

دراسة تأثير عدد دورات الامتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة (SILAR) في مردود الخلايا الشمسية المُحسّنة بنقاط كبريتيد الكاديوم الكومومية

محمد أسامة الحبال^{1*}، خالد مصري²، سحر الحريري³

1. طالب ماجستير علوم وهندسة المواد - المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
mhdosama.alhabbal@hiast.edu.sy

2. مدير بحوث - قسم الفيزياء - المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
khaled.masri@hiast.edu.sy

3. أستاذة مساعدة - قسم الكيمياء - كلية العلوم - جامعة دمشق
sahar.alhariri@damascusuniversity.edu.sy

الملخص

يتناول هذا البحث دراسة تأثير عدد دورات الامتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة (SILAR) Successive Ionic Layers Adsorption and Reaction في خصائص نقاط كبريتيد الكاديوم الكومومية والخلايا الشمسية المحضرة منها. جرى تحضير الإلكتروود الضوئي انطلاقاً من شرائح زجاجية مغطاة بطبقة من أكسيد القصدير المشوب بالفلور (FTO). جرى توضع طبقة مُصمّنة من ثنائي أكسيد التيتانيوم بطريقة التدوير spin coating، وطبقة مسامية من ثنائي أكسيد التيتانيوم النانوي بطريقة doctor blade، ومن ثمّ توضع النقاط الكومومية بطريقة امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة. أمّا الإلكتروود المضاد فقد جرى تحضيره من كبريتيد النحاس الأحادي على ركيزة من الشبه (Cu-Zn) brass. وأخيراً، جرى تجميع الخلية الشمسية بطريقة الساندويش باستعمال إلكتروود ناقل من البولي سلفيد.

جرى تحضير نقاط كبريتيد الكاديوم الكومومية من أجل عدد دورات SILAR (8،12،16،20)، ثم توصيفها ضوئياً بمطيافية الامتصاص الجزيئي (UV-VIS) وبمطيافية الفلورة. جرى تحضير خلايا شمسية من هذه الإلكتروودات، وقياس منحنياتها المميزة $J(V)$ باستعمال مصباح هالوجيني ودائرة قياس مُخصّصة لذلك. كانت أفضل الخلايا أداءً تلك الموافقة لـ 16 دورة، حيث كانت كثافة تيار القصر 11.1 mA/cm^2 وقلطية الدارة المفتوحة 364 mV وكفاءة التحويل الطاقوي 1.7%.

الكلمات المفتاحية: خلايا شمسية - نقاط كومومية - كفاءة الخلية - إلكتروود مضاد- إلكتروود ضوئي - كبريتيد الكاديوم - كبريتيد النحاس - دورات سيلار.

تاريخ الإيداع: 2022/9/9

تاريخ الموافقة: 2024/9/18



حقوق النشر: جامعة دمشق - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص
CC BY-NC-SA 04

Study of the effect of the cycles number of Successive Ionic Layers Adsorption and Reaction (SILAR) on the cadmium sulfide quantum dots sensitized solar cells efficiency.

Muhammad Osama Al-Habbal*¹, Khaled Al-Masry²
Sahar Hariri³

1. Master's student in Materials Science and Engineering - Higher Institute of Applied Sciences and Technology (HIAST) mhdosama.alhabbal@hiast.edu.sy

2. Research Director - Department of Physics - Higher Institute of Applied Sciences and Technology, khaled.masri@hiast.edu.sy

3. Assistant Professor - Department of Chemistry - Faculty of Science - Damascus University, sahar.alhariri@damascusuniversity.edu.sy

Abstract

This paper deals with the study of the effect of the number of adsorption cycles and the interaction of Successive Ionic Layers Adsorption and Reaction (SILAR) on the properties of cadmium sulfide quantum dots and solar cells prepared from them. The photoelectrode was prepared from glass slides with a layer of fluorine-doped tin oxide (FTO). A solid layer of titanium oxide was applied by spin coating and a porous layer of nanoporous titanium oxide by doctor blade, and then the quantum dots were placed by adsorption and interaction of successive ionic layers. The counter electrode was prepared from copper monosulfide on brass (Cu-Zn) substrate. Finally, the solar cell was assembled by sandwich method using a polysulfide conductive electrolyte.

Cadmium sulfide quantum dots were prepared for SILAR cycle counting (8,12,16,20) and then optically characterized by UV-VIS absorption spectroscopy and fluorescence spectroscopy.

Solar cells were prepared from these electrodes, and their characteristic curves J(V) were measured using a halogen lamp and a dedicated measuring circuit. The best performing cells were those corresponding to 16 cycles, where the short-circuit current density was 11.1 mA/cm², the open circuit voltage was 364 mV, and the energy conversion efficiency was 1.7%.

Key word: Solar Cells- Quantum Dots (Qds) - Cell Efficiency – Counter Electrode – Photo Electrode - Cadmium Sulfide – Copper (I) Sulfide – SILAR Cycles.

Received :2022/9/9

Accepted:2024/9/18



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

المقدمة:

ظهرت الخلايا الشمسية ذات النقاط الكمومية (QDSCs) كمرشح واعد للخلايا الشمسية من الجيل الثالث، نظرًا لسمات الإلكترونيات والضوئية المتميزة للنقاط الكمومية (QDs)، مثل الاستقرار العالي تجاه الحرارة والرطوبة، سهولة التحضير، إضافة إلى إمكانية التحكم بفجوة النطاق بضبط عمليات التصنيع، وبالتالي الحصول على نقاط كمومية تتمتع بامتصاص ضوئي قابل للضبط [1,2]. إضافة إلى ذلك، تتمتع النقاط الكمومية بمعامل امتصاص مولي عالي أكبر من معظم الأصباغ العضوية [3]، وعزم ثنائي قطب كبير مما يعزز عملية فصل الإكسيتونات وبثبات كيميائي تجاه الماء والأكسجين [4]. من مميزات النقاط الكمومية أيضًا قدرتها على توليد إكسيتونات متعددة (MEG) مما يدفع كفاءة تحويل الطاقة القصوى النظرية لهذه الخلايا إلى 44٪، وهو ما يتجاوز حد كيسر وشوكلي Shockley وQueasier البالغ 31٪ للخلايا الشمسية التقليدية [5]. بالمحصلة، تتميز الخلايا الشمسية المحسنة بنقاط كمومية بسهولة التصنيع والتحضير والتكلفة المنخفضة كما تتوافر موادها الأولية بشكل كبير ومتنوع مما يجعل هذه الخلايا منافسًا قويًا لخلايا الجيل الأول والثاني. في السنوات الأخيرة، ازداد اهتمام الباحثين بهذه الخلايا حتى أصبح عدد المنشورات العلمية المتاحة من عام 2016 حتى 2022 2109 أبحاث حسب موقع core [6].

يمكن توضيح النقاط الكمومية على سطوح أشباه الموصلات بطرائق عدة:

1- امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة (SILAR) Successive Ionic Layers Adsorption and Reaction [7]

2- ترسيب الحمام الكيميائي (chemical bath deposition CBD) [9.8]

3- الصب drop casting أو الطلاء بالدوران spin coating [10].

4- الرحلان الكهربائي [11].

5- الرابط ثنائي الوظيفة [12].

تتميز طريقة امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة بإمكانية التحكم بفجوة النطاق للنقاط الكمومية وذلك عن طريق التحكم بعدد الدورات وتغيير أنواع المذيبات، وبالتالي التحكم في امتصاص الضوء وكفاءة الخلية الشمسية.

في عام 2012 قام Paul [13] وزملاؤه بدراسة تأثير عدد دورات (SILAR) على كفاءة الخلية الشمسية باستخدام نقاط من كبريتيد الكادميوم كمحسس متوضعة على طبقة من ثنائي أكسيد التيتانيوم و إلكترود مضاد من البلاتين و إلكتروليت من اليود (I_3^- / I^-) ، حيث جرى توضع النقاط الكمومية على طبقة ثنائي أكسيد التيتانيوم بغمس الإلكترود الضوئي في محلول كحولي من إيثانول يحتوي على 0.33 M من نترات الكادميوم لمدة 30 ثانية ، وغسله بالإيثانول ، ومن ثم غمسه لمدة 30 ثانية أخرى في محلول ميثانول 0.5 من كبريتيد الصوديوم وغسله مرة أخرى بالميثانول. تم تكرار هذا الطلاء المتتالي لعدة مرات. أظهرت الخلية القائمة على 12 دورة الكفاءة الأعلى بين الخلايا المحضرة بكثافة تيار القصر 3.44 mA/cm^2 ، وقلبية دارة مفتوحة 690 mV ، وكفاءة تحويل طاقي 0.48%.

في عام 2014 قام H. K. Jun [14] وزملاؤه بدراسة تأثير كل من التركيز وعدد دورات ووقت الغمس (SILAR) على كفاءة الخلية الشمسية باستخدام نقاط من كبريتيد الكادميوم كمحسس متوضعة على طبقة من ثنائي أكسيد التيتانيوم النانوي وطبقة من ثنائي أكسيد التيتانيوم المترصعة و إلكترود مضاد من البلاتين و إلكتروليت من البولي سلفيد (0.5M Na₂S, 2M S, and 0.2M KCl) في محلول كحولي (ميثانول) / مائي (v: 3/v: 7) ، حيث تم توضع النقاط الكمومية على طبقة ثنائي أكسيد التيتانيوم بغمس الإلكترود الضوئي في محلول كحولي (إيثانول) يحوي على نترات الكادميوم ومن ثم غسله بالميثانول ومن ثم غمسه بمحلول ميثانولي من كبريتيد الصوديوم ومن ثم يغسل بالميثانول ، أظهرت النتائج أن التركيز الابتدائي الأمثل للسلائف (المحاليل الأولية) هو 0.1M وأن زمن الغمس الأمثل هو 5 دقائق كما أن عدد الدورات الأفضل هو 4 دورات SILAR حيث أظهرت الخلية المحضرة وفق تلك الوسطاء كثافة تيار قصر 11.42 mA/cm^2 ، وقلبية دارة مفتوحة 565 mV ، وكفاءة تحويل طاقي 1.67%.

في عام 2017 قام K. Veerathangam [15] وزملاؤه بدراسة تأثير عدد دورات (SILAR) على كفاءة الخلية الشمسية باستخدام نقاط من كبريتيد الكادميوم كمحسس متوضعة على طبقة من ثنائي أكسيد التيتانيوم و إلكترود مضاد من البلاتين و إلكتروليت من اليود (I/I_3)، حيث تم توزيع النقاط الكمومية على طبقة ثنائي أكسيد التيتانيوم بغمس الإلكترود الضوئي في محلول مائي يحتوي على 0.1M من نترات الكادميوم لمدة 2 دقيقة، وغسله بماء منزوع الشوارد، ومن ثم غمسه في محلول مائي 0.1 من كبريتيد الصوديوم وغسله مرة أخرى بماء منزوع الشوارد. تم تكرار هذا الطلاء المتتالي لعدة مرات مع الحفاظ على درجة حرارة 32 درجة مئوية، أظهرت الخلية القائمة على 12 دورة الكفاءة الأعلى بين الخلايا المحضرة بكثافة تيار القصر 2.716 mA/cm^2 ، ولفطية دارة مفتوحة 720 mV، وكفاءة التحويل الطاقى 1.45%.

في عام 2019 قام A. Khalid [16] وزملاؤه بتحضير خلايا شمسية محسنة بنقاط كمومية من كبريتيد الكادميوم متوضعة على طبقة من ثنائي أكسيد التيتانيوم النانوي بعدد دورات SILAR مختلفة حيث جرى غمس الأنود الضوئي لمدة دقيقة واحدة في محلول من نترات الكادميوم 0.1 M في الميثانول ومن ثم بعد ذلك يغسل القطب الضوئي بالميثانول ومن ثم يتم غمس الأنود الضوئي في محلول ميثانولي 0.1 مولاري Na_2S لمدة دقيقة واحدة متبوعة بغسل الميثانول، وإلكترود مضاد من البلاتين وإلكتروليت من بولي سلفيد

($1.1\text{M Na}_2\text{S}$, 1.2 M S , and 0.12 M KCl)، أظهرت الخلية القائمة على 10 دورات الكفاءة الأعلى بين الخلايا المحضرة بكثافة تيار القصر 2.24 mA/cm^2 ، ولفطية دارة مفتوحة 510 mV، وكفاءة التحويل الطاقى 0.48%.

في بحثنا الحالي جرى تحضير خلايا شمسية محسنة بنقاط كبريتيد الكادميوم الكمومية، ولكن باستعمال إلكتروليت سائل من البولي سلفيد (IM) وإلكترود مضاد من كبريتيد النحاس الأحادي، ودراسة تأثير عدد دورات (SILAR) في خصائص هذه النقاط وكفاءة هذه الخلايا.

أهداف البحث:

دراسة تأثير عدد دورات امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة (SILAR) على خصائص نقاط كبريتيد الكادميوم الكمومية وعلى الخلايا الشمسية المُحضرة منها.

المواد المستعملة في البحث:

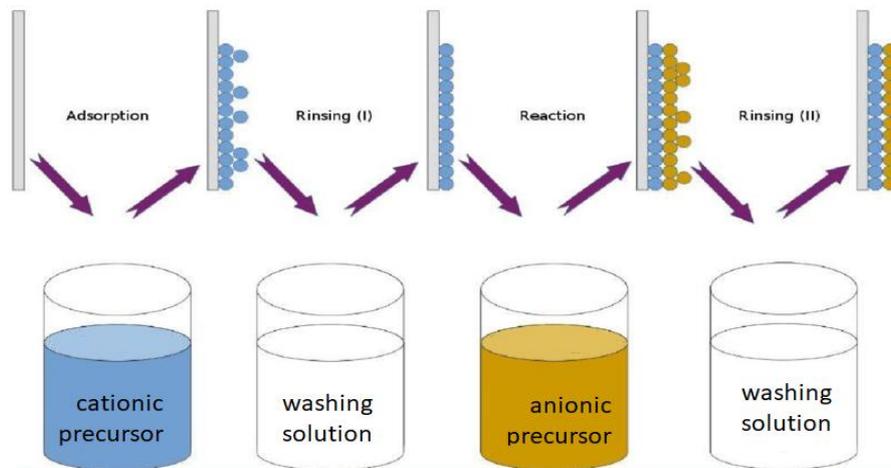
ماء مقطر (محلي)، ثنائي أكسيد التيتانيوم النانوي TiO_2 ، 25 نانومتر (Sigma-Aldrich) ، ايزوبروبوكسيد التيتانيوم $\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$ - Sigma-Aldrich ، أسيتيل أسيتون $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ - Sigma-Aldrich ، بولي ايثيلين جلايكول $(\text{C}_{2n}\text{H}_{4n+2}\text{O}_{n+1})$ ، دي ايثانول أمين $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2$ ، Merck-Triton X-100 $\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$ ، Sigma-Aldrich- 400- ، الإيثانول $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ - Honeywell ، شريحة من النحاس الأصفر -الشبه (Cu-Zn) - شرائح محلية، - كبريتيد Sigma-Aldrich ، Merck - s ، كبريتيد الصوديوم 65% Na_2S - Acros Organics ، حمض كلور الماء HCl : كثافة 1.19g/mL ، ونقاوة 37% - poch ، شرائح زجاجية مطلية بأكسيد القصدير المشبع بالفلور Sigma-Aldrich-(FTO) ، أسيتون CH_3COCH_3 - Sigma-Aldrich ، نترات الكادميوم المائية $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ - Sigma-Aldrich ، ايتيل سيليلوز - Sigma-Aldrich ، شرائح كوارتز.

الأجهزة المستعملة في البحث:

- فرن كهربائي ألماني الصنع Nabertherm L3/R Muffelofen
- جهاز تغشية بالدوران (spin coating): محلي الصنع
- 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 (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.
- دارة قياس المنحنيات المميزة I(V) صنع محلي.

تحضير الخلايا الشمسية ذات النقاط الكمومية:

جرى تحضير الخلايا الشمسية وفق الطريقة المنشورة سابقاً [17]، وهي تقوم باختصار على توضيح طبقة مصمتة من ثنائي أكسيد التيتانيوم بطريقة الطلي الدوراني على شرائح (FTO)، ثم طليها بطبقة ثانية مسامية من ثنائي أكسيد التيتانيوم بطريقة (Doctor blade) بعد تحديد المساحة المراد طليها بواسطة شريط لاصق. وأخيراً، يجري توضيح النقاط الكمومية على الإلكترود الضوئي بطريقة (SILAR) في درجة حرارة الغرفة، حيث يُغمس 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 يُغسل الإلكترود الضوئي بغمسه في الإيثانول مدة دقيقة واحدة ومن ثم يُترك في الهواء مدة 0.5 دقيقة. بعدها تُغمس الركيزة في محلول (50% إيثانول + 50% ماء مقطر حجماً) يحوي على 0.1 M من كبريتيد الصوديوم مدة دقيقة واحدة، بعد ذلك تجفّ العينة مدة نصف دقيقة في الهواء، وأخيراً يُغسل الإلكترود بغمسه في الإيثانول مدة دقيقة واحدة. تُعدّ جميع الخطوات السابقة دورة واحدة.

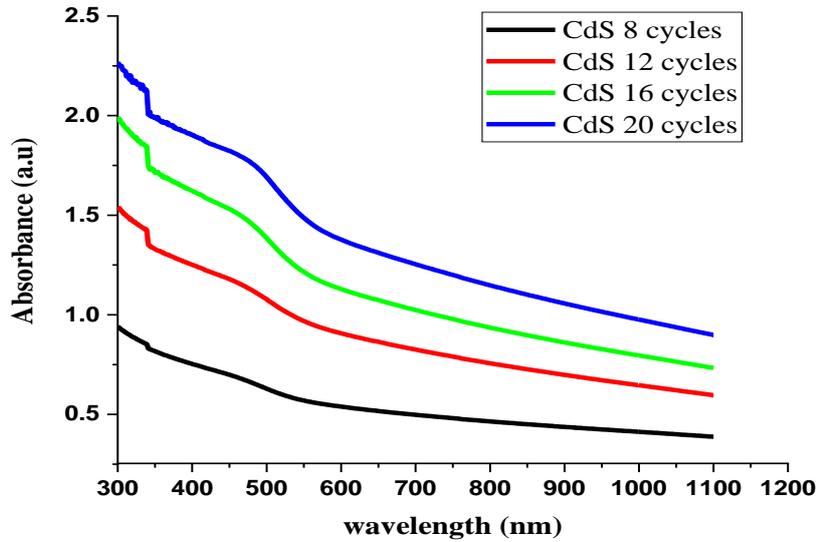


الشكل (1): آلية تحضير النقاط الكمومية في الموضع على الإلكترود الضوئي بطريقة (SILAR) [17]

جرى تكرار عملية التوضيع لعددٍ من الدورات (8-12-16-20 دورة)، كما يوضح ذلك الشكل (1). أما الإلكترود المضاد (كبريتيد النحاس الأحادي) فيحضّر من شريحة من سبيكة الشبه (brass) بمعالجتها بوسط من حمض كلور الماء (37% w/w) في درجة حرارة 90°C ومن ثم غمسها بمحلول بولي سلفيد تركيزه 1M مدة خمسة دقائق. ولتحضير الإلكتروليت، يُمزج 1M من كبريتيد الصوديوم مع 1M من زهر الكبريت في محلول مائي نقي، بحيث نحصل على بولي سلفيد بتركيز 1M. أخيرًا، تُجمّع أجزاء الخلية بطريقة الساندويش بعد حصر المساحة الفعّالة في الإلكترود الضوئي بلاصق وإضافة نقطة من الإلكتروليت.

النتائج والمناقشة

- توصيف النقاط الكمومية لكبريتيد الكاديوم المتوضعة على شرائح من الكوارتز:
- أطياف الامتصاص الضوئي



الشكل (2): أطياف الامتصاصية لنقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية المتوضعة على شرائح الكوارتز بعددٍ مختلف من الدورات

يظهر الشكل (2) أطياف امتصاصية نقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية المتوضعة على شرائح من الكوارتز بعددٍ مختلف من الدورات. تدل أطياف الامتصاصية إلى أن الامتصاصية تزداد بزيادة عدد دورات سيلر، وهذا يتوافق مع ما ورد في المرجع [16]، مما يدل على زيادة كمية النقاط الكمومية الممتزة. كما يلاحظ وجود كتف امتصاص عند طول الموجة 474 nm.

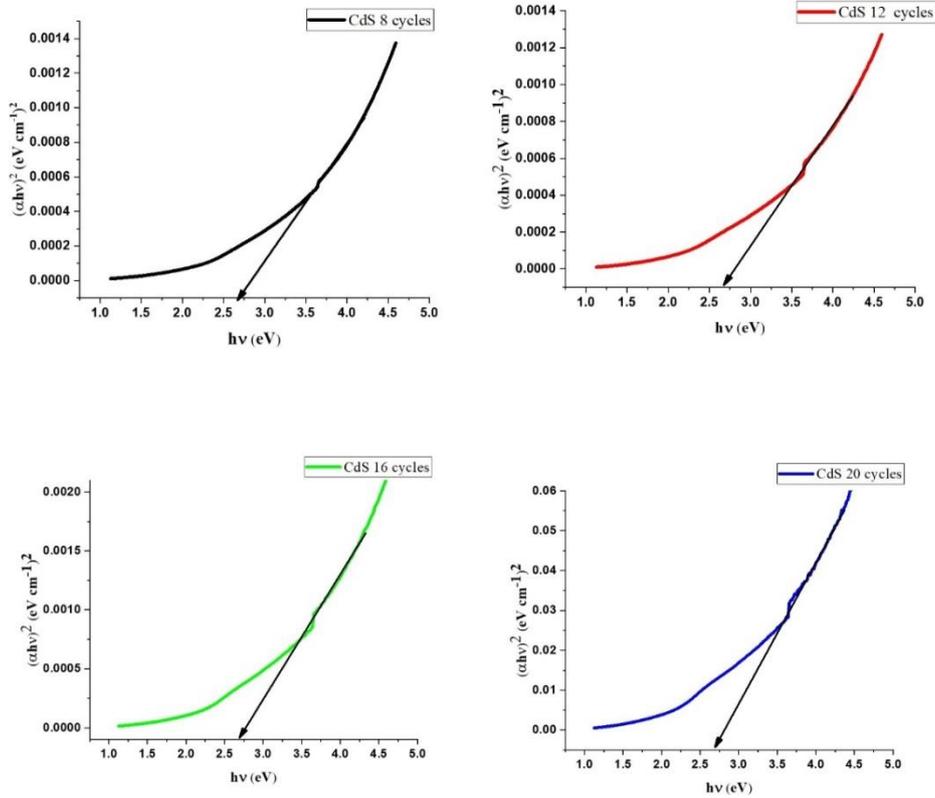
- حساب فجوة النطاق للنقاط الكمومية CdS:

يمكن حساب فجوة النطاق اعتمادًا على علاقة تاوك [18]:

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

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، A ثابت، ν التردد و E_g طاقة فجوة النطاق.

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 . يبين الشكل (3) المنحنيات الموافقة للنقاط الكمومية المحضرة بعدد دورات مختلفة، كما يظهر الجدول (1) قيم فجوة النطاق المقابلة لها. نلاحظ أن فجوة النطاق لجميع النقاط متقاربة $E_g \approx 2.66$ eV وهي أكبر من فجوة نطاق CdS الحجمي (2.42 eV) [18] مما يدل على فعل الحصر الكوموي الناتج عن الأبعاد النانوية لـ CdS.



الشكل (3): منحنيات $(\alpha \cdot hv)^2$ بدلالة hv لتحديد فجوة النطاق لـ QDCdS المحضرة بعدد دورات مختلفة

الجدول (1): قيم فجوة نطاق النقاط الكمومية المحضرة بعدد دورات SILAR مختلفة

فجوة النطاق eV	عدد دورات SILAR
2.67	8
2.65	12
2.66	16
2.66	20

- حساب أقطار النقاط الكمومية

جرى حساب أقطار النقاط الكمومية لكبريتيد الكاديوم اعتمادًا على تقريب نموذج الكتلة الفعالة، باستعمال العلاقة (2) [18,19]:

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

حيث: $E_g(\text{nano})$ طاقة فجوة النطاق للنقطة الكمومية، $E_g(\text{bulk})$ 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.

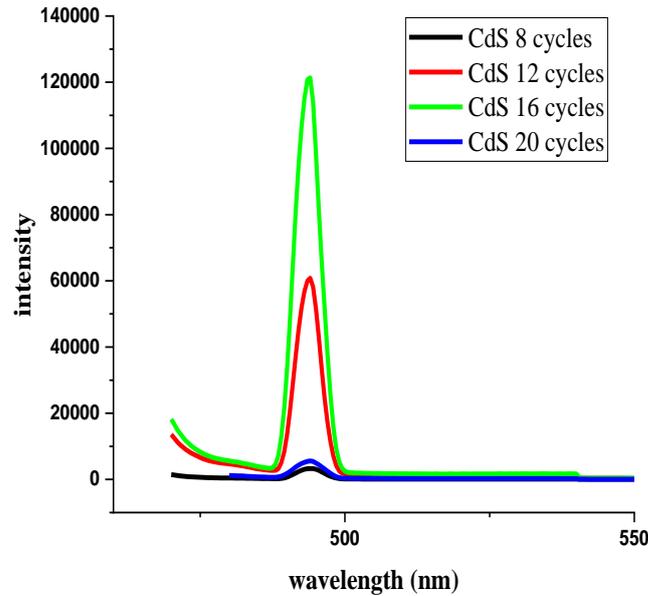
يظهر الجدول (2) أقطار النقاط الكمومية المحضرة، ونلاحظ أن أقطار النقاط الكمومية متقاربة نظراً لتقارب قيم فجوتها الطاقية.

الجدول (2): أقطار النقاط الكمومية المحضرة بعدد دورات SILAR مختلفة

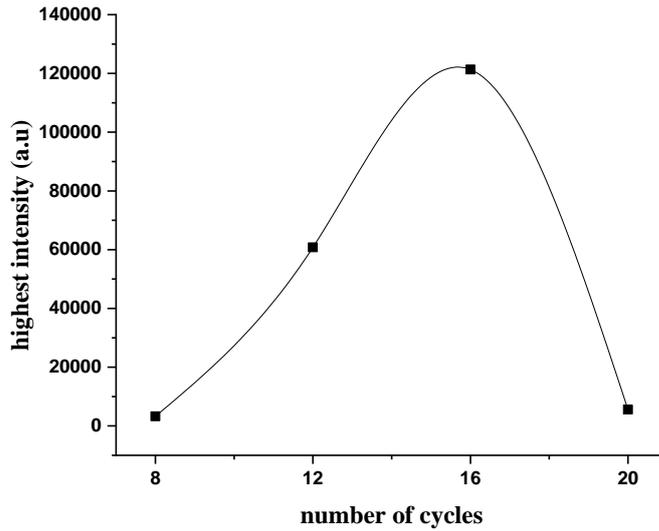
عدد دورات SILAR	القطر (nm)
8	6.3
12	6.5
16	6.4
20	6.4

- أطياف الفلورة

يبين الشكل (4) أطياف فلورة نقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية المحضرة بعدد دورات SILAR مختلفة عند إثارتها بضوء طول موجته 460nm . يظهر طيف الفلورة قمم اصدار عند الطول الموجي 490nm بشدات مختلفة تبعاً لعدد الدورات، تمتلك النقاط الكمومية المحضرة بـ 16 دورة الشدة الأعلى، في حين تكون الشدة منخفضة للنقاط المحضرة بـ 8 دورات نتيجة قلة كمية النقاط الكمومية الممتزة على الركيزة، أما النقاط المحضرة بـ 20 دورة فيعزى انخفاض شدة الفلورة إلى ازدياد كمية النقاط الكمومية كثيراً، وهذا يؤدي إلى عملية تخميد ذاتي self-quenching نتيجة امتصاص النقاط الكمومية للضوء الصادر عن النقاط الأخرى. يظهر الشكل (5) تغير شدة الإصدار العظمى مع عدد دورات SILAR.



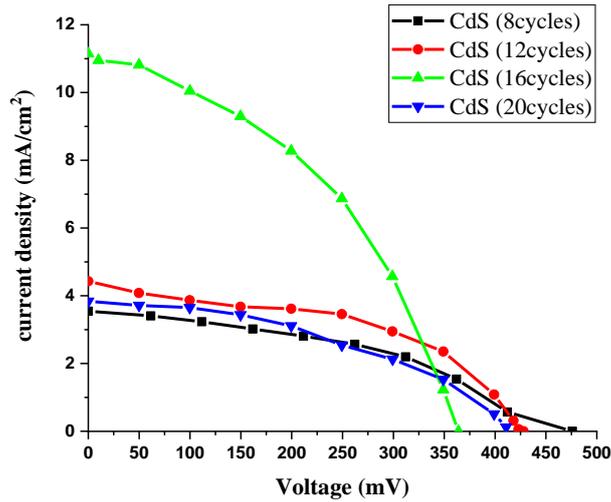
الشكل (4) أطياف فلورة نقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية المحضرة بعدد دورات SILAR مختلفة.



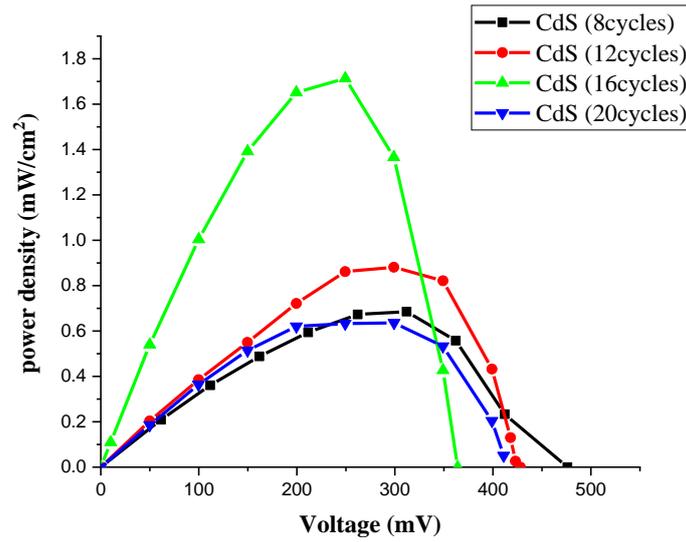
الشكل (5) علاقة شدة الإصدار بعدد دورات SILAR

● قياس المنحني المميز J-V للخلايا الشمسية:

جرى قياس المنحنيات المميزة للخلايا الشمسية المحضرة باستعمال مصباح هالوجيني شدة إضاءته 100 mW/cm^2 . يظهر الشكل (6) هذه المنحنيات.



الشكل (6): المنحنيات المميزة للخلايا الشمسية بمختلف عدد دورات سيلر



الشكل (7): منحنيات كثافة الاستطاعة/الفلطية للخلايا المحضرة

ويبين الشكل (7) منحنيات كثافة الاستطاعة لهذه الخلايا.

من المنحنيات السابقة يمكننا تحديد كثافة تيار القصر (J_{sc}) للخلايا وفلطية الدارة المفتوحة (V_{oc}) والاستطاعة العظمى (P_{max})، كما يُمكن حساب معامل الملاء (FF) من العلاقة (3) وكفاءة الخلية η من العلاقة (4) [20]:

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

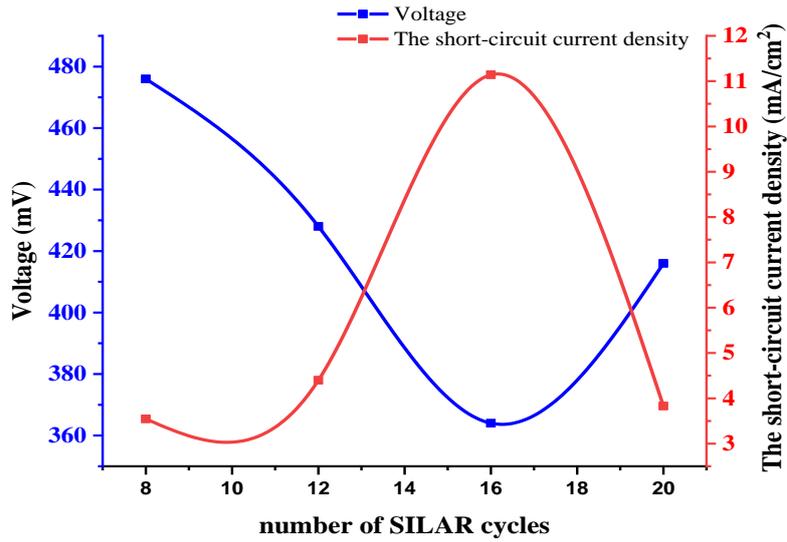
$$\eta\% = \frac{P_{max}}{P_{in}} * 100 \quad (4)$$

حيث: P_{in} شدة إشعاع المصباح وتساوي 100 mW/cm^2 .

ويبين الجدول (3) قيم كل وسطاء الخلايا.

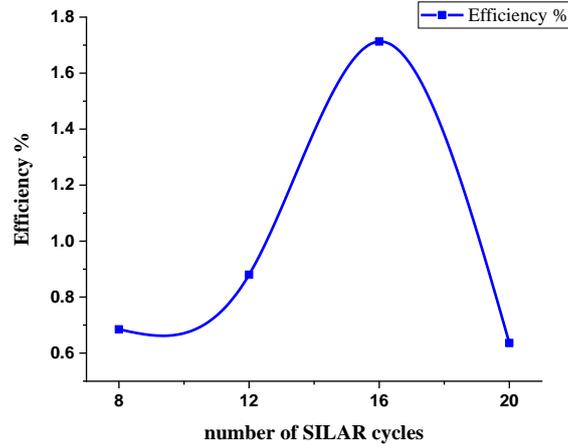
الجدول (3): قيم وسطاء الخلايا المحضرة

η %	FF %	$P_{max}(\text{mW/cm}^2)$	$V_{oc}(\text{mV})$	$J_{sc}(\text{mA/cm}^2)$	عدد دورات سيلر
0.68	40.6	0.68	476	3.54	8
0.88	46.7	0.88	428	4.40	12
1.71	42.17	1.71	364	11.14	16
0.64	40.50	0.64	410	3.83	20



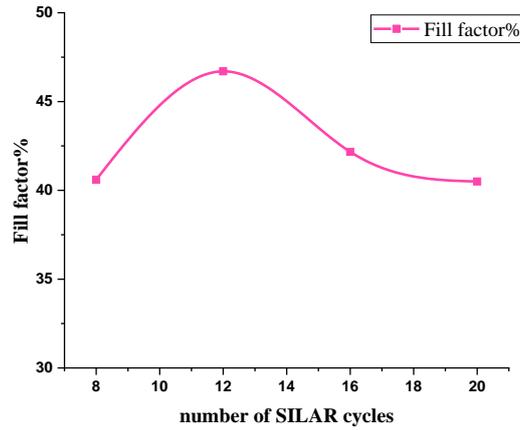
الشكل (8): تأثير عدد دورات سيلر في كثافة تيار القصر ولفطية الدارة المفتوحة للخلايا الشمسية

يظهر الشكل (8) تأثير عدد دورات سيلر في كل من كثافة تيار القصر ولفطية الدارة المفتوحة للخلايا. يُلاحظ أن كثافة تيار القصر تزداد بازدياد عدد دورات سيلر حتى 16 دورة ومن ثم تتناقص، في حين تتناقص لفظية الدارة المفتوحة بازدياد عدد دورات سيلر حتى عدد دورات 16 دورة ومن ثم تزداد قليلاً. هناك عدة عوامل تؤثر في هذين البارامترين. إذ يمكن أن تُعزى زيادة التيار إلى ازدياد كمية النقاط الكمومية الممتزة مما يؤدي إلى زيادة امتصاص الضوء، ولكن بعد حد معين ينخفض مردود حقن الإلكترونات من النقاط الكمومية إلى ثنائي أكسيد التيتانيوم بسبب ازدياد ثخانة CdS، ومن ثم يتناقص التيار.



