

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بابل

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء



## تحسين اداء الخلايا الشمسية

### باستخدام مواد نانوية

بحث مقدم الى مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة جامعة بابل وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في قسم الفيزياء.

من قبل الطالب

**عبدالله علي موسى**

بإشراف

**د. علاء نهاد**

١٤٤٧ هـ

٢٠٢٦ م

# الآية القرآنية

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿وَسَخَّرَ لَكُمُ الشَّمْسَ وَالْقَمَرَ دَائِبَيْنِ﴾

صدق الله العلي العظيم

[سورة إبراهيم، الآية ٣٣]

## الإهداء

إلى من غرسوا في قلبي حبَّ العلم، وكانوا السند والدافع في كل خطوة....  
إلى والدي العزيزين، نبض قلبي ومصدر إلهامي، شكرا لصلابتكما حين  
ضعفت، ولحنانكما حين قست الأيام.

إلى أساتذتي الكرام، الذين لم يدخلوا بعلم ولا توجيه...

إلى زملائي وزميلاتي، من تقاسموا معي لحظات التعب والفرح...

إلى كل من دعمني بكلمة، بدعاء، بابتسامة...

أهدي هذا الجهد المتواضع، ثمرة سنوات من السعي والتعب، متمنياً أن

يكون نافعاً ومصدر فخر لكل من شاركني هذا الطريق.

# شكر وامتنان

الحمد لله الذي بنعمته تم الصالحات، والصلاة والسلام على معلم البشرية الخير، وبعد..  
يتقدم الباحث بوافر الشكر وعظيم الامتنان إلى عمادة جامعة بابل، ممثلة بـ  
كلية التربية للعلوم الصرفة، لما قدمته من دعم أكاديمي وبيئة محفزة للبحث والتعلم.  
كما يمتد الشكر والتقدير إلى أساتذة قسم الفيزياء الأفاضل الذين لم ييخلوا علينا  
بعلمهم وتوجيهاتهم طيلة مسيرتنا الدراسية.

وخصّ بالذكر وبأسمى عبارات العرفان، الأستاذ المشرف الدكتور علاء نهاد،  
الذي كان لنصائحه السديدة وتوجيهاته القيمة ومتابعته المستمرة الأثر الأكبر في  
إتمام هذا البحث وخروجه بهذه الصورة. فجزاه الله عنا خير الجزاء، وبارك في  
علمه وعطائه.

كما نسأل الله العلي القدير أن ينفع بهذا العمل، وأن يوفق الجميع لما يحبه  
ويرضاه.

# قائمة المحتويات

العنوان	رقم الصفحة
الآية القرآنية	أ
الإهداء	ب
شكر وامتنان	ت
قائمة المحتويات	ث
قائمة الاشكال	ج
الخلاصة	ح
<b>الفصل الاول</b>	<b>٥-١</b>
المقدمة	٢
تاريخ المواد النانوية	٤-٣
تاريخ الخلايا الشمسية	٤
استثمار المواد النانوية في مجال الخلايا الشمسية	٥
<b>الفصل الثاني</b>	<b>١٤-٦</b>
الخلايا الشمسية	٨-٧
تصنيع الخلايا الشمسية	٩-٨
انواع الخلايا الشمسية	١٢-٩
كفاءة الخلايا الشمسية	١٣-١٢
مزايا وعيوب الخلايا الشمسية	١٤-١٣
تأثير المواد النانوية في اداء الخلايا الشمسية	١٤
<b>الفصل الثالث</b>	<b>٢٤-١٥</b>
المواد النانوية	١٦
طرق تحضير المواد النانوية	١٨-١٦
استخدامات المواد النانوية	٢٠-١٩
طرق تصنيع الخلايا الشمسية	٢٢-٢٠
طرق قياس كفاءة الخلايا الشمسية	٢٤-٢٣
<b>الفصل الرابع</b>	<b>٢٩-٢٦</b>
كفاءة الخلايا الشمسية النانوية	٢٦
كفاءة الخلايا الشمسية بتأثير المواد النانوية	٢٩-٢٧
الاستنتاج	٣٠
المصادر	٣٩-٣١

## قائمة الاشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	رقم الصفحة
الشكل (١-٢)	الخلايا الشمسية السيليكونية أحادية البلورة	١٠
الشكل (٢-٢)	الخلايا الشمسية السيليكونية متعددة البلورات	١٠
الشكل (٣-٢)	الخلايا الشمسية البيروفسكايت.	١١
الشكل (١-٣)	مخطط يوضح الفرق بين منهجية البناء من الأعلى إلى الأسفل (Top-Down) والمنهجية من الأسفل إلى الأعلى (Bottom-Up)	١٦
الشكل (٢-٣)	رسم تخطيطي يوضح البنية الهيكلية لطبقات خلية شمسية من نوع البيروفسكايت. [٥١]	٢٢
الشكل (٣-٣)	منحنيات الخصائص الكهربائية (التيار-الجهد والقدرة-الجهد) لتحديد نقطة الطاقة القصوى للخلية.	٢٤
الشكل (١-٤)	مخطط العلاقة بين $((\alpha h \nu)^2)$ وطاقة الفوتون $(h\nu)$ لاستخراج قيمة فجوة الطاقة البصرية المباشرة لأغشية Cu <sub>2</sub> O:Ag.	٢٧
الشكل (٢-٤)	كفاءة الخلايا الشمسية في الظلام.	٢٨
الشكل (٣-٤)		

## الخلاصة

يتناول هذا البحث دراسة تطور الخلايا الشمسية في ظل التقدم المتسارع في تقنية النانو، مع التركيز على دور المواد النانوية في تحسين كفاءة الأداء الكهروضوئي. تم استعراض التطور التاريخي لكل من المواد النانوية والخلايا الشمسية، بدءاً من الاكتشافات المبكرة للتأثير الكهروضوئي وصولاً إلى التقنيات الحديثة المعتمدة على النانوتكنولوجي.

كما تناول البحث أنواع الخلايا الشمسية المختلفة، بما في ذلك خلايا السيليكون التقليدية، وخلايا الأغشية الرقيقة، والخلايا المتقدمة مثل خلايا البيروفسكايت والخلايا الحساسة للأصباغ. وتم توضيح طرق تصنيع هذه الخلايا، إلى جانب تقنيات قياس كفاءتها تحت ظروف الاختبار القياسية. ركز البحث بشكل أساسي على تأثير المواد النانوية، مثل النقاط الكمومية والأنابيب الكربونية والجرافين، في تحسين امتصاص الضوء، وتقليل الفواقد، وتعزيز نقل الشحنات داخل الخلية. كما تم استعراض تقنيات تحضير المواد النانوية وأهم تطبيقاتها في مجالات متعددة، خاصة في مجال الطاقة.

وأظهرت النتائج أن دمج المواد النانوية في تصميم الخلايا الشمسية يسهم بشكل واضح في رفع كفاءة التحويل الكهروضوئي وتحسين الاستقرار الحراري والكيميائي، رغم وجود تحديات تتعلق بعمر الخلية والتصنيع واسع النطاق. ويؤكد البحث أن تقنيات النانو تمثل مستقبلاً واعداً لتطوير أنظمة الطاقة الشمسية وتحقيق الاستدامة.

# الفصل الاول

## تطور الخلايا الشمسية في عصر تقنية النانو

### ١-١ المقدمة

يشهد مجال الخلايا الشمسية تطورًا متسارعًا مدفوعًا بالحاجة إلى رفع كفاءة تحويل الطاقة وتقليل التكلفة وزيادة العمر التشغيلي للأنظمة الكهروضوئية. ورغم التقدم الكبير في تقنيات السيليكون

والخلايا الرقيقة، ما تزال هناك تحديات تتعلق بخسائر الامتصاص وإعادة الاتحاد الإلكتروني والتدهور الناتج عن العوامل البيئية [١].

برزت تقنية النانو بوصفها أحد أهم الاتجاهات العلمية القادرة على إحداث نقلة نوعية في تحسين أداء الخلايا الشمسية، إذ تعتمد المواد النانوية على خصائص فريدة تظهر عند المقياس النانوي، مثل زيادة مساحة السطح وتحسين الخواص البصرية وتعزيز التوصيلية الكهربائية والتأثيرات الكمية [٢]. يسهم دمج الهياكل النانوية — مثل الجسيمات النانوية والنقاط الكمومية والأنابيب الكربونية — في تحسين امتصاص الضوء وتقليل الفاقد الطاقوي، مما يؤدي إلى رفع كفاءة التحويل الكهروضوئي [٣]. كما تلعب المواد النانوية دورًا مهمًا في تطوير طبقات الامتصاص والنقل داخل أنواع متعددة من الخلايا الشمسية، مثل خلايا البيروفسكايت، والخلايا البوليمرية، والخلايا الحساسة للصبغة (خلايا غرانزل)، إضافة إلى تحسين أداء خلايا السيليكون وCdTe وCIGS، حيث تسهم في تعزيز الاستقرار الحراري والكيميائي وتقليل معدلات التدهور وزيادة موثوقية النظام [٤]. وعليه، تمثل المواد النانوية أداة واعدة لتحسين أداء الخلايا الشمسية من خلال رفع الكفاءة وتحسين الاستقرار وتمكين تصميمات أكثر مرونة وأقل كلفة، مما يعزز من دور الطاقة الشمسية كمصدر مستدام للطاقة في المستقبل [٥].

## ٢-١ تاريخ المواد النانوية

يعود استخدام المواد النانوية إلى عصور قديمة، رغم أن مفهوم “النانو” لم يكن معروفًا آنذاك. فقد استخدم البشر خصائص المواد ذات الأبعاد الدقيقة في صناعة الصلب والمطاط والزجاج الملون.

ومن أبرز الأمثلة التاريخية كأس لايكورجوس الروماني في القرن الرابع الميلادي، والذي احتوى على جسيمات نانوية من الذهب والفضة أظهرت تغييرًا في اللون تبعًا لنوع الإضاءة، مما يعكس فهمًا عمليًا لخصائص المواد عند المقياس النانوي. وفي عام ١٨٥٧م نشر العالم البريطاني Michael Faraday تقريرًا علميًا حول تحضير جسيمات الذهب الغروية، ويُعد من أوائل الدراسات العلمية الموثقة حول المواد النانوية، وفي أربعينيات القرن العشرين بدأ الاهتمام باستخدام المواد النانوية في مجال المحفزات الكيميائية. [٥]

شكل عام ١٩٥٩م نقطة تحول مهمة عندما ألقى الفيزيائي الأمريكي Richard Feynman محاضراته الشهيرة "There's Plenty of Room at the Bottom"، والتي أشار فيها إلى إمكانية التحكم في الذرات والجزيئات بصورة فردية، واضعًا الأساس النظري لعلم النانو الحديث. وفي عام ١٩٧٤م استخدم العالم الياباني Norio Taniguchi مصطلح "تقنية النانو" لأول مرة، معرّفًا إياها بأنها عمليات معالجة المواد على مستوى الذرات والجزيئات. ثم جاء العالم الأمريكي Eric Drexler عام ١٩٨٦م ليعزز المفهوم النظري لعلم النانو من خلال كتابه Engines of Creation، الذي تناول فيه فكرة إعادة ترتيب الذرات وبناء مواد جديدة عبر ما أسماه بالمجمّع (Assembler). [٦]

وفي عام ١٩٩٠م تمكن باحثون في شركة IBM من كتابة اسم الشركة باستخدام ٣٥ ذرة من الزينون، مما عُدّ بداية عملية لعصر النانو. وفي عام ١٩٩١م اكتشف العالم الياباني Sumio Iijima أنابيب الكربون النانوية، وهو اكتشاف أحدث ثورة في علم المواد. كما تمكن العالم الأمريكي Donald Bethune عام ١٩٩٣م من رصد أنابيب كربونية أحادية الجدار. [٤] وشهدت التسعينيات وبداية الألفية الجديدة توسعًا كبيرًا في أبحاث النانو، حيث أنشئت الوكالة الوطنية لتقنية النانو في الولايات المتحدة عام ١٩٩٦م، وبدأت التطبيقات الصناعية الفعلية عام ٢٠٠٤م باستخدام المواد النانوية في تحسين الخصائص الميكانيكية للمطاط وغيره من المواد. كما أسهم العالم العربي Mounir Nayfeh عام ١٩٩٧م في تصنيع جسيمات سيليكون نانوية فائقة الصغر، ما عزز التقدم في هذا المجال. وبذلك تطور علم المواد النانوية من استخدامات تقليدية غير مفهومة علميًا في العصور القديمة إلى علم متكامل قائم على التحكم الدقيق في المادة على المستوى الذري، مع تطبيقات واسعة في المجالات الصناعية والطبية والتكنولوجية [٦].

### ٣-١ تاريخ الخلايا الشمسية

يعود الاهتمام باستغلال الطاقة الشمسية إلى بدايات القرن العشرين، إذ قام رجل الأعمال الأمريكي Frank Shuman ببناء أول مشروع ناجح يعمل بالطاقة الشمسية الحرارية باستخدام أحواض مكافئة لتجميع أشعة الشمس وتتبعها. وفي عام ١٩١٢م أنشأ محطة ضخ قرب القاهرة في مصر، وكانت قادرة على توليد نحو ٥٥ حصاناً ميكانيكياً. إلا أن اندلاع الحرب العالمية الأولى عام ١٩١٤م أدى إلى تدمير المشروع، ولم تُستأنف هذه التقنية إلا لاحقاً في النصف الثاني من القرن العشرين [٧].

أما الوسيلة الثانية لتوليد الكهرباء من الشمس، وهي الخلية الشمسية (الكهروضوئية)، فقد بدأت باكتشاف التأثير الكهروضوئي على يد العالم الفرنسي Edmond Becquerel عام ١٨٣٩م، حيث لاحظ زيادة التيار الكهربائي عند تعريض أقطاب خلية كهروكيميائية للضوء [١٠]. وفي عام ١٨٧٣م نشر المهندس الإنجليزي Willoughby Smith ملاحظاته حول زيادة الموصلية الكهربائية لمادة السيلينيوم عند تعرضها للضوء [١١].

وتبع ذلك عمل كل من Richard Evans Day و William Grylls Adams عام ١٨٧٦م، حيث أثبتا أن إضاءة تقاطع بين السيلينيوم والبلاطين يولد تياراً كهربائياً [١٢]. وفي عام ١٨٨٣م قام المخترع الأمريكي Charles Fritts بتطوير أول خلية شمسية من السيلينيوم، إلا أن كفاءتها لم تتجاوز ١%، وكانت تكلفتها مرتفعة جداً، مما حدّ من استخدامها العملي [٧]. شهدت العقود اللاحقة تطوراً في فهم التأثير الكهروضوئي، خاصة بعد التفسير النظري الذي قدمه العالم Albert Einstein عام ١٩٠٥م، والذي نال عنه جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٢١م [٨]. لكن الانطلاقة الحقيقية للتقنية الكهروضوئية جاءت في أوائل الخمسينيات، عندما نجح كل من Daryl Chapin و Calvin Fuller و Gerald Pearson في مختبرات Bell Laboratories عام ١٩٥٤م في تطوير أول خلية سيليكون عملية بكفاءة بلغت ٤%، ثم ارتفعت لاحقاً إلى ١١%، مما مهّد الطريق لاستخدام الخلايا الشمسية في التطبيقات الفضائية والتجارية [٩].

#### ٤-١ استثمار المواد النانوية في مجال الخلايا الشمسية

يُعد استثمار المواد النانوية في مجال الخلايا الشمسية من أهم الاتجاهات الحديثة في تطوير تقنيات الطاقة المتجددة، إذ تتميز هذه المواد بخصائص فيزيائية وكيميائية فريدة ناتجة عن صغر حجمها

وزيادة نسبة مساحة السطح إلى الحجم، مما يؤدي إلى تحسين التفاعلات الضوئية والكهربائية داخل الخلية الكهروضوئية [١٣].

تسهم الجسيمات النانوية المعدنية في تعزيز ظاهرة الرنين البلازموني السطحي، الأمر الذي يزيد من امتصاص الضوء ويُحسّن احتجاز الفوتونات داخل الطبقة النشطة ويقلل من الفقد الناتج عن الانعكاس [١٤].

كما تسمح النقاط الكمومية بالتحكم في فجوة الطاقة وبالتالي توسيع نطاق الامتصاص ليشمل أطوالاً موجية أكبر من الطيف الشمسي مما يرفع كفاءة التحويل الكهروضوئي [١٥]. كذلك تساهم المواد النانوية الكربونية مثل أنابيب الكربون النانوية والجرافين في تحسين نقل الشحنات وتقليل إعادة اتحاد الإلكترونات والفجوات بفضل موصليتها العالية مما ينعكس على زيادة كثافة التيار وتحسين الأداء العام للخلية [١٦].

وفي الخلايا الحديثة المعتمدة على مواد Perovskite تُستخدم الإضافات النانوية لتخميل العيوب السطحية وتعزيز الاستقرار الحراري والرطوبة ورفع كفاءة التحويل [١٧].

أما في خلايا الأغشية الرقيقة المعتمدة على Cadmium telluride و Copper indium gallium selenide فإن دمج المواد النانوية يساعد في تقليل سماكة الطبقات مع الحفاظ على كفاءة عالية وتحسين الامتصاص البصري والتوصيل الكهربائي [١٨].

كما يمكن دمج مستشعرات نانوية داخل الخلية لمراقبة الأداء وتحسينه في الزمن الحقيقي مما يساهم في إطالة العمر التشغيلي وزيادة الاستقرار [١٣].

الفصل الثاني

الاطار النظري

## ٢-١ الخلايا الشمسية

الخلايا الشمسية هي أجهزة إلكترونية مصنوعة من مواد شبه موصلة تقوم بتحويل ضوء الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية عن طريق التأثير الكهروضوئي، حيث يمتص الفوتون طاقة ويولد زوج إلكترون-فجوة، ويتم فصل هذه الشحنات عند وصلة (p-n) لتوليد تيار كهربائي يمكن استخدامه [١٩].

تُعد الطاقة الشمسية مصدرًا متجددًا ونظيفًا، وصديقًا للبيئة مقارنة بمصادر الوقود الأحفوري، ويمكن استخدامها لتوليد الكهرباء في المنازل، المصانع، والمحطات الشمسية الكبيرة [٢٠]. تشمل المواد المستخدمة في تصنيع الخلايا الشمسية السيليكون (أحادي البلورة ومتعدد البلورات وغير المتبلور)، تيلوريد الكاديوم، سيلينيد النحاس-الإنديوم-الغاليوم، وكبريتيد النحاس-الإنديوم-الغاليوم، مما يؤدي إلى تصنيف الخلايا إلى عدة أجيال وتقنيات مختلفة [٢١].

### • الجيل الأول – رقائق السيليكون

خلايا الجيل الأول تُصنع على رقائق السيليكون، وهي أقدم وأكثر أنواع الخلايا الشمسية شيوعًا بفضل كفاءتها العالية، وتنقسم إلى:

١. **السيليكون أحادي البلورة:** يُصنع من بلورات سيليكون كبيرة باستخدام عملية تشوخر السكي، وكفاءته تتراوح بين ١٧%-١٨% [٢١].
٢. **السيليكون متعدد البلورات:** يُصنع عن طريق تبريد السيليكون المنصهر لتكوين عدة بلورات، وهي أكثر اقتصادية وأقل كفاءة (١٢%-١٤%) [٢٢].

### • الجيل الثاني – الأغشية الرقيقة

الخلايا الشمسية الرقيقة اقتصادية وسمكها صغير مقارنة بالجيل الأول، وتشمل:

١. **السيليكون غير المتبلور (a-Si):** يمكن تصنيعه على ركائز مرنة وبتكلفة منخفضة، مع كفاءة ٤%-٨% [٢١].
٢. **تيلوريد الكاديوم (CdTe):** يتميز بفجوة طاقة مناسبة ومعامل امتصاص عالٍ، وكفاءته ٩%-١١%، لكنه يحتوي على مادة سامة [٢٢].
٣. **CIGS (سيلينيد النحاس-الإنديوم-الغاليوم):** شبه موصل رباعي العناصر بكفاءة ١٠%-١٢% [٢١].

## • الجيل الثالث – تقنيات متقدمة

يشمل الجيل الثالث خلايا جديدة وواحدة مثل:

١. البلورات النانوية (QD): يمكنها توليد عدة أزواج إلكترون-فجوة من فوتون واحد [٢١].
٢. الخلايا البوليمرية: خلايا مرنة مصنوعة من مواد عضوية يمكن تطبيقها على المنسوجات والأقمشة [٢٢].
٣. الخلايا الحساسة للصبغة (DSSC): تعتمد على ثاني أكسيد التيتانيوم الصبغي، سهلة التصنيع وشفافة، وكفاءتها تزيد عن ١٠% [٢٢].
٤. الخلايا المركزة (CPV): تجمع أشعة الشمس في مساحة صغيرة باستخدام عدسات ومرآيا، وتصل كفاءتها إلى أكثر من ٤٠% [٢١].

## ٢-٢ تصنيع الخلايا الشمسية

تُصنع الخلايا الشمسية من مواد متنوعة، وأكثرها شيوعاً السيليكون، بالإضافة إلى مواد أخرى مثل الإنديوم والغالسيوم وسيلينيد الكادميوم، والتي تلعب دوراً رئيسياً في تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية. يتمتع السيليكون بخصائص شبه موصلة جيدة، ويولد أزواج الإلكترون-فجوة عند تعرضه للضوء، مما يسمح بتحويله إلى طاقة كهربائية بكفاءة عالية. تشمل أنواع الخلايا الشمسية الرئيسية خلايا السيليكون البلورية، وخلايا الأغشية الرقيقة، وبعض الخلايا الحديثة مثل بيروفسكايت، وتخضع عمليات تصنيعها لتطوير مستمر لزيادة الكفاءة وخفض التكلفة [٢٣].

تعتمد الخلايا الشمسية التقليدية المصنوعة من السيليكون على إنتاج رقائق السيليكون عالية النقاء باستخدام طريقة تشوخرالسكي، حيث يُصهر السيليكون الخام ويُضاف له عناصر تطعيم دقيقة مثل البورون أو الفوسفور للحصول على نوعية  $p$  أو  $n$  من السيليكون. تُسحب البلورة الناتجة ببطء من السيليكون المنصهر لتكوين سبائك أسطوانية كبيرة، ثم تُقطع هذه السبائك إلى رقائق رقيقة جداً تصل سمكها إلى حوالي ١٦٠-٢٠٠ ميكرون باستخدام مناشير متعددة الأسلاك الماسية [٢٣].

بعد الحصول على الرقائق، تُبنى الخلية الشمسية من خلال تركيب طبقات مختلفة من السيليكون من النوع  $p$  والنوع  $n$  لتكوين وصلة  $pn$ ، وهي المسؤولة عن توليد المجال الكهربائي الداخلي الذي يحرك الإلكترونات والفجوات ويحول الطاقة الضوئية إلى تيار كهربائي. تُغطى الخلية بطبقة زجاجية أو بلاستيكية، ويُضاف الموصل الأمامي والخلفي لتكامل دائرة الإلكترونات وتسمح بتدفق الكهرباء.

أما بالنسبة للخلايا الشمسية الحديثة، مثل خلايا بيروفسكايت الرقيقة (Thin-Film Solar Cells)، فيتم ترسيب طبقاتها على مادة أساسية (substrate) يمكن أن تكون صلبة أو مرنة، حيث تُطبع أولاً طبقة موصلة تليها الطبقة النشطة من البيروفسكايت [٢٤].

تُذاب مركبات البيروفسكايت في مذيب، ثم يُرش المحلول على السطح بكميات صغيرة، ويتبخر المذيب ليترك طبقة رقيقة من البلورة النشطة التي تمتص ضوء الشمس وتحوّله إلى كهرباء. بعد تبلور الطبقة، تُطبع طبقة موصلة أخرى متبوعة بالقطب الكهربائي، ثم يتم نقش الفيلم بالليزر لتشكيل خلايا بيروفسكايت متصلة على التوالي، وأخيراً تُغلف وحدات الطاقة الشمسية كلوح شفاف. تتميز عملية تصنيع خلايا البيروفسكايت بكونها أقل استهلاكاً للطاقة وأكثر استدامة مقارنة بخلايا السيليكون، إذ تقلل الطاقة المستخدمة أثناء التصنيع بشكل كبير، مما يساهم في خفض انبعاثات الغازات الدفيئة [٢٤].

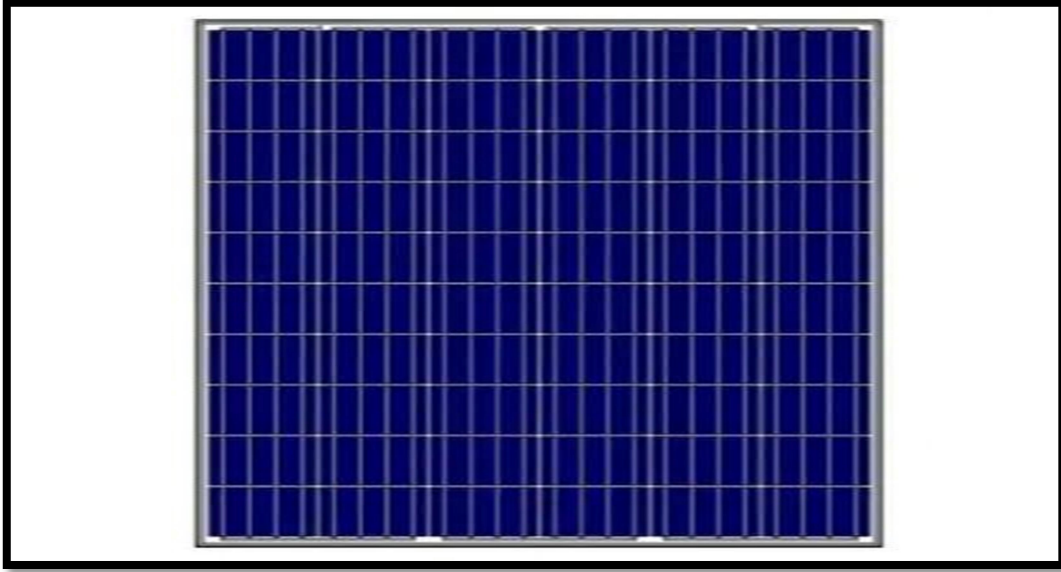
## ٢-٣ أنواع الخلايا الشمسية

### أنواع الخلايا الشمسية

تُعد الخلايا الشمسية الأجهزة الأساسية لتحويل الطاقة الشمسية إلى كهربائية، وتختلف حسب المادة وطريقة التصنيع والكفاءة. فيما يلي أهم أنواعها:

#### ١. الخلايا الشمسية السيليكونية أحادية البلورة

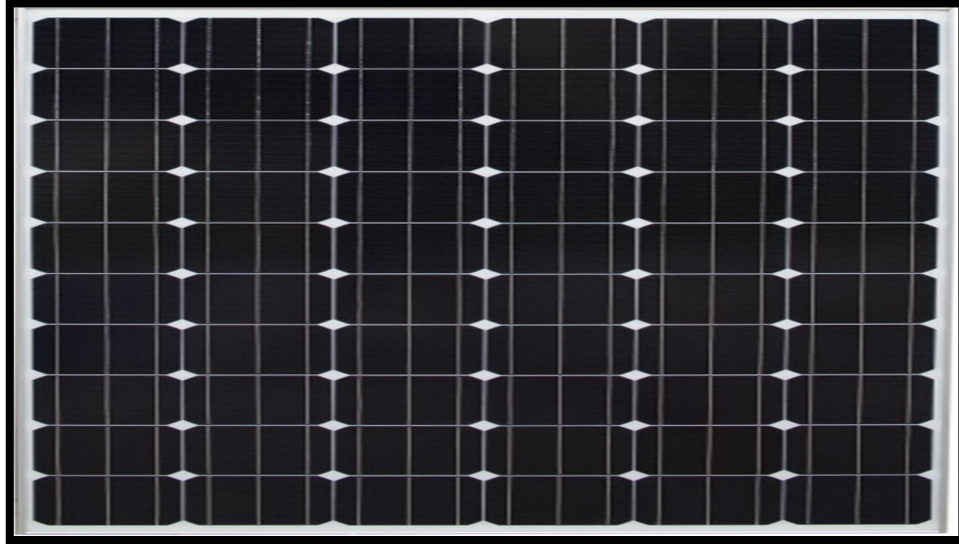
صُنعت هذه الخلايا من السيليكون النقي، ويبدأ تصنيعها بسحب بلورة من السيليكون المصهور للحصول على سبيكة أسطوانية متصلة، ثم تُقَصّ البلورات إلى رقائق وتُصقل لبناء الوصلة الموجبة والسالبة (p-n Junction)، وتُطلى بطبقة مضادة للانعكاس قبل تجميعها كما في الشكل (٢-١). هذه الخلايا عالية الكفاءة، لكن تصنيعها بطيء ويكلف كثيراً [٢٣].



الشكل (١-٢)، الخلايا الشمسية السيليكونية أحادية البلورة. [٢٣]

## ٢. الخلايا الشمسية السيليكونية متعددة البلورات

تصنع من سبائك سيليكونية مربعة الشكل، حيث يُصب السيليكون المصهور في كتل لتكوين ألواح رفيعة تحتوي على عدة بلورات كما موضح في الشكل (٢-٢). هذه الخلايا أقل كفاءة من أحادية البلورة، لذلك تحتاج مساحة أكبر، لكنها أسهل تصنيعًا وأرخص [٢٥].



الشكل (٢-٢)، الخلايا الشمسية السيليكونية متعددة البلورات. [٢٥]

### ٣. الخلايا الشمسية الرقيقة

تتكون من طبقات مادة عالية الامتصاص للفوتونات مثبتة على ركيزة مرنة، وتعمل عبر التأثير الكهروضوئي. ظهرت هذه التكنولوجيا في السبعينيات وتطورت حتى استخدامها اليوم بسبب سعرها المنخفض وكفاءتها الجيدة [٢٤].

### ٤. الخلايا الشمسية ذات الكفاءة العالية

#### أ. خلايا زرنبيد الغاليوم:

مصنوعة من مادة زرنبيد الغاليوم شبه الموصلة، وتصل كفاءتها إلى حوالي ٣٠%، مع مقاومة جيدة للحرارة وخصائص كهربائية ممتازة [٢٣].

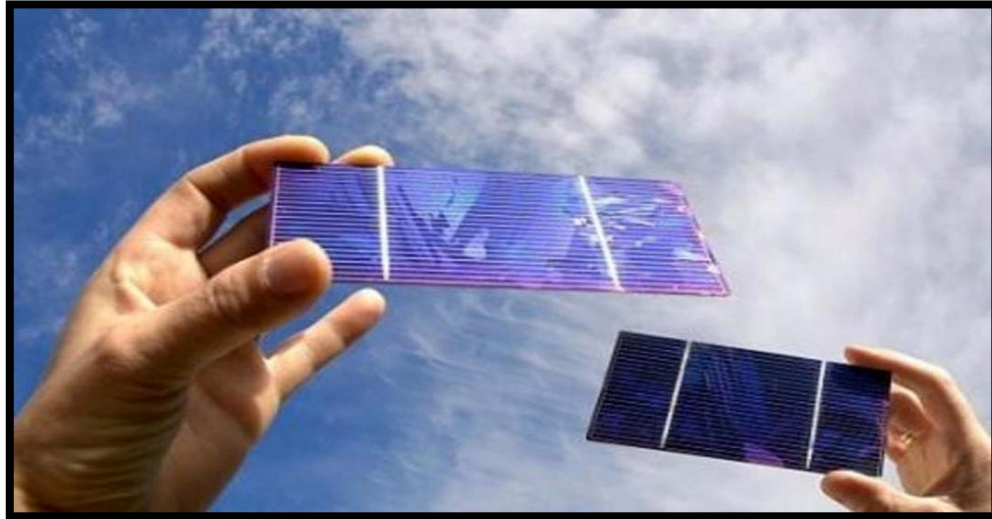
#### ب. الخلايا الشمسية متعددة الوصلات:

تحتوي على طبقات متعددة تمتص أطوال موجية مختلفة من الإشعاع الشمسي، مما يزيد كفاءتها مقارنة بالخلايا أحادية الوصلة [٢٦].

### ٥. الخلايا التكنولوجية المستجدة

#### أ. خلايا بيروفسكايت الشمسية: [٢٣]

تستفيد من مواد مثل الكلور والبروم واليود والرصاص، رخيصة نسبياً وذات كفاءة عالية، لكنها محدودة العمر والاستخدام. كما في الشكل (٢-٣):



الشكل (٢-٣)، الخلايا الشمسية البيروفسكايت. [٢٣]

#### ب. الخلايا الشمسية العضوية:

تتكون من طبقات مبلعمة، رخيصة لكنها ذات انتشار محدود وكفاءة منخفضة نسبياً.

### ج. الخلايا الشمسية الصبغية:

تصنع من ثنائي أكسيد التيتانيوم، وتغلف بمستشعرات رقيقة باستخدام تكنولوجيا النانو. لا تزال تحت التجربة المخبرية رغم كفاءتها النظرية العالية.

### ٢-٤ كفاءة الخلايا الشمسية

كفاءة الخلية الشمسية هي مقياس لقدرة الخلية على تحويل الطاقة الضوئية القادمة من الشمس إلى طاقة كهربائية. يتم التعبير عنها عادةً بالنسبة المئوية، حيث تقارن الطاقة الكهربائية الناتجة بالطاقة الشمسية الساقطة على سطح الخلية [٢٣].

