

تحضير خلية شمسية مُحسَّنة بنقاط كمومية من كبريتيد الكاديوم باستعمال طريقة امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة (SILAR) وتوصيفها

محمد أسامة الحبال¹ . د. خالد مصري² . د. سحر الحريري³

¹ طالب ماجستير علوم وهندسة المواد - المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.

² مدير بحوث - قسم الفيزياء - المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا.

³ أستاذة مساعدة - قسم الكيمياء - كلية العلوم - جامعة دمشق.

الملخص

يتناول هذا البحث تحضير خلية شمسية مُحسَّنة بنقاط كمومية من كبريتيد الكاديوم. جرى تحضير الإلكتروود الضوئي انطلاقاً من شرائح زجاجية عليها طبقة من أكسيد القصدير المشوب بالفلور (FTO). جرى توضع طبقة مُصمَّنة من أكسيد التيتانيوم بطريقة التدوير spin coating، وطبقة مسامية من أكسيد التيتانيوم النانوية بطريقة doctor blade، ومن ثم توضع النقاط الكمومية بطريقة امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة Successive Ionic Layers Adsorption and reaction (SILAR). أما الإلكتروود المضاد فقد جرى تحضيره من كبريتيد النحاس الأحادي على ركيزة من الشبه brass. وأخيراً، جرى تجميع الخلية الشمسية بطريقة الساندويش باستعمال الكتروليت ناقل من البولي سلفيد، وبمساحة فعالة (0.35x0.3) سم².

جرى توصيف الإلكتروود الضوئي بتقانة XRD، وأظهر الطيف الناتج أن طور أكسيد التيتانيوم هو الأنتاز anataze، كما تم قياس سماكة الطبقة المصمَّنة بجهاز قياس الخشونة فكانت قرابة 60 نانومتر. جرى توصيف الإلكتروود المضاد بتقانة XRD، وأظهر الطيف الناتج بنية Cu_{1.8}S ونجاح عملية تخليق المادة.

جرى توصيف النقاط الكمومية بمطيافية الامتصاص الجزيئي (UV-VIS)، وأظهر الطيف كثف امتصاص عند طول موجة 474 nm، كما أظهرت مطيافية الفلورة قمة اصدار عند طول الموجة 492.5nm باستعمال طول موجة إثارة 474.5nm. حُسِبَت فجوة النطاق للنقاط الكمومية باستعمال نموذج تاوك وكانت ($E_g=2.65\text{eV}$). كما حُسِبَ قطرها باستعمال نموذج تقريب الكتلة الفعالة فكان قرابة 7 nm.

جرى تسجيل المنحني المميز للخلية الشمسية باستعمال مصباح هالوجيني ومقاومة متغيرة، وكانت كثافة تيار القصر 7.5 mA/cm² وفرق كمون الدارة المفتوحة 470 mV وكفاءة التحويل الطاقى 0.88%.

الكلمات المفتاحية: خلايا شمسية - نقاط كمومية - كفاءة الخلية - إلكتروليت مضاد-إلكتروود ضوئي - كبريتيد الكاديوم - كبريتيد النحاس.

تاريخ الإيداع: 2022/04/29

تاريخ القبول: 2022/06/19



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

Preparation and characterization of cadmium sulfide quantum dot sensitized solar cell by Successive Ionic layers Adsorption and Reaction (SILAR) method

Muhammad Osama Al-Habbal¹ Dr. Khaled Masri² Dr. Sahar Hariri³

¹ Master's student in Materials Science and Engineering - Higher Institute of Applied Sciences and Technology (HIAST).

² Research Director - Department of Physics - Higher Institute of Applied Sciences and Technology.

³ Assistant Professor - Department of Chemistry - Faculty of Science - Damascus University.

Abstract

This paper deals with the preparation of a cadmium sulfide (CdS) quantum dot-sensitized solar cell. The photoelectrode was prepared from glass slides with a layer of fluorine-doped tin oxide (FTO). A compact layer of titanium oxide was prepared by spin coating and a porous layer of nano porous titanium oxide by doctor blade. Then the quantum dots were deposited by Successive Ionic Layers Adsorption and Reaction (SILAR) method. The counter electrode was prepared from copper(I) sulfide on brass substrate. Finally, the solar cell was assembled by sandwich method using a conductive polysulfide electrolyte, with an effective area of $(0.3 \times 0.35) \text{ cm}^2$. The photoelectrode was characterized by XRD, and the resulting spectrum showed that titanium oxide is in the anatase phase. The thickness of the titanium oxide compact layer was measured by means of a roughness measuring device, and was found to be about 60 nm.

The counter electrode was characterized by XRD, and the resulting spectrum showed the structure of $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$.

Quantum dots were characterized by molecular absorption spectroscopy (UV-VIS). The absorption spectrum showed an absorption shoulder at wavelength 474 nm, and fluorescence spectroscopy showed an emission peak at wavelength 492.5 nm using excitation wavelength 474.5 nm. The bandgap of the prepared quantum dots was calculated using Tauc method and a value of

($E_g=2.65\text{eV}$) was obtained. The diameter of the quantum dots was calculated using the effective mass approximation model, and it was about 7 nm.

The characteristic curve of the solar cell was measured using a halogen lamp and a rheostat. The Short-circuit current density i was 7.5 mA/cm^2 , the open circuit voltage was 470 mV, and the power conversion efficiency was 0.88%.

Key word: SOLAR CELLS- QUANTUM DOTS - CELL EFFICIENCY – COUNTER ELECTRODE – PHOTO ELECTRODE - CADMIUM SULFIDE – COPPER SULFIDE.

