

THUỘC TÍNH QUANG ĐIỆN HÓA TÁCH NƯỚC CỦA VẬT LIỆU ZnO/BiVO₄ CÓ CẤU TRÚC PHÂN NHÁNH

Hoàng Nhật Hiếu^{1*}, Nguyễn Văn Nghĩa¹, Nguyễn Minh Vương¹,
Nguyễn Ngọc Khoa Trường¹, Nguyễn Ngọc Sẻ²

¹ Khoa Khoa học tự nhiên, Trường Đại học Quy Nhơn, Gia Lai

² Trường THPT Nguyễn Thị Minh Khai, La Bằng, Gia Lai

*Email: hoangnhathieu@qnu.edu.vn

Ngày nhận bài: 17/10/2025; ngày hoàn thành phản biện: 12/11/2025; ngày duyệt đăng: 6/12/2025

TÓM TẮT

Vật liệu điện cực quang cấu trúc nano phân nhánh ZnO/BiVO₄ được thiết kế và chế tạo nhằm ứng dụng trong quá trình tách nước quang điện hóa, khai thác đồng thời nhiều ưu điểm nổi bật: khả năng bẫy ánh sáng vượt trội nhờ cấu trúc phân nhánh; sự hấp thụ quang hiệu quả trong vùng khả kiến của BiVO₄ với khe năng lượng hẹp; và tốc độ vận chuyển điện tử cao nhờ hiệu quả tách cặp điện tử – lỗ trống tại bề mặt tiếp xúc. Các đặc trưng cấu trúc, khả năng hấp thụ quang, tính chất quang điện hóa và khả năng vận chuyển điện tích của các điện cực chế tạo đã được nghiên cứu chi tiết. Kết quả đo quang điện hóa cho thấy, dưới chiếu sáng mô phỏng ánh sáng Mặt trời, hiệu suất tách nước của cấu trúc ZnO/BiVO₄ đạt 0,76% tại thế 0,4 V so với điện cực Ag/AgCl, cao gấp 1,8 lần so với điện cực ZnO phân nhánh đơn thuần.

Từ khóa: Quang điện hóa tách nước, năng lượng H₂, vật liệu ZnO/BiVO₄.

1. MỞ ĐẦU

Công nghệ tách nước quang điện hóa dựa trên chất bán dẫn để tạo ra khí hydro đã được coi là một trong những phương pháp hứa hẹn nhất để giải quyết cuộc khủng hoảng năng lượng thế giới và các vấn đề môi trường. Kể từ khi quá trình tách nước quang điện hóa (PEC) trên điện cực quang TiO₂ lần đầu tiên được khám phá bởi Fujishima và Honda vào năm 1972 [1], người ta đã chú ý rất nhiều đến việc phát triển các vật liệu bán dẫn oxit kim loại cho ứng dụng làm điện cực quang cho công nghệ tách nước PEC. So với điện cực TiO₂, thì ZnO sở hữu hai ưu điểm quan trọng so với TiO₂: Thứ nhất, nó có độ linh động điện tử cao hơn và tốc độ tái hợp điện tích thấp hơn và thứ hai là các mô hình cấu trúc nano khác nhau, chẳng hạn như hạt nano, dây nano, cây nano

và tấm nano, có thể được tổng hợp dễ dàng [2, 3]. Trong số rất nhiều cấu trúc khác nhau, cấu trúc phân cấp ba chiều (3D) đã thu hút được sự quan tâm đáng kể nhờ có diện tích bề mặt cực kỳ lớn, khả năng vận chuyển điện tích nhanh, tăng cường hiệu quả bẫy và tán xạ ánh sáng cũng như khả năng tách cặp điện tử - lỗ trống [4]. Tuy nhiên, ZnO là chất bán dẫn có độ rộng vùng cấm lớn (3,2 eV), chỉ có thể bị kích thích bởi ánh sáng cực tím [5-8]. Do đó, chỉ một phần rất nhỏ bức xạ mặt trời (3–5%) có bước sóng ngắn hơn khoảng 400 nm có thể được sử dụng để thúc đẩy quá trình phân tách nước [9]. Để mở rộng vùng phản ứng quang phổ sang vùng ánh sáng khả kiến, một số phương pháp đã được theo đuổi, ví dụ, pha tạp nguyên tố kim loại hoặc nguyên tử phi kim, kết hợp chất bán dẫn với kim loại plasmon và chất bán dẫn có khe năng lượng hẹp. Trong số các biện pháp đã nói ở trên, sử dụng vật liệu ZnO cấu trúc 3D kết hợp với bán dẫn có khe năng lượng hẹp được chứng minh là một trong những phương pháp hiệu quả và rẻ tiền nhất.

Gần đây, bismuth vanadate (BiVO₄) ngày càng thu hút được sự quan tâm vì tính ổn định khá tốt, khả năng hấp thụ quang trong vùng ánh sáng khả kiến và không độc hại. Nó chủ yếu xuất hiện ở ba dạng đa hình: (pucherit) trực thoi, (clinobisvanit) đơn nghiêng và (dreyerit) tứ phương [10]. Trong đó BiVO₄ đơn nghiêng là một chất bán dẫn loại n với độ rộng vùng cấm hẹp là 2,4 eV, xác định hiệu suất chuyển đổi năng lượng mặt trời thành hydro tối đa theo lý thuyết của nó là 9,1% [11]. Mặc dù nó có nhiều tính năng đặc biệt nhưng vẫn tồn tại một số yếu tố hạn chế, chủ yếu bao gồm khả năng tách electron-lỗ trống kém và các đặc tính vận chuyển điện tích không hiệu quả. Do đó, có thể là một ý tưởng hay khi sử dụng các ZnO 3D và BiVO₄ cùng nhau để chế tạo các điện cực quang tiếp xúc dị thể cho tách nước PEC. Cụ thể, ZnO 3D sẽ được sử dụng làm kênh truyền điện tử, trong khi BiVO₄ sẽ là chất hấp thụ ánh sáng mạnh. Hai vật liệu được bổ trợ lẫn nhau giúp cải thiện hiệu suất tách nước PEC.

Trong nghiên cứu này, cấu trúc nano ZnO/BiVO₄ phân nhánh được chế tạo bởi quá trình kết hợp phương pháp phun tĩnh điện, thủy nhiệt ở nhiệt độ thấp và phương pháp quay phủ. Các cấu trúc chế tạo được sử dụng làm điện cực quang trong ứng dụng tách nước quang điện hóa.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Quy trình chế tạo cấu trúc ZnO phân nhánh

Đầu tiên các sợi nano ZnO (ZnO-NFs) được chế tạo bằng phương pháp quay điện với thời gian phun 3 phút bằng thiết bị quay điện TL nanofiber electrospinning (Tong Li Tech) trên đế dẫn (ITO), đế ITO được cắt thành miