

ẢNH HƯỞNG CỦA PHƯƠNG PHÁP CHẾ TẠO LÊN HIỆU SUẤT CỦA PIN MẶT TRỜI CHẤM LƯỢNG TỬ

Hà Thanh Tùng*, Huỳnh Vĩnh Phúc và Lê Thị Ngọc Tú

Khoa Sư phạm Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Đồng Tháp, Việt Nam

*Tác giả liên hệ: Hà Thanh Tùng, Email: httung@dthu.edu.vn

Lịch sử bài báo

Ngày nhận: 15/3/2021; Ngày nhận chỉnh sửa: 17/5/2021; Ngày duyệt đăng: 19/7/2021

Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, chúng tôi chế tạo màng a nốt quang $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ với $\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ được chế tạo theo hai phương pháp lắng đọng hóa học và phản ứng hấp thụ các ion nhằm cải thiện hiệu suất của pin mặt trời chấm lượng tử. Kết quả thu được màng TiO_2 có cấu trúc Anatase, CdS và CdSe pha tạp Mn đều có cấu trúc lập phương. Dạng hình học của màng cũng được ghi lại bằng kính hiển vi điện tử quét độ phân giải cao, hạt có dạng hình cầu. Kết quả hiệu suất thu được từ đường cong mật độ dòng và thế đối với $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ -CBD là 4,9% cao hơn so với 3,77% của $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ -SILAR. Hơn nữa, tính chất quang học, đường cong mật độ dòng và thế, điện trở động học của các pin mặt trời cũng được xác định chi tiết nhằm giải thích kết quả trên.

Từ khóa: Bán dẫn, chấm lượng tử, màng mỏng, pin mặt trời.

INFLUENCE OF PREPARATION METHODS ON THE PERFORMANCE EFFICIENCY OF QUANTUM DOT SENSITIZED SOLAR CELL

Ha Thanh Tung*, Huynh Vinh Phuc, and Le Thi Ngoc Tu

Faculty of Natural Sciences Teacher Education, Dong Thap University, Vietnam

*Corresponding author: Ha Thanh Tung, Email: httung@dthu.edu.vn

Article history

Received: 15/3/2021; Received in revised form: 17/5/2021; Accepted: 19/7/2021

Abstract

In this study, we have prepared $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ with $\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ photoanode using chemical bath deposition and successive ionic layer adsorption and reaction methods to improve the performance efficiency of quantum dot sensitized solar cell. As a result, TiO_2 thin film has an Anatase structure, both CdS and CdSe doped Mn have the zinc blende. The morphologies of photoanode, as a sphere, were recorded by scanning electron microscopy. The current density - Voltaic curves show that the performance efficiency for $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ - chemical bath deposition is 4.9%, which is higher than that of $\text{TiO}_2/\text{CdS}/\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ - successive ionic layer adsorption and reaction (3.77%). Moreover, optical properties, current density - Voltaic curves, dynamic resistances R_{ct1} and R_{ct2} were determined and explained details.

Keywords: Semiconductor, quantum dot, thin film, solar cell.

DOI: <https://doi.org/10.52714/dthu.11.2.2022.936>

Trích dẫn: Hà, T. T., Huỳnh, V. P., & Lê, T. N. T. (2022). Ảnh hưởng của phương pháp chế tạo lên hiệu suất của pin mặt trời chấm lượng tử. *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp*, 11(2), 39-44. <https://doi.org/10.52714/dthu.11.2.2022.936>.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây vật liệu bán dẫn vô cơ ở kích thước nanomet như chấm lượng tử (Quantum dots, QDs) nổi lên như vật liệu có khả năng hấp thụ ánh sáng rất mạnh sinh ra điện tử ứng dụng trong pin mặt trời. O'Regan và Grätzel (1991), Poh & cs. (2021) đã chế tạo nhiều QDs ứng dụng trong QDSSCs như: CdS, CdSe, PbS, PbSe, InP. Kovalenko (2015) cho rằng các QDs có nhiều ưu điểm hơn so với các phân tử chất màu do chúng ta có thể điều khiển năng lượng vùng cấm thông qua quá trình thay đổi kích thước hạt, theo Lee & cs. (2012) thì các QDs có hệ số hấp thụ quang học cao hơn so với các phân tử chất màu và sinh ra nhiều cặp điện tử - lỗ trống khi hấp thụ photon.

Nhìn chung các công trình của Gopi & cs. (2016), Muthalif & cs. (2017), Firoozi & cs. (2015) có đặc điểm đáng lưu ý đều thực hiện trên đơn QDs CdS hoặc CdSe nên chỉ hấp thụ ánh sáng mặt trời có giới hạn, không tận dụng hết vùng phổ khả kiến. Cụ thể bước sóng hấp thụ ở vật liệu khối của CdS khoảng 550 nm và của CdSe khoảng 705 nm. Trong khi đó nếu ở kích thước QDs, thì bước sóng hấp thụ của cả hai bé hơn nhiều so với các giá trị trên. Mặc dù sau đó có sử dụng tác nhân liên kết, tuy nhiên kết quả hiệu suất tăng lên không đáng kể. Vì vậy để cải tiến hiệu suất của pin mặt trời thì vấn đề đặt ra là phải mở rộng đỉnh của phổ hấp thụ về sâu trong vùng ánh sáng khả kiến và hạn chế tái hợp cũng như dòng tối. Các công trình của Dang & cs. (2016), Shen & cs. (2016), Thao & cs. (2018), Nguyen & cs. (2018) đã mở rộng vùng phổ hấp thụ ánh sáng mặt trời bằng cách kết hợp cả hai loại QDs CdS/CdSe lại với nhau đã được nhiều nhóm nghiên cứu, hiệu suất thu được cao hơn nhiều so với pin mặt trời sử dụng đơn QDs.

Một kỹ thuật cải tiến khả năng hấp thụ ánh sáng của điện cực a nốt quang đó là pha tạp các ion kim loại chuyển tiếp vào chấm lượng tử nhằm tạo ra các mức ion tạp chất trong vùng cấm quang của các chấm lượng tử, qua đó mở rộng đỉnh phổ hấp thụ về phía sóng dài (dịch đỏ). Shen & cs. (2016) đã nghiên cứu trên pin mặt trời chấm lượng tử CdS pha tạp Mn đạt được hiệu suất 3,29%. Sự tăng hiệu suất là do ảnh hưởng của nồng độ pha tạp làm tăng khả năng phân tách và quá trình truyền điện tích từ các chấm lượng tử qua bán dẫn TiO_2 và ra mạch ngoài. Tương tự, nhóm của Gopi & cs. (2016) đã pha tạp Ni vào chấm lượng

tử CdS và cải tiến được phổ hấp thụ của chấm lượng tử CdS và hạn chế được tái hợp. Do đó hiệu suất thu được tăng 50% so với pin mặt trời không pha tạp Ni. Gần đây, Muthalif & cs. (2017) đã chứng minh cải thiện hiệu suất của chấm lượng tử CdS khi pha tạp với kim loại đồng hay Co pha tạp vào chấm lượng tử CdS làm tăng hiệu suất lên 35%.

Trong kỹ thuật trên, chúng tôi thực hiện pha tạp ion Mn^{2+} vào chấm lượng tử CdSe nhằm mở rộng đỉnh phổ hấp thụ dịch sâu về vùng khả kiến. Đồng thời chúng tôi chế tạo màng CdSe pha tạp Mn bằng phương pháp lắng đọng hóa học và phương pháp phản ứng, hấp thụ ion nhằm so sánh hiệu quả cải thiện hiệu suất của pin mặt trời.

2. Thục nghiệm

Vật liệu và hóa chất: Fluorine-doped tin oxide, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, bột Se, Na_2SO_3 , NaOH, Na_2SeO_3 , CdSO_4 , Na_3NTA , Na_2S , S, KCl được mua từ hãng hóa chất Sigma, nước Đức.

Màng dẫn điện (fluorine-doped tin oxide, FTO) có kích thước dài và rộng $1,2 \times 2$ cm, có độ dày 2,2 mm được đánh siêu âm, rửa sạch bằng ethanol và nước cất. Keo TiO_2 thương mại có kích thước hạt từ 20 nm đến 40 nm được phủ lên màng FTO bằng phương pháp in lụa. Sau đó màng được nung trong môi trường không khí ở 500°C sử dụng cho bước chế tạo tiếp theo.

Chế tạo màng TiO_2/CdS : Màng FTO/ TiO_2 được nhúng vào trong hỗn hợp dung dịch chứa ion Cd^{2+} gồm (2,665 g $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ hòa tan với 20 ml ethanol và nước cất theo tỉ lệ 1:1 về thể tích) trong thời gian 5 phút và được rửa lại bằng ethanol để loại bỏ các phức chất kết tụ. Tiếp theo màng được nhúng vào trong dung dịch chứa ion S^{2-} gồm (12 g $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ hòa tan với 100 ml methanol và nước cất theo tỉ lệ 1:1) trong thời gian 5 phút và được rửa lại bằng methanol. Hai bước này được ký hiệu là 1 vòng của phương pháp phản ứng, hấp thụ ion.

2.1. Chế tạo màng $\text{CdSe}:\text{Mn}^{2+}$ bằng phương pháp phản ứng, hấp thụ ion

Màng FTO/ TiO_2/CdS tiếp tục được nhúng trong hỗn hợp dung dịch chứa ion Cd^{2+} và Mn^{2+} gồm (0,740304 g $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ và 0,154 g $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ được hòa tan trong 30 ml ethanol) trong thời gian 5 phút và rửa sạch lại với

ethanol để loại bỏ tạp chất. Tiếp theo, màng được nhúng trong dung dịch chứa ion Se^{2-} (2,27 g bột Se và 0,6M Na_2SO_3 hòa tan với 100 ml nước cất, sau đó thêm 5 ml NaOH 1M trong điều kiện khuấy từ gia nhiệt ở 70°C trong 7 giờ) trong thời gian 15 phút ở 50°C và rửa lại với nước cất. Quá trình trên được lặp lại 3 lần để nhận được độ dày tối ưu. Cuối cùng, màng được nung ở 300°C trong chân không 30 phút để đạt được trạng thái kết tinh.

2.2. Chế tạo màng CdSe:Mn²⁺ bằng phương pháp lắng đọng hóa học

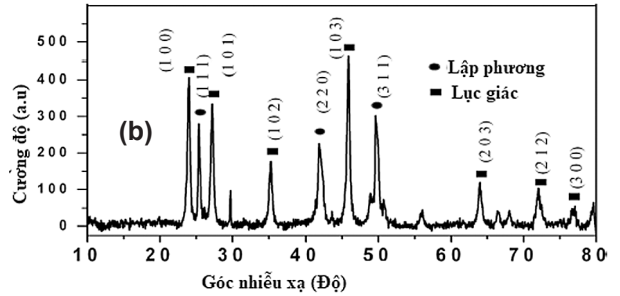
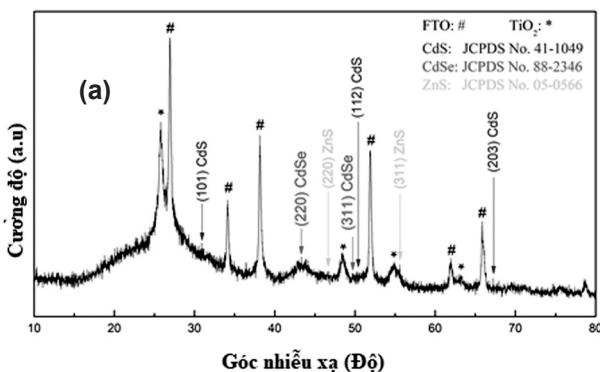
0,2 M bột Se được hòa tan trong nước cất và 0,5 M Na_2SO_3 trong điều kiện khuấy ở 70°C trong thời gian 7 giờ thu được dung dịch chứa Na_2SeO_3 . Hòa tan 80 mM CdSO_4 với 10% nồng độ mol của $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ trong nước cất, sau đó thêm vào 160 mM Na_3NTA , 80 mM Na_2SeO_3 khuấy đều thu được dung dịch chứa CdSe pha tạp Mn^{2+} . Màng FTO/ TiO_2 /CdS được ngâm trong dung dịch trên trong thời gian 4 giờ dưới điều kiện tối thu được Màng FTO/ TiO_2 /CdS/CdSe:Mn²⁺.

Cuối cùng hệ điện ly polysulfide electrolyte được chế tạo bằng cách trộn hỗn hợp 0,5 M Na_2S , 0,2 M S, 0,2 M KCl trong nước cất và methanol theo tỉ lệ 7:3.

2.3. Các thiết bị nghiên cứu

Để nghiên cứu cấu trúc, tính chất quang, tính chất điện, đo hiệu suất của pin mặt trời chúng tôi sử dụng các thiết bị sau: Phổ nhiễu xạ tia X (XRD), phổ hấp thụ UV-Vis JASCO V-670, kính hiển vi điện tử quét FESEM, thiết bị đo đường đặc trưng Volt - Ampe; phổ đo điện trở thiết bị EIS.

3. Kết quả và thảo luận



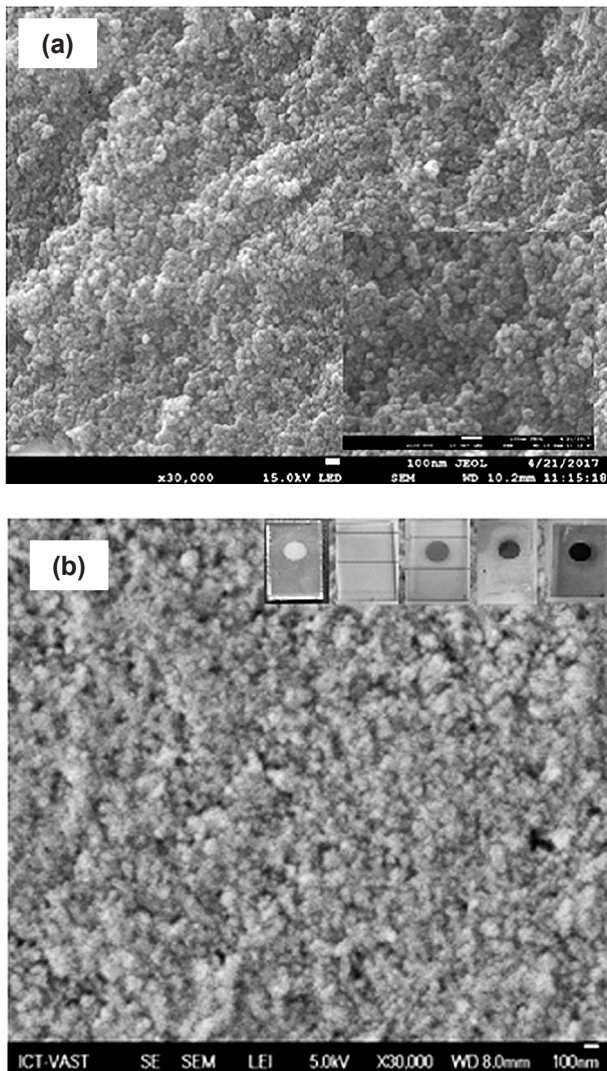
Hình 1. Phổ nhiễu xạ tia X của: (a) màng TiO_2 /CdS/CdSe:Mn, (b) màng CdSe

Màng mỏng sau khi nung xong được xác định tính chất cấu trúc bằng phổ nhiễu xạ tia X, kết quả thu được được trình bày ở Hình 1. Từ giản đồ nhiễu xạ ta thấy xuất hiện các đỉnh nhiễu xạ ở vị trí 43,2 và 50,1 độ tương ứng với các mặt phẳng có chỉ số Miller (220) và (311) của cấu trúc CdSe dạng lập phương. Kết quả này phù hợp với các thẻ chuẩn JCPDS No. 88-2346 của nhóm tác giả Song & cs. (2010). Bên cạnh đó, các đỉnh nhiễu xạ ở 30,6, 50,5 và 67,1 độ tương ứng với các mặt phẳng mạng (101), (112), (203) của CdS lập phương, phù hợp với thẻ chuẩn JCPDS No. 41-1019 của nhóm tác giả Song & cs. (2010). Cuối cùng, đỉnh nhiễu xạ mạnh nhất xuất hiện ở 25,4 độ tương ứng với mặt phẳng mạng (101) của TiO_2 dạng Anatase theo nhóm Nguyen & cs. (1990). Để khẳng định kết quả nhiễu xạ, chúng tôi dùng Hình 1b của nhóm tác giả Muthukannan & cs. (2014) để so sánh. Nhóm này cũng đã thực hiện đo trong khoảng 2θ từ 10 đến 80 thu được tất cả các đỉnh đặc trưng của CdSe ở cấu trúc lập phương và lục giác. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với vị trí các đỉnh trong phổ nhiễu xạ của chúng tôi thu được.

Hình 2a và 2b được ghi lại bằng kính hiển vi điện tử quét trên bề mặt màng ở cả hai phương pháp chế tạo. Kết quả cho thấy các hạt TiO_2 có dạng cầu, kích thước trung bình khoảng 40 nm ở cả hai màng. Bên cạnh đó, bề mặt của màng khá xốp tạo điều kiện cho các hạt chấm lượng tử CdS, CdSe:Mn²⁺ bám lên trên bề mặt bán dẫn nano TiO_2 .

Tính chất quang học của màng ở cả hai phương pháp lắng đọng hóa học và phương pháp phản ứng hấp thụ ion được ghi lại bằng thiết bị đo phổ hấp thụ. Từ Hình 3, ta thấy đường cong hấp thụ của màng được chế tạo theo phương pháp lắng đọng hóa học có cường độ hấp thụ cao gấp hai lần và có đỉnh hấp thụ mở rộng sâu hơn trong vùng khả kiến

so với màng được chế tạo bằng phương pháp phản ứng, hấp thụ ion. Nguyên nhân là do kích thước hạt CdSe:Mn²⁺ thu được ở cả hai phương pháp là khác nhau. Kết quả này còn được khẳng định thông qua độ rộng vùng cấm quang của màng từ Bảng 1: màng CdSe:Mn²⁺-CBD có độ rộng vùng cấm là 1,73 eV, trong khi màng CdSe:Mn²⁺-SILAR có độ rộng vùng cấm là 1,8 eV. Độ rộng vùng cấm của CdSe:Mn²⁺ càng bé thì khả năng hấp thụ càng nhiều photon ở các vùng khác nhau trong vùng khả kiến. Ngoài ra do phương pháp chế tạo khác nhau và khác nhau ở một số hóa chất nguồn nên dẫn đến cường độ phổ hấp thụ của phương pháp lắng đọng hóa học cao hơn so với phương pháp còn lại.

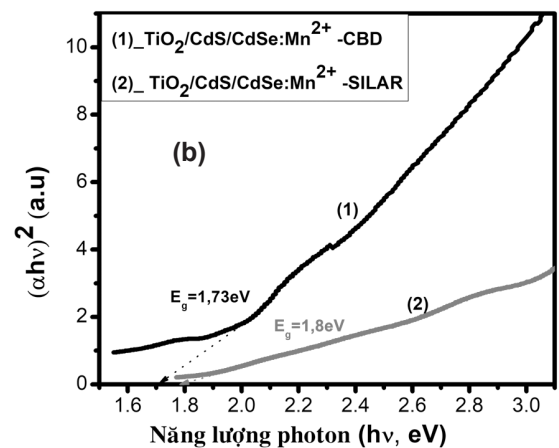
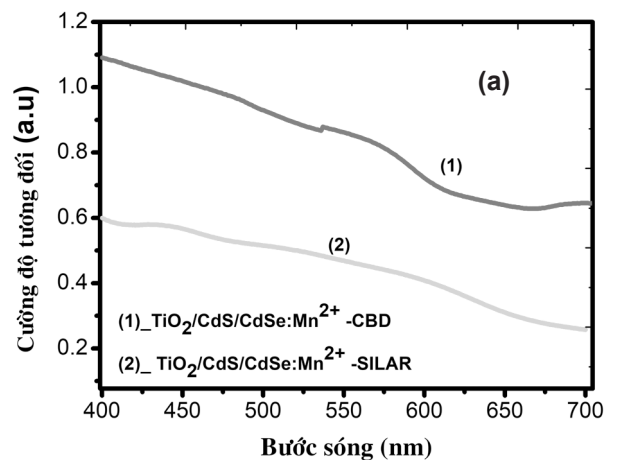


Hình 2. Ảnh FESEM của màng TiO₂/CdS/CdSe:Mn²⁺ (a) phương pháp lắng đọng hóa học và (b) phương pháp phản ứng, hấp thụ ion

Ở đây để xác định độ rộng vùng cấm quang của CdSe:Mn²⁺ chúng tôi sử dụng phương trình Tauc & cs. (1966).

$$\alpha hv = \alpha_0 (hv - E_g)^n \quad (1)$$

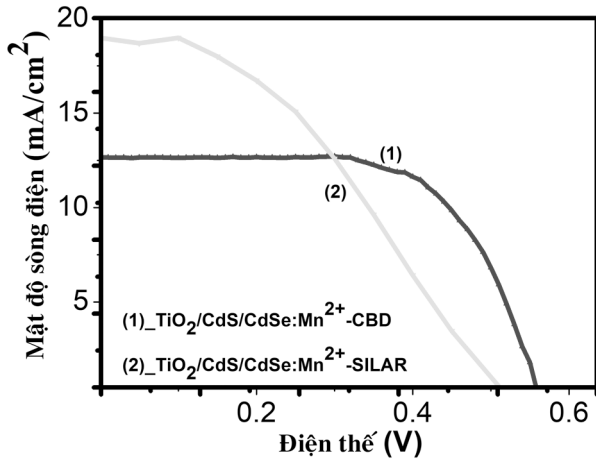
Trong đó α là hệ số hấp thụ, hv là năng lượng photon đến, α_0 là hằng số. Đối với CdSe là bán dẫn có vùng cấm trực tiếp nên $n=0,5$. Độ rộng vùng cấm của màng được xác định theo công thức 1. Chúng tôi đã sử dụng công thức 1 để vẽ đồ thị mối liên hệ giữa $(\alpha hv)^2$ với năng lượng của photon đến, đường thẳng tiếp tuyến tại bờ hấp thụ cắt trục hoành sẽ cho chúng tôi thu được giá trị độ rộng vùng cấm.



Hình 3. (a) Phổ hấp thụ UV-Vis (b) đồ thị mối quan hệ giữa $(\alpha hv)^2$ với năng lượng của photon tới của màng TiO₂/CdS/CdSe:Mn²⁺ được chế tạo bằng hai phương pháp khác nhau

Bảng 1. Các tham số quang học, điện học và tổng trở của

Pin mặt trời chấm lượng tử	E_g (eV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	V_{oc} (V)	η (%)	R_{ct1} (Ω)	R_{ct2} (Ω)
TiO ₂ /CdS/CdSe:Mn ²⁺ -CBD	1,73	12,65	0,58	0,57	4,9	1,91	96,51
TiO ₂ /CdS/CdSe:Mn ²⁺ -SILAR	1,8	18,99	0,381	0,52	3,77	24,65	204,5



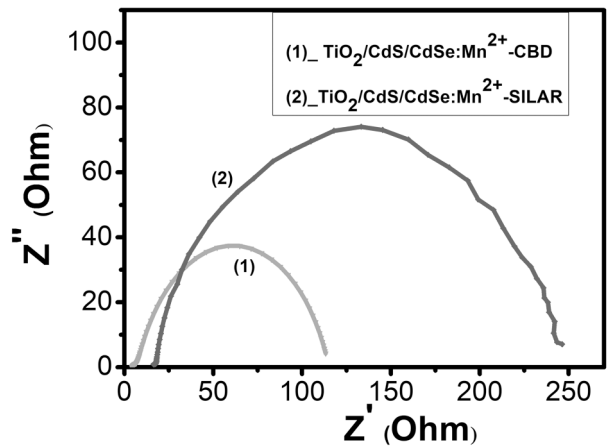
Hình 4. Đường đặc trưng dòng và thế của màng TiO₂/CdS/CdSe:Mn²⁺ được chế tạo bằng hai phương pháp khác nhau

Ở đây chúng tôi sử dụng thiết bị đo đường cong dòng và thế của pin mặt trời chấm lượng tử trên cơ sở màng TiO₂/CdS/CdSe:Mn²⁺ sử dụng nguồn Keithley 2400 dưới điều kiện chiếu sáng được chuẩn hóa theo phổ mặt trời. Các kết quả mật độ dòng điện, thế mạch hở, hệ số lấp đầy và hiệu suất của pin được trình bày trong Bảng 1. Từ Hình 4 chúng ta thấy có hai sự khác biệt từ đường cong này: Thứ nhất là mật độ dòng của phương pháp lắng đọng hóa học (12,65 mA/cm²) nhỏ hơn so với mật độ dòng của phương pháp phản ứng, hấp thụ ion (18,99 mA/cm²). Thứ hai là ngược lại, thế mạch hở của phương pháp CBD (0,57 V) cao hơn so với thế mạch hở của phương pháp SILAR (0,52 V) và hệ số lấp đầy của phương pháp CBD gần gấp hai lần so với phương pháp

SILAR. Theo công thức $\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}}$, I_{sc} là

mật độ dòng điện, V_{oc} là thế mạch hở còn FF là hệ số lấp đầy. Kết quả thu được hiệu suất chuyển đổi quang điện của pin mặt trời theo phương pháp CBD (4,9%) cao hơn so với phương pháp SILAR (3,77%). Kết quả này chỉ ra rằng đối với phương pháp CBD

chúng ta có thể cải thiện được hệ số lấp đầy và thế mạch hở do đó hiệu suất pin mặt trời đối với phương pháp này đạt rất cao. Trong khi đó đối với phương pháp SILAR thì hệ số lấp đầy quá bé, mặt dù có sự cải thiện về mật độ dòng điện nhưng hiệu suất thu được thấp hơn. Các kết quả của chúng tôi cho thấy hiệu suất cao hơn rất nhiều khi so sánh với kết quả pha tạp của nhóm Shen & cs. (2016), nhóm này đã pha tạp Mn vào CdS và đạt hiệu suất chuyển đổi quang điện 3,29% bằng phương pháp phản ứng và hấp thụ ion. Trong khi chúng tôi sử dụng so sánh cả hai phương pháp lắng đọng hóa học và phản ứng hấp thụ ion, hơn nữa chúng tôi pha tạp Mn vào CdSe và đạt hiệu suất rất cao (4,9%).



Hình 5. Phổ tổng trở điện hóa của màng TiO₂/CdS/CdSe:Mn²⁺ được chế tạo bằng hai phương pháp khác nhau

Mosa - Sero & cs. (2000) đã khám phá ra phổ tổng trở điện hóa, được dùng để xác định điện trở qua bề mặt tiếp xúc, điện trở khuếch tán trong màng TiO₂, điện trở khuếch tán qua hệ điện ly, điện trở tổ hợp trong các chấm lượng tử CdS, CdSe:Mn²⁺, chúng được ký hiệu là R_{ct1} và R_{ct2} . Từ Hình 5 chúng ta thấy vòng cung của pin mặt trời TiO₂/CdS/CdSe:Mn²⁺-CBD bé hơn nhiều so với vòng cung của pin mặt trời TiO₂/CdS/CdSe:Mn²⁺-SILAR. Điều này chỉ ra rằng

các giá trị điện trở R_{ct1} và R_{ct2} của phương pháp lắng đọng hóa học bé hơn so với phương pháp còn lại. Như vậy, phương pháp CBD đã tạo ra các vật liệu chấm lượng tử CdSe:Mn²⁺ có tinh thể hoàn thiện hơn, vì thế mà điện trở động học của phương pháp này bé hơn phương pháp SILAR. Kết quả này cũng phù hợp với kết quả đo hiệu suất pin, phổ UV-Vis của nhóm Shen & cs. (2016).

4. Kết luận

Pin mặt trời chấm lượng tử trên cơ sở màng TiO₂/CdS/CdSe:Mn²⁺ được chế tạo thành công theo hai phương pháp CBD và SILAR. Kết quả thu được có sự cải thiện về hiệu suất của pin được chế tạo bằng phương pháp CBD cao hơn rất nhiều so với phương pháp SILAR. Kết quả này là do có sự tăng cường độ phổ hấp thụ, tăng hệ số lấp đầy và đồng thời giảm được điện trở động học trong pin. Kết quả của nghiên cứu này là cơ sở cho việc chọn lựa các phương pháp chế tạo hiệu quả cho các nghiên cứu tiếp theo của nhóm nhằm từng bước nâng cao hiệu suất của pin mặt trời chấm lượng tử.

Tài liệu tham khảo

Dang, H. P., Ha, T. T., Van, C. N., & My, H. N. T. (2021). Influence of dopant concentration on optical electrical features of Quantum dot - sensitized solar cell. *Molecules*, 26, 2865.

Firoozi, N., Dehghani, H., & Afrooz, M. (2015). Cobalt-doped cadmium sulfide nanoparticles as efficient strategy to enhance performance of quantum dot sensitized solar cells. *J. Power Sources*, 278, 98-103.

Gopi, C. V. V. M., Venkata, H. M., Seo, H., Singh, S., Kim, S. K., Shiratani, M., & Kim, H. J. (2016). Improving the performance of quantum dot sensitized solar cells through CdNiS quantum dots with reduced recombination and enhanced electron lifetime. *Dalton Trans*, 45, 8447-8457.

Kovalenko, M. V. (2015). Opportunities and challenges for quantum dot photovoltaics. *Nat. Nanotech*, 10, 994-997.

Lee, M. M., Teuscher, J., Miyasaka, T., Murakami, T. N., & Snaith, H. J. (2012). Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites. *Science*, 338, 643-647.

Mora, S. I., Gimenez, S., Moehl, T., Fabregat, S. F.,

Lana, V. T., Gomez, R., & Bisquert, J. (2000). *Nanotechnology*, 19, 424007

Muthalif, M.P.A., Lee, Y. S., Sunesh, C.D., Kim, H. J., & Choe, Y. (2017). Enhanced photovoltaic performance of quantum dot-sensitized solar cells with a progressive reduction of recombination using Cu-doped CdS quantum dots. *Appl. Surf. Sci*, 396, 582-589.

Muthukannan., Abirami., Sivakumar. G., & Mohanraj. K. (2014). Influence of Equimolar Concentration on Structural and Optical Properties of Binary Selenides Nanoparticles. *Particulate Science and Technology*, 32(4), 392-398.

Nguyen, T. K. C., Phat, T. N., Ha, T. T., & Dang, H. P. (2021). Quantum dot - sensitized - solar cell: photoanodes, counter electrodes, and electrolytes. *Molecules*, 26, 2638.

Nguyen, T. P., Ha, T. T., Thao, T. N., Ho, N. P., Huynh, T. D., & Lam, Q. V. (2018). Effect of Cu²⁺ ions doped on the photovoltaic features of CdSe quantum dot sensitized solar cells. *Electrochimica Acta*, 282, 16-23.

O'Regan, B., and Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, 353, 737-740.

Poh, S. C., Ahmad, H., Ting, C. H., Tung, H. T., & Jun, H. K. (2021). Performances of flexible dye-sensitized solar cells fabricated with binder-free nanostructured TiO₂. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021.

Shen, T., Tian, J., Lv, L., Fei, C., Wang, Y. T. P., & Cao, G. (2016). Investigation of the role of Mn dopand in CdS quantum dot sensitized solar cell. *Electrochim. Acta*, 191, 62-69.

Song, L., Junling, D., & Jinhua, Z. (2010). One-pot Microwave Assisted Synthesis of Homogeneously Alloyed CdSe_xTe_{1-x} Nanocrystals with Tunable Photoluminescence. *Materials Letters*, 64(16), 1843-1845.

Tauc, J., Radu, G., & Anina, V. (1966). Optical properties and electronic structure of amorphous germanium. *Physica status solidi (b)*, 15(2), 627-637.

Thao, N. T., Ho, N. P., Ha, T. T., Nguyen, T. P., Huynh, T. D., & Lam, Q. V. (2018). The enhanced current density of the quantum dots solar cells based on CdSe: Mn²⁺ crystalline. *Optical Materials*, 84, 199-204.