Received :2021/04/19

Accepted:2022/06/19



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

• المقدمة:

تعتمد جودة حياة الإنسان بشكل كبير على توفر مصادر الطاقة، وأهمها حاليًا الوقود الأحفوري (النفط والفحم والغاز الطبيعي). ومع النمو السريع في استهلاك الطاقة عالمياً (حالياً، يبلغ إجمالي استهلاك الطاقة في جميع أنحاء العالم حوالي 14 تيراواط) ومع القيود البيئية المفروضة نتيجة التلوث البيئي الحاصل من استعمال الوقود الأحفوري وتحقيقاً لمبدأ التنمية المستدامة لمصادر الطاقة تطلَّب الأمر انتقالاً سريعاً إلى التقنيات الخضراء الجديدة لتوليد الطاقة [2,1]. من بين مصادر الطاقات البديلة الحالية (الطاقة الكهرومائية، والنووية، والكتلة الحيوية، وطاقة الرياح، والطاقة الحرارية الأرضية، والطاقة الشمسية)، تُعدُّ الطاقة الشمسية إلى حد بعيد أكبر مورد قابل للاستغلال. يكفي القول بأن ضوء الشمس الذي يرد على سطح الأرض في ساعة واحدة يوفر طاقة أكبر من كل الطاقة التي تستهلكها البشرية في عام واحد [3]. وبالتالي، فإن تصميم وتصنيع الخلايا الشمسية عالية الأداء ومنخفضة التكلفة، القادرة على استبدال الوقود الأحفوري، يُعدُّ مهمةً عاجلة لفرق البحوث العلمية متعددة التخصصات في جميع أنحاء العالم [5,4].

تُعدُّ تكلفة إنتاج الخلايا الشمسية السيليكونية التقليدية العائق الرئيسي لتوسع انتشارها، كما أن تعقيد العمليات الإنتاجية الخاصة بها ومتطلباتها لتقانات متطورة جداً يشكلان عقبة كبيرة لإنتاجها بشكل واسع، لذلك كان التحدي هو تصنيع خلايا شمسية ذات تكلفة منخفضة وتقنيات تصنيع سهلة وكفاءة تحويل كهروضوئية مرضية، وهذا ما فتح باب البحث باتجاه الخلايا الشمسية غير السيليكونية كـالخلايا الشمسية الصباغية والخلايا الشمسية المُحسَّنة بنقاط كمومية QDSSCs، والتي تُصنَّف ضمن خلايا الجيل الثالث [7,6]. تتميز الخلايا الشمسية المُحسَّنة بنقاط كمومية بميزات عديدة [9,8]:

- 1- اصطناع الأصبغة المُحسَّنة معقّد جداً ويتطلب مراحل متعددة من اصطناع وتنقية، كما أنها مواد غالية الثمن، في حين تتميز النقاط الكمومية بسهولة تحضيرها وبساطة عمليات اصطناعها وتكلفتها الاقتصادية المنخفضة.
 - 2- تتميز النقاط الكمومية بفجوة نطاق قابلة للضبط عن طريق ضبط حجم النقاط حسب طريقة الاصطناع، وبالتالي إمكانية التحكم في طيف امتصاص الضوء في مجالٍ واسع.
 - 3- معامل امتصاص مولي عالي أكبر من معظم الأصباغ العضوية [10].
 - 4- عزم ثنائي قطب داخلي كبير مما يعزز عملية فصل الإكسيتون.
 - 5- ثبات كيميائي تجاه الماء والأكسجين [11].
 - 6- خاصية توليد الإكسيتون المتعدد (MEG) مما يدفع كفاءة تحويل الطاقة القصوى النظرية لهذه الخلايا إلى 44٪، وهو ما يتجاوز حد كيرس وشوكلي Shockley و Queisser البالغ 31٪ للخلايا الشمسية التقليدية [13,12].
- تُعدُّ طبيعة النقاط الكمومية (QDs) وطريقة ارتباطها بأشباه الموصلات ذات الفجوة العريضة من العوامل المهمة التي تحدد كفاءة الخلية الشمسية، ويمكن توضع هذه النقاط عن طريق الترسيب في الموقع على الأكسيد أو عن طريق امتزاز النقاط الكمومية الغروية المشكلة سابقاً على سطح الأكسيد.

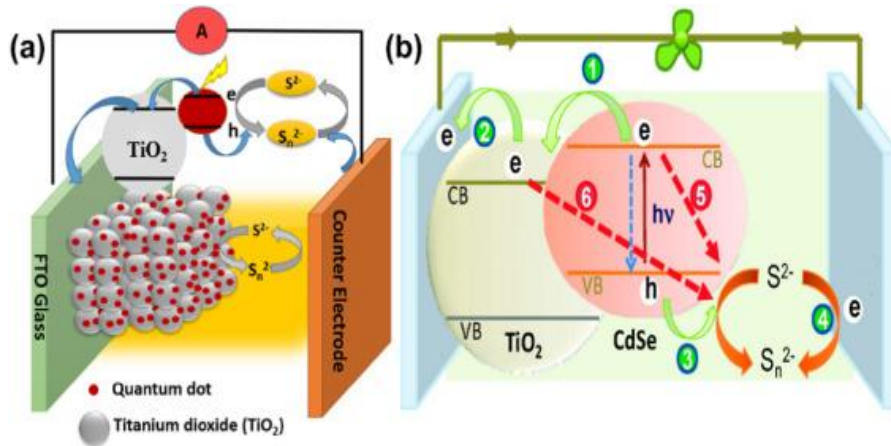
أظهرت معظم الدراسات تفوق الطريقة الأولى من حيث مردود تحويل الخلايا الشمسية [7].

• بنية الخلية الشمسية المُحسَّنة بنقاط كمومية

تتألف الخلية الشمسية المُحسَّنة بنقاط كمومية من أربعة أجزاء رئيسية وهي:

- الإلكترود الضوئي: وهو يمثل نافذة الخلية الشمسية، ويتكون من عدة طبقات رقيقة متوضعة على شريحة زجاجية. الطبقة الأولى شفافة ناقلة كهربائياً وهي طبقة رقيقة من أكسيد القصدير المشوبة بالفلور (FTO)، تليها طبقة رقيقة مصمتة من ثنائي أكسيد التيتانيوم TiO_2 وطبقة مسامية من TiO_2 تعمل عمل منصة لحمل النقاط الكمومية التي تقوم بدور مُحسَّس يمتص الفوتونات الضوئية، ثم تحرر إلكتروناتها المثارة إلى الأكسيد لتنتقل بعد ذلك إلى الدارة الخارجية مولدةً التيار الكهربائي.

- النقاط الكمومية: تعرف النقاط الكمومية على أنها جسيمات نانوية كروية نصف ناقلة، أبعادها أقل من (10 nm) [15,14]، تظهر هذه الجسيمات الكمومية خصائص إلكترونية وضيئية مختلفة عن تلك الموجودة في الجسيمات الأكبر منها ويعزى ذلك إلى ظاهرة تدعى بالحصر الكمي quantum confinement [17,16] توضع النقاط الكمومية على سطح TiO_2 طرائق عدة:
- 1- امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة [18].
 - 2- ترسيب الحمام الكيميائي (CBD) [20,19].
 - 3- الصب drop casting أو الطلاء بالدوران [21].
 - 4- الرحلان الكهربائي [22].
 - 5- نهج الرباط ثنائي الوظيفة [23].
- الإلكترونيات: يُعدّ الإلكترونيات صلة الوصل بين الإلكترونيات الضوئية والإلكترونيات المضاد، ويعمل كمصدر لتعويض الإلكترونيات المزاحة من النقاط الكمومية. وقد تكون الإلكترونيات سائلة، وهي الأكثر شيوعاً والأعلى مردوداً، أو هلامية أو صلبة. في الخلايا الشمسية ذات النقاط الكمومية تُعدّ الإلكترونيات المائية متعددة الكبريتيد (S^{2-} / S_n^{2-}) القائمة على كبريتيد الصوديوم والكبريت (بولي سلفيد) هي الأكثر استعمالاً [24].
- الإلكترونيات المضاد: يمثل قاع الخلية الشمسية في الجهة المقابلة للإلكترونيات الضوئية، ودوره الأساسي هو تعويض الإلكترونيات المزاحة للإلكترونيات واكمال الدارة الكهربائية في الخلية الشمسية.



الشكل (1): (a) بنية الخلية الشمسية المُحسَّنة بنقاط كمومية
(b): عمليات انتقال الشحنة في الخلية [25]

يظهر الشكل (1) بنية الخلية الشمسية المُحسَّنة بنقاط كمومية وعمليات انتقال الشحنة فيها [25].

● هدف البحث: تحضير خلية شمسية مُحسَّنة بنقاط كمومية بطريقة امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة (SILAR) وتوصيفها.

● المواد المستعملة في البحث:

ماء مقطر (محلّي)، ثنائي أكسيد التيتانيوم النانوي، 25 نانومتر (Sigma-Aldrich)، ايزوبروبوكسيد التيتانيوم - Sigma- Aldrich، أسيتيل أسيتون - Sigma-Aldrich، بولي ايثيلين جلايكول Sigma-Aldrich-400، Merck-Triton X-100، دي ايثانول أمين - Sigma-Aldrich، الإيثانول - Honeywell، شريحة من النحاس الأصفر - الشبه (Cu-Zn) - شرائح محلّية، - كبريت - Merck، كبريتيد الصوديوم 65% - Acros Organics، حمض كلور الماء: كثافة 1.19g/mL، ونفاوة 37% poch،

شرائح زجاجية مطلية بأكسيد القصدير المشبع بالفلور (Sigma-Aldrich-(FTO)، أسيتون-Sigma-Aldrich، نترات الكاديوم-Sigma-Aldrich، إيتيل سيليلوز-Sigma-Aldrich .
● الأجهزة المستعملة في البحث:

- فرن كهربائي ألماني الصنع Nabertherm L3/R Muffelofen
- جهاز التغطية بالدوران (spin coating): جهاز محلي الصنع
- جهاز انعراج الأشعة السينية (XRD): صنع شركة Philips، طراز PW3710، وهو يستعمل الإشعاع $CuK\alpha$ كمنبع أشعة سينية، بطول موجي 1.54 أنغستروم.
- جهاز مطيافية الأشعة تحت الحمراء ذو تحويل فورييه Fourier Transform Spectrometer، أمريكي الصنع من شركة Bruker طراز Vector 22.
- جهاز مطيافية الأشعة المرئية والأشعة فوق البنفسجية وهو جهاز ياباني الصنع من شركة (SHIMADZU)، طراز (UV-1800).
- جهاز الترسيب بطريقة امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR): صنع محلي.
- أدوات زجاجية مخبرية
- جهاز الأمواج فوق الصوتية من شركة JEKEN.
- جهاز مطيافية الفلورة صنع شركة JASCO، طراز FP-8300.
- جهاز قياس خشونة السطح (Kosaka portable step meter).
- مصباح هالوجيني.
- مقياس تيار ومقياس فلطية ومقاومات متغيرة.
- تحضير الخلية الشمسية ذات النقاط الكمومية
- تحضير الإلكترود الضوئي:

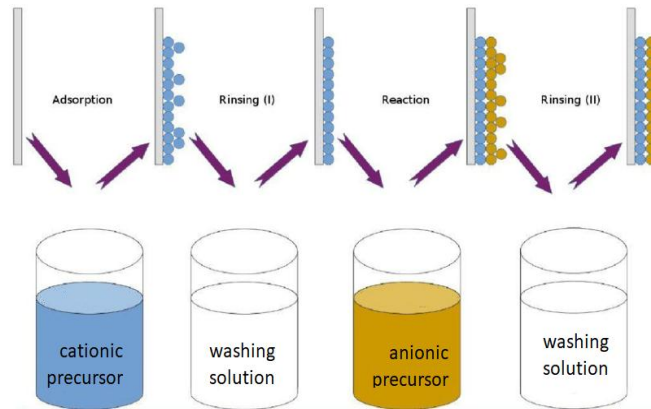
تغسل شرائح (FTO) بالصابون (مادة فعالة سطحيا) بقطعة قماشية ناعمة، تغسل بعدها بالماء المقطر وباستخدام جهاز الامواج فوق صوتية، نكرر عملية الغسيل باستخدام الاسيتون ثم باستخدام الكحول النقي لمدة عشرة دقائق وأخيرا تُحفظ الشرائح في الكحول النقي لحين الاستخدام.

- تحضير طبقة أكسيد التيتانيوم المُصمَّنة على ركائز FTO:
يُحضَّر المحلول الذي سيستعمل كمركب سلف (Precursor) لأكسيد التيتانيوم وذلك بمزج ايزوبروبوكسيد التيتانيوم TIP، دي إيثانول أمين DEA، والإيثانول النقي وفق النسب الحجمية: 1mL، 3mL، و20mL على الترتيب (TIP: DEA: Ethanol=3:1:20). نظرًا لفعالية TIP، تجرى عملية المزج بإضافة 1mL من دي إيثانول أمين الى 10mL من الإيثانول النقي مع التحريك متبوعا بإضافة 3mL من TIP. يمزج المحلول باستخدام محرك مغناطيسي لمدة 15 دقيقة، ثم يضاف الإيثانول المتبقي (10mL) مع التحريك لمدة 45 دقيقة. لاحظنا أن هذا المحلول يبقى مستقرًا لمدة 3 أسابيع يتحول بعدها الى مادة هلامية، علمًا أن الظروف المحيطة من حرارة ورطوبة تؤثر بشكل كبير على استقراره [26]. بعد ذلك، تُطلى الركائز بالمحلول المحضر بطريقة الطلي الدوراني ديناميكية بسرعة 1000 دورة في الدقيقة مدة 200 ثانية. أخيرًا، توضع الركائز في الفرن لتلدينها عند درجة حرارة 500 درجة مئوية لمدة 3 ساعات.
- تحضير طبقة أكسيد التيتانيوم المسامية:

جرى تحضير مزيج من 1 g من مسحوق ثنائي أكسيد التيتانيوم النانوي و 8 mL من الكحول الايثيلي و 100 mL من الأسيتيل أسيتون و 1 g من البولي إيثيلين غليكول-400، و 20 mL من (Triton X-100)، و 0.5 g من إيثيل السيليلوز. يوضع المزيج في جهاز الأمواج فوق الصوتية لمدة 30 دقيقة في درجة حرارة 50 مئوية مع الحفاظ على تغطية البيشر لتجنب تبخر الكحول ثم يحرك المزيج مغناطيسيا لمدة 48 ساعة حتى يصبح متجانسا. ثم تظلى الركائز بطريقة (Doctor blade) بعد تحديد المساحة المراد طلبها بواسطة شريط لاصق، وتلدن في درجة حرارة 450 درجة مئوية لمدة ساعة.

- توضع النقاط الكمومية على الإلكترود الضوئي بطريقة (SILAR):

يُغمر الإلكترود الضوئي في محلول كحولي من الإيثانول يحوي نترات الكاديوم بتركيز 0.1 M لمدة دقيقة واحدة، ثم يُترك في الهواء لمدة 0.5 دقيقة حتى يجف. بعدها يُشطف الإلكترود الضوئي بغمسه في الإيثانول مدة دقيقة واحدة ومن ثم يُترك في الهواء مدة 0.5 دقيقة. بعدها تُغمر الركيزة في محلول (50% إيثانول + 50% ماء مقطر حجماً) يحوي على 0.1 M من كبريتيد الصوديوم مدة دقيقة واحدة، بعد ذلك تجف العينة مدة نصف دقيقة في الهواء، وأخيراً يُشطف الإلكترود بغمسه في الإيثانول مدة دقيقة واحدة. تُعد جميع الخطوات السابقة دورة واحدة، وجرى إجراء 12 دورة في اصطناع النقاط الكمومية مباشرة على الإلكترود الضوئي.



الشكل (2): آلية تحضير النقاط الكمومية في الموضع على الإلكترود الضوئي بطريقة (SILAR)

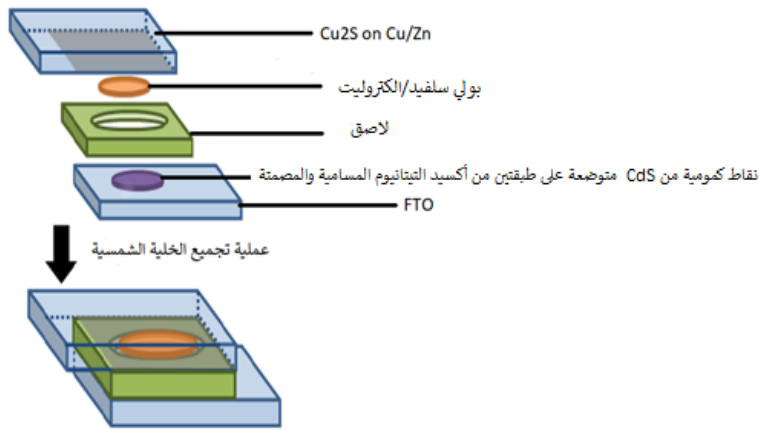
يظهر الشكل رقم (2): آلية تحضير النقاط الكمومية في الموضع على الإلكترود الضوئي بطريقة (SILAR).

- اصطناع الإلكترود المضاد (كبريتيد النحاس الأحادي):

تغسل شريحة من سبيكة النحاس والزنك (الشبه brass) بالماء والصابون، ثم تعالج بوسط من حمض كلور الماء (37% w/w) في درجة حرارة 90 درجة مئوية لمدة ربع ساعة، تهدف هذه المرحلة تنميش سطح السبيكة. يتحول لونها من الاصفر إلى الاحمر. ثم تغسل بالماء المقطر وتغمر بمحلول بولي سلفيد تركيزه 1M مدة خمسة دقائق. بذلك يتشكل على سطح السبيكة كبريتيد النحاس الأحادي اسود اللون، تغسل أخيراً بالماء المقطر وتجفف بتيار من غاز الأوت.

- تحضير الإلكتروليت: يُمزج 1M من كبريتيد الصوديوم مع 1M من زهر الكبريت في محلول مائي نقي، بحيث نحصل على بولي سلفيد بتركيز 1M.

- تجميع الخلية الشمسية: تُجمَع أجزاء الخلية بطريقة الساندويش بعد حصر المساحة الفعالة في الإلكترود الضوئي بلاصق وإضافة نقطة من الإلكتروليت ثم يوضع الإلكترود المضاد ويُحكم الإغلاق بحامل. كما في الشكل (3) عملية تجميع الخلية الشمسية.

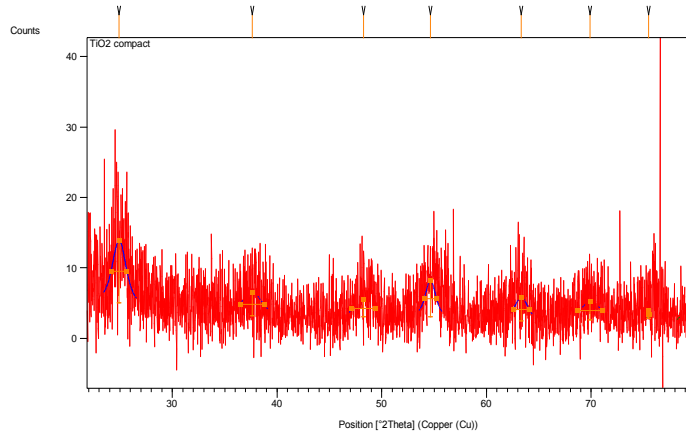


الشكل (3): توضيح عملية تجميع الخلية الشمسية ذات النقاط الكمومية

● النتائج والمناقشة:

- التوصيف البنوي لطبقة أكسيد التيتانيوم المصمتة:

يظهر الشكل (4) مخطط انعراج الأشعة السينية لطبقة أكسيد التيتانيوم المصمتة، ويبين الجدول (1) مواقع القمم ودلائل ميلر للمستويات الموافقة لها. بالمقارنة مع مخطط الأشعة السينية لأكسيد التيتانيوم بطور الأناتاز [27] نجد تطابقاً واضحاً مما يدل على أن المادة هي أكسيد التيتانيوم بطور الأناتاز (بنية رباعية قائمة/tetragonal).



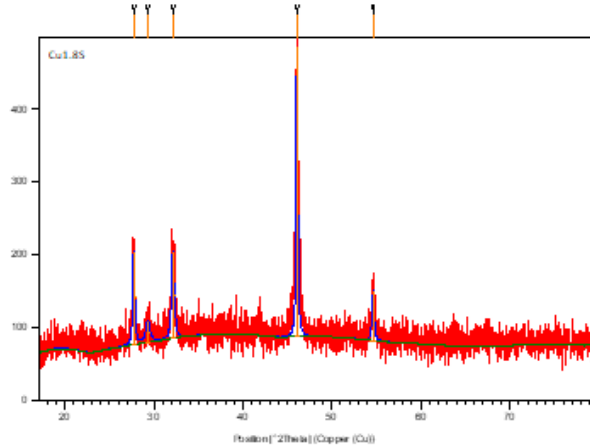
الشكل (4): مخطط انعراج الأشعة السينية لطبقة أكسيد التيتانيوم المصمتة.

الجدول 1: مواقع قمم مخطط انعراج الأشعة السينية لطبقة أكسيد التيتانيوم المصمتة

Pos. [°2Th.]	(h k l)
24.91	(101)
37.63	(104)
48.28	(200)
54.65	(105)
63.32	(204)
69.89	(116)
75.46	(215)

- التوصيف البنوي للإلكترود المضاد:

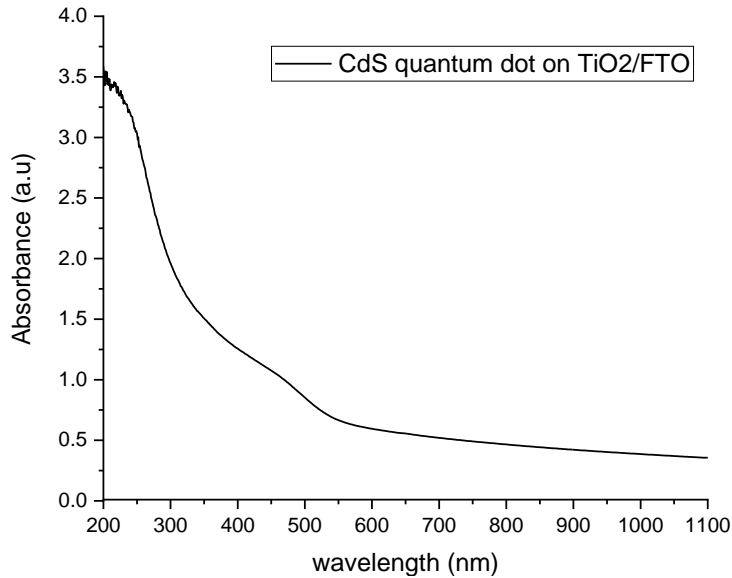
يظهر الشكل (5) مخطط انعراج الأشعة السينية لمادة كبريتيد النحاس الأحادي بعد التقشير الكيميائي للطبقة عن شريحة النحاس. تعود القمم الواقعة عند الزوايا 27.73° ، 32.11° ، 46.10° و 54.65° إلى المركب $Cu_{1.8}S$ ذي البنية السداسية (hexagonal) [28]، وهي متوافقة مع المرجع [29].



الشكل (5): مخطط انعراج الأشعة السينية لكبريتيد النحاس

- توصيف النقاط الكمومية لكبريتيد الكادميوم:

حساب فجوة النطاق: يظهر الشكل (6) طيف امتصاص النقاط الكمومية لكبريتيد الكادميوم المتوضعة على أكسيد التيتانيوم المسامي. نلاحظ أن امتصاص كبريتيد الكادميوم جيد في الطيف المرئي، كما نلاحظ وجود كتف امتصاص عند طول الموجة (475nm).

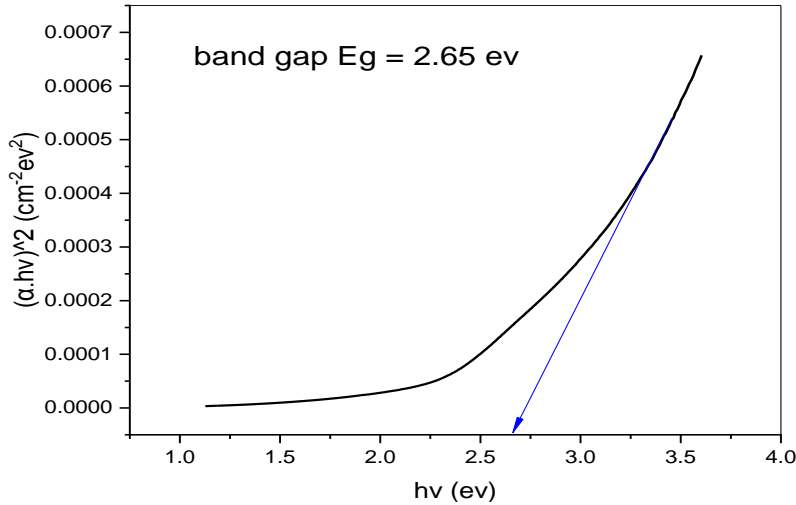


الشكل (6): طيف الامتصاص للنقاط الكمومية من كبريتيد الكادميوم

يمكن حساب فجوة النطاق اعتمادًا على علاقة تاوك [30]:

$$(\alpha \cdot h \cdot \nu)^{\frac{1}{n}} = B(h \cdot \nu - E_g) \quad (1)$$

حيث: α معامل الامتصاص، h ثابتة بلانك، γ ثابتة تساوي 0.5 في حالة فجوة النطاق المباشرة، و 2 في حالة فجوة النطاق غير المباشرة، B ثابت، \square التردد و E_g طاقة فجوة النطاق.



الشكل (7): المنحني $(\alpha \cdot hv)^2$ بدلالة hv لتحديد فجوة النطاق لـ QDCdS

بما أن CdS ذو فجوة نطاق مباشرة، نرسم المنحني $(\alpha \cdot hv)^2$ بدلالة h ونحصل على قيمة فجوة النطاق من نقطة تقاطع الجزء الخطي للمنحني مع المحور hv كما يبين الشكل (7). وقد وجدنا أن $E_g=2.65$ eV وهي أكبر من فجوة نطاق CdS الحجمي (2.42 eV) مما يدل على أن أبعاد CdS نانوية، كما سنبين في الفقرة اللاحقة.

- حساب أبعاد النقاط الكمومية

جرى حساب أبعاد النقاط الكمومية لكبريتيد الكاديوم اعتماداً على تقريب نموذج الكتلة الفعالة، باستعمال العلاقة (2)[31,30]:

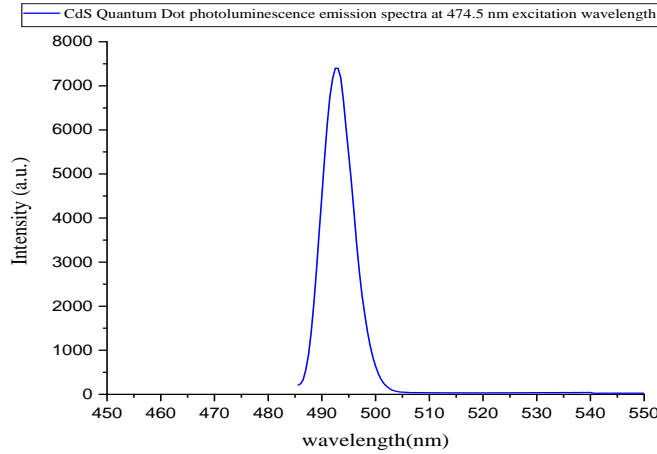
$$E_g(nano) - E_g(bulk) = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2r^2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (2)$$

حيث: $E_g(nano)$ طاقة فجوة النطاق للنقطة الكمومية، $E_g(bulk)$ طاقة فجوة النطاق للمادة الحجمية 2.42eV، \hbar : ثابتة بلانك المختزلة، r نصف قطر النقطة الكمومية، m_e^* الكتلة الفعالة للإلكترون وتساوي $0.19 m_0$ ، m_h^* الكتلة الفعالة للثقب وتساوي $0.8 m_0$ و m_0 : كتلة الإلكترون الحر.

عند تعويض قيمة فجوة النطاق التي وجدناها ($E_g=2.65$ eV) حصلنا على نصف قطر النقاط الكمومية لكبريتيد الكاديوم وهو قرابة 3.3 نانومتر.

- طيف فلورة نقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية:

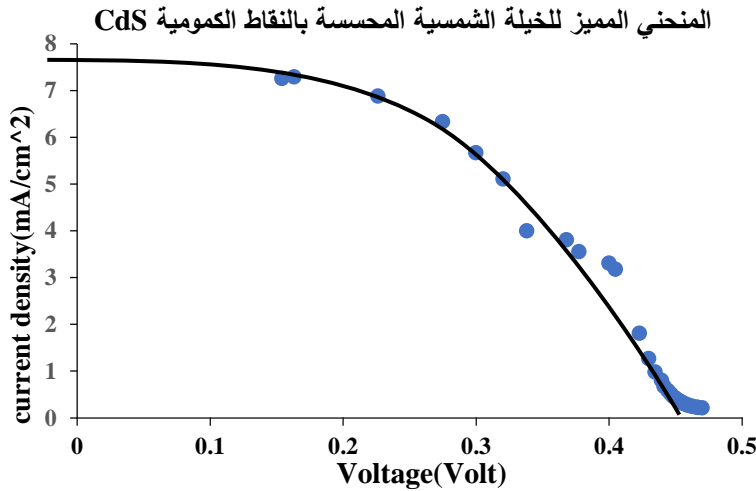
يبين الشكل (8) طيف فلورة نقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية عند إثارتها بضوء طول موجته 474.5 نانومتر. يظهر طيف الفلورة قمة اصدار شديدة عند الطول الموجي 492.5nm وهو متقارب مع المرجع [32].



الشكل (8): طيف فلورة نقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية

● قياس المنحني المميز J-V للخلية الشمسية:

جرى قياس المنحني المميز للخلية الشمسية باستعمال مصباح هالوجيني شدة إضاءته 1980 W/m^2 ومقاومة متغيرة يظهر الشكل (9) المنحني المميز للخلية الشمسية المحضرة:



الشكل (9): المنحني التجريبي (I-V) للخلية المحضرة

من المنحني السابق يمكننا تحديد كثافة تيار

القصر (J_{sc}) للخلية وكمون الدارة المفتوحة (V_{oc}) والاستطاعة العظمى (P_{max})، حيث نجد:

$$1.742 \text{ mW/cm}^2 = \text{mA/cm}^2, \quad V_{oc} = 0.47 \text{ V}, \quad P_{max} = 5 J_{sc} = 7.$$

يُحسب معامل الملء (FF) من العلاقة التالية:

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{1.742}{7.5 \cdot 0.47} = 0.495 \quad (3)$$

وتحسب كفاءة الخلية من العلاقة التالية:

$$\eta\% = \frac{P_{max}}{P_{in}} * 100 = \frac{1.742}{198.3} * 100 = 0.88\% \quad (4)$$

حيث:

P_{in} هي شدة إشعاع المصباح وتساوي 198.3 mW/cm^2 .

η : كفاءة الخلية.

يُخلص الجدول (2) بارامترات الخلية المحضرة.

الجدول (2) بارامترات الخلية الشمسية المحضرة					
J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (volt)	$FF\%$	P_{max} (mW/cm^2)	$\eta \%$	S (cm^2)
7.5	0.47	49.5%	1.742	0.88 %	0.105

● الخاتمة والاستنتاجات:

تُعدّ النقاط الكمومية لكبريتيد الكاديوم مادة واعدة لاستعمالها كمحسس في الخلايا الشمسية، كما أن عملية توزيع النقاط الكمومية بطريقة سيلر (SILAR) عملية سهلة نسبياً وتُمكن من توزيع النقاط الكمومية مباشرةً على طبقة الأكسيد المسامية. تمتاز الخلايا الشمسية المُحسَّنة بالنقاط الكمومية بالتكلفة المنخفضة مقارنة بتكلفة تصنيع الخلايا الشمسية السيليكونية كما تمتاز ببساطة تحضيرها. يمكن زيادة كفاءة الخلية بترسيب نقاط كمومية من أنصاف نواقل أخرى للحصول على تحسُّس ضوئي مشترك.

- حضرت الخلية الشمسية بجميع أجزائها الإلكترون الضوئي والإلكترون المضاد والمادة المحسنة والإلكتروليت الناقل.
- حضرت طبقة نانوية بسماكة 60 نانومتر من أكسيد التيتانيوم.
- جرى توصيف كلاً من الإلكترون الضوئي والإلكترون المضاد بتقانة انعراج الأشعة السينية وأظهرت النتائج نجاح عملية الاصطناع.
- جرى توصيف نقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية بمطيافية الامتصاص في المجال فوق البنفسجي والمرئي.
- حسبت فجوة النطاق لكبريتيد الكاديوم الكمومي بواسطة نموذج تاوك فكانت 2.65 eV وهذا يدل على وجود ظاهرة الحصر الكمومي.
- جرى حساب قطر النقاط الكمومية المحضرة بواسطة نموذج الكتلة الفعالة، فوجدنا أنه يساوي قرابة 7 nm .
- أظهر طيف الفلورة قمة اصدار شديدة عند الطول الموجي 492.5 nm من أجل طول موجة إثارة 474.5 nm .
- جرى تجميع الخلية الشمسية وقياس بارامتراتهما بواسطة مصباح هالوجيني شدة إضاءته 198.3 mW/cm^2 ومقاومة متغيرة. فوجدنا أن كثافة تيار القصر يساوي 7.5 mA ، وكمون الدارة المفتوحة يساوي 0.47 V ، ومعامل الملء 49.5% ، والاستطاعة العظمى 1.742 mW/cm^2 ، وكفاءة التحويل الطاقى 0.88% ، وهذا قريب من القيم المنشورة لمثل هذه الخلايا [35,34,33].

● المراجع:

1. Grätzel, M. (2009). Recent advances in sensitized mesoscopic solar cells. *Accounts of chemical research*, 42(11), 1788-1798.
2. Lewis, N. S., & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(43), 15729-15735.
3. Lewis, N. S. (2007). Toward cost-effective solar energy use. *science*, 315(5813), 798-801.
4. Graetzel, M., Janssen, R. A., Mitzi, D. B., & Sargent, E. H. (2012). Materials interface engineering for solution-processed photovoltaics. *Nature*, 488(7411), 304-312.
5. Grätzel, M. (2007). Photovoltaic and photoelectrochemical conversion of solar energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1853), 993-1005.
6. Halme, Janne. "Dye-sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests." (2002).
7. Barceló, I., Guijarro, N., Lana-Villarreal, T., & Gómez, R. (2014). Recent progress in colloidal quantum dot-sensitized solar cells. *Quantum Dot Solar Cells*, 1-38.
8. G. Zhu, L. Pan, T. Xu, et al., CdS/CdSe-Cosensitized TiO₂ photoanode for quantumdot-sensitized solar cells by a microwave-assisted chemical bath deposition method, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 3 (8) (2011) 3146–3151.
9. Victoria González-Pedro, X. Xu, Iván Mora-Seró, et al., Modeling high-efficiency quantum dot sensitized solar cells, *ACS Nano* 4 (10) (2010) 5783–5790.
10. Yu, W. W., Qu, L., Guo, W., & Peng, X. (2003). Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals. *Chemistry of Materials*, 15(14), 2854-2860.
11. Carey, G. H., Abdelhady, A. L., Ning, Z., Thon, S. M., Bakr, O. M., & Sargent, E. H. (2015). Colloidal quantum dot solar cells. *Chemical reviews*, 115(23), 12732-12763.
12. Semonin, O. E., Luther, J. M., Choi, S., Chen, H. Y., Gao, J., Nozik, A. J., & Beard, M. C. (2011). Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell. *Science*, 334(6062), 1530-1533.
13. efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell, *Science* 334 (6062) (2011) 1530–1533.
14. Wang, Y., & Hu, A. (2014). Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(34), 6921-6939.
15. Lim, S. Y., Shen, W., & Gao, Z. (2015). Carbon quantum dots and their applications. *Chemical Society Reviews*, 44(1), 362-381.
16. Alivisatos, A. P. (1996). Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. *science*, 271(5251), 933-937.
17. Norris, D. J., & Bawendi, M. G. (1996). Measurement and assignment of the size-dependent optical spectrum in CdSe quantum dots. *Physical Review B*, 53(24), 16338.
18. González-Pedro, V., Xu, X., Mora-Sero, I., & Bisquert, J. (2010). Modeling high-efficiency quantum dot sensitized solar cells. *ACS nano*, 4(10), 5783-5790.
19. Niitsoo, O., Sarkar, S. K., Pejoux, C., Rühle, S., Cahen, D., & Hodes, G. (2006). Chemical bath deposited CdS/CdSe-sensitized porous TiO₂ solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 181(2-3), 306-313.
20. Chang, C. H., & Lee, Y. L. (2007). Chemical bath deposition of CdS quantum dots onto mesoscopic TiO₂ films for application in quantum-dot-sensitized solar cells. *Applied Physics Letters*, 91(5), 053503.
21. Luther, J. M., Gao, J., Lloyd, M. T., Semonin, O. E., Beard, M. C., & Nozik, A. J. (2010). Stability assessment on a 3% bilayer PbS/ZnO quantum dot heterojunction solar cell. *Advanced materials*, 22(33), 3704-3707.
22. Serban, B. C., Bumbac, M., Ionescu, O., Dumitru, V., rezeanu, M., Buiu, O., & Cobianu, C. *Quantum Dots versus Dyes in Sensitized Solar Cells: Synthesis, Optimization, Performance*.
23. Kamat, P. V. (2013). Quantum dot solar cells. The next big thing in photovoltaics. *The journal of physical chemistry letters*, 4(6), 908-918.
24. Zhao, K., Pan, Z., Mora-Seró, I., Cánovas, E., Wang, H., Song, Y., ... & Zhong, X. (2015). Boosting power conversion efficiencies of quantum-dot-sensitized solar cells beyond 8% by recombination control. *Journal of the American Chemical Society*, 137(16), 5602-5609.

25. Sun, J. K., Jiang, Y., Zhong, X., Hu, J. S., & Wan, L. J. (2017). Three-dimensional nanostructured electrodes for efficient quantum-dot-sensitized solar cells. *Nano Energy*, 32, 130-156.
26. Verma, A., Kar, M., & Singh, D. P. (2010). Aging effect of diethanolamine derived precursor sol on TiO₂ films deposited at different annealing temperatures. *Journal of sol-gel science and technology*, 54(2), 129-138.
27. Kong, W., Liu, B., Ye, B., Yu, Z., Wang, H., Qian, G., & Wang, Z. (2011). An Experimental Study on the Shape Changes of TiO₂ Nanocrystals Synthesized by Microemulsion-Solvothermal Method. *Journal of Nanomaterials*, 2011.
28. Zhao, Y., Pan, H., Lou, Y., Qiu, X., Zhu, J., & Burda, C. (2009). Plasmonic Cu_{2-x}S nanocrystals: optical and structural properties of copper-deficient copper (I) sulfides. *Journal of the American Chemical Society*, 131(12), 4253-4261.
29. Jing, M., Long, F., Jing, L., Lv, X., Zhang, J., & Wu, T. (2018). Dataset analysis on Cu₉S₅ material structure and its electrochemical behavior as anode for sodium-ion batteries. *Data in brief*, 20, 790-793.
30. Ahamad, T., Khan, M., Kumar, S., Ahamed, M., Shahabuddin, M., & Alhazaa, A. N. (2016). CdS quantum dots: growth, microstructural, optical and electrical characteristics. *Applied Physics B*, 122(6), 1-8.
31. Plass, R. (2004). Nanoparticle sensitisation of solid-state nanocrystalline solar cell (No. THESIS). EPFL.
32. Chen, L. Y., Chou, H. L., Chen, C. H., & Tseng, C. H. (2012). Surface modification of CdSe and CdS quantum dots-experimental and density function theory investigation. *Nanocrystals—Synthesis, Characterization and Applications*, 148.
33. Huang, P., Xu, S., Zhang, M., Zhong, W., Xiao, Z., & Luo, Y. (2020). Carbon quantum dots improving photovoltaic performance of CdS quantum dot-sensitized solar cells. *Optical Materials*, 110, 110535.
34. Veerathangam, K., Senthil Pandian, M., & Ramasamy, P. (2018). Influence of SILAR deposition cycles in CdS quantum dot-sensitized solar cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(9), 7318-7324.
35. Liu, C., Li, Y., Wei, L., Wu, C., Chen, Y., Mei, L., & Jiao, J. (2014). CdS quantum dot-sensitized solar cells based on nano-branched TiO₂ arrays. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 1-8.