لحساب الطاقة الكهربائية الناتجة، تُستخدم معادلة تعتمد على جهد الدائرة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) والتيار الدائرة القصيرة ( $I_{sc}$ ) ومعامل ملء الخلية الشمسية  $FF$ ، وهو معيار يقيس مدى استغلال الخلية لقدرتها القصوى على توليد الطاقة، ويُعبر عنه بالمعادلة التالية (٢-١) [٢٤]:

$$P_{out} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \dots \dots (1 - 2)$$

تمثل الطاقة الشمسية الساقطة على سطح الخلية كمية الطاقة التي تصل من الشمس إلى مساحة الخلية، ويمكن حسابها بضرب شدة الإشعاع الشمسي  $G$  في مساحة الخلية  $A$ ، كما يلي [٢٧]:

$$P_{in} = G \times A \dots \dots (2 - 2)$$

بعد معرفة الطاقة الناتجة والطاقة الشمسية الساقطة، يمكن حساب كفاءة الخلية الشمسية ( $\eta$ ) كنسبة مئوية باستخدام المعادلة (٢-٣):

$$\eta = \frac{p_{out}}{p_{in}} \times 100 \dots \dots (3 - 2)$$

على سبيل المثال، إذا كان جهد الدائرة المفتوحة للخلية ٠.٦ فولت، والتيار الدائرة القصيرة ٥ أمبير، ومعامل الملء ٠.٧٥، ومساحة الخلية ٠.٠١ متر مربع، وشدة الإشعاع الشمسي ١٠٠٠ واط/م<sup>2</sup>، فإن الطاقة الناتجة ستكون ٢.٢٥ واط، بينما الطاقة الشمسية الساقطة تبلغ ١٠ واط، مما يعطي كفاءة تساوي ٢٢.٥% [٢٨].

من الضروري التفرقة بين الكفاءة النظرية والكفاءة العملية. فالكفاءة النظرية تعبر عن الحد الأعلى لنسبة الطاقة التي يمكن تحويلها من ضوء الشمس إلى كهرباء في ظروف مثالية دون أي فقد، وتعتمد على الحسابات والنماذج الرياضية المثالية، بينما الكفاءة العملية هي النسبة الفعلية للطاقة المحولة في

التطبيقات الواقعية، حيث تتأثر بعوامل متعددة مثل ظروف الإشعاع، درجة الحرارة، والخسائر الداخلية للخلية، مما يجعلها دائماً أقل من الكفاءة النظرية [٢٩].  
أما الكفاءة المثالية للخلية الشمسية، فهي أقصى نسبة طاقة يمكن تحويلها من ضوء الشمس إلى كهرباء في ظروف مثالية، وعادةً لا تتجاوز حوالي ٣٣٪ للسيليكون البلوري، وهي تمثل الهدف الذي تسعى عمليات تطوير وتصنيع الخلايا الشمسية الحديثة لتحقيقه من أجل رفع كفاءة التحويل وتقليل فاقد الطاقة [١].

## ٥-٢ مزايا وعيوب الخلايا الشمسية

### ١-٥-٢ مميزات الخلايا الشمسية

١. الخلايا الشمسية تعتبر تقنية صديقة للبيئة، فهي لا تنتج أي تلوث أو غازات دفيئة أثناء توليد الكهرباء، مما يجعلها خياراً مستداماً للطاقة النظيفة [٣٠].
٢. تستمد الخلايا الشمسية طاقتها من الشمس، وهو مصدر متجدد وغير محدود للطاقة، مما يتيح لها تلبية الاحتياجات المستقبلية للطاقة دون نفاذ المصدر [٣١].
٣. تكلفة صيانة الخلايا الشمسية منخفضة نسبياً، إذ أن عمرها طويل قد يصل إلى أكثر من ٢٠ عاماً، ولا تحتوي على أجزاء متحركة كبيرة، ما يقلل الحاجة للصيانة الدورية [٣٢].
٤. تمتاز الخلايا الشمسية بمرونتها في الاستخدام، فهي مناسبة لمختلف التطبيقات المنزلية، الصناعية، والتجارية، كما يمكن استخدامها في المناطق النائية التي لا تصلها الشبكات الكهربائية [٣٣].
٥. تكنولوجيا الخلايا الشمسية في تطور مستمر، إذ تعمل الابتكارات في المواد وتقنيات التركيب على تحسين كفاءتها وزيادة فعالية توليد الطاقة [٣٤].

### ٢-٥-٢ سلبيات الخلايا الشمسية

١. أحد أبرز عيوب الخلايا الشمسية هو ارتفاع تكلفة تركيبها الأولية، والتي تشمل الألواح، العاكس، البطاريات، والأسلاك، مما يجعل الاستثمار المبدئي مرتفعاً [٣٥].
٢. كفاءة التحويل في معظم الخلايا الشمسية لا تزال محدودة، وتتأثر بالعوامل البيئية مثل شدة الضوء ودرجة الحرارة، ما يجعل الطاقة المنتجة أقل من الطاقة الشمسية المتاحة [٣٦].
٣. الخلايا الشمسية تولد الكهرباء فقط خلال ساعات النهار، ولذا تحتاج إلى أنظمة تخزين للطاقة مثل البطاريات لاستخدام الكهرباء في الليل أو أيام الغيوم، مما يزيد التكلفة [٣٧].

٤. تحتاج الخلايا الشمسية إلى مساحة كبيرة لتوليد كميات كبيرة من الكهرباء، وقد تكون بعض الأسطح غير كافية لتركيب العدد المطلوب من الألواح [٣٨].

## ٦-٢ تأثير المواد النانوية في أداء الخلايا الشمسية

شهدت الخلايا الشمسية تطورًا ملحوظًا نتيجة توظيف تقنيات النانوتكنولوجي في بنيتها الداخلية، إذ أسهمت المواد النانوية في تحسين الأداء الكهروضوئي من خلال تعديل الخصائص البصرية والإلكترونية للمادة شبه الموصلة. إن تقليص أبعاد المواد إلى المقياس النانوي يؤدي إلى تغيرات في فجوة الطاقة وزيادة في المساحة السطحية الفعالة وتحسين آليات انتقال الشحنات، وهو ما ينعكس بصورة مباشرة على كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية [٣٩].

يُعد استخدام نقاط الكم الغروية أحد أبرز تطبيقات النانوتكنولوجي في الخلايا الشمسية، حيث تتيح هذه الجسيمات شبه الموصلة إمكانية التحكم في فجوة النطاق الطاقوي من خلال تغيير حجمها، مما يسمح بامتصاص نطاق أوسع من الطيف الشمسي وزيادة توليد أزواج الإلكترون-الفجوة، وبالتالي رفع الكفاءة الكهروضوئية للخلايا الشمسية. كما أن إدخال البنى النانوية مثل الأسلاك النانوية في تصميم الخلايا الشمسية يسهم في تعزيز ظاهرة حبس الضوء داخل المادة شبه الموصلة، الأمر الذي يزيد من احتمالية امتصاص الفوتونات ويقلل من مسافة انتقال الشحنات، مما يؤدي إلى تقليل إعادة الاتحاد وتحسين كفاءة التحويل الكهروضوئي [٤٠].

وفي سياق الخلايا الحساسة للأصباغ، أثبتت بلورات أكسيد التيتانيوم النانوية فعاليتها نظرًا لمساحتها السطحية العالية وقدرتها على تحسين امتصاص الضوء ونقل الإلكترونات، مما أسهم في تطوير خلايا شمسية منخفضة الكلفة وذات أداء محسّن. أما التطورات الحديثة في مجال رفع كفاءة الخلايا الشمسية، فقد وثقتها تقارير متخصصة في تحديثات كفاءة الخلايا البحثية، والتي تُظهر التحسن المستمر في الأداء نتيجة إدخال مواد وهياكل نانوية متقدمة ضمن البنية التصميمية للخلية الشمسية [٤١].

## الفصل الثالث

تقنيات تحضير المواد النانوية ومنهجية تصنيع  
الخلايا الشمسية

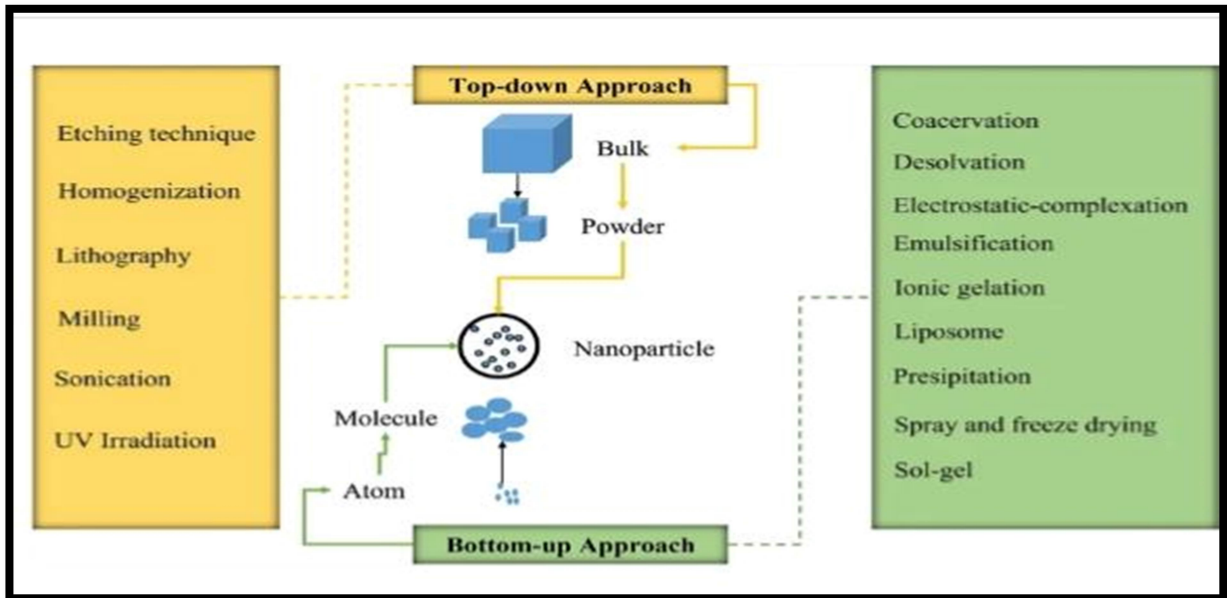
### ١-٣ المواد النانوية

المواد النانوية هي مواد تمتلك بُعدًا واحدًا على الأقل ضمن المقياس النانوي الذي يتراوح بين (١-١٠٠ نانومتر)، وتتميز بنسبة مساحة سطح إلى حجم عالية جدًا. وعلى عكس المواد التقليدية، فإن خصائصها الفيزيائية والكيميائية تعتمد بشكل أساسي على حجمها وأبعادها، مما يمنحها خصائص فريدة مثل الخصائص الحرارية والكهربائية والمغناطيسية والبصرية المميزة. [٤٢] [٤٣]

تُظهر المواد النانوية سلوكًا مختلفًا بسبب صغر حجمها، حيث تصبح الذرات على السطح أكثر نشاطًا، مما يؤدي إلى تغيير خصائص مثل درجة الانصهار والتفاعل الكيميائي. كما أن تأثيرات التأثيرات الكمومية تلعب دورًا مهمًا في تحديد سلوك الإلكترونات داخل هذه المواد. [٤٤]

### ٢-٣ طرق تحضير المواد النانوية

تُحضّر المواد النانوية باستخدام منهجين رئيسيين، هما طريقة البناء من الأعلى إلى الأعلى (Bottom-Up) وطريقة البناء من الأعلى إلى الأسفل (Top-Down) كما في الشكل (١-٣). يعتمد المنهج الأول على بناء الجسيمات النانوية ابتداءً من الذرات أو الجزيئات، بينما يعتمد المنهج الثاني على تصغير المواد الكبيرة إلى الحجم النانوي باستخدام تقنيات ميكانيكية أو فيزيائية. [٤٢]



الشكل (١-٣): مخطط يوضح الفرق بين منهجية البناء من الأعلى إلى الأسفل (Top-Down) والمنهجية من الأسفل إلى الأعلى (Bottom-Up). [٤٢]

### ١. طريقة البناء من الأسفل إلى الأعلى (Bottom-Up)

تعتمد هذه الطريقة على تجميع الذرات أو الجزيئات تدريجيًا لتكوين مواد نانوية. ومن أهم التقنيات المستخدمة في هذا المنهج: طريقة سول-جل، والترسيب الكيميائي، والاختزال الكيميائي، والتخليق الأخضر، والتخليق الكيميائي الحيوي، والغزل، والتحلل الحراري، وترسيب الطبقات الذرية، والتجميع الذاتي الجزيئي، والترسيب الكيميائي للبخار. وتُعد هذه الطريقة فعّالة في إنتاج جسيمات نانوية ذات تحكم جيد في الحجم والتركيب. [٤٥]

### ٢. طريقة البناء من الأعلى إلى الأسفل (Top-Down)

في هذه الطريقة يتم تقليل حجم المواد الضخمة إلى مقياس النانو باستخدام تقنيات فيزيائية أو ميكانيكية. وتشمل هذه التقنيات الطحن الميكانيكي، والطباعة الحجرية، والترسيب بالرش، والحفر، والترسيب الفيزيائي للبخار، والتفريغ القوسي. وتُستخدم هذه الطريقة بشكل واسع في التطبيقات الصناعية لإنتاج المواد النانوية من المواد الصلبة التقليدية. [٤٣]

### ٣. الطحن الميكانيكي (Ball Milling)

يُعد الطحن الميكانيكي من أكثر الطرق استخدامًا في إنتاج المواد النانوية، حيث يتم طحن المواد الصلبة باستخدام كرات معدنية داخل مطحنة خاصة حتى يصل حجم الجسيمات إلى المقياس النانوي. وتُستخدم هذه الطريقة في تصنيع السبائك النانوية والطلاءات والمركبات النانوية المختلفة. [٤٢]

### ٤. الترسيب بالرش (Sputtering)

تُستخدم هذه الطريقة في إنتاج طبقات رقيقة من المواد النانوية داخل بيئة مفرغة، حيث يتم قذف جسيمات من مادة صلبة (الهدف) لترسب على سطح مادة أخرى، مما يؤدي إلى تكوين طبقات نانوية عالية الجودة. [٤٢]

### ٥. الطباعة الحجرية النانوية (Nanolithography)

تعتمد هذه التقنية على استخدام حزم إلكترونية أو ضوئية مركزة لإنشاء هياكل نانوية دقيقة على مواد حساسة للضوء. وتُستخدم هذه الطريقة في تصنيع الأجهزة الإلكترونية الدقيقة، إلا أنها تُعد مكلفة وتتطلب أجهزة متطورة. [٤٤]

## ٦. التحلل الحراري (Pyrolysis)

تُعد هذه الطريقة من الطرق الفعالة اقتصاديًا لإنتاج الجسيمات النانوية، حيث يتم استخدام درجات حرارة عالية لتفكيك المواد الكيميائية وتحويلها إلى جسيمات نانوية. وتُستخدم هذه الطريقة بشكل واسع في الإنتاج الصناعي بسبب بساطتها وكفاءتها العالية. [٤٢]

## ٧. طريقة سول-جل (Sol-Gel)

تُستخدم طريقة سول-جل لتحضير الجسيمات النانوية المعدنية من محاليل تحتوي على مركبات أولية مثل الأكاسيد أو الكلوريدات. وتتحول هذه المحاليل تدريجيًا إلى مادة هلامية (جل) ثم إلى جسيمات صلبة نانوية بعد المعالجة الحرارية. [٤٢]

## ٨. الترسيب الكيميائي للبخار (CVD)

تعتمد هذه التقنية على استخدام غازات متفاعلة تترسب على سطح مادة معينة لتكوين طبقات أو هياكل نانوية. وتتميز هذه الطريقة بإمكانية إنتاج مواد نانوية عالية الجودة، لكنها تتطلب تجهيزات خاصة وقد تنتج عنها نواتج ثانوية غازية. [٤٥]

### ٣-٣ استخدامات المواد النانوية

تُعدّ المواد النانوية من المواد المتقدمة التي تمتلك تطبيقات واسعة في مختلف المجالات العلمية والصناعية، وذلك بسبب خصائصها الفريدة المرتبطة بصغر حجمها ومساحتها السطحية الكبيرة، والتي تجعلها أكثر كفاءة من المواد التقليدية في العديد من الاستخدامات [٤٢].

#### ١. المجال الطبي (Nano medicine)

تُستخدم المواد النانوية في المجال الطبي في توصيل الأدوية بدقة إلى الخلايا المستهدفة، مما يقلل من الآثار الجانبية ويحسن كفاءة العلاج. كما تُستخدم في تشخيص الأمراض مثل السرطان باستخدام تقنيات التصوير الحديثة، إضافةً إلى دورها في الهندسة النسيجية والعلاج الجيني. وقد ساهمت أيضاً في تطوير اللقاحات الحديثة، مثل لقاحات كوفيد-١٩، بفضل قدرتها على نقل المواد الحيوية داخل الجسم بكفاءة عالية [٤٣].

#### ٢. مجال الإلكترونيات والتقنيات الحديثة

تلعب المواد النانوية دوراً مهماً في تطوير الأجهزة الإلكترونية، حيث تُستخدم في تصنيع الشرائح الإلكترونية والدوائر المتكاملة، مما يؤدي إلى تصغير حجم الأجهزة وزيادة سرعتها. كما تدخل في الإلكترونيات الضوئية ووسائط تخزين البيانات ذات السعة العالية، مما يدعم التطور التكنولوجي الحديث [٤٢].

#### ٣. مجال الطاقة

تُستخدم المواد النانوية في تحسين كفاءة الخلايا الشمسية وزيادة قدرتها على تحويل الطاقة. كما تُستخدم في البطاريات القابلة لإعادة الشحن والمكثفات الفائقة التي تمتاز بسرعة الأداء. إضافةً إلى ذلك، تدخل في خلايا الوقود التي تُعد من مصادر الطاقة النظيفة والمستدامة [٤٥].

#### ٤. المجال البيئي

تُساهم المواد النانوية في حماية البيئة من خلال استخدامها في تنقية المياه والهواء وإزالة الملوثات الكيميائية والعضوية. كما تُستخدم كمواد محفزة في التفاعلات الكيميائية التي تساعد على تفكيك المواد السامة، مما يقلل من التلوث البيئي [٤٢].

#### ٥. المجال الصناعي والهندسي

تُستخدم المواد النانوية في تحسين خواص المواد الصناعية، حيث تزيد من الصلابة والمتانة ومقاومة التآكل. كما تدخل في تصنيع الطلاءات الواقية والمواد خفيفة الوزن المستخدمة في صناعة السيارات والطائرات، مما يساهم في تحسين الأداء وتقليل استهلاك الطاقة [٤٤].

## ٦. المجال الزراعي والغذائي

في المجال الزراعي، تُستخدم المواد النانوية في تطوير الأسمدة الذكية التي تحسن امتصاص العناصر الغذائية وتزيد الإنتاجية. كما تُستخدم في مراقبة جودة الأغذية والكشف عن الملوثات، بالإضافة إلى تحسين مواد التعبئة والتغليف [٤٢].

## ٧. مستحضرات التجميل والمنسوجات

تُستخدم المواد النانوية في صناعة مستحضرات التجميل مثل واقيات الشمس، حيث توفر حماية فعالة من الأشعة فوق البنفسجية. كما تدخل في تصنيع الأقمشة المضادة للبكتيريا والماء، مما يزيد من كفاءة المنتجات النسيجية [٤٣].

## ٨. التطبيقات التقنية والعسكرية

تُستخدم المواد النانوية في تطوير أجهزة الاستشعار عالية الحساسية، وتقنيات الحماية من الإشعاع، إضافةً إلى استخدامها في تحسين أداء الأنظمة التقنية المتقدمة [٤٥].

## ٣-٤ طرق تصنيع الخلايا الشمسية

تصنيع الخلايا الشمسية يعتمد على عدة مراحل وتقنيات تختلف باختلاف نوع الخلية (مثل السيليكون البلوري أو خلايا الأغشية الرقيقة أو الخلايا النانوية الحديثة)، وتشمل هذه المراحل خطوات من تصنيع المواد الأولية إلى تشكيل الطبقات الفوتوفولتاكية وتجميع الوحدة النهائية [٤٦].

### ١. تصنيع السيليكون عالي النقاوة

أول خطوة في تصنيع خلايا السيليكون هي إنتاج السيليكون عالي النقاوة من السيليكا الخام باستخدام عمليات كيميائية مثل عملية سيمينز (Siemens process)، حيث يتفاعل غاز مركب من السيليكون والهيدروجين عند درجات حرارة عالية لتكوين رودات من السيليكون النقي [٤٧].

بعد ذلك، تُسخن هذه المواد حتى تتحول إلى كتلة صلبة كبيرة تسمى الإنغوت (Ingot)، والتي يمكن أن تكون أحادية البلورة أو متعددة البلورات. ثم تُقَطَّع هذه الألواح إلى رقائق رقيقة (Wafers) بسمك حوالي ١٦٠-٢٠٠ ميكرون باستخدام مناشير ماسية [٤٨].

## ٢. تحضير رقائق السيليكون وتجهيز السطح (Wafer Processing)

بعد تقطيع الرقائق، يتم معالجة السطح بطرق مثل النقش الكيميائي (chemical texturing) أو الحفر بالليزر لتحسين امتصاص الضوء وتقليل الانعكاس. ثم تُطهى الرقائق في بيئة تحتوي على غازات تطعيم (مثل الفوسفور أو البورون) لإضافة شوائب تتحكم في خصائصها شبه الموصلة [٤٩].

هذه الطبقات من نوع "p" و "n" تُخلق على السطح لتكوين وصلة p-n، وهي الجزء المسؤول عن فصل الشحنات الكهربائية عند تعرض الخلية للضوء [٤٩].

## ٣. ترسيب وتوصيل الطبقات الفوتوفولتائية (Deposition and Metallization)

بعد تجهيز الطبقات شبه الموصلة، تُستخدم تقنيات مختلفة لتكوين الطبقات الفعالة في الخلية، مثل: التصفيح بالرش أو الترسيب الكيميائي للبخر (Chemical Vapor Deposition, CVD) لتكوين طبقات مثل أكسيد السيليكون أو أكسيد التيتانيوم.

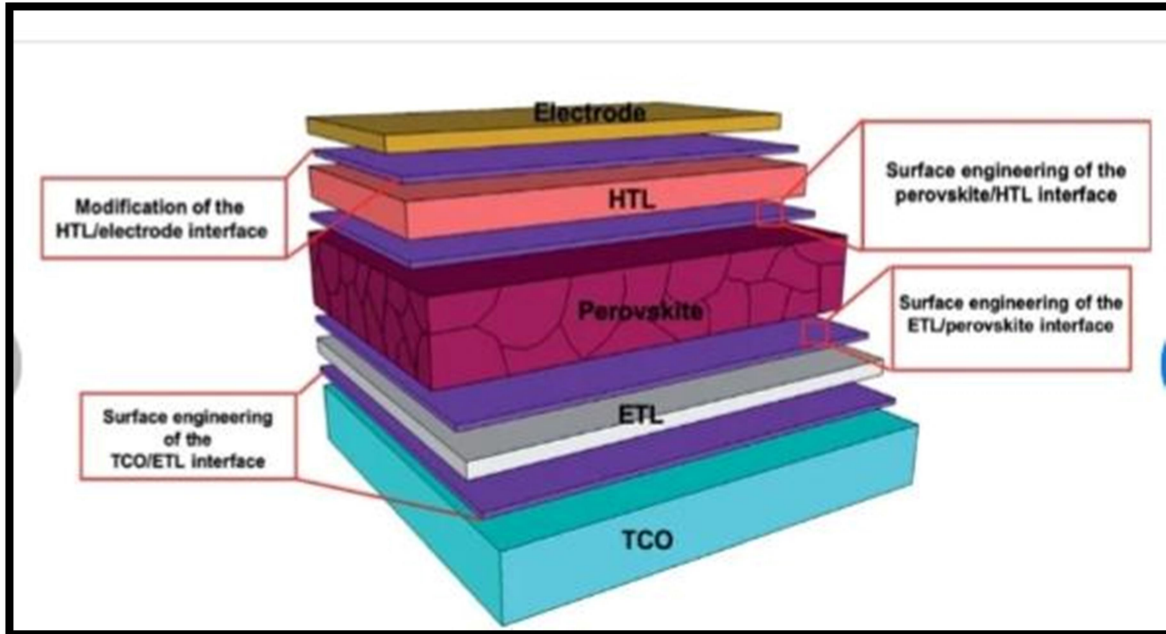
الطباعة بالشاشة (screen printing) لطباعة خطوط التوصيل المعدنية (مثل فضة أو ألومنيوم) لجمع التيار الكهربائي الناتج [٥٠].

## ٤. تقنيات تصنيع خلايا النانو والخلايا الحديثة

بالإضافة إلى تصنيع السيليكون التقليدي، هناك تقنيات حديثة أكثر تطوراً تُستخدم في تصنيع أنواع جديدة من الخلايا، مثل خلايا البيروفسكايت (Perovskite Solar Cells)، والتي تعتمد على ترسيب طبقات رقيقة من مواد البيروفسكايت باستخدام طرق مثل:

- Spin coating (تدوير الرقائق مع محلول البيروفسكايت لتكوين طبقة رقيقة).
- Doctor blade coating و slot die coating لتطبيق المواد على نطاق واسع.
- الترسيب بالبخر أو الترسيب المحسن (vapour assisted) لزيادة جودة الفيلم الكهروضوئي [٥١].

تهدف هذه الطرق إلى خفض التكلفة، تحسين جودة الطبقة الفعالة، وتسهيل الانتقال من المختبر إلى التصنيع التجاري [٥١]. الترسيب كما موضح في الشكل (٣-٢):



الشكل (٣-٢)، رسم تخطيطي يوضح البنية الهيكلية لطبقات خلية شمسية من نوع البيروفسكايت. [٥١]

#### ٥. التجميع النهائي للوحدات الشمسية

بعد تصنيع الخلايا المفردة، يتم تجميعها في وحدات أكبر (Modules) عن طريق وصل الخلايا كهربائياً (سلسلة وتوازي) ثم وضعها بين أغشية واقية وإطار زجاجي أو بلاستيكي مقاوم للعوامل الجوية.

ثم تُجرى اختبارات جودة وكفاءة تحت ظروف الاختبار القياسية (STC) قبل طرحها في السوق [٥٢].

### ٥-٣ طرق قياس كفاءة الخلايا الشمسية

قياس كفاءة الخلايا الشمسية يهدف لتحديد نسبة الطاقة الكهربائية الناتجة إلى الطاقة الضوئية الساقطة على الخلية، وهي مؤشر رئيسي لجودة وأداء الخلية. تعتمد هذه القياسات على معايير دقيقة وتحكم في الظروف التجريبية [٥٣].

#### ١. القياس تحت ظروف الاختبار القياسية (Standard Test Conditions – STC)

يتم اختبار الخلية تحت ظروف محددة موحدة تشمل:

- إشعاع شمسي بقوة ١٠٠٠ واط/م<sup>2</sup>
- درجة حرارة ٢٥°م
- طيف ضوء قياسي AM1.5

يتم توصيل الخلية إلى دائرة كهربائية قابلة للتحكم وقياس التيار ( $I$ ) والجهد ( $V$ ) لإيجاد النقطة القصوى للطاقة ( $P_{max}$ ).

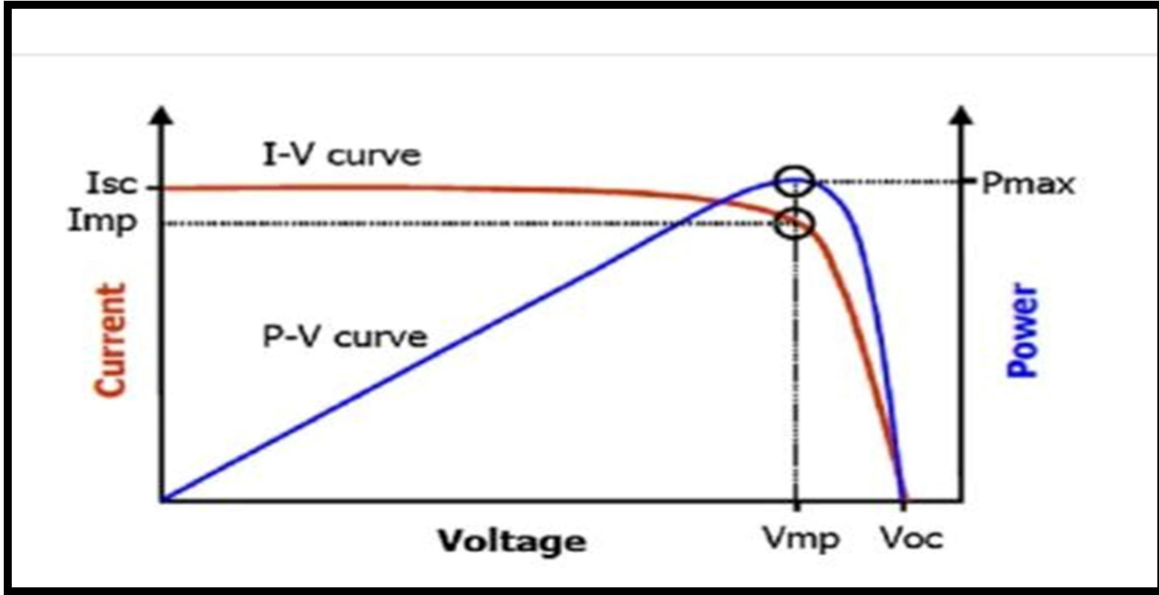
الكفاءة ( $\eta$ ) تحسب بالعلاقة كما في معادلة (١-٣):

$$\eta = \frac{p_{max}}{p_{in}} \times 100\% \dots \dots (1 - 3)$$

حيث  $p_{in}$  هي الطاقة الشمسية الساقطة على مساحة الخلية [٥٤].

#### ٢. القياس باستخدام منحنى I-V (Current-Voltage Curve Measurement)

- يتم توصيل الخلية بمصدر ضوء اصطناعي يمكن التحكم في شدته.
- يتم تغيير الجهد تدريجيًا وقياس التيار عند كل قيمة للحصول على منحنى I-V.
- من المنحنى تُستخرج القيم: الجهد المفتوح ( $V_{oc}$ )، التيار القصوى ( $I_{sc}$ )، وكفاءة الخلية ( $P_{max}$ ). كما في الشكل (٣-٣)، هذه الطريقة الأكثر شيوعًا في المختبرات لمعرفة أداء الخلية تحت ضوء مختلف [٥٥].



الشكل (٣-٣)، منحنيات الخصائص الكهربائية (التيار-الجهد والقدرة-الجهد) لتحديد نقطة الطاقة القصوى للخلية.

٣. القياس باستخدام منحنى (P-V (Power-Voltage Curve Measurement))
- يركز على تحديد النقطة التي تعطي أقصى طاقة كهربائية ممكنة (Maximum Power Point - MPP).
  - يُستخدم جهاز MPPT (Maximum Power Point Tracker) لتسجيل القدرة عند تغيير الجهد والتيار.
- مفيد لتقييم أداء الخلايا ضمن أنظمة توليد الطاقة الفعلية [٥٦].

٤. القياس باستخدام جهاز مطياف الشمس الاصطناعي (Solar Simulator Spectral Response)

- يستخدم محاكاة الطيف الشمسي الكامل أو الجزئي لمعرفة حساسية الخلية لكل طول موجي من الضوء.
- يعطي بيانات Quantum Efficiency (QE) التي تصف نسبة الفوتونات المحولة إلى إلكترونات [٥٧].

٥. القياس تحت ظروف الطقس الفعلية (Outdoor or Field Testing)

- يتم تركيب الخلايا في بيئة حقيقية وتسجيل الإنتاج الكهربائي على مدى أيام أو أشهر.
- يعطي تقييماً واقعياً لأداء الخلية مقارنة بالاختبارات المخبرية.
- يستخدم لقياس فقدان الكفاءة بسبب الغبار، الحرارة، أو زاوية السقوط [٥٨].

## الفصل الرابع

# الخلايا الشمسية النانوية

٤-١ كفاءة الخلايا الشمسية النانوية

تُعد كفاءة الخلايا الشمسية النانوية من الموضوعات الحديثة والمهمة في تكنولوجيا الطاقة الشمسية، حيث تهدف هذه التقنية إلى تحسين عملية تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية من خلال استخدام مواد وهياكل على مقياس النانو. وتُعرّف الكفاءة بأنها النسبة بين القدرة الكهربائية الناتجة من الخلية والقدرة الضوئية الساقطة عليها، ويُعبّر عنها بالعلاقة الآتية:

$$\eta = \left( \frac{p_{out}}{p_{in}} \right) \times 100\% \dots \dots (1 - 4)$$

إذ تعكس هذه النسبة مدى قدرة الخلية على استغلال الإشعاع الشمسي بأكبر قدر ممكن [٥٩].

تعتمد الخلايا الشمسية النانوية على خصائص فيزيائية مميزة تظهر عند تصغير أبعاد المواد إلى مستويات نانوية، حيث يؤدي ذلك إلى تحسين امتصاص الضوء وتقليل الفواقد الطاقية. فبفضل ظاهرة تأثير الحجم الكمي يمكن التحكم في فجوة الطاقة للمواد، مما يسمح بامتصاص نطاق أوسع من الطيف الشمسي مقارنة بالخلايا التقليدية، وهو ما ينعكس بشكل مباشر على زيادة الكفاءة. كما أن استخدام تراكيب نانوية مثل النقاط الكمومية والأسطح المحسنة يقلل من انعكاس الضوء ويزيد من كمية الإشعاع الممتص [٦٠].

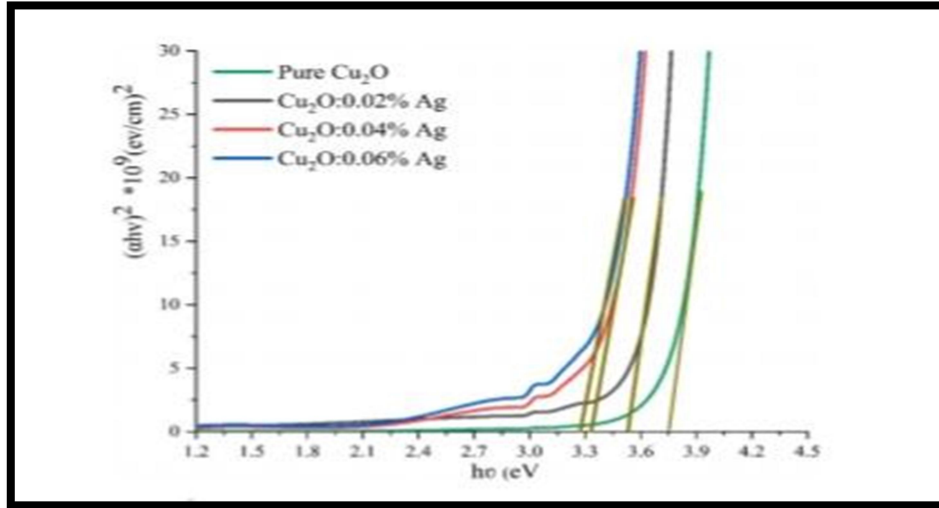
إضافة إلى ذلك، تسهم الهياكل النانوية مثل الأسلاك والأنابيب النانوية في تحسين حركة الشحنات داخل الخلية، إذ توفر مسارات أكثر كفاءة لنقل الإلكترونات، مما يقلل من احتمالية إعادة اتحادها مع الفجوات ويزيد من التيار الكهربائي الناتج. كما أن التحكم الدقيق في البنية الإلكترونية للمواد النانوية يساعد على تحسين فصل الشحنات وتقليل الفقد الداخلي، وهو عامل أساسي في رفع كفاءة الخلايا [٦١].

وعلى الرغم من التطور الكبير الذي حققته هذه التقنية، لا تزال هناك تحديات تحد من الوصول إلى كفاءة مثالية، من أبرزها عدم الاستقرار طويل الأمد لبعض المواد النانوية، وتأثيرها بالعوامل البيئية مثل الرطوبة ودرجات الحرارة، فضلاً عن صعوبة التصنيع على نطاق واسع. ومع ذلك، فإن التقدم المستمر في مجال تقنية النانو يشير إلى إمكانية تجاوز هذه التحديات مستقبلاً، مما يجعل الخلايا الشمسية النانوية من أكثر التقنيات الواعدة في تحسين كفاءة أنظمة الطاقة المتجددة وتوفير حلول مستدامة للطاقة [٦٢].

## ٢-٤ كفاءة الخلايا الشمسية بتأثير المواد النانوية

المؤشرات التي تُستخدم لتقييم أداء الأجهزة الكهروضوئية، إذ تعبر عن قدرة الخلية على تحويل الطاقة الضوئية الساقطة إلى طاقة كهربائية مفيدة، وتعتمد على عدة عوامل مثل فجوة الطاقة، وخصائص النقل الكهربائي، والبنية السطحية للمادة الفعالة [٦٣].

تلعب المواد النانوية دوراً محورياً في تحسين كفاءة الخلايا الشمسية، نتيجة لخصائصها الفريدة المرتبطة بالحجم النانوي مثل زيادة المساحة السطحية وظهور تأثيرات الحجم الكمي، والتي تؤدي إلى تحسين الامتصاص الضوئي وسلوك الشحنات [٦٤]. إن تطعيم أغشية أكسيد النحاس وز ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) بجسيمات نانوية من الفضة (Ag) يُحسن من الخصائص البصرية والكهربائية، حيث يؤدي إلى تقليل فجوة الطاقة وزيادة امتصاص الضوء ضمن نطاق أوسع من الطيف الشمسي، كما موضح في الشكل (١-٤) مما يُعزز من توليد الأزواج الإلكترونية-الفجوية [٦٥].

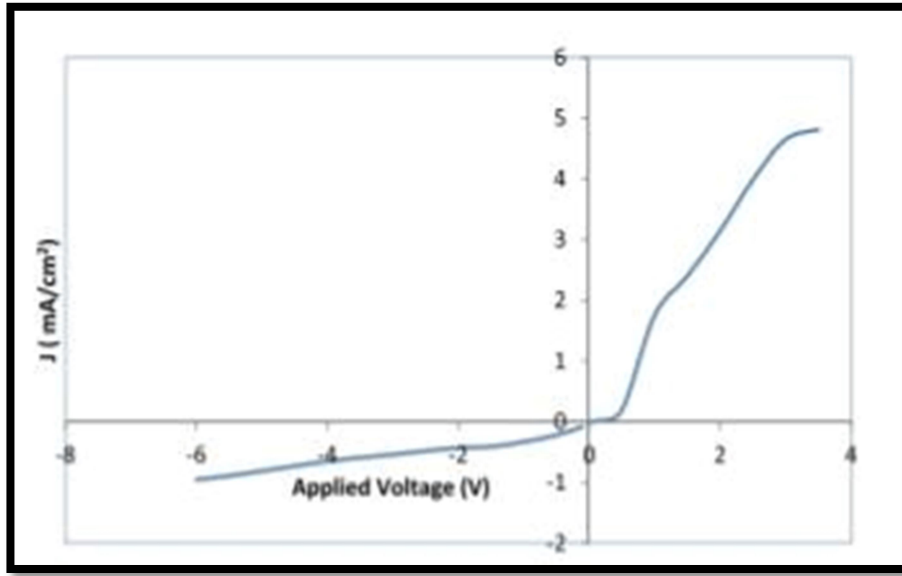


الشكل (١-٤)، مخطط العلاقة بين  $(\alpha h \nu)^2$  وطاقة الفوتون  $(h \nu)$  لاستخراج قيمة فجوة الطاقة البصرية المباشرة لأغشية  $\text{Cu}_2\text{O}:\text{Ag}$ .

كما يُسهم وجود الفضة في تقليل إعادة اتحاد الحوامل (Recombination) وتحسين انتقال الشحنات داخل المادة، وهو ما يؤدي إلى رفع كفاءة الأداء الكهروضوئي للخلايا الشمسية [٦٦].

إضافةً إلى ذلك، فإن البنية النانوية تُحسّن من مورفولوجيا السطح وتُقلل من العيوب البنيوية، مما يعزز من عملية فصل الشحنات وزيادة كفاءة التحويل [٦٧].

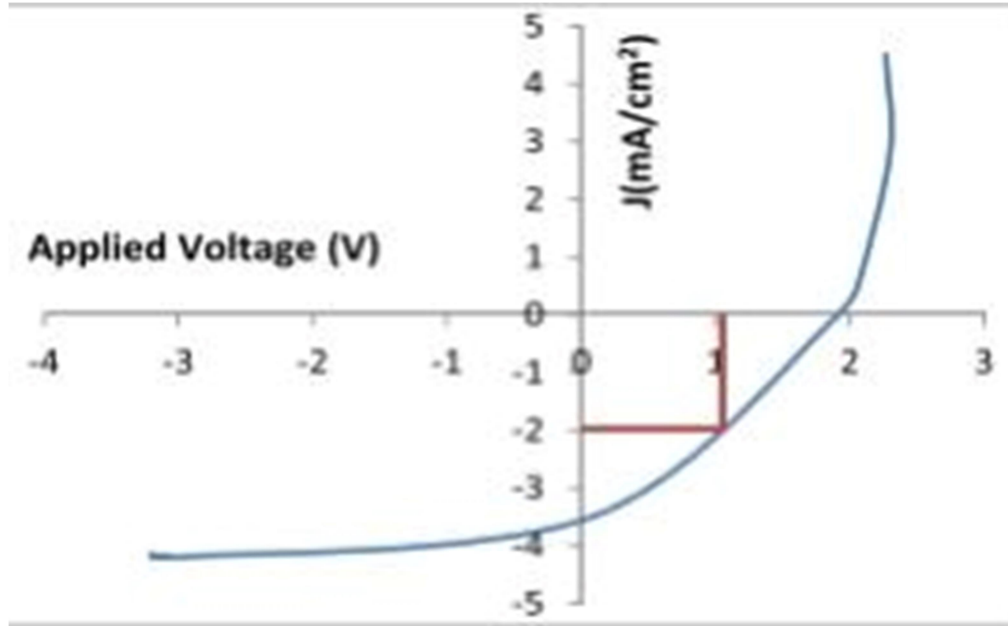
وقد انعكست هذه التأثيرات في النتائج العملية، حيث تم تسجيل زيادة في كفاءة التحويل لتصل إلى (٦.٤٨%) عند تطعيم  $\text{Cu}_2\text{O}$  بالفضة كما موضح في الشكل (٤-٢)، وهو ما يتفق مع دراسات سابقة أثبتت أن استخدام المواد النانوية يُعد من الاستراتيجيات الفعالة لتحسين أداء الخلايا الشمسية [٦٨].



الشكل (٤-٢)، كفاءة الخلايا الشمسية في الظلام.

يمثل منحنى التيار-الجهد (I-V) أحد أهم الخصائص الكهربائية المستخدمة في تقييم أداء الخلايا الشمسية، إذ يوضح العلاقة بين الجهد المطبق وكثافة التيار المتولد تحت تأثير الإضاءة. ومن خلال هذا المنحنى يمكن تحديد المعلمات الأساسية للخلايا الشمسية مثل تيار القصر (Isc)، وجهد الدائرة المفتوحة (Voc)، ونقطة القدرة العظمى (MPP)، إضافة إلى تقدير كفاءة التحويل الكهروضوئي.

كما يبين شكل المنحنى طبيعة الوصلة شبه الموصلة وكفاءة انتقال الشحنات وتأثير مقاومة السلسلة وإعادة الاتحاد داخل الخلية. وعليه يوضح الشكل (٣-٤) منحنى (I-V) لخلية شمسية مكونة من  $\text{Cu}\square\text{O}$  على سيليكون محفور نوع (n-Si) تحت إضاءة مقدارها  $100 \text{ mW/cm}^2$  وبسماكة ٦٠



nm، وذلك لدراسة سلوكها الكهروضوئي وتحديد أدائها العملي [٦٨].

الشكل (٣-٤)، كفاءة الخلايا الشمسية تحت تأثير الإضاءة.

## الاستنتاج

من خلال ما تم عرضه وتحليله في هذا البحث، يمكن التوصل إلى مجموعة من الاستنتاجات المهمة، أبرزها:

١. إن الخلايا الشمسية تُعد من أهم تقنيات الطاقة المتجددة، وقد شهدت تطورًا كبيرًا عبر الأجيال المختلفة، بدءًا من خلايا السيليكون التقليدية وصولًا إلى الخلايا المتقدمة.
٢. أثبتت تقنية النانو دورًا محوريًا في تحسين أداء الخلايا الشمسية، حيث ساهمت في زيادة كفاءة التحويل الكهروضوئي من خلال تحسين الخصائص البصرية والكهربائية للمواد المستخدمة.
٣. إن استخدام المواد النانوية مثل النقاط الكمومية، والجسيمات النانوية المعدنية، والأنابيب الكربونية، أدى إلى:
  - زيادة امتصاص الضوء.
  - تقليل الفواقد الناتجة عن الانعكاس وإعادة الاتحاد.
  - تحسين نقل الشحنات داخل الخلية.
٤. أظهرت الخلايا الشمسية النانوية، خاصة المعتمدة على مواد البيروفسكايت، إمكانات عالية من حيث الكفاءة وانخفاض التكلفة مقارنة بالخلايا التقليدية.
٥. رغم التطور الكبير، لا تزال هناك تحديات تواجه هذه التقنية، من أهمها:
  - محدودية الاستقرار طويل الأمد لبعض المواد النانوية.
  - التأثير بالعوامل البيئية مثل الرطوبة والحرارة.
  - صعوبة الإنتاج الصناعي واسع النطاق.
٦. تمثل المواد النانوية خيارًا استراتيجيًا واعدًا لتطوير الخلايا الشمسية، مما يسهم في تعزيز الاعتماد على الطاقة الشمسية كمصدر نظيف ومستدام للطاقة.
٧. إن استمرار البحث والتطوير في مجال النانوتكنولوجي سيسهم في تجاوز التحديات الحالية وتحقيق كفاءة أعلى، مما يدعم التحول نحو أنظمة طاقة أكثر كفاءة واستدامة في المستقبل.

## المصادر

- [1] M. A. Green, "Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost," *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.*, vol. 9, no. 2, pp. 123–135, 2003.
- [2] G. Cao, *Nanostructures and nanomaterials: Synthesis, properties and applications*, London: Imperial College Press, 2004.
- [3] A. J. Nozik, "Quantum dot solar cells," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 14, no. 1–2, pp. 115–120, 2002.
- [4] M. Grätzel, "Photoelectrochemical cells," *Nature*, vol. 414, pp. 338–344, 2001.
- [5] C. J. Brabec, V. Dyakonov, and U. Scherf, *Organic photovoltaics: Materials, device physics, and manufacturing technologies*, Weinheim: Wiley-VCH, 2014.
- [٦] م. م. س. صالح، تقنية النانو وعصر علمي جديد، ص. ٤٢.
- [7] J. Perlin, *Let It Shine: The 6000-Year Story of Solar Energy*, New World Library, 2013.
- [8] M. A. Green, "Photovoltaics: Technology overview," *Energy Policy*, vol. 28, no. 14, pp. 989–998, 2000.
- [9] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power," *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 1954.
- [10] E. Becquerel, "Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires," *C. R. Acad. Sci.*, 1839.

- [11] W. Smith, "Effect of light on selenium during the passage of an electric current," *Nature*, vol. 7, pp. 303, 1873.
- [12] W. G. Adams and R. E. Day, "The action of light on selenium," *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. 25, pp. 113–117, 1877.
- [13] A. A. Mohaimeed, "The application of nanomaterials to increase solar cell efficiency: A review," *Iraqi J. Nat. Sci. Nanotechnology.*, vol. 4, pp. 1–8, 2023, doi: 10.47758/ijnsn.v4i0.72.
- [14] M. Alkahtani et al., "Enhanced efficiency and stability of perovskite solar cells through neodymium-doped upconversion nanoparticles with TiO<sub>2</sub> coating," *Molecules*, vol. 30, no. 10, Art. 2166, 2025, doi: 10.3390/molecules30102166.
- [15] S. Rajukkannu, W. Bunpheng, R. Dhairiyasamy, and V. Gopinath, "Efficiency improvement in silicon and perovskite solar cells through nanofluid cooling using citrate and PVP stabilized silver nanoparticles," *Sci. Rep.*, vol. 15, Art. 833, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-85374-8.
- [16] U. Asghar et al., "Recent advances in carbon nanotube utilization in perovskite solar cells: A review," *Micromachines*, vol. 15, no. 4, Art. 529, 2024, doi: 10.3390/mi15040529.
- [17] Z. Niazi, A. Hagfeldt, and E. K. Goharshadi, "Recent progress on the use of graphene-based nanomaterials in perovskite solar cells," *J. Mater. Chem. A*, vol. 11, pp. 6659–6671, 2023, doi: 10.1039/D2TA09985C.
- [18] Z. Xu, "Research on the improvement of solar cell performance by low-dimensional semiconductor nanomaterials," *Theor. Nat. Sci.*, vol. 79, pp. 161–166, 2025, doi: 10.54254/2753-8818/2025.20107.

- [19] Y. Chu and P. Meisen, Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies, Diego: Global Energy Network Institute (GENI), 2011.
- [20] P. C. Choubey, A. Oudhia, and R. Dewangan, “A Review: Solar Cell Current Scenario and Future Trends,” Recent Res. Sci. Technol., vol. 4, pp. 99–101, 2012.
- [21] A. McEvoy, L. Castaner, and T. Markvart, Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation, 2<sup>nd</sup> ed., Oxford: Elsevier, 2012, pp. 3–25.
- [22] B. Srinivas, S. Balaji, M. N. Babu, and Y. S. Reddy, “Review on Present and Advance Materials for Solar Cells,” Int. J. Eng. Res.-Online, vol. 3, pp. 178–182, 2015.
- [23] B. Afework, J. Hanania, K. Stenhouse, et al., “Types of photovoltaic cells,” Energy Education, Jun. 25, 2018. [Online]. Available:  
[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types\\_of\\_photovoltaic\\_cells](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_photovoltaic_cells)  
· □. [Accessed: May 31, 2021].
- [24] D. Burgess, “Thin-film solar cell,” Encyclopedia Britannica, Jan. 23, 2020. [Online]. Available:  
<https://www.britannica.com/technology/thin-film-solar-cell>  
· . [Accessed: May 31, 2021].
- [25] D. S. Dennis, “Polycrystalline Silicon Cells: production and characteristics,” Sinovoltaics.com, Oct. 8, 2020. [Accessed: May 31, 2021].
- [26] M. C. Mark, “Multi-junction solar cells: what you need to know,” news.energysage.com, Apr. 21, 2020. [Accessed: May 31, 2021].

- [27] I. Mathew and S. Pillai, “Solar cell efficiency calculations: theory and practice,” *Renew. Energy J.*, vol. 145, pp. 125–132, 2019.
- [28] J. Green, “Practical vs. theoretical efficiencies in silicon photovoltaics,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 159, pp. 345–352, 2017.
- [29] W. Shockley and H. J. Queisser, “Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells,” *J. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 3, pp. 510–519, 1961.
- Jan. 27, ‘almrsal.com’, “مميزات وسلبيات الخلايا الشمسية” [٣٠] ابتسام مهران، 2020. [Online]. Available: <https://www.almrsal.com/post/887847>. . [Accessed: Feb. 27, 2026].
- [31] Solar Energy Industries Association (SEIA), “Solar Energy Facts,” 2021. [Online]. Available: <https://www.seia.org/initiatives/solar-energy-facts>. . [Accessed: Feb. 27, 2026].
- [32] REN21, *Renewables 2021 Global Status Report*, Paris: REN21 Secretariat, 2021. [Online]. Available: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>. . [Accessed: Feb. 27, 2026].
- [33] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Benefits of Solar Energy,” 2020. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/research/benefits-of-solar.html>. . [Accessed: Feb. 27, 2026].
- [34] International Energy Agency (IEA), *Solar PV Technology Roadmap*, Paris: IEA, 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>. . [Accessed: Feb. 27, 2026].

- [35] U.S. Department of Energy, “Solar Photovoltaic Technology Basics,” 2021. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>. [Accessed: Feb. 27, 2026].
- [36] EnergySage, “Pros and Cons of Solar Panels,” 2021. [Online]. Available: <https://news.energysage.com/pros-and-cons-of-solar-panels/>. [Accessed: Feb. 27, 2026].
- [37] Clean Energy Reviews, “Solar Battery Storage,” 2021. [Online]. Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-battery-storage-guide>. [Accessed: Feb. 27, 2026].
- [38] U.S. Energy Information Administration (EIA), “Solar Explained,” 2021. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/>. [Accessed: Feb. 27, 2026].

[٣٩] م. نايفة، تقنية النانوتكنولوجي – عالم صغير ومستقبل كبير، ترجمة ص. سلامة، الكويت: عالم المعرفة، ص. ١٢٥.

- [40] A. J. Nozik, “Quantum dot solar cells,” *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 14, pp. 115–120, 2002.
- [41] B. O’Regan and M. Grätzel, “A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films,” *Nature*, vol. 353, pp. 737–740, 1991.
- [42] N. Dhull, “What are nanomaterials and how are they made?,” *AZoM*, Aug. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=20648>.

- [43] B. Mikoui and B. Abra, "Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, properties and applications," *Nano Select*, 2023, doi: 10.1002/nano.202300038.
- [44] T. A. Saleh, "Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicity," *Environ. Technol. & Innovation*, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.101067.
- [45] N. Page, E. Kamakakam, and W. Flath, "Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges," *Materials Advances*, 2021, doi: 10.1039/d0ma00807a.
- [46] O. Ougbemhe and F. Calon, "Recent advances in nanomaterials applications for improving biofuel production," *Fuel*, 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130261.
- [47] N. Sundararajan et al., "Addressing global challenges: Green synthesized nanomaterials for sustainable crop production," *Global Challenges*, 2023, doi: 10.1002/gch2.202300187.
- [48] B. Eram and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic (PV) Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 2, pp. 439- 449, Jun. 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
- [49] H. S. Rauschenbach, *Solar Cell Array Design Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1980.
- [50] M. A. Green, "Crystalline and Thin-Film Silicon Solar Cells: State of the Art and Future Potential," *Solar Energy*, vol. 68, no. 1, pp. 3- 14, 2000, doi: 10.1016/S0038- 092X(00)00014- 6.

- [51] A. M. Buck and R. Jain, "Doping and Junction Formation in Silicon Solar Cells," in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, 2011, pp. 299- 332.
- [52] F. Ulbio, G. E. L. De Rossi, and C. R. Prior, "Advanced Metallization Techniques for High-Efficiency Silicon Solar Cells," Prog. Photovoltaics: Res. Appl., vol. 28, no. 5, pp. 473- 485, 2020, doi: 10.1002/pip.3242.
- [53] Z. Shi and A. H. Jayatissa, "Perovskites-Based Solar Cells: A Review of Recent Progress, Materials and Processing Methods," Materials, vol. 11, no. 5, Art. 729, 2018, doi: 10.3390/ma11050729.
- [54] T. Markvart and L. Castaner, Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation, 2<sup>nd</sup> ed., Elsevier, 2005.
- [55] A. Padilla et al., "Photovoltaic performance is conventionally defined at standard test conditions (STC), considering mainly an irradiance of 1000 W/m<sup>2</sup> and device temperature of 25 °C," Solar Energy, vol. xxx, 2022. [Online]. Available: ScienceDirect.
- [56] International Electrotechnical Commission, Guideline for PV Power Measurement and I-V characterization under STC, EUR- 24359 EN, European Commission JRC, 2009. [Online]. Available: publications.jrc.ec.europa.eu
- [57] L. Sani, "Review of I-V Electrical Characterization Techniques for Photovoltaic Modules under Standard Test Conditions," Appl. Sci., vol. 15, no. 17, 2025. [Online]. Available: MDPI.
- [58] K. Emery, Research Level IV and QE Measurements, NREL/DOE, 2013. [Online]. Available: docs.nrel.gov

- [59] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4<sup>th</sup> ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- [60] M. A. Green, *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, UNSW Press, 2015.
- [61] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, and R. Corkish, *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*, Prentice Hall, 2007.
- [62] J. Nelson, *Fundamentals of Photovoltaics*, Imperial College Press, 2003.
- [63] H. M. Wei, H. B. Gong, L. Chen, M. Zi, and B. Q. Cao, “Photovoltaic efficiency enhancement of Cu<sub>2</sub>O solar cells achieved by controlling homojunction orientation and surface microstructure,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 116, no. 19, pp. 10510–10515, 2012.
- [64] L. C. Chen, “Review of preparation and optoelectronic characteristics of Cu<sub>2</sub>O-based solar cells with nanostructures,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 16, no. 5, pp. 1172–1185, 2013.
- [65] C. C. Tseng, J. H. Hsieh, S. J. Liu, and W. Wu, “Effects of Ag contents and deposition temperatures on the electrical and optical behaviors of Ag-doped Cu<sub>2</sub>O thin films,” *Thin Solid Films*, vol. 518, no. 5, pp. 1407–1410, 2009.
- [66] M. Abd-Allah, J. P. Thomas, L. Zhang, and K. T. Leung, “Enhancement of solar cell performance of p-Cu<sub>2</sub>O/n-ZnO nanorod heterojunction devices,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 152, pp. 87–93, 2016.

[67] A. Eskandari, P. Sangpour, and M. R. Vaezi, "Hydrophilic Cu $\square$ O nanostructured thin films prepared by facile spin coating method: Investigation of surface energy and roughness," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 147, no. 1–2, pp. 1204–1209, 2014.

[68] A. N. Tuama, K. H. Abass, M. Q. Hamzah, A. H. Jabbar, and M. A. Agam, "Fabrication and characterization of Cu $\square$ O:Ag/Si solar cell via thermal evaporation technique," *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, vol. 13, no. 2, pp. 601–614, 2020.