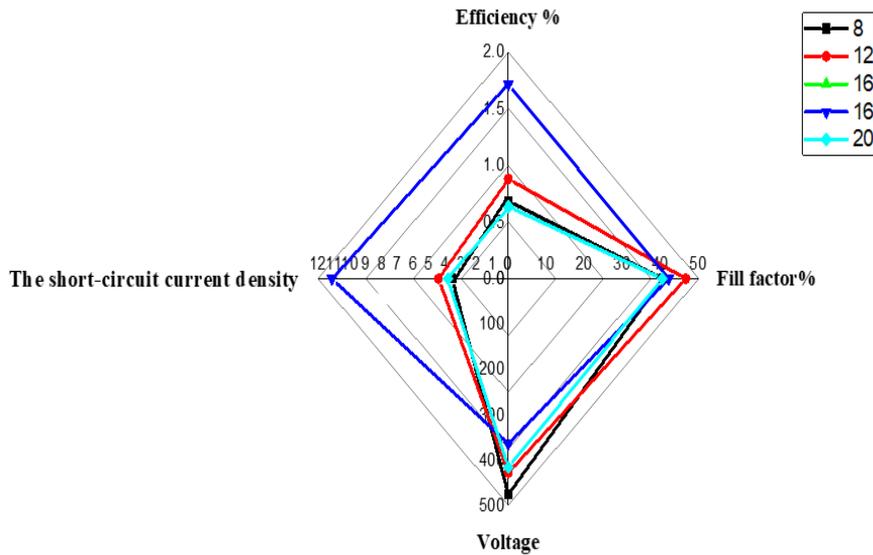
الشكل (9): منحنى كفاءة الخلايا الشمسية المحضرة بدلالة عدد دورات سيلر

ظهر الشكل (9 و 10) منحنيًا كفاءة ومعامل ملء الخلايا الشمسية المحضرة بدلالة عدد دورات سيلر



الشكل (10): منحنى معامل الملء للخلايا بدلالة عدد دورات سيلر

نلاحظ أن كفاءة الخلية الشمسية الموافقة لـ 16 دورة سيلر هي الأعلى حيث بلغت 1.7% مع أن عامل الملء أقل من عامل ملء الخلية الموافقة لـ 12 دورة، نظرًا للزيادة الكبيرة للتيار. يظهر الشكل (11) مخططاً يبين تأثير عدد دورات سيلر في كل الوسطاء معاً.



الشكل (11): تأثير عدد دورات سيلر في كل وسطاء الخلية

الخاتمة والاستنتاجات:

تُعدّ النقاط الكمومية لكبريتيد الكاديوم مادة واحدة لاستعمالها مُحسَّناً 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، ويمكن التحكم بها من خلال عدد الدورات ودرجة حرارة الامتزاز ونوع المذيبات المستخدمة. 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.

- جرى توصيف نقاط كبريتيد الكاديوم الكمومية بمطيافية الامتصاص في المجال فوق البنفسجي والمرئي.
- تم حساب أبعاد النقاط الكمومية المحضرة وفق نموذج تقريب الكتلة الفعال.
- تم توصيف النقاط الكمومية المحضرة بمطيافية الفلورة.
- حضرت خلايا شمسية بجميع أجزائها الإلكترون الضوئي والإلكترون المضاد والمادة المحسنة والإلكترونات الناقل.
- جرى تجميع الخلايا الشمسية وقياس وسطاءها بواسطة مصباح هالوجيني شدة إضاءته 100 mW/cm^2 .
- دُرِس تأثير عدد دورات سيلر على وسطاء الخلية، وتبين أن الخلايا الموافقة لـ 16 دورة سيلر تتمتع بأعلى كفاءة.
- تتوافق هذه النتائج مع الدراسات المرجعية [13,14,15,16] وتتفوق على بعضها وتسمح من خلالها المضي قدما في تطوير أجزاء أخرى من الخلية بغية رفع كفاءة الخلية وتعزيز ميزاتها.

معلومات التمويل :

هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

المراجع:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] <https://core.ac.uk/search?q=quantum+dot+sensitized+solar+cells++AND+%28yearPublished%3E%3D2016+AND+yearPublished%3C%3D2022%29&page=1>
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Kamat, P. V. (2013). Quantum dot solar cells. The next big thing in photovoltaics. *The journal of physical chemistry letters*, 4(6), 908-918.
- [13] Paul, G. S., Kim, J. H., Kim, M. S., Do, K., Ko, J., & Yu, J. S. (2012). Different hierarchical nanostructured carbons as counter electrodes for CdS quantum dot solar cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(1), 375-381.
- [14] Jun, H. K., Careem, M. A., & Arof, A. K. (2014). Fabrication, characterization, and optimization of CdS and CdSe quantum dot-sensitized solar cells with quantum dots prepared by successive ionic layer adsorption and reaction. *International Journal of Photoenergy*, 2014.
- [15] 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.
- [16] Khalid, A., Easawi, K., Abdallah, S., El-Shaarawy, M. G., Negm, S., & Talaat, H. (2019). The Photovoltaic Performance of CdS/Cu₂S (QD) Co-Sensitized Solar Cell. *American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 56(1), 62-73.
- [17] محمد أسامة الحبال، خالد المصري، سحر الحريري. (2022). تحضير خلية شمسية مُحسَّنة بنقاط كمومية من كبريتيد الكادميوم باستعمال طريقة امتزاز وتفاعل الطبقات الأيونية المتعاقبة (SILAR) وتوصيفها. *مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية* (قبلت للنشر بتاريخ 2022/6/19).
- [18] 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.
- [19] Plass, R. (2004). Nanoparticle sensitization of solid-state nanocrystalline solar cell (No. THESIS). EPFL
- [20] علي حمزة، (2016–2017)، هندسة النظم الشمسية الكهروضوئية تحليل وتصميم. منشورات جامعة دمشق كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية