة	٥
٢-١ مبدأ الخلايا الشمسية	٦
٢-١-١ الظاهرة الكهروضوئية	٦
٢-١-٢ المواد شبه الموصلة ودورها في الخلايا الشمسية	٦
٢-١-٣ تركيب الخلية الشمسية الوصلة	٦
٢-١-٤ آلية توليد التيار الكهربائي	٧
٢-١-٥ حركة الالكترونات والثقوب داخل الخلية	٧
٢-١-٦ دور المجال الكهربائي الداخلي	٨
٢-١-٧ العوامل الفيزيائية المؤثرة في عمل الخلية الشمسية	٨
٢-١-٨ الخسائر أثناء عملية التحويل الكهروضوئي	٩
٢-٢ أنواع الخلايا الشمسية :	١٠
٢-٢-١ الخلايا المصنوعة من السيليكون البلوري	١٠-١٢
٢-٢-٢ الخلايا الشمسية الرقيقة	١٢-١٤
٢-٢-٣ الخلايا الشمسية متعددة الوصلات	١٤-١٥
٢-٢-٤ الخلايا الشمسية العضوية	١٥-١٦
٢-٢-٥ الخلايا الشمسية الحديثة والمتقدمة	١٦-١٩
٢-٣ مفهوم الكفاءة والعوامل المؤثرة فيها	١٩
٢-٣-١ تعريف الكفاءة	١٩

٢-٢-٢ المعايير المستخدمة للقياس	١٩-٢٠
٢-٣-٣ العوامل الفيزيائية والهندسية المؤثرة في الكفاءة .	٢٠-٢٢
٢-٣-٤ طرق تحسين الكفاءة وتقليل الخسائر	٢٢-٢٣
الفصل الثالث: طرق تطوير كفاءة الخلية الشمسية	
المقدمة	٢٤
٣-١ التقنيات المتقدمة لتحسين كفاءة الخلايا الشمسية	٢٤
٣-١-١ خلديا البيروفسكايت(Perovskite Solar Cells)	٢٤-٢٧
٣-١-٢ الخلايا الشمسية ثنائية الوجه(Bifacial Solar Cells)	٢٨-٣٠
٣-١-٣ الخلايا الشمسية متعددة الوصلات(Multi-Junction Solar Cells)	٣٠-٣٢
٣-٢ استراتيجيات تحسين امتصاص الضوء وتقليل الخسائر	٣٢
٣-٢-١ تحسين الامتصاص الضوء	٣٢-٣٣
٣-٢-٢ تقليل خسائر إعادة الاتحاد	٣٣-٣٤
٣-٢-٣ إدارة الحرارة (Thermal Management)	٣٤-٣٥
٣-٣ الابتكارات في المواد والتصنيع	٣٥
٣-٣-١ المواد النانوية (Nanomaterials)	٣٥
٣-٣-٢ الخلايا الشمسية الشفافة (Transparent Solar Cells)	٣٦
٣-٣-٣ الطباعة ثلاثية الأبعاد (٣D Printing) في تصنيع الخلايا الشمسية	٣٦
٣-٤ التحديات والآفاق المستقبلية في تطوير كفاءة الخلايا الشمسية	٣٧
الفصل الرابع: الاستنتاجات والتوصيات	
الاستنتاجات	٣٨
التوصيات	٣٨
المصادر والمراجع	٣٩-٤١

قائمة الصور

رقم الصورة	الموضوع	رقم الصفحة
(١)	آلية امتصاص الضوء في الخلايا الشمسية ثنائية الوجه من الجهتين الأمامية والخلفية.	٥
(٢)	الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري	١٠
(٣)	الخلايا أحادية البلورة	١٠
(٤)	الخلايا متعددة البلورة	١١
(٥)	الخلايا الشمسية الرقيقة	١٢
(٦)	خلايا السليكون غير المتبلور	١٢
(٧)	خلايا كادميوم تيلورايد	١٣
(٨)	خلايا النحاس والإنديوم والغاليوم	١٣
(٩)	تركيب وعمل الخلية الشمسية متعددة الوصلات	١٤
(١٠)	الخلايا الشمسية العضوية	١٥
(١١)	الخلايا الشمسية الحديثة والمتقدمة	١٦
(١٢)	الخلايا الشمسية المعتمدة على المواد النانوية	١٧
(١٣)	الخلايا الشمسية الهجينة	١٨
(١٤)	هيكل خلية البيروفسكايت الشمسية	٢٦
(١٥)	خلية بيروفسكايت على سيليكون ترادفية	٢٧
(١٦)	مقارنة بين الخلايا أحادية الوجه وثنائية الوجه	٢٩
(١٧)	تأثير الأسطح المختلفة على أداء الخلايا ثنائية الوجه	٢٩
(١٨)	هيكل خلية شمسية متعددة الوصلات	٣١

الخلاصة

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة في العالم الحديث، لما لها من دور كبير في تلبية الاحتياجات الكهربائية بطريقة نظيفة ومستدامة. تمثل الخلايا الشمسية التقنية الأساسية لاستغلال الطاقة الشمسية، حيث تقوم بتحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء باستخدام مواد شبه موصلة. ورغم التقدم الكبير في هذا المجال، إلا أن كفاءة الخلايا الشمسية لا تزال محدودة بالنسبة للطاقة المتاحة من أشعة الشمس، ما دفع الباحثين إلى السعي المستمر لتطوير تقنيات وأساليب تزيد من قدرتها على إنتاج الطاقة بكفاءة أعلى.

يركز هذا البحث على دراسة مفهوم الكفاءة في الخلايا الشمسية والعوامل التي تؤثر فيها، مثل نوع المواد المستخدمة في تصنيع الخلايا، التصميم الهندسي للخلية، وطريقة امتصاص الضوء. كما يناقش البحث التطورات التاريخية لتكنولوجيا الخلايا الشمسية، بدءاً من الخلايا التقليدية المصنوعة من السيليكون البلوري، مروراً بالخلايا متعددة الطبقات، وصولاً إلى الخلايا العضوية والمرنة، موضحاً مزايا وعيوب كل نوع ومدى إمكانية استخدامه في التطبيقات العملية.

يتناول البحث أيضاً المبادئ العلمية التي تعمل بها الخلايا الشمسية وأنواعها المختلفة، مع تحليل العوامل التي تحدد كفاءتها، مثل فقد الطاقة الحرارية، الانعكاسات الضوئية، وخصائص المواد شبه الموصلة. بالإضافة إلى ذلك، يعرض البحث أحدث الطرق العلمية والهندسية لتطوير كفاءة الخلايا الشمسية، بما في ذلك تحسين مواد الامتصاص، تصميم الخلايا متعددة الطبقات، واستخدام تقنيات معالجة الأسطح لتقليل الفاقد الضوئي.

توصل البحث إلى أن تطوير كفاءة الخلايا الشمسية يمثل خطوة أساسية نحو زيادة الاعتماد على الطاقة النظيفة وتقليل الانبعاثات الكربونية، وأن الجمع بين الابتكار في المواد والتصميم الهندسي يمكن أن يحقق قفزات نوعية في إنتاج الطاقة الكهربائية من أشعة الشمس. كما يؤكد البحث على أهمية مواصلة البحث والتطوير في هذا المجال لضمان تحقيق استدامة الطاقة وتوفير حلول فعالة لمواجهة الطلب المتزايد على الكهرباء في مختلف أنحاء العالم.

الفصل الأول

مقدمة البحث

الفصل الأول

مقدمة البحث

المقدمة

تعتبر الطاقة الشمسية واحدة من أهم مصادر الطاقة المتجددة في العالم الحديث، نظراً لوفرتها الواسعة وانخفاض تكاليفها على المدى الطويل، بالإضافة إلى كونها صديقة للبيئة ولا تنتج عنها أي انبعاثات كربونية ضارة [1]. مع تزايد الطلب على الطاقة الكهربائية، وأهمية البحث عن مصادر نظيفة ومستدامة للطاقة، أصبح تطوير تكنولوجيا الخلايا الشمسية وتحسين كفاءتها من أهم أهداف البحث العلمي والتقني في مجال الطاقة المتجددة.[2]

تلعب الخلايا الشمسية دوراً محورياً في تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية مباشرة باستخدام الظاهرة الكهروضوئية(Photovoltaic Effect) ، وتختلف كفاءتها بحسب نوع المواد المستخدمة، التصميم الهندسي للخلية، وظروف التشغيل [3]. ورغم التقدم الكبير في تصنيع الخلايا الشمسية التقليدية، إلا أن هناك حدوداً قصوى للكفاءة تتطلب تطوير مواد وتصاميم مبتكرة لتقليل الفقد وتحسين الأداء الكهروضوئي.

يهدف هذا البحث إلى دراسة سبل **تطوير كفاءة الخلايا الشمسية** من خلال فهم مبدأ عملها، أنواعها، والعوامل التي تؤثر في أدائها، بالإضافة إلى استعراض الطرق الحديثة لتحسين كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء [4]. كما يسعى البحث إلى تقديم مقترحات علمية قابلة للتطبيق يمكن أن تساهم في تحسين فعالية الخلايا الشمسية المستخدمة في التطبيقات المنزلية والصناعية.

يتضمن الفصل مقدمة عامة عن الطاقة الشمسية، تعريفها، أهميتها، ولمحة عن تطور تكنولوجيا الخلايا الشمسية عبر الزمن، مع التأكيد على الهدف الرئيسي للبحث في دراسة وتطوير الكفاءة التشغيلية لهذه الخلايا.[5]

1-1مفهوم الطاقة الشمسية

الطاقة الشمسية هي الطاقة المستمدة من إشعاع الشمس، وهي مصدر طاقة متجدد يمكن تحويله إلى طاقة كهربائية أو حرارية. تتميز الطاقة الشمسية بأنها نظيفة ومتجددة، ولا تنتج عنها أي ملوثات بيئية عند استخدامها، كما أنها متاحة على نطاق واسع في معظم مناطق العالم، مما يجعلها خياراً مثالياً لتلبية الاحتياجات المتزايدة للطاقة.[1]

تتمثل أهم استخدامات الطاقة الشمسية في نوعين رئيسيين:

١. **التحويل الكهروضوئي:(Photovoltaic Conversion)**
   - يتم من خلال الخلايا الشمسية التي تحول ضوء الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية.
   - تعتمد هذه العملية على ظاهرة التأثير الكهروضوئي، حيث يؤدي تعرض مواد شبه موصلة للضوء إلى تحرير الإلكترونات وتوليد تيار كهربائي.[2]
   - يُستخدم هذا النوع من الطاقة في المنازل، المصانع، والأجهزة المحمولة، إضافة إلى محطات توليد الكهرباء الكبيرة.
٢. **التحويل الحراري:(Solar Thermal Energy)**
   - يستخدم لتسخين المياه أو الهواء أو إنتاج البخار لتشغيل التوربينات.
   - تُعد هذه الطريقة فعالة لتوفير الطاقة الحرارية في التطبيقات الصناعية والمنزلية، كما يمكن دمجها مع أنظمة توليد الكهرباء.[3]

تتميز الطاقة الشمسية بعدة مزايا:

- **استدامة طويلة المدى** :طالما أن الشمس موجودة، فإن الطاقة الشمسية لن تنفد.
- **صديقة للبيئة** :لا تنتج عنها أي انبعاثات كربونية أو ملوثات ضارة.
- **متنوعة الاستخدامات** :يمكن استخدامها في الخلايا الشمسية، الطاقة الحرارية، أو حتى في توليد وقود الهيدروجين.
- **تقليل التكاليف على المدى الطويل** :بعد الاستثمار في أنظمة التوليد، تصبح الطاقة الشمسية مصدر طاقة منخفض التكلفة نسبياً.

كما تواجه الطاقة الشمسية بعض التحديات، أهمها:

- التغيرات المناخية وغياب الشمس في بعض الأوقات، ما يتطلب حلول تخزين الطاقة.
- الكفاءة المحدودة للخلايا الشمسية التقليدية مقارنة بالطاقة الضوئية المتاحة.
- تكلفة بعض المواد عالية الجودة المستخدمة في تصنيع الخلايا الشمسية المتقدمة.

ورغم هذه التحديات، فإن الأبحاث والتطورات المستمرة في مجال تكنولوجيا الخلايا الشمسية والعمل على تحسين الكفاءة تجعل الطاقة الشمسية من أبرز حلول الطاقة النظيفة في المستقبل.[4]

١-٢ لمحة عن تطور تكنولوجيا الخلايا الشمسية

بدأت فكرة تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء منذ أوائل القرن العشرين مع اكتشاف **الظاهرة الكهروضوئية** (Photovoltaic Effect)، حيث لوحظ أن الضوء يمكن أن يحرر الإلكترونات من بعض المواد لتوليد تيار كهربائي. ومع ذلك، لم يتم تطبيق هذه الفكرة عملياً إلا في خمسينيات القرن العشرين، حينما تم تصنيع أولى الخلايا الشمسية المصنوعة من **السيليكون البلوري**، والتي وصلت كفاءتها إلى حوالي ٦٪ فقط، لكنها شكّلت الأساس لتطوير صناعة الطاقة الشمسية.[1]

شهدت تكنولوجيا الخلايا الشمسية عدة مراحل مهمة من التطور:

١. **الخلايا الشمسية التقليدية من السيليكون البلوري:(Crystalline Silicon Solar Cells)**
   - تعد الأكثر استخداماً على مستوى العالم بسبب ثباتها وكفاءتها المتوسطة.
   - تتميز بالمتانة وطول العمر التشغيلي، لكن تكلفتها التصنيعية مرتفعة نسبياً.
   - كفاءتها العملية تتراوح عادة بين ١٥٪ و٢٠٪ بسبب فقد الطاقة الناتج عن الانعكاس والحرارة.[2]

٢. **الخلايا الشمسية متعددة الطبقات:(Multi-junction Solar Cells)**
   - صممت لزيادة امتصاص أطياف أوسع من الضوء الشمسي من خلال استخدام أكثر من مادة شبه موصلة، حيث تمتص كل طبقة نطاقاً محدداً من الطيف الضوئي.
   - وصلت كفاءتها التجريبية في المختبرات إلى أكثر من ٤٠٪، ما يجعلها مناسبة للتطبيقات الفضائية والصناعية عالية الكفاءة.[5]

٣. **الخلايا الشمسية الرقيقة والمرنة:(Thin-film and Flexible Solar Cells)**
   - تصنع من مواد شبه موصلة رقيقة مثل كبريتيد النحاس والمواد العضوية.
   - تتميز بانخفاض التكلفة وخفة الوزن، ما يسمح بدمجها في المباني أو الأجهزة المحمولة.
   - كفاءتها تتراوح حالياً بين ١٠٪ و١٥٪، لكنها قابلة للتحسين من خلال الابتكار المستمر [6].

٤. **الخلايا الشمسية العضوية والبوليمرية:(Organic and Polymer Solar Cells)**
   - تستخدم مركبات عضوية تحول الطاقة الضوئية إلى كهرباء.
   - تتميز بسهولة التصنيع ومرونة التصميم، مع إمكانية إنتاج خلايا شفافة أو مرنة.
   - لا تزال كفاءتها أقل من السيليكون، لكنها واعدة للتطبيقات الصغيرة والمحمولة.[7]

٥. **الابتكارات الحديثة:(Emerging Technologies)**

- تشمل استخدام المواد النانوية مثل **النقاط الكمومية (Quantum Dots)** والمواد ثنائية الأبعاد مثل **الجرافين**، لتحسين امتصاص الضوء وتقليل فقد الطاقة.
- تهدف هذه التطورات إلى تحقيق خلايا شمسية ذات كفاءة أعلى، عمر تشغيلي أطول، وتكلفة تصنيع منخفضة.[8]

توضح هذه المراحل أن تطور تكنولوجيا الخلايا الشمسية كان نتيجة جهود علمية وهندسية متكاملة، مع التركيز على تحسين المواد، التصميم الهندسي، وتقنيات معالجة الأسطح لزيادة امتصاص الضوء وتحويله بكفاءة أكبر إلى كهرباء. ويشير هذا التطور إلى أن مستقبل الطاقة الشمسية يعتمد على الجمع بين **الكفاءة العالية، التكلفة المنخفضة، والمرونة في الاستخدام**، وهو ما يمثل تحدياً وفرصة في الوقت ذاته للباحثين والمطورين في مجال الطاقة المتجددة.

١-٣ الهدف من البحث

يهدف هذا البحث إلى:

١. دراسة مبدأ عمل الخلايا الشمسية وأنواعها المختلفة.
٢. تحليل العوامل المؤثرة في كفاءة الخلايا الشمسية.
٣. عرض الطرق العلمية والهندسية لتطوير كفاءة الخلايا الشمسية وزيادة قدرتها على إنتاج الكهرباء.
٤. تقديم توصيات عملية قابلة للتطبيق لتحسين الأداء الكهروضوئي للخلايا الشمسية في الاستخدامات المنزلية والصناعية.

الفصل الثاني

مبدأ الخلايا الشمسية وأنواعها والكفاءة

الفصل الثاني

مبدأ الخلايا الشمسية وأنواعها والكفاءة

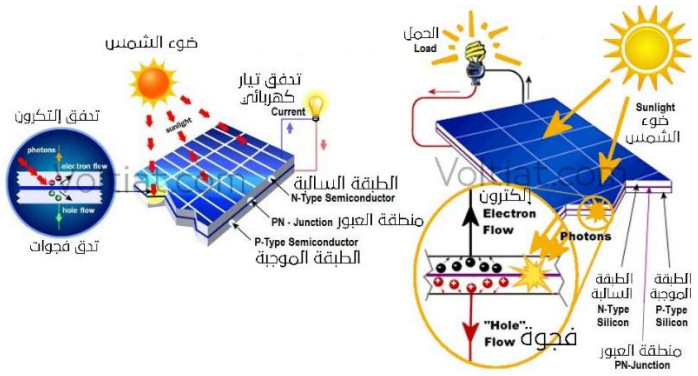
المقدمة

يُعد فهم مبدأ عمل الخلايا الشمسية وأنواعها المختلفة خطوة أساسية في دراسة سبل تطوير كفاءتها وتحسين أدائها في توليد الطاقة الكهربائية. فقبل الخوض في تقنيات رفع الكفاءة، لا بد من الإحاطة بالأسس العلمية التي تقوم عليها الخلايا الشمسية، وطبيعة المواد المستخدمة في تصنيعها، والآليات الفيزيائية التي يتم من خلالها تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية.

يركز هذا الفصل على توضيح المبدأ العلمي لعمل الخلايا الشمسية اعتماداً على الظاهرة الكهروضوئية، مع شرح مبسط لكيفية توليد التيار الكهربائي داخل المواد شبه الموصلة عند تعرضها لأشعة الشمس. كما يتناول الفصل تصنيف الخلايا الشمسية إلى أنواعها المختلفة، مثل الخلايا المصنوعة من السيليكون البلوري، الخلايا الرقيقة، والخلايا الحديثة المتقدمة، مع بيان الخصائص العامة لكل نوع ومجالات استخدامه.

كما يخصص هذا الفصل جزءاً مهماً لشرح مفهوم كفاءة الخلية الشمسية، باعتبارها المؤشر الأساسي لقياس مدى قدرة الخلية على تحويل الطاقة الشمسية الساقطة عليها إلى طاقة كهربائية مفيدة. ويتم التطرق إلى أهم العوامل المؤثرة في هذه الكفاءة، مثل نوع المادة شبه الموصلة، شدة الإشعاع الشمسي، درجة الحرارة، التصميم الهندسي للخلية، والخسائر الناتجة عن الانعكاس والحرارة.

ويهدف هذا الفصل إلى توفير قاعدة علمية متينة تمكّن من فهم المشكلات والتحديات المرتبطة بانخفاض كفاءة الخلايا الشمسية، مما يساعد في الفصل اللاحق على دراسة الطرق والتقنيات المستخدمة في تطوير كفاءة الخلايا الشمسية وتحسين أدائها بما ينسجم مع متطلبات الطاقة الحديثة والاستدامة البيئية.



صورة رقم (١): آلية امتصاص الضوء في الخلايا الشمسية ثنائية الوجه من الجهتين الأمامية والخلفية. [٤٠]

٢-١ مبدأ الخلايا الشمسية

٢-١-١ الظاهرة الكهروضوئية

تُعد الظاهرة الكهروضوئية الأساس العلمي الذي تقوم عليه الخلايا الشمسية في عملية تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية. وتتمثل هذه الظاهرة في تحرر الإلكترونات داخل المادة عند تعرضها للإشعاع الشمسي، حيث تمتص إلكترونات الذرة طاقة الفوتونات الساقطة، مما يؤدي إلى انتقالها من مستوى طاقة منخفض إلى مستوى أعلى، مكوّنة شحنات حرة قادرة على توليد تيار كهربائي [1].

تحدث هذه الظاهرة عندما تكون طاقة الفوتون الساقط مساوية أو أكبر من فجوة الطاقة الخاصة بالمادة شبه الموصلة، أما إذا كانت أقل من ذلك فلا يحدث أي انتقال للإلكترونات [2]. ويؤثر طول موجة الضوء وشدته بشكل مباشر في عدد الإلكترونات المتحررة، وبالتالي في مقدار التيار الكهربائي الناتج. ويعد فهم هذه الظاهرة أمراً ضرورياً لتطوير تصميم الخلايا الشمسية واختيار المواد المناسبة لزيادة كفاءتها.[1]

٢-١-٢ المواد شبه الموصلة ودورها في الخلايا الشمسية

تلعب المواد شبه الموصلة دوراً أساسياً في تصنيع الخلايا الشمسية، إذ تمتلك خصائص كهربائية متوسطة بين الموصلات والعوازل، ما يجعلها مناسبة لتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية. ويُعد السيليكون من أكثر المواد استخداماً في هذا المجال بسبب وفرته في الطبيعة وملاءمته من حيث فجوة الطاقة والخصائص الكهربائية [3].

تتميز المواد شبه الموصلة بوجود فجوة طاقة تسمح بانتقال الإلكترونات من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل عند امتصاص الضوء. ويتم تحسين الخصائص الكهربائية لهذه المواد من خلال عملية التطعيم، حيث تُضاف شوائب معينة لتكوين نوعين رئيسيين: شبه موصل من النوع N يحتوي على إلكترونات حرة، وشبه موصل من النوع P يحتوي على فجوات موجبة الشحنة [4].

يؤثر نوع المادة شبه الموصلة، نقاوتها، وسماكتها بشكل مباشر في كفاءة الخلية الشمسية، إذ تؤدي المواد عالية الجودة إلى تقليل الخسائر وزيادة امتصاص الإشعاع الشمسي.[3]

٢-١-٣ تركيب الخلية الشمسية الوصلة(P–N)

تعتمد الخلية الشمسية في تركيبها الأساسي على الوصلة الثنائية المعروفة بالوصلة(P–N) ، والتي تتكون من دمج طبقة من شبه الموصل من النوع P مع طبقة من النوع .N عند التقاء هاتين الطبقتين، تنتقل

الإلكترونات والفجوات بينهما، مما يؤدي إلى تكوين منطقة تُسمى منطقة الاستنزاف، ويتولد فيها مجال كهربائي داخلي.[5]

عند سقوط أشعة الشمس على الخلية، تتحرر الإلكترونات نتيجة الظاهرة الكهروضوئية، ويعمل المجال الكهربائي الداخلي على فصل الشحنات، حيث يدفع الإلكترونات نحو القطب السالب والفجوات نحو القطب الموجب، مما يؤدي إلى توليد فرق جهد كهربائي بين طرفي الخلية.[6]

يتضمن تركيب الخلية الشمسية أيضاً طبقة مضادة للانعكاس تقلل فقد الضوء، وأقطاباً معدنية لجمع التيار الكهربائي ونقله إلى الدائرة الخارجية. ويسهم التصميم الجيد للوصلة P–N في تحسين كفاءة الخلية وزيادة قدرتها على إنتاج الطاقة الكهربائية.[5]

٢-١-٤ آلية توليد التيار الكهربائي

تتم آلية توليد التيار الكهربائي في الخلية الشمسية نتيجة التفاعل المباشر بين الإشعاع الشمسي والمادة شبه الموصلة. فعند سقوط أشعة الشمس على سطح الخلية، تقوم المادة شبه الموصلة بامتصاص فوتونات الضوء، وعندما تكون طاقة هذه الفوتونات أكبر من فجوة الطاقة للمادة، تتحرر الإلكترونات من نطاق التكافؤ وتنتقل إلى نطاق التوصيل، مما يؤدي إلى تكوين أزواج من الإلكترونات والثقوب داخل الخلية الشمسية.[1]

بعد تكوين الشحنات الحرة، تبدأ عملية الفصل والتوجيه لهذه الشحنات تحت تأثير المجال الكهربائي الداخلي المتولد في منطقة الوصلة .(P–N) وعند توصيل الخلية الشمسية بدائرة كهربائية خارجية، تتحرك الإلكترونات عبر الدائرة من القطب السالب إلى القطب الموجب، مولدة تياراً كهربائياً مستمراً يمكن الاستفادة منه في تشغيل الأحمال الكهربائية المختلفة.[6]

تعتمد كمية التيار المتولد على عدة عوامل، من أهمها شدة الإشعاع الشمسي، نوع المادة شبه الموصلة، ومساحة سطح الخلية. وكلما زادت كمية الضوء الممتص داخل الخلية، زاد عدد الإلكترونات المتحررة، وبالتالي ارتفعت قيمة التيار الكهربائي الناتج.[7]

٢-١-٥ حركة الإلكترونات والثقوب داخل الخلية

تلعب حركة الإلكترونات والثقوب داخل الخلية الشمسية دوراً أساسياً في تحديد كفاءتها وقدرتها على توليد الطاقة الكهربائية. فبعد تحرر الإلكترونات نتيجة الظاهرة الكهروضوئية، تتحرك الإلكترونات باتجاه المنطقة

من النوعN ، بينما تتحرك الثقوب باتجاه المنطقة من النوعP ، وذلك نتيجة تأثير المجال الكهربائي الداخلي الموجود في منطقة الاستنزاف.[2]

تحدث هذه الحركة بطريقة منظمة، حيث تعمل الوصلة (P–N) على منع إعادة اتحاد الإلكترونات مع الثقوب بسرعة، مما يقلل من فقد الطاقة ويزيد من فرصة انتقال الشحنات إلى الدائرة الخارجية. وفي حال حدوث إعادة اتحاد بين الإلكترونات والثقوب قبل وصولها إلى الأقطاب، فإن ذلك يؤدي إلى انخفاض التيار الكهربائي المتولد، وبالتالي تقليل كفاءة الخلية الشمسية.[5]

إن تحسين حركة الشحنات داخل الخلية يتطلب استخدام مواد ذات نقاوة عالية، وتقليل العيوب البلورية، وتحسين تصميم الخلية، مما يساعد على تقليل الخسائر وزيادة كفاءة التحويل الكهروضوئي.[3]

٢-١-٦ دور المجال الكهربائي الداخلي

يُعد المجال الكهربائي الداخلي عنصراً أساسياً في عمل الخلية الشمسية، إذ يتولد هذا المجال في منطقة الاستنزاف عند التقاء طبقتي شبه الموصل من النوع P والنوع .N ويعمل هذا المجال على فصل الشحنات الكهربائية المتولدة نتيجة امتصاص الضوء، حيث يدفع الإلكترونات نحو القطب السالب، والثقوب نحو القطب الموجب.[4]

يساعد المجال الكهربائي الداخلي على توجيه حركة الشحنات ومنع إعادة اتحادها داخل الخلية، مما يسهم بشكل مباشر في زيادة فرق الجهد الكهربائي بين طرفي الخلية. وكلما كان المجال الكهربائي الداخلي أقوى وأكثر انتظاماً، زادت فعالية فصل الشحنات وتحسنت كفاءة الخلية الشمسية.[6]

كما أن تحسين تصميم الوصلة (P–N) وسماكة منطقة الاستنزاف يساهم في تعزيز دور المجال الكهربائي الداخلي، وتقليل الفاقد الكهربائي، وزيادة القدرة الكهربائية الناتجة من الخلية الشمسية، وهو ما يمثل أحد أهم محاور تطوير كفاءة الخلايا الشمسية الحديثة.[7]

٢-١-٧ العوامل الفيزيائية المؤثرة في عمل الخلية الشمسية

يتأثر أداء الخلية الشمسية وعدد الإلكترونات المتولدة فيها بعدة عوامل فيزيائية تتحكم بشكل مباشر في كفاءتها وقدرتها على إنتاج الطاقة الكهربائية. وتعد **شدة الإشعاع الشمسي** من أهم هذه العوامل، إذ يزداد عدد الفوتونات الساقطة على سطح الخلية بزيادة شدة الإشعاع، مما يؤدي إلى زيادة عدد أزواج الإلكترونات والثقوب المتولدة، وبالتالي ارتفاع التيار الكهربائي الناتج.[7]

كما تؤثر **درجة الحرارة** بشكل ملحوظ على عمل الخلية الشمسية، حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى انخفاض فرق الجهد الناتج من الخلية بسبب زيادة حركة الإلكترونات داخل المادة شبه الموصلة، مما يقلل من كفاءة التحويل الكهروضوئي [4]. لذلك تُعد أنظمة التبريد وتحسين التهوية من العوامل المهمة في الحفاظ على كفاءة الخلايا الشمسية.

يلعب **نوع المادة شبه الموصلة** وفجوة الطاقة الخاصة بها دوراً أساسياً في تحديد مقدار الضوء الممتص. فالمواد ذات فجوة الطاقة المناسبة تكون أكثر قدرة على امتصاص أطوال موجية متعددة من الإشعاع الشمسي [1]. إضافة إلى ذلك، تؤثر **نقاوة المادة والعيوب البلورية** على حركة الشحنات داخل الخلية، حيث تؤدي العيوب إلى زيادة إعادة الاتحاد بين الإلكترونات والثقوب، مما يقلل من التيار المتولد.[3]

كما يؤثر **سمك الخلية الشمسية** في كفاءتها، إذ إن السماكة غير المناسبة قد تؤدي إما إلى عدم امتصاص كامل للإشعاع أو إلى زيادة فقد الطاقة بسبب إعادة الاتحاد الداخلي. ولهذا فإن التصميم الهندسي الدقيق للخلية يعد عاملاً مهماً في تحسين أدائها.[5]

٢-١-٨ الخسائر أثناء عملية التحويل الكهروضوئي

تتعرض الخلايا الشمسية أثناء عملية التحويل الكهروضوئي إلى عدة أنواع من الخسائر التي تؤدي إلى انخفاض كفاءتها مقارنة بالقيمة النظرية. من أبرز هذه **الخسائر الضوئية**، والتي تنتج عن انعكاس جزء من الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الخلية وعدم امتصاصه بالكامل. وتُستخدم الطبقات المضادة للانعكاس للتقليل من هذا النوع من الخسائر.[6]

كما توجد **الخسائر الحرارية**، حيث تتحول طاقة بعض الفوتونات إلى حرارة بدلاً من توليد شحنات كهربائية، خاصة عندما تكون طاقة الفوتونات أعلى من فجوة الطاقة للمادة شبه الموصلة. وتؤدي هذه الخسائر إلى ارتفاع درجة حرارة الخلية وانخفاض جهدها الكهربائي.[4]

من أنواع الخسائر المهمة أيضاً **خسائر إعادة الاتحاد**، والتي تحدث عندما تعود الإلكترونات المتحررة للاتحاد مع الثقوب قبل وصولها إلى الدائرة الخارجية، مما يؤدي إلى فقد جزء من الطاقة الكهربائية المتولدة [2]. وتزداد هذه الخسائر بوجود العيوب البلورية أو عدم تجانس المادة شبه الموصلة.

إضافة إلى ذلك، توجد **الخسائر الكهربائية** الناتجة عن مقاومة المواد المكونة للخلية والأسلاك المعدنية، والتي تؤدي إلى فقد جزء من التيار أثناء انتقاله إلى الحمل الكهربائي. ويُعد تقليل هذه الخسائر هدفاً أساسياً في تصميم الخلايا الشمسية الحديثة، لما له من أثر مباشر في تحسين الكفاءة الكلية للنظام الشمسي.[7]

٢-٢ أنواع الخلايا الشمسية

تتنوع الخلايا الشمسية المستخدمة في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية تبعاً لاختلاف المواد الداخلة في تصنيعها، وطريقة عملها، ومستوى كفاءتها، وتكلفتها الاقتصادية. وقد أدى التطور المستمر في مجال الطاقة المتجددة إلى ظهور أنواع متعددة من الخلايا الشمسية، صُمم كل منها ليلائم تطبيقات معينة ويحقق توازناً بين الكفاءة العالية والتكلفة المناسبة وسهولة الاستخدام.

يعتمد تصنيف الخلايا الشمسية بشكل رئيسي على نوع المادة شبه الموصلة المستخدمة في تصنيعها، حيث تختلف الخصائص الفيزيائية والكهربائية لهذه المواد، مما يؤثر بشكل مباشر في كفاءة الخلية وأدائها العملي. فبعض الخلايا تتميز بكفاءة تحويل مرتفعة وعمر تشغيلي طويل، بينما تمتاز أنواع أخرى بانخفاض تكلفتها أو مرونتها وسهولة دمجها في التطبيقات المعمارية والصناعية.

يهدف هذا المبحث إلى استعراض أهم أنواع الخلايا الشمسية المستخدمة حالياً، مع بيان الخصائص العامة لكل نوع، ومزاياه وعيوبه، ومجالات استخدامه. كما يسهم هذا التصنيف في توضيح أسباب اختلاف الكفاءة بين الأنواع المختلفة، الأمر الذي يساعد على اختيار النوع الأنسب للتطبيقات العملية، ويمهّد لفهم أفضل للطرق المستخدمة في تطوير كفاءة الخلايا الشمسية في الفصول اللاحقة.

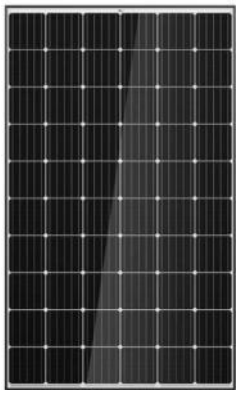
٢-٢-١ الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري

تُعد الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري الأكثر استخداماً على مستوى العالم، وذلك لما توفره من كفاءة جيدة، واستقرار طويل الأمد، وموثوقية عالية. يعتمد هذا النوع من الخلايا على السيليكون النقي كمادة شبه موصلة لتحويل الضوء إلى كهرباء من خلال الظاهرة الكهروضوئية. تختلف هذه الخلايا بحسب البنية البلورية للسيليكون إلى نوعين رئيسيين: الخلايا أحادية البلورة والخلايا متعددة البلورات.[8]

صورة رقم (٢) : لخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري[8]

٢-٢-١-١ الخلايا أحادية البلورة (Monocrystalline)

الخلايا أحادية البلورة تُصنع من بلورة واحدة متجانسة من السيليكون، مما يمنحها كفاءة عالية في امتصاص الضوء وتحويله إلى طاقة كهربائية. تتميز هذه الخلايا بشكلها الأسود الموحد، ووجود حدود أقل بين الحبيبات، مما يقلل من فقد الإلكترونات أثناء انتقالها داخل المادة.



صورة رقم (٣) : الخلايا أحادية البلورة [8]

مزايا الخلايا أحادية البلورة:

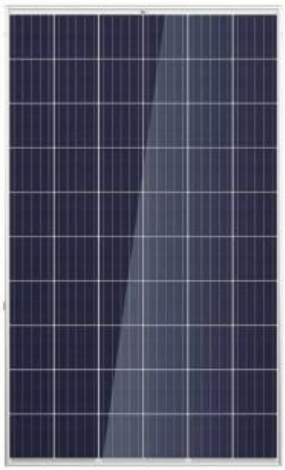
١. كفاءة تحويل عالية :عادة تتراوح بين ١٨٪ و٢٢٪، وتعتبر الأعلى مقارنة بالأنواع الأخرى.[8]
٢. عمر تشغيلي طويل :يمكن أن يعمل النظام لمدة ٢٥ سنة أو أكثر مع انخفاض تدريجي بسيط في الكفاءة.
٣. مساحة أصغر لمستوى إنتاجية معين :نظراً لكفاءتها العالية، تحتاج إلى مساحة أقل لتوليد نفس كمية الطاقة مقارنة بالأنواع الأخرى.

عيوبها:

١. تكلفة تصنيع مرتفعة :بسبب صعوبة إنتاج السيليكون أحادي البلورة عالي النقاء.
٢. هشاشة نسبية :تتطلب حماية جيدة عند التركيب لضمان عدم كسرها.

تُستخدم عادة هذه الخلايا في التطبيقات التي تتطلب مساحة محدودة وكفاءة عالية، مثل الأقمار الصناعية، الأنظمة المنزلية، والمشاريع الصناعية الصغيرة.[9]

٢-٢-١-١ الخلايا متعددة البلورات (Polycrystalline)



صورة رقم (٤) : الخلايا متعددة البلورة [8]

الخلايا متعددة البلورات تُصنع من عدة بلورات صغيرة من السيليكون ملتحمة معاً، ويظهر ذلك في شكلها الأزرق أو الرمادي ووجود حدود حبيبية واضحة. على الرغم من أن كفاءتها أقل من أحادية البلورة، إلا أن تكلفة تصنيعها منخفضة نسبياً، مما يجعلها أكثر شيوعاً في الأنظمة الشمسية واسعة النطاق.

مزايا الخلايا متعددة البلورات:

١. تكلفة أقل :عملية تصنيعها أبسط وتحتاج إلى سيليكون أقل نقاء من أحادية البلورة.
٢. سهولة الإنتاج على نطاق واسع :تناسب المشاريع التجارية الكبيرة والمزارع الشمسية.
٣. متانة جيدة :يمكنها العمل لفترة طويلة مع صيانة بسيطة.

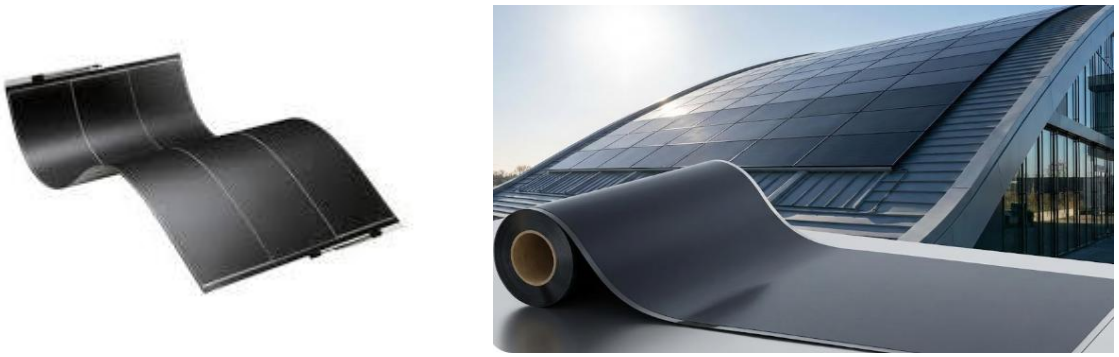
عيوبها:

١. كفاءة تحويل أقل :عادة تتراوح بين ١٣٪ و١٦.[8] %
٢. استهلاك مساحة أكبر :لتوليد نفس كمية الطاقة مقارنة بالخلايا أحادية البلورة.

تُستخدم هذه الخلايا بشكل واسع في المشاريع الكبيرة مثل محطات الطاقة الشمسية الأرضية والمرافق الصناعية، حيث تُعتبر التكاليف المنخفضة أهم عامل اقتصادي.[9]

٢-٢-٢ الخلايا الشمسية الرقيقة (Thin-Film Solar Cells)

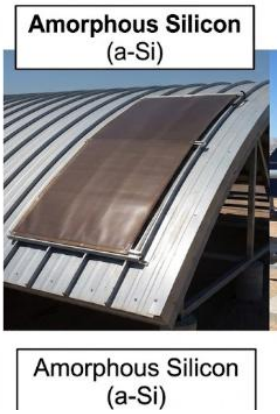
تختلف الخلايا الشمسية الرقيقة عن الخلايا المصنوعة من السيليكون البلوري في أن المادة شبه الموصلة تُوضع على شكل طبقة رقيقة جداً على ركائز مختلفة مثل الزجاج أو البلاستيك أو المعدن. وتتميز هذه الخلايا بخفة الوزن، المرونة النسبية، وانخفاض تكلفة المواد المستخدمة مقارنة بالخلايا البلورية، لكنها عادةً أقل كفاءة في تحويل الطاقة مقارنة بالخلايا البلورية.[10]



صورة رقم (٥) : الخلايا الشمسية الرقيقة [10]

تنقسم الخلايا الشمسية الرقيقة إلى عدة أنواع رئيسية حسب المادة شبه الموصلة المستخدمة:

٢-٢-٢-١ خلايا السليكون غير المتبلور (Amorphous Silicon – a-Si)



صورة رقم (٦) : خلايا السليكون غير المتبلور [١١]

تُصنع خلايا السليكون غير المتبلور من طبقة رقيقة من السيليكون عديم البلورة، وهو ما يجعل عملية التصنيع أقل تكلفة من السيليكون البلوري. وتتميز هذه الخلايا بقدرتها على امتصاص الضوء بشكل أفضل في بعض أطوال الموجة مقارنة بالسيليكون البلوري، ولكنها تعاني من انخفاض الكفاءة على المدى الطويل بسبب تأثير Staebler-Wronski الذي يقلل من قدرة الخلية بعد فترة من الاستخدام.[11]

مزاياها:

١. تكلفة إنتاج منخفضة نسبياً.
٢. خفيفة الوزن وقابلة للدمج في الأسطح المنحنية أو المرنة.

عيوبها:

١. كفاءة تحويل منخفضة نسبياً، تتراوح عادة بين ٦٪ و١٠.%
٢. فقدان تدريجي للكفاءة مع مرور الوقت.

تُستخدم هذه الخلايا غالباً في التطبيقات الصغيرة مثل أجهزة الحساب المحمولة، المصابيح الشمسية، والأسطح المعمارية المرنة.[11]

٢-٢-٢-٢ خلايا كادميوم تيلورايد (CdTe)

صورة رقم (٧) : خلايا كادميوم تيلورايد [١٢]

خلايا CdTe هي نوع رائج من الخلايا الشمسية الرقيقة تعتمد على مركب كادميوم تيلورايد كمادة شبه موصلة. تتميز هذه الخلايا بكفاءة أعلى مقارنة بالسليكون غير المتبلور، إذ يمكن أن تصل إلى حوالي ١٥٪-١٨٪، مع تكلفة إنتاج منخفضة نسبياً.[12]

مزاياها:

١. كفاءة متوسطة جيدة مع تكلفة تصنيع منخفضة.
٢. قابلة للإنتاج على نطاق واسع للمشاريع التجارية الكبيرة.

عيوبها:

١. استخدام مادة الكادميوم السامة يستلزم إجراءات بيئية صارمة أثناء التصنيع والتخلص النهائي.
٢. عمر تشغيلي أقل مقارنة بالخلايا البلورية في بعض الظروف البيئية.

تُستخدم هذه الخلايا في مشاريع الطاقة الشمسية التجارية والمرافق الصناعية، حيث توازن بين التكلفة والكفاءة.[12]

٢-٢-٢-٣ خلايا النحاس والإنديوم والغاليوم (CIGS)

صورة رقم (٨) : خلايا النحاس والإنديوم والغاليوم [١٣]

خلايا CIGS تعتمد على مركب النحاس والإنديوم والغاليوم والسيلينيوم، وتعتبر من أكثر أنواع الخلايا الرقيقة كفاءة، إذ يمكن أن تصل كفاءتها في المختبر إلى أكثر من ٢٠٪، مما يجعلها منافساً قوياً لبعض أنواع السيليكون البلوري.[13]

مزاياها:

١. كفاءة عالية مقارنة بالخلايا الرقيقة الأخرى.
٢. مرونة نسبية، مما يسمح بدمجها في التطبيقات المعمارية مثل الأسطح المنحنية أو النوافذ الشمسية.
٣. استهلاك أقل للمواد مقارنة بالخلايا البلورية.

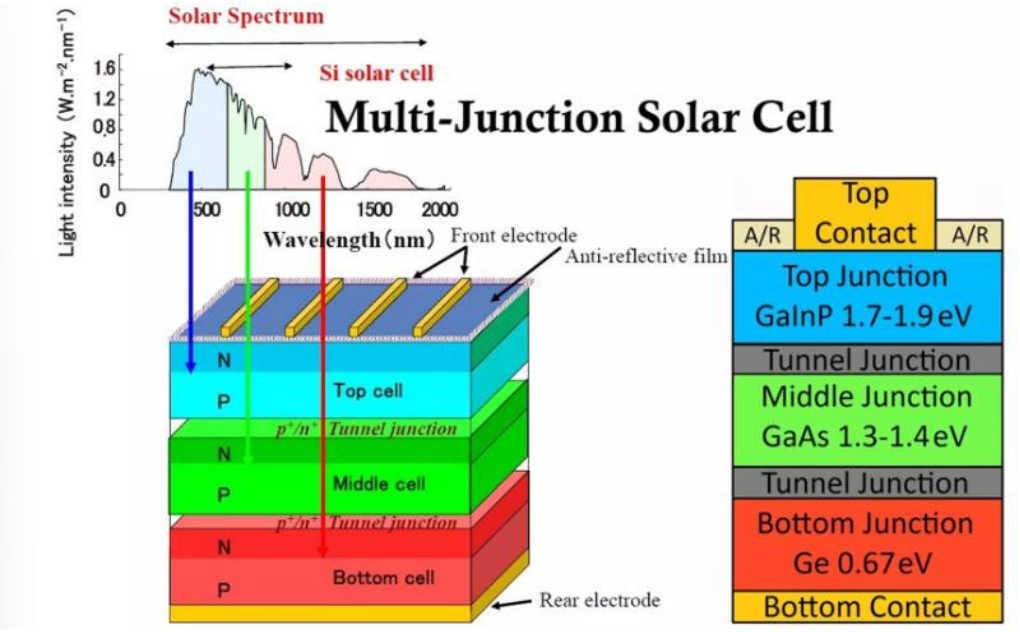
عيوبها:

١. تكلفة تصنيع أعلى من باقي الخلايا الرقيقة.
٢. تحتاج إلى تقنيات تصنيع دقيقة ومعقدة لضمان جودة الطبقة الرقيقة.

تُستخدم خلايا CIGS في التطبيقات المعمارية والمشاريع الشمسية التجارية، حيث تجمع بين كفاءة جيدة ومرونة التصميم.[13]

٢-٢-٣ الخلايا الشمسية متعددة الوصلات(Multi-Junction Solar Cells)

الخلايا الشمسية متعددة الوصلات تمثل التطور الحديث في تكنولوجيا الخلايا الشمسية، حيث تتكون من عدة طبقات من المواد شبه الموصلة مختلفة فجوة الطاقة، بحيث تمتص كل طبقة نطاقًا محددًا من الطيف الشمسي. هذا التصميم يسمح بتحقيق كفاءة أعلى من الخلايا أحادية الطبقة التقليدية، حيث يمكن لكل طبقة الاستفادة من جزء مختلف من الضوء وتحويله إلى كهرباء.[14]



صورة رقم (٩) : تركيب وعمل الخلية الشمسية متعددة الوصلات [31]

مزايا الخلايا متعددة الوصلات:

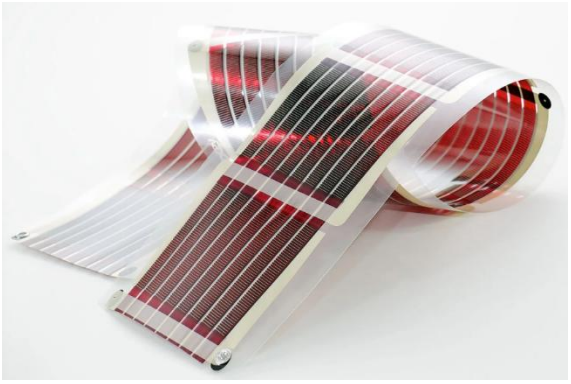
١. كفاءة تحويل عالية جدًا :يمكن أن تصل الكفاءة النظرية إلى أكثر من ٤٠٪ في المختبرات، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات الفضائية والأجهزة التي تحتاج إلى طاقة عالية.[14]
٢. استخدام فعال للطيف الشمسي :كل طبقة تمتص أطوال موجية محددة، مما يقلل فقد الطاقة الناتج عن الفوتونات عالية أو منخفضة الطاقة.
٣. قابلية التخصيص :يمكن تصميم الوصلات لتناسب متطلبات معينة، مثل التركيز العالي للضوء أو البيئات الفضائية.

عيوبها:

١. تكلفة تصنيع عالية جدًا بسبب تعقيد الطبقات واستخدام مواد متقدمة.
٢. صعوبة الإنتاج على نطاق واسع مقارنة بالخلايا البلورية أو الرقيقة.
٣. الحاجة إلى تقنيات تصنيع دقيقة للتماسك بين الطبقات المختلفة بدون فقد الطاقة.

تُستخدم هذه الخلايا بشكل رئيسي في الأقمار الصناعية، المركبات الفضائية، وأنظمة الطاقة المركزة حيث تكون الكفاءة القصوى أكثر أهمية من التكلفة.[15]

٢-٢-٤ الخلايا الشمسية العضوية (Organic Solar Cells)



صورة رقم (١٠) : ٤ الخلايا الشمسية العضوية [١٦]

الخلايا الشمسية العضوية تعتمد على مواد عضوية شبه موصلة لتحويل الضوء إلى كهرباء، مثل البوليمرات والجزيئات الصغيرة. وتتميز هذه الخلايا بمرونتها وخفتها، وإمكانية تصنيعها على أسطح مرنة وشفافة، مما يسمح باستخدامها في التطبيقات المعمارية والإلكترونيات القابلة للارتداء.[16]

مزايا الخلايا الشمسية العضوية:

١. تصنيع منخفض التكلفة :يمكن إنتاجها باستخدام تقنيات الطباعة على أسطح كبيرة.
٢. مرونة عالية وخفة الوزن :مناسبة للأسطح المنحنية والمواد المرنة.
٣. إمكانية التصميم الشفاف :يمكن دمجها في نوافذ الأبنية أو واجهات المباني.

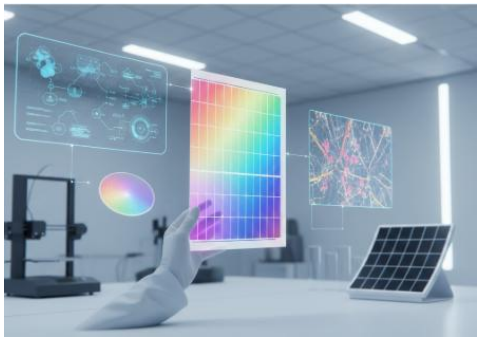
عيوبها:

١. كفاءة منخفضة نسبيًا :عادة تتراوح بين ٨٪ و١٢٪، أقل من السيليكون البلوري أو الخلايا متعددة الوصلات.[16]
٢. عمر تشغيلي قصير :المواد العضوية تتدهور أسرع عند التعرض المستمر لأشعة الشمس والحرارة.
٣. حساسية للبيئة :تتأثر بالرطوبة والحرارة بشكل أكبر من المواد غير العضوية.

تُستخدم الخلايا العضوية بشكل رئيسي في التطبيقات الصغيرة أو المرنة، مثل أجهزة الشحن المحمولة، النوافذ الشمسية، والأجهزة الإلكترونية القابلة للارتداء.[16]

٢-٢-٥ الخلايا الشمسية الحديثة والمتقدمة

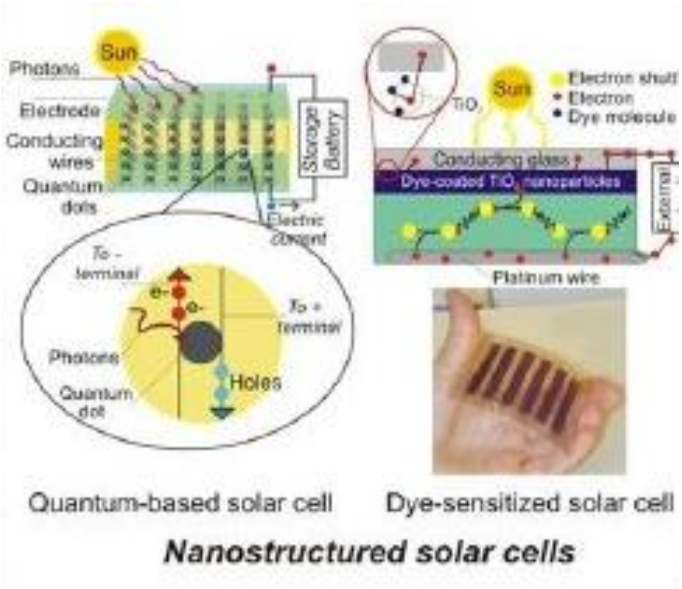
شهدت تكنولوجيا الطاقة الشمسية تطورًا كبيرًا في السنوات الأخيرة مع ظهور الخلايا الشمسية الحديثة والمتقدمة، والتي تعتمد على مواد وتقنيات مبتكرة لتعزيز كفاءة التحويل وخفض التكاليف، بالإضافة إلى إمكانية تطبيقها في تصميمات مرنة ومتنوعة. وتشمل هذه الفئة الخلايا المعتمدة على المواد النانوية والخلايا الهجينة، التي تمثل تطورًا علميًا مهمًا مقارنة بالخلايا التقليدية.[17]



صورة رقم (١١) : الخلايا الشمسية الحديثة والمتقدمة [٣٩]

٢-٢-٥-١ الخلايا الشمسية المعتمدة على المواد النانوية(Nanomaterials-Based Solar Cells)

تعتمد هذه الخلايا على المواد النانوية مثل نقاط الكم (Quantum Dots) وأنابيب الكربون النانوية والمواد النانوية الأخرى لتوسيع نطاق امتصاص الضوء وتحسين حركة الشحنات داخل الخلية. وتتميز هذه التقنية بإمكانية تعديل فجوة الطاقة للمادة حسب حجم الجسيمات النانوية، مما يسمح بتحسين كفاءة امتصاص الطيف الشمسي.[18]



صورة رقم (١٢) : الخلايا الشمسية المعتمدة على المواد النانوية [٣٩]

مزاياها:

١. كفاءة أعلى في امتصاص الضوء :يمكن تعديل خصائص المواد النانوية للاستفادة من أطوال موجية مختلفة.
٢. خسائر أقل للشحنات :حركة الإلكترونات والثقوب تتحسن بفضل المسارات الموجهة في المواد النانوية.
٣. مرونة في التصميم :يمكن دمجها في أسطح مرنة أو رقيقة لتطبيقات معمارية متقدمة.

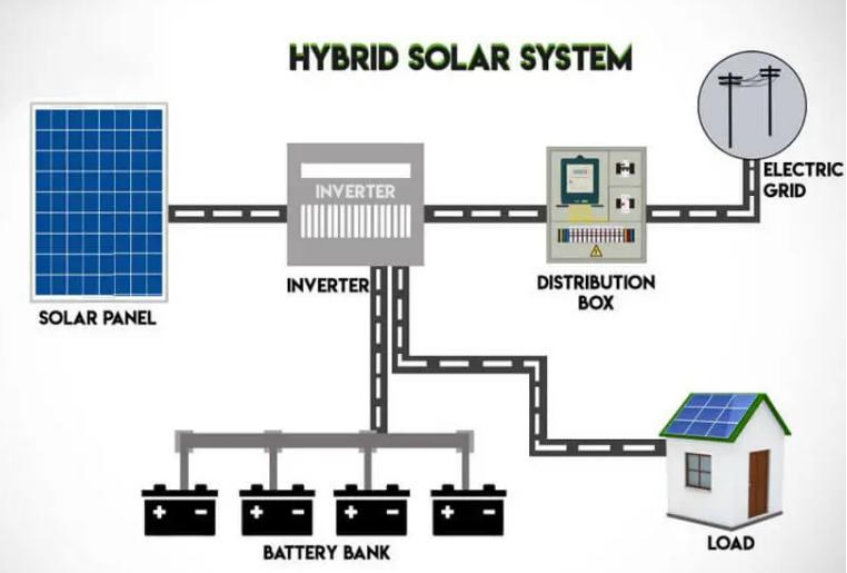
عيوبها:

١. تكلفة تصنيع مرتفعة :الحاجة إلى مواد متقدمة وتقنيات نانوية دقيقة.
٢. تعقيد الإنتاج على نطاق صناعي واسع :لا تزال بعض تقنيات المواد النانوية في مراحل البحث والتطوير.

تستخدم الخلايا النانوية في التطبيقات التي تتطلب كفاءة عالية مع مساحة محدودة، مثل الأقمار الصناعية والأجهزة الإلكترونية الحديثة.[18]

٢-٢-٥-٢ الخلايا الشمسية الهجينة(Hybrid Solar Cells)

الخلايا الشمسية الهجينة تمزج بين المواد العضوية وغير العضوية في تصميمها، مثل دمج المواد النانوية مع البوليمرات أو السيليكون الرقيق، بهدف الجمع بين مزايا كل نوع وتحقيق كفاءة أعلى مع تكلفة إنتاج منخفضة نسبياً.[19]



صورة رقم (١٣) : الخلايا الشمسية الهجينة [٦]

مزاياها:

١. كفاءة محسّنة :الاستفادة من المواد غير العضوية لزيادة التحويل مع مرونة المواد العضوية.
٢. تصميم مرن وخفيف الوزن :يمكن إنتاجها على أسطح رقيقة ومرنة.
٣. خفض التكاليف مقارنة بالخلايا عالية التقنية الأخرى :الجمع بين المواد يقلل الحاجة إلى مواد نقية مكلفة.

عيوبها:

١. تحديات الاستقرار :المواد العضوية داخل الهجين قد تتدهور مع الزمن والحرارة.
٢. تعقيد التصنيع :يتطلب دمج المواد المختلفة تقنيات دقيقة لضمان جودة الخلية وأدائها على المدى الطويل.

تُستخدم الخلايا الهجينة في التطبيقات المرنة والمتطورة، مثل الأجهزة الإلكترونية القابلة للارتداء، الأسطح الشمسية المعمارية، والأجهزة المحمولة، حيث تمثل توازنًا بين الكفاءة والتكلفة والمرونة.[19]

٢-٣ مفهوم الكفاءة والعوامل المؤثرة فيها

٢-٣-١ تعريف الكفاءة في الخلايا الشمسية

الكفاءة في الخلايا الشمسية هي نسبة الطاقة الكهربائية الناتجة من الخلية إلى الطاقة الضوئية الساقطة عليها، وتعبر عن مدى قدرة الخلية على تحويل الضوء إلى كهرباء فعليًا. وتعد الكفاءة مؤشرًا رئيسيًا لتقييم أداء الخلايا الشمسية، إذ كلما زادت الكفاءة، قلّت المساحة المطلوبة لتوليد كمية محددة من الطاقة، مما يجعل النظام أكثر فعالية.[20]

يمكن التعبير عن الكفاءة (η) رياضيًا كما يلي:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \dots \dots (1)$$

حيث:

- P_{out} الطاقة الكهربائية الناتجة (واط)
- P_{in} الطاقة الضوئية الساقطة على سطح الخلية (واط)

تلعب الكفاءة دورًا محوريًا في مقارنة أنواع الخلايا المختلفة، سواء كانت أحادية البلورة، متعددة البلورات، رقيقة، أو حديثة ومتقدمة مثل المواد النانوية والهجينة. كما أنها تساعد في تقييم الجدوى الاقتصادية لأي مشروع للطاقة الشمسية.[21]

٢-٣-٢ المعايير المستخدمة لقياس الكفاءة

لقياس كفاءة الخلايا الشمسية، يعتمد العلماء على مجموعة من المعايير الأساسية التي تحدد الأداء الكهربائي للخلية:

١. التيار القصوى:(Isc – Short–Circuit Current) يمثل التيار الكهربائي الناتج عندما تكون أقطاب الخلية موصولة مباشرة بدون حمل، ويعكس كمية الشحنات المتولدة نتيجة امتصاص الضوء.[22]
٢. الجهد القصوى :(Voc – Open–Circuit Voltage) هو فرق الجهد بين طرفي الخلية عندما لا يكون هناك تيار متدفق، ويعبر عن قدرة الخلية على توليد فرق جهد تحت تأثير المجال الكهربائي الداخلي.[22]

٣. القدرة القصوى:(Pmax – Maximum Power) تمثل أكبر قدرة كهربائية يمكن للخلية إنتاجها عند نقطة التشغيل المثلى، وهي معيار مباشر للكفاءة العملية للخلية.[23]
٤. معامل الملء:(Fill Factor – FF) هو النسبة بين القدرة القصوى الفعلية للخلية والقدرة النظرية الناتجة من حاصل ضربIsc × Voc ، ويعكس جودة الخلية وقدرتها على توليد الطاقة بكفاءة [23].
٥. الكفاءة الإجمالية:(η – Efficiency) تحسب وفق العلاقة بين القدرة القصوى والطاقة الضوئية الساقطة، وهي المعيار النهائي لتقييم أداء الخلية.[20]

تُستخدم هذه المعايير جميعها لتحديد أداء أنواع مختلفة من الخلايا الشمسية تحت ظروف اختبار قياسية (STC – Standard Test Conditions)تشمل شدة الإشعاع ١٠٠٠ واط/م²، ودرجة حرارة ٢٥°م، وطيف ضوء قياسي.[21] AM1.5

٢-٣-٣ العوامل المؤثرة في كفاءة الخلية الشمسية

تتأثر كفاءة الخلية الشمسية بمجموعة من العوامل الفيزيائية والهندسية والكيميائية التي تحدد مقدار الطاقة الكهربائية الناتجة بالنسبة للطاقة الضوئية الساقطة. وفهم هذه العوامل يُعد أساسيًا لتطوير وتحسين تصميم الخلايا الشمسية وزيادة كفاءتها.[24]

٢-٣-٣-١ شدة الإشعاع الشمسي وطيف الضوء

تلعب شدة الإشعاع الشمسي دورًا مباشرًا في تحديد كمية الفوتونات الممتصة وعدد الإلكترونات المتولدة. كلما زادت شدة الضوء الساقط على الخلية، ارتفع التيار الناتج وزادت القدرة الكهربائية للخلية. كما يؤثر طيف الضوء، أي توزيع أطوال الموجة، على الكفاءة، إذ تمتص الخلايا أنواعًا محددة من الضوء بحسب فجوة الطاقة للمادة شبه الموصلة. فعلى سبيل المثال، الخلايا متعددة الوصلات مصممة للاستفادة من أطياف ضوء متعددة، مما يقلل فقد الطاقة مقارنة بالخلايا أحادية الطبقة [24][25].

٢-٣-٣- ٢ درجة الحرارة وتأثيرها على الخلية

تؤثر درجة الحرارة بشكل كبير على الأداء الكهربائي للخلية. مع ارتفاع درجة الحرارة، تزداد حركة الإلكترونات داخل المادة شبه الموصلة، مما يؤدي إلى انخفاض فرق الجهد (Voc) وزيادة الخسائر الداخلية. وعليه، فإن ارتفاع درجة الحرارة يقلل من الكفاءة النهائية للخلية الشمسية، خاصة في المناطق

الحارة.

لحل هذه المشكلة، تُستخدم تقنيات التبريد أو المواد المقاومة للحرارة للحفاظ على أداء مستقر للخلية.[26]

٢-٣-٣-٣ المواد شبه الموصلة وخصائصها

تلعب المواد شبه الموصلة المستخدمة في تصنيع الخلايا دورًا أساسيًا في كفاءتها، حيث تحدد فجوة الطاقة، قدرة امتصاص الضوء، وحركة الشحنات داخل الخلية.

- المواد عالية النقاوة تقلل من إعادة اتحاد الإلكترونات والثقوب.
- اختيار المادة المناسبة يحدد الأطوال الموجية التي تمتصها الخلية، وبالتالي كفاءة التحويل.[27]

٢-٣-٣-٤ العيوب البلورية ونقاوة المادة

تؤثر العيوب البلورية مثل الشوائب، الفجوات، وحدود الحبيبات على حركة الإلكترونات داخل الخلية، حيث تزيد من إعادة اتحاد الشحنات وتقلل التيار الناتج.

- الخلايا أحادية البلورة تتميز بعمر طويل وكفاءة أعلى بسبب قلة العيوب.
- الخلايا متعددة البلورات أو الرقيقة أكثر عرضة لهذه الخسائر، مما يؤثر على الكفاءة.[28]

٢-٣-٣-٥ التصميم الهندسي للخلية والوصلةP–N

يعد التصميم الهندسي للخلية، بما في ذلك سُمك الطبقات، نوع الوصلةP–N ، وطبقات مضادة للانعكاس، من أهم العوامل المؤثرة على الكفاءة.

- تصميم وصلة P–N بشكل مثالي يعزز المجال الكهربائي الداخلي ويفصل الشحنات بكفاءة.
- الطبقات المضادة للانعكاس تقلل فقد الضوء وتحسن امتصاص الفوتونات.[29]

٢-٣-٣- ٦ الخسائر الضوئية والحرارية والكهربائية

تحدث الخسائر أثناء عملية التحويل الكهروضوئي بعدة طرق:

١. الخسائر الضوئية :انعكاس الضوء أو عدم امتصاصه بالكامل.
٢. الخسائر الحرارية :تحول بعض طاقة الفوتونات إلى حرارة بدلًا من شحنات كهربائية.

٣. الخسائر الكهربائية :مقاومة المواد والأقطاب المعدنية تؤدي إلى فقد جزء من التيار قبل الوصول إلى الحمل.[30]

تقليل هذه الخسائر وتحسين إدارة الشحنات والحرارة يعد من أهم محاور تطوير كفاءة الخلايا الشمسية الحديثة.

٢-٣-٤ طرق تحسين الكفاءة وتقليل الخسائر

تطوير كفاءة الخلايا الشمسية وتقليل الخسائر الناتجة عن عملية التحويل الكهروضوئي يمثل محورًا أساسيًا في أبحاث الطاقة الشمسية، حيث يسهم في زيادة الإنتاجية وتقليل التكلفة لكل واط من الطاقة المنتجة. يمكن تلخيص أهم الطرق والأساليب العلمية المستخدمة لتحقيق هذا الهدف كما يلي:

١. تحسين امتصاص الضوء

- الطبقات المضادة للانعكاس :(Anti-Reflection Coatings) تقلل من فقد الضوء الناتج عن الانعكاس على سطح الخلية، مما يزيد كمية الفوتونات الممتصة ويعزز التيار الناتج.[31]
- تصميم الأسطح المجهرية :(Textured Surfaces) تشكيل سطح الخلية على شكل نتوءات أو مسام دقيقة يساعد على حصر الضوء داخل الخلية لفترة أطول، وزيادة فرصة امتصاصه.[32]
- استخدام مواد نانوية وطبقات متعددة :(Nanostructures & Multi-Layer Coatings) تحسين امتصاص أطياف ضوء واسعة، خاصة في الخلايا متعددة الوصلات والخلايا النانوية الحديثة.[33]

٢. التحكم في درجة الحرارة

- أنظمة التبريد النشط أو السلبي :مثل المراوح، المبادلات الحرارية، أو ألواح تبريد، لتقليل تأثير الحرارة على فرق الجهد الكهربائي.[34]
- استخدام مواد مقاومة للحرارة :مثل السيليكون المعالج أو المواد النانوية المصممة لتحمل درجات حرارة مرتفعة دون فقد كبير للكفاءة.[33]

٣. تحسين المواد شبه الموصلة

- زيادة نقاوة المواد :تقلل من العيوب البلورية وتقلل إعادة اتحاد الإلكترونات والثقوب، مما يزيد التيار الكهربائي الناتج.[35]

- استخدام مواد متعددة الطبقات أو مركبات هجينة :مثل خلايا CIGS أو الخلايا الهجينة، للاستفادة من أطياف ضوء أوسع وتحسين الكفاءة.[33]

٤. تحسين التصميم الهندسي للخلية

- تحسين الوصلة :P–N اختيار سمك مناسب للوصلة ومنطقة الاستنزاف يزيد من قوة المجال الكهربائي الداخلي وفعالية فصل الشحنات.[34]
- تقليل مقاومة الأسلاك والأقطاب المعدنية :استخدام أسلاك وطبقات موصلة عالية الجودة لتقليل الخسائر الكهربائية أثناء انتقال التيار.[31]
- تصميم الخلية لتقليل الحدود البلورية والعيوب :خصوصًا في الخلايا متعددة البلورات والرقيقة.[35]

٥. تقليل الخسائر الكهروضوئية

- تحسين إدارة الشحنات :باستخدام تقنيات الطبقات النانوية أو الهجينة لتوجيه حركة الإلكترونات والثقوب وتقليل إعادة الاتحاد.[33]
- استخدام تقنيات التركيز الشمسي :(Concentrated Photovoltaics) توجيه الضوء إلى الخلايا بكفاءة أعلى لزيادة كثافة الطاقة الناتجة.[36]
- دمج الخلايا متعددة الوصلات أو المواد المتقدمة :لزيادة استغلال كامل الطيف الشمسي وتحسين الكفاءة الكلية.[36]

الفصل الثالث

طرق تطوير كفاءة الخلية الشمسية

الفصل الثالث

طرق تطوير كفاءة الخلية الشمسية

المقدمة

تعتبر الخلايا الشمسية حجر الزاوية في مستقبل الطاقة المتجددة، ومع تزايد الطلب العالمي على مصادر الطاقة النظيفة، أصبح تحسين كفاءة هذه الخلايا هدفًا بحثيًا وتقنيًا ذا أولوية قصوى. فكل زيادة في كفاءة التحويل الكهروضوئي تعني إنتاج المزيد من الكهرباء من نفس المساحة، مما يقلل من التكاليف ويوسع نطاق التطبيقات الممكنة. يستعرض هذا الفصل أحدث الطرق والتقنيات المبتكرة التي تهدف إلى رفع كفاءة الخلايا الشمسية، بدءًا من تطوير مواد جديدة وتصاميم هيكلية متقدمة، وصولا إلى استكشاف مفاهيم ثورية في فيزياء أشباه الموصلات.

سيتناول هذا الفصل بالتفصيل التقنيات المتقدمة مثل خلايا البيروفسكايت، والخلايا ثنائية الوجه، والخلايا متعددة الوصلات، مع التركيز على مبادئ عملها، ومزاياها، والتحديات التي تواجهها. كما سيبحث في استراتيجيات تحسين امتصاص الضوء، وتقليل خسائر إعادة الاتحاد، وإدارة الحرارة داخل الخلية.

ويهدف هذا الاستعراض الشامل إلى تقديم رؤية واضحة حول الاتجاهات الحالية والمستقبلية في مجال تطوير كفاءة الخلايا الشمسية، مما يمهد الطريق نحو تحقيق أقصى استفادة من الطاقة الشمسية كمصدر مستدام للطاقة.

٣-١ التقنيات المتقدمة لتحسين كفاءة الخلايا الشمسية

٣-١-١ خلديا البيروفسكايت(Perovskite Solar Cells)

تُعد خلايا البيروفسكايت واحدة من أكثر الابتكارات الواعدة في مجال الطاقة الشمسية خلال العقد الأخير. اكتسبت هذه الخلايا اهتمامًا بحثيًا هائلاً نظرًا لقدرتها على تحقيق كفاءات تحويل عالية جدًا بتكاليف تصنيع منخفضة نسبيًا [1]. تعتمد هذه الخلايا على مركبات البيروفسكايت المعدنية الهاليدية كمادة أساسية لامتصاص الضوء، والتي تتميز بخصائص بصرية وإلكترونية فريدة.

٣-١-١-١ مقدمة عن البيروفسكايت وخصائصه

يشير مصطلح البيروفسكايت إلى فئة من المواد ذات بنية بلورية محددة تشبه بنية معدن البيروفسكايت الطبيعي .(CaTiO3) في سياق الخلايا الشمسية، تُستخدم مركبات البيروفسكايت الهاليدية العضوية-غير العضوية، والتي تتكون عادةً من أيون عضوي (مثل ميثيل الأمونيوم) أو غير عضوي (مثل السيزيوم) في الموقعA ، وأيون معدني (مثل الرصاص أو القصدير) في الموقعB ، وأيون هاليد (مثل اليود أو البروم أوالكلور) في الموقعX ، بالصيغة العامة [ABX3٢]

تتميز هذه المواد بخصائص استثنائية تجعلها مثالية للتطبيقات الكهروضوئية، منها:

•امتصاص ضوئي عالٍ: تتمتع البيروفسكايت بقدرة عالية على امتصاص الضوء عبر نطاق واسع من الطيف الشمسي، حتى في الطبقات الرقيقة جدًا، مما يقلل من كمية المواد المطلوبة.[3]

- فجوة طاقة قابلة للتعديل: يمكن تعديل فجوة الطاقة (Bandgap) لمواد البيروفسكايت عن طريق تغيير تركيبها الكيميائي، مما يسمح بامتصاص أطوال موجية محددة من الضوء، وهو أمر بالغ الأهمية لتطوير الخلايا الترادفية.[4] (Tandem Solar Cells)
- حركة شحنات ممتازة: توفر البيروفسكايت مسارات فعالة لحركة الإلكترونات والثقوب، مما يقلل من خسائر إعادة الاتحاد ويزيد من كفاءة جمع الشحنات.[5]
- سهولة التصنيع: يمكن تصنيع خلايا البيروفسكايت باستخدام تقنيات منخفضة التكلفة مثل الطباعة بالرش أو الطباعة بالشاشة، مما يفتح الباب أمام إنتاج واسع النطاق وبتكلفة منخفضة.[6]

٣-١-١-٢ هيكل خلديا البيروفسكايت

تتكون خلية البيروفسكايت الشمسية النموذجية من عدة طبقات، حيث تلعب كل طبقة دورًا حاسمًا في عملية تحويل الطاقة الضوئية إلى كهربائية. الهيكل الأساسي يشمل:

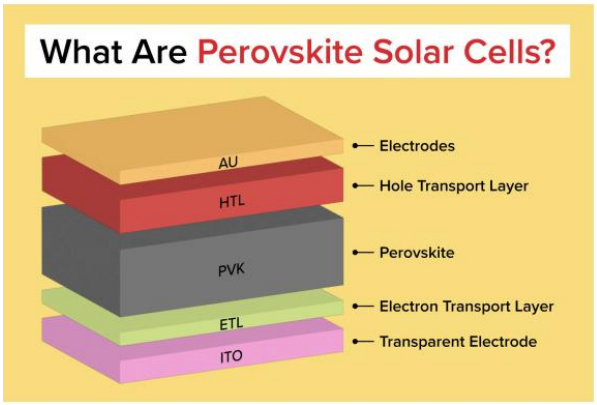
١ .الركيزة :(Substrate) عادة ما تكون من الزجاج الشفاف المغطى بطبقة موصلة شفافة (مثل أكسيد القصدير والإنديوم ITO - أو أكسيد الفلورين المخدر بالقصدير (FTO - تعمل كقطب أمامي [٧.]

٢ .طبقة نقل الثقوب :(Hole Transport Layer - HTL) تقع فوق طبقة البيروفسكايت وتسهل نقل الثقوب المتولدة إلى القطب الأمامي، مع منع الإلكترونات من الوصول إليه. من المواد الشائعة المستخدمة في هذه الطبقة.Spiro-OMeTAD [8]

٣ .طبقة البيروفسكايت الماصة :(Perovskite Absorber Layer) هي الطبقة الأساسية التي تمتص الفوتونات الشمسية وتولد أزواج الإلكترون–ثقب. يمكن أن تكون هذه الطبقة رقيقة جدًا (حوالي ٣٠٠–٥٠٠ نانومتر) [9].

٤ .طبقة نقل الإلكترونات :(Electron Transport Layer – ETL) تقع أسفل طبقة البيروفسكايت وتسهل نقل الإلكترونات المتولدة إلى القطب الخلفي، مع منع الثقوب من الوصول إليه. من المواد الشائعة المستخدمة في هذه الطبقة ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) أو أكسيد القصدير.[10] (SnO_2)

٥ .القطب الخلفي :(Back Electrode) عادة ما يكون من معدن موصل (مثل الذهب أو الفضة أوالألومنيوم) لجمع الإلكترونات وإكمال الدائرة الكهربائية [11].

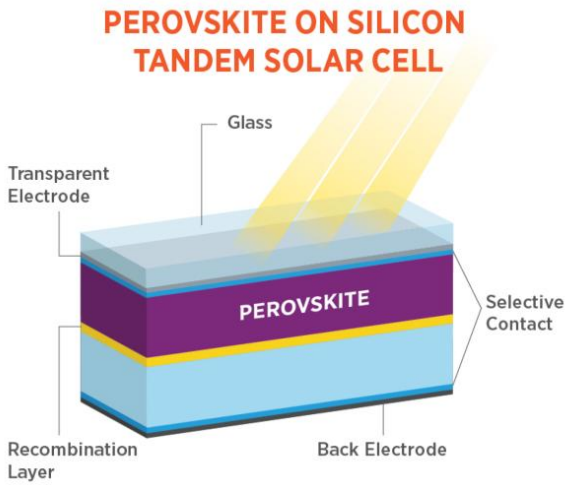


صورة رقم (١٤): هيكل خلية البيروفسكايت الشمسية [٤٤]

٣-١-١-٣ خلديا البيروفسكايت الترادفية(Perovskite Tandem Solar Cells)

لتحقيق كفاءات أعلى تتجاوز حدود الخلايا الشمسية أحادية الوصلة، يتم دمج خلايا البيروفسكايت مع خلايا السيليكون التقليدية لتكوين خلايا ترادفية. تستفيد هذه الخلايا من قدرة البيروفسكايت على امتصاص الجزء عالي الطاقة من الطيف الشمسي (الضوء الأزرق والأخضر)، بينما يمتص السيليكون الجزء منخفض الطاقة (الضوء الأحمر والأشعة تحت الحمراء). هذا الدمج يسمح بالاستفادة القصوى من الطيف الشمسي، مما يؤدي إلى زيادة كبيرة في الكفاءة.[12]

وقد وصلت كفاءة الخلايا الترادفية البيروفسكايت–سيليكون إلى مستويات قياسية تقترب من ٣٤٪ في المختبرات، مما يجعلها تتجاوز كفاءة خلايا السيليكون وحدها [13].



صورة رقم (١٥): خلية بيروفسكايت على سيليكون ترادفية[٧]

٣-١-١-٤ التحديات والآفاق المستقبلية

على الرغم من الكفاءات العالية وسهولة التصنيع، تواجه خلايا البيروفسكايت بعض التحديات التي يجب التغلب عليها قبل تحقيق التسويق التجاري الواسع النطاق. من أبرز هذه التحديات:

- الاستقرارية (Stability): تعاني مواد البيروفسكايت من عدم استقرار نسبي عند التعرض للرطوبة والحرارة والأشعة فوق البنفسجية، مما يؤدي إلى تدهور أدائها بمرور الوقت. تركز الأبحاث الحالية على تطوير تركيبات بيروفسكايت أكثر استقرارًا وتغليف فعال لحماية الخلايا.[14]
- السمية (Toxicity): تحتوي العديد من مركبات البيروفسكايت عالية الكفاءة على الرصاص، وهو عنصر سام. يبحث العلماء عن بدائل غير سامة للرصاص، مثل القصدير، مع الحفاظ على مستويات الكفاءة العالية.[15]
- الإنتاج على نطاق واسع (Scalability): لا تزال تقنيات الإنتاج على نطاق واسع للخلايا البيروفسكايتية في مراحل التطوير، وهناك حاجة إلى تحسين عمليات التصنيع لتقليل التكاليف وزيادة الإنتاجية.[16]

على الرغم من هذه التحديات، فإن الآفاق المستقبلية لخلايا البيروفسكايت واعدة جدًا، ومن المتوقع أن تلعب دورًا محوريًا في الجيل القادم من تكنولوجيا الطاقة الشمسية، خاصة في التطبيقات المتخصصة مثل الخلايا الشفافة والمرنة، وتطبيقات الطاقة المتكاملة في المباني (BIPV).

٣-١-٢ الخلايا الشمسية ثنائية الوجه(Bifacial Solar Cells)

تمثل الخلايا الشمسية ثنائية الوجه تطورًا مهمًا في تكنولوجيا الألواح الشمسية، حيث تستطيع هذه الخلايا امتصاص ضوء الشمس من كلا الجانبين (الأمامي والخلفي)، على عكس الخلايا التقليدية أحادية الوجه التي تمتص الضوء من جانب واحد فقط. هذا التصميم المبتكر يسمح بزيادة إنتاج الطاقة بشكل ملحوظ من نفس المساحة، مما يعزز الكفاءة الكلية للنظام الشمسي.[17]

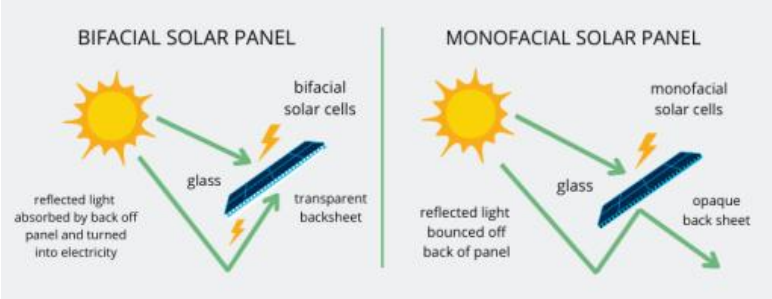
٣-١-٢-١ مبدأ العمل والمزايا

تعتمد الخلايا ثنائية الوجه على مبدأ بسيط وفعال: بالإضافة إلى امتصاص الإشعاع الشمسي المباشر من الجانب الأمامي، فإنها تستفيد أيضًا من الضوء المنعكس (Albedo) من الأسطح المحيطة، مثل الأرض أو الأسطح الفاتحة، من الجانب الخلفي للخلية. يتم تحقيق ذلك من خلال تصميم خاص يسمح بمرور الضوء عبر الجزء الخلفي للخلية، وعادة ما تكون الألواح التي تحتوي على هذه الخلايا شفافة من الخلف [18]

من أبرز مزايا الخلايا ثنائية الوجه:

•زيادة إنتاج الطاقة: يمكن للخلايا ثنائية الوجه أن تزيد من إنتاج الطاقة بنسبة تتراوح بين ٥٪ و٣٠% مقارنة بالخلايا أحادية الوجه، اعتمادًا على عوامل مثل ارتفاع التركيب، لون السطح الأرضي، وزاوية الميل[19].

- كفاءة استخدام المساحة: تتيح هذه الخلايا توليد المزيد من الطاقة من نفس المساحة، مما يجعلها مثالية للمشاريع ذات المساحة المحدودة أو حيث تكون تكلفة الأرض مرتفعة.[20]
- أداء أفضل في الظروف الجوية المختلفة: يمكن أن تعمل الخلايا ثنائية الوجه بشكل أفضل في الظروف الغائمة أو المنتشرة للضوء، حيث يتم امتصاص الضوء المنعكس من السحب.[21]
- عمر افتراضي أطول: غالبًا ما تكون الألواح ثنائية الوجه أكثر متانة بسبب استخدام الزجاج على كلا الجانبين، مما يوفر حماية أفضل للخلايا من العوامل البيئية.[22]

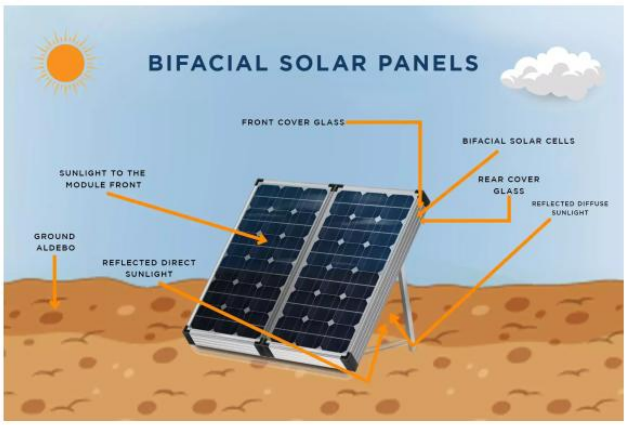


صورة رقم (١٦): مقارنة بين الخلايا أحادية الوجه وثنائية الوجه [٢]

٣-١-٢-٢ عوامل تؤثر على أداء الخلايا ثنائية الوجه

يتأثر أداء الخلايا ثنائية الوجه بعدة عوامل رئيسية:

- ارتفاع التركيب :(Mounting Height) كلما زاد ارتفاع تركيب الألواح عن الأرض، زادت كمية الضوء المنعكس التي يمكن للجانب الخلفي امتصاصها.[23]
- لون السطح الأرضي :(Ground Albedo) الأسطح ذات الانعكاسية العالية (مثل الرمل الفاتح، العشب الأخضر، أو الأسطح المغطاة بالثلج) تزيد من كمية الضوء المنعكس، وبالتالي تزيد من إنتاج الطاقة. يوضح الشكل ٣-٤ تأثير الأسطح المختلفة على أداء الخلايا ثنائية الوجه.[24]
- زاوية الميل :(Tilt Angle) تؤثر زاوية ميل الألواح على كمية الضوء المباشر والمنعكس الذي يصل إلى كلا الجانبين.[25]
- التظليل :(Shading) يجب تصميم أنظمة التركيب لتقليل التظليل على الجانب الخلفي من الألواح قدر الإمكان، حيث يمكن أن يؤثر التظليل سلبًا على الأداء الكلي.[26]



الصورة رقم (١٧): تأثير الأسطح المختلفة على أداء الخلايا ثنائية الوجه[١١]

٣-١-٢-٣ التحديات والآفاق المستقبلية

على الرغم من المزايا العديدة، تواجه الخلايا ثنائية الوجه بعض التحديات، مثل الحاجة إلى تصميم أنظمة تركيب خاصة تسمح بمرور الضوء إلى الجانب الخلفي، وضرورة تقييم دقيق لموقع التركيب لضمان أقصى استفادة من الضوء المنعكس. ومع ذلك، فإن التطور المستمر في تقنيات التصنيع والتصميم، بالإضافة إلى انخفاض التكاليف، يجعل الخلايا ثنائية الوجه خيارًا جذابًا بشكل متزايد لمشاريع الطاقة الشمسية الكبيرة والصغيرة.[27]

من المتوقع أن تستمر الخلايا ثنائية الوجه في النمو والانتشار، خاصة في المزارع الشمسية واسعة النطاق، وتطبيقات الطاقة المتكاملة في المباني، وحتى في الأنظمة السكنية، حيث توفر حلاً فعالًا لزيادة إنتاج الطاقة من مساحة محدودة.

٣-١-٣ الخلايا الشمسية متعددة الوصلات(Multi-Junction Solar Cells)

تُعد الخلايا الشمسية متعددة الوصلات (MJSs) من أكثر التقنيات الواعدة لتحقيق كفاءات تحويل عالية جدًا، خاصة في التطبيقات التي تتطلب أقصى قدر من إنتاج الطاقة لكل وحدة مساحة، مثل الأقمار الصناعية وأنظمة الطاقة الشمسية المركزة .(CPV) تعتمد هذه الخلايا على فكرة تقسيم الطيف الشمسي إلى نطاقات مختلفة، حيث يتم امتصاص كل نطاق بواسطة طبقة شبه موصلة ذات فجوة طاقة مناسبة .[28]

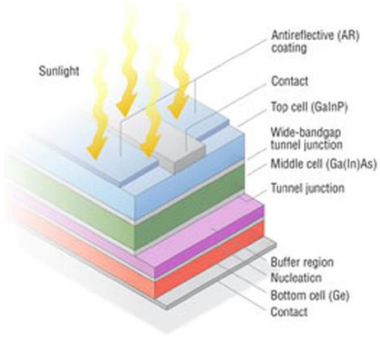
٣-١-٣-١ مبدأ العمل والهيكل

يتكون الهيكل الأساسي للخلية متعددة الوصلات من عدة وصلات P-N مكدسة فوق بعضها البعض، كل منها مصنوع من مادة شبه موصلة مختلفة (مثل زرنيخيد الغاليومGaAs ، فوسفيد الغاليوم والإنديوم GaInP، أو الجرمانيوم .(Ge يتم اختيار هذه المواد بحيث تكون فجوات طاقتها متناقصة تدريجيًا من الطبقة العلوية إلى السفلية.[29]

- الطبقة العلوية :(Top Cell) تمتص الفوتونات عالية الطاقة (الضوء الأزرق والأخضر) ذات الأطوال الموجية القصيرة، وتكون فجوة طاقتها كبيرة.
- الطبقة الوسطى :(Middle Cell) تمتص الفوتونات ذات الطاقة المتوسطة (الضوء الأصفر والبرتقالي) التي تمر عبر الطبقة العلوية.

- الطبقة السفلية :(Bottom Cell) تمتص الفوتونات منخفضة الطاقة (الضوء الأحمر والأشعة تحت الحمراء) التي تمر عبر الطبقات العلوية، وتكون فجوة طاقتها صغيرة.

هذا الترتيب يسمح لكل طبقة بتحويل جزء محدد من الطيف الشمسي بكفاءة، مما يقلل من الخسائر الحرارية الناتجة عن تحويل الفوتونات عالية الطاقة إلى حرارة في الخلايا أحادية الوصلة. يوضح الشكل ٣-٥ الهيكل الطبقي لخلية شمسية متعددة الوصلات ثلاثية.



صورة رقم (١٨): هيكل خلية شمسية متعددة الوصلات [٤٠]

٣-١-٣-٢ مزايا الخلديا متعددة الوصلات

- كفاءة تحويل قياسية: حققت الخلايا متعددة الوصلات أعلى كفاءات تحويل مسجلة للخلايا الشمسية، حيث تجاوزت ٤٧٪ في المختبرات تحت ظروف التركيز الشمسي.[30]
- استغلال أمثل للطيف الشمسي: بفضل الطبقات المتعددة ذات فجوات الطاقة المختلفة، يتم استغلال نطاق أوسع من الطيف الشمسي بكفاءة أكبر.[31]
- أداء ممتاز في ظروف الإشعاع العالي: تعتبر مثالية لأنظمة CPV التي تركز ضوء الشمس عدة مئات أو آلاف المرات على مساحة صغيرة من الخلية.[32]

3-1-3-3 التحديات والآفاق المستقبلية

على الرغم من الكفاءات العالية، تواجه الخلايا متعددة الوصلات تحديات كبيرة تحد من انتشارها الواسع:

- تكلفة التصنيع العالية: تتطلب هذه الخلايا مواد شبه موصلة باهظة الثمن وعمليات تصنيع معقدة ودقيقة للغاية، مما يجعل تكلفتها أعلى بكثير من خلايا السيليكون التقليدية.[33]
- الحاجة إلى أنظمة تتبع وتركيز: تتطلب أنظمة CPV التي تستخدم الخلايا متعددة الوصلات أنظمة تتبع دقيقة للشمس وأنظمة تركيز بصري معقدة، مما يزيد من تعقيد وتكلفة النظام الكلي.[34]

- حساسية لدرجة الحرارة: على الرغم من تصميمها لتقليل الخسائر الحرارية، إلا أن أداءها لا يزال يتأثر بارتفاع درجة الحرارة، مما يتطلب أنظمة تبريد فعالة.[35]

تركز الأبحاث المستقبلية على تقليل تكاليف التصنيع، وتطوير مواد جديدة ذات فجوات طاقة محسنة، وتحسين استقرارية الخلايا متعددة الوصلات. ومن المتوقع أن تستمر هذه الخلايا في لعب دور حاسم في التطبيقات المتخصصة وعالية الأداء، مع إمكانية دمجها في تقنيات هجينة لخفض التكاليف وزيادة الكفاءة.

٣-٢ استراتيجيات تحسين امتصاص الضوء وتقليل الخسائر

بالإضافة إلى تطوير أنواع جديدة من الخلايا الشمسية، هناك العديد من الاستراتيجيات والتقنيات التي تهدف إلى تحسين كفاءة الخلايا الحالية عن طريق زيادة امتصاص الضوء وتقليل أنواع مختلفة من الخسائر. هذه الاستراتيجيات يمكن تطبيقها على نطاق واسع عبر أنواع مختلفة من الخلايا الشمسية.[36]

٣-٢-١ تحسين امتصاص الضوء

يُعد امتصاص أكبر قدر ممكن من الفوتونات الشمسية خطوة أساسية لزيادة كفاءة الخلية. هناك عدة طرق لتحقيق ذلك:

٣-٢-١-١ الطبقات المضادة للانعكاس(Anti-Reflection Coatings - ARCs)

عندما يسقط الضوء على سطح الخلية الشمسية، ينعكس جزء منه بدلاً من امتصاصه، مما يقلل من كمية الطاقة المتاحة للتحويل. تُستخدم الطبقات المضادة للانعكاس، وهي طبقات رقيقة من مواد ذات معامل انكسار محدد) مثل نيتريد السيليكون SiNx أو ثاني أكسيد التيتانيوم(TiO2 ، لتقليل هذا الانعكاس وزيادة نفاذية الضوء إلى داخل الخلية.[37]

تعمل هذه الطبقات عن طريق التداخل البناء للموجات الضوئية، حيث تلغي الموجات المنعكسة بعضها البعض، مما يسمح بمرور المزيد من الضوء. يمكن تصميم هذه الطبقات لتحسين امتصاص أطوال موجية محددة من الطيف الشمسي.[38]

٣-٢-١-٢ الأسطح المنسوجة(Textured Surfaces)

بدلاً من السطح الأملس، يتم معالجة سطح الخلية الشمسية لإنشاء هياكل مجهرية (مثل الأهرامات أو الحفر) تعرف بالأسطح المنسوجة. هذه الهياكل تزيد من مسار الضوء داخل الخلية عن طريق حبس

الفوتونات ومنعها من الانعكاس مباشرة خارج الخلية. هذا يؤدي إلى زيادة فرصة امتصاص الفوتونات وتحويلها إلى طاقة كهربائية.[39]

تُستخدم تقنيات الحفر الكيميائي أو النقش بالليزر لإنشاء هذه الأسطح المنسوجة، وهي فعالة بشكل خاص في خلايا السيليكون البلورية، حيث يمكن أن تزيد من كفاءة امتصاص الضوء بشكل كبير [40].

٣-٢-١-٣ تقنيات الحصر الضوئي(Light Trapping Techniques)

بالإضافة إلى الأسطح المنسوجة، تُستخدم تقنيات أخرى لحصر الضوء داخل الخلية، مثل استخدام الطبقات الخلفية العاكسة (Back Surface Reflectors – BSRs) التي تعكس الفوتونات غير الممتصة مرة أخرى إلى طبقة الامتصاص، مما يزيد من مسارها البصري وفرصة امتصاصها. كما يمكن استخدام الهياكل البلازمونية النانوية (Plasmonic Nanostructures) التي تعمل على تشتيت الضوء وحصره داخل الطبقة الماصة، مما يعزز الامتصاص في الطبقات الرقيقة جدًا.[41]

٣-٢-٢ تقليل خسائر إعادة الاتحاد(Recombination Losses)

تُعد خسائر إعادة الاتحاد بين الإلكترونات والثقوب أحد أهم العوامل التي تحد من كفاءة الخلايا الشمسية. تحدث هذه الخسائر عندما تتحد الإلكترونات والثقوب قبل أن يتم جمعها بواسطة الأقطاب الكهربائية، مما يؤدي إلى فقدان الطاقة. يمكن تقليل هذه الخسائر من خلال عدة استراتيجيات:

٣-٢-٢-١ التخميل السطحي(Surface Passivation)

توجد على أسطح المواد شبه الموصلة العديد من العيوب (مثل الروابط المعلقة) التي تعمل كمراكز لإعادة الاتحاد. يهدف التخميل السطحي إلى تقليل هذه العيوب عن طريق تغطية السطح بطبقات رقيقة من مواد عازلة) مثل أكسيد السيليكون SiO_2 أو نيتريد السيليكون (SiN_x أو مواد شبه موصلة ذات فجوة طاقة واسعة. هذه الطبقات تقلل من عدد مراكز إعادة الاتحاد السطحية، مما يسمح بجمع المزيد من الشحنات المتولدة.[42]

تُعد تقنيات التخميل السطحي حاسمة في تحقيق الكفاءات العالية في خلايا السيليكون البلورية، وقد ساهمت بشكل كبير في تطوير خلايا Passivated Emitter Rear Cell(PERC) التي أصبحت معيارًا صناعيًا[43].

٣-٢-٢-٢ التخميل الحجمي(Bulk Passivation)

بالإضافة إلى السطح، يمكن أن تحدث إعادة الاتحاد أيضًا داخل حجم المادة شبه الموصلة بسبب العيوب البلورية أو الشوائب. يهدف التخميل الحجمي إلى تقليل هذه العيوب من خلال استخدام مواد عالية النقاوة وعمليات تصنيع تتحكم بدقة في نمو البلورات. كما يمكن استخدام تقنيات المعالجة الحرارية (Annealing) لإصلاح بعض العيوب البلورية وتقليل مراكز إعادة الاتحاد [44].

٣-٢-٢-٣ تصميم الوصلات المحسّن(Optimized Junction Design)

يلعب تصميم الوصلة P–N دورًا حيويًا في فصل الشحنات ومنع إعادة الاتحاد. يمكن تحسين هذا التصميم من خلال التحكم الدقيق في تركيز الشوائب (Doping Profile) وعمق الوصلة، مما يؤدي إلى إنشاء مجال كهربائي داخلي أقوى وأكثر فعالية في توجيه الإلكترونات والثقوب نحو الأقطاب المناسبة.[45] كما أن استخدام وصلات غير متجانسة(Heterojunctions) ، حيث يتم دمج مواد شبه موصلة مختلفة ذات فجوات طاقة متباينة، يمكن أن يخلق حواجز طاقة تمنع إعادة الاتحاد وتزيد من كفاءة جمع الشحنات، كما هو الحال في خلايا.HJT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) [46]

٣-٢-٣ إدارة الحرارة(Thermal Management)

تؤثر درجة الحرارة بشكل كبير على أداء الخلايا الشمسية، حيث يؤدي ارتفاعها إلى انخفاض في الجهد الكهربائي الناتج وبالتالي انخفاض الكفاءة. لذلك، تُعد استراتيجيات إدارة الحرارة ضرورية للحفاظ على أداء مستقر وعالٍ للخلايا.[47]

٣-٢-٣-١ أنظمة التبريد(Cooling Systems)

يمكن استخدام أنظمة تبريد نشطة أو سلبية لخفض درجة حرارة الخلايا الشمسية. تشمل أنظمة التبريد النشطة استخدام المراوح أو المبادلات الحرارية التي تعمل على تبديد الحرارة بعيدًا عن الألواح. أما أنظمة التبريد السلبية، فتعتمد على تصميم الألواح والمواد المستخدمة لتعزيز التبادل الحراري الطبيعي مع البيئة، مثل استخدام مواد ذات موصلية حرارية عالية أو تصميم يسمح بتدفق الهواء بشكل فعال.[48]

٣-٢-٣-٢ المواد المقاومة للحرارة(Heat-Resistant Materials)

تطوير واستخدام مواد شبه موصلة ومواد تغليف تكون أقل حساسية لارتفاع درجة الحرارة يمكن أن يقلل من تأثير الحرارة السلبي على الكفاءة. تركز الأبحاث على مواد ذات معامل حراري منخفض (Temperature Coefficient) للجهد والكفاءة، مما يعني أن أداءها يتأثر بشكل أقل بالتغيرات في درجة الحرارة [49].

٣-٣ الابتكارات في المواد والتصنيع

يشهد مجال الخلايا الشمسية تطورات مستمرة في المواد المستخدمة وتقنيات التصنيع، مما يفتح آفاقًا جديدة لتحقيق كفاءات أعلى وتكاليف أقل.

٣-٣-١ المواد النانوية(Nanomaterials)

تُعد المواد النانوية، مثل النقاط الكمومية(Quantum Dots) ، والأسلاك النانوية(Nanowires) ، والجرافين (Graphene)، من المجالات البحثية الواعدة في تطوير الجيل الجديد من الخلايا الشمسية. تتميز هذه المواد بخصائص فريدة على المستوى النانوي تتيح لها التفاعل مع الضوء والإلكترونات بطرق غير ممكنة في المواد التقليدية.[50]

٣-٣-١-١ النقاط الكمومية(Quantum Dots – QDs)

النقاط الكمومية هي بلورات شبه موصلة صغيرة جدًا (بضعة نانومترات) تظهر خصائص كمومية فريدة. يمكن تعديل فجوة طاقتها عن طريق تغيير حجمها، مما يسمح بامتصاص أطوال موجية محددة من الضوء بدقة عالية. تُستخدم النقاط الكمومية لزيادة امتصاص الضوء، خاصة في نطاقات الطيف التي لا تمتصها المواد التقليدية بكفاءة، ويمكن دمجها في الخلايا الشمسية لزيادة كفاءة التحويل.[51]

٣-٣-١-٢ الأسلاك النانوية(Nanowires)

توفر الأسلاك النانوية مساحة سطحية كبيرة لامتصاص الضوء وتسهيل فصل الشحنات. يمكن دمجها في هياكل الخلايا الشمسية لزيادة كفاءة جمع الشحنات وتقليل الانعكاس السطحي. كما أن مرونتها تجعلها مناسبة لتطبيقات الخلايا الشمسية المرنة.

٣-٣-١-٣ الجرافين(Graphene)

الجرافين، وهو مادة ثنائية الأبعاد تتكون من طبقة واحدة من ذرات الكربون، يتميز بموصلية كهربائية وحرارية عالية جدًا، وشفافية بصرية ممتازة. يمكن استخدام الجرافين كطبقة موصلة شفافة بديلة لـITO في الخلايا الشمسية، مما يقلل التكاليف ويزيد من المرونة. كما يمكن استخدامه لتحسين نقل الشحنات وتقليل خسائر إعادة الاتحاد [49].

٣-٣-٢ الخلايا الشمسية الشفافة(Transparent Solar Cells)

تُعد الخلايا الشمسية الشفافة ابتكارًا ثوريًا يفتح آفاقًا جديدة لتطبيقات الطاقة الشمسية، حيث يمكن دمجها في النوافذ، وشاشات الأجهزة الإلكترونية، والأسطح الزجاجية للمباني. تعتمد هذه الخلايا على مواد تمتص فقط الأطوال الموجية غير المرئية للعين البشرية (مثل الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء)، بينما تسمح بمرور الضوء المرئي [50].

تُستخدم مواد مثل البوليمرات العضوية الشفافة أو النقاط الكمومية التي تمتص الضوء في نطاقات محددة من الطيف، ثم تحول هذه الطاقة إلى كهرباء. على الرغم من أن كفاءتها لا تزال أقل من الخلايا التقليدية، إلا أن قدرتها على الاندماج في البيئة الحضرية دون التأثير على المظهر الجمالي يجعلها ذات إمكانات هائلة.[55]

٣-٣-٣ الطباعة ثلاثية الأبعاد (3D Printing) في تصنيع الخلايا الشمسية

تُقدم الطباعة ثلاثية الأبعاد إمكانات واعدة لتصنيع الخلايا الشمسية بتصاميم معقدة ومخصصة، وبطرق أكثر كفاءة وبتكلفة أقل. يمكن استخدام هذه التقنية لطباعة هياكل الخلايا الشمسية متعددة الطبقات، أو لإنشاء هياكل مجهرية معقدة لتعزيز امتصاص الضوء وإدارة الشحنات.[51]

من مزايا الطباعة ثلاثية الأبعاد في هذا المجال:

- التخصيص والمرونة: إمكانية تصميم خلايا شمسية بأشكال وأحجام مختلفة لتناسب تطبيقات محددة.
- خفض التكاليف: تقليل هدر المواد وتبسيط عمليات التصنيع.
- الإنتاج السريع: إمكانية إنتاج الخلايا الشمسية عند الطلب وبسرعة أكبر.

لا تزال هذه التقنية في مراحلها المبكرة، ولكنها تحمل وعدًا كبيرًا لتطوير الجيل القادم من الخلايا الشمسية ذات الكفاءة العالية والتكلفة المنخفضة.[52]

٣-٤ التحديات والآفاق المستقبلية في تطوير كفاءة الخلايا الشمسية

على الرغم من التقدم الهائل في تطوير كفاءة الخلايا الشمسية، لا تزال هناك تحديات كبيرة يجب التغلب عليها لتحقيق الاعتماد الكامل على الطاقة الشمسية كمصدر رئيسي للطاقة. في هذا القسم، سنناقش أبرز هذه التحديات والآفاق المستقبلية للبحث والتطوير في هذا المجال.

٣-٤-١ التحديات الرئيسية

٣-٤-١-١ الاستقرارية والمتانة على المدى الطويل

تُعد الاستقرارية والمتانة من أهم التحديات، خاصة بالنسبة للتقنيات الجديدة مثل خلايا البيروفسكايت والخلايا العضوية. فتعرض هذه الخلايا للعوامل البيئية مثل الرطوبة، الحرارة، والأشعة فوق البنفسجية يؤدي إلى تدهور أدائها بمرور الوقت. هناك حاجة ماسة لتطوير مواد تغليف أفضل وتقنيات تصنيع تضمن عمرًا تشغيليًا طويلًا وموثوقًا.

٣-٤-١-٢ التكلفة مقابل الكفاءة

على الرغم من أن بعض التقنيات الحديثة تحقق كفاءات عالية جدًا (مثل الخلايا متعددة الوصلات)، إلا أن تكاليف تصنيعها لا تزال مرتفعة جدًا، مما يحد من استخدامها في التطبيقات التجارية واسعة النطاق. التحدي يكمن في إيجاد توازن بين تحقيق كفاءة عالية والحفاظ على تكلفة إنتاج تنافسية.

٣-٤-١-٣ المواد السامة والمستدامة

تستخدم بعض الخلايا الشمسية مواد سامة (مثل الرصاص في البيروفسكايت أو الكادميوم في خلايا CdTe)، مما يثير مخاوف بيئية وصحية. البحث عن بدائل صديقة للبيئة وغير سامة، مع الحفاظ على الأداء العالي، هو مجال بحثي نشط ومهم.

٣-٤-١-٤ الإنتاج على نطاق واسع وتوحيد المعايير

تحويل التقنيات البحثية الواعدة من المختبر إلى الإنتاج الصناعي على نطاق واسع يتطلب تذليل العديد من العقبات التقنية والاقتصادية. كما أن توحيد معايير الاختبار والأداء للتقنيات الجديدة أمر ضروري لضمان جودتها وموثوقيتها في السوق .

الفصل الرابع

الاستنتاجات والتوصيات

الفصل الرابع

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات

١. تعد الخلايا الشمسية من أهم تقنيات الطاقة المتجددة لما توفره من مصدر طاقة نظيف ومستدام.
٢. تتأثر كفاءة الخلايا الشمسية بعدة عوامل مثل شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة ونوع المادة شبه الموصلة.
٣. الخلايا المصنوعة من السيليكون البلوري تعد الأكثر استخدامًا بسبب كفاءتها واستقرارها.
٤. التقنيات الحديثة مثل الخلايا متعددة الوصلات والمواد النانوية تسهم في تحسين كفاءة الخلايا الشمسية.
٥. تطوير المواد والتصميم الهندسي للخلية يساعد على تقليل الخسائر وزيادة كفاءة التحويل الكهروضوئي.

التوصيات

١. دعم البحوث العلمية في مجال تطوير تقنيات الخلايا الشمسية.
٢. التوسع في استخدام الطاقة الشمسية كمصدر بديل للطاقة التقليدية.
٣. تحسين تقنيات التبريد وإدارة الحرارة لرفع كفاءة الخلايا.
٤. تطوير المواد شبه الموصلة المستخدمة في تصنيع الخلايا الشمسية.
٥. تعزيز التعاون بين المؤسسات البحثية والصناعية لتطوير تقنيات الطاقة الشمسية.

المصادر والمراجع

[1] Chowdhury, S., *Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems*, Springer, 2020.
[2] Parida, B., Iniyan, S., & Goic, R., "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011.
[3] Twidell, J., & Weir, T., *Renewable Energy Resources*, 3rd Edition, Taylor & Francis, 2015.
[4] Chow, C. K., & Yuen, K. H., "Advances in Solar Energy Conversion and Storage Technologies," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 15–28, 2020.
[5] Green, M. A., *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*, Springer, 2003.
[6] Brabec, C., *Organic Photovoltaics: Materials, Device Physics, and Manufacturing Technologies*, Wiley-VCH, 2003.
[7] Catchpole, K. R., & Polman, A., "Plasmonic solar cells," *Optics Express*, vol. 16, no. 26, pp. 21793–21800, 2008.
[8] Nelson, J., *The Physics of Solar Cells*, Imperial College Press, 2003.
[9] Sze, S. M., & Ng, K. K., *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, 2006.
[10] Streetman, B. G., & Banerjee, S., *Solid State Electronic Devices*, Pearson, 2015.
[11] Green, M. A., *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*, Prentice-Hall, 1982.
[12] Fonash, S., *Solar Cell Device Physics*, Academic Press, 2010.
[13] Luque, A., & Hegedus, S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Wiley, 2011.
[14] Messenger, R., & Ventre, J., *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press, 2010.
[15] Chirilă, A., et al., "Highly efficient CdTe thin-film solar cells," *Nature Materials*, vol. 12, pp. 1107–1111, 2013.
[16] Jackson, P., et al., "High-efficiency CIGS solar cells: status and development," *Progress in Photovoltaics*, vol. 19, pp. 894–897, 2011.
[17] Yamaguchi, M., "Multi-junction solar cells for space applications," *Progress in Photovoltaics*, vol. 11, pp. 93–106, 2003.
[18] Nozik, A., "Quantum dot solar cells," *Physica E*, vol. 14, pp. 115–120, 2002.
[19] Kim, D., et al., "Hybrid solar cells combining organic and inorganic materials," *Advanced Materials*, vol. 25, pp. 1460–1483, 2013.
[20] Snaith, H. J., "Perovskites: The emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells," *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2013.
[21] Park, N. G., "Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology," *Materials Today*, 2015.
[22] Green, M. A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H. J., "The emergence of perovskite solar cells," *Nature Photonics*, 2014.

[23] Saliba, M., et al., "Cesium-containing triple cation perovskite solar cells achieve 21.1% power conversion efficiency," *Energy & Environmental Science*, 2016.
[24] Stranks, S. D., & Snaith, H. J., "High-performance organic–inorganic hybrid perovskite solar cells," *Nature Nanotechnology*, 2015.
[25] Yang, Y., et al., "Solution-processed perovskite solar cells: from materials to devices," *Advanced Materials*, 2018.
[26] Lee, M. M., et al., "Efficient hybrid perovskite solar cells via control of morphology and interlayers," *Science*, 2012.
[27] Grätzel, M., "The advent of perovskite solar cells," *Nature Materials*, 2014.
[28] Kim, H. S., et al., "Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state solar cell," *Scientific Reports*, 2012.
[29] Liu, M., Johnston, M. B., & Snaith, H. J., "Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition," *Nature*, 2013.
[30] Burschka, J., et al., "Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells," *Nature*, 2013.
[31] Albrecht, S., et al., "Perovskite/silicon tandem solar cells with >20% efficiency," *Energy & Environmental Science*, 2016.
[32] Niu, G., et al., "Progress of interface engineering in perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, 2015.
[33] Zhou, H., et al., "High-performance lead-free perovskite solar cells," *Advanced Materials*, 2017.
[34] Green, M. A., et al., "Solar cell efficiency tables," *Progress in Photovoltaics*, 2020.
[35] Deline, C., et al., "The value of bifacial PV across the United States," *Solar Energy*, 2019.
[36] Ponnusamy, K., et al., "Bifacial solar cells: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
[37] Shoukry, R., et al., "Performance analysis of bifacial PV modules," *Energy Procedia*, 2016.
[38] Marion, B., et al., "A practical model for bifacial PV performance," *Solar Energy*, 2017.
[39] Aberle, A. G., "Crystalline silicon solar cells: properties and manufacturing," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000.
[40] Campbell, P., & Green, M. A., "Light trapping properties of pyramidally textured surfaces," *Journal of Applied Physics*, 1986.
[41] Wenham, S. R., et al., *Applied Photovoltaics*, Earthscan, 2007.
[42] Atwater, H. A., & Polman, A., "Plasmonics for improved photovoltaic devices," *Nature Materials*, 2010.
[43] Richter, A., et al., "Status of PERC solar cell technology," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017.

[44] Taguchi, M., et al., "24.7% record efficiency HIT solar cell," *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014.
[45] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A., "Temperature dependence of photovoltaic module performance," *Solar Energy*, 2009.
[46] Hasan, M. A., et al., "Cooling technologies for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.
[47] Sargent, E. H., "Colloidal quantum dot solar cells," *Nature Photonics*, 2012.
[48] Tian, B., et al., "Coaxial silicon nanowires as solar cells," *Nature*, 2007.
[49] Wang, X., et al., "Graphene-based transparent conductive electrodes for organic photovoltaics," *Nano Letters*, 2008.
[50] Lunt, R. R., "Transparent and flexible organic solar cells," *Nature Photonics*, 2012.
[51] Mei, J., et al., "3D printing of perovskite solar cells," *Advanced Materials*, 2017.
[52] Li, J., et al., "3D printing for solar energy harvesting and storage," *Advanced Energy Materials*, 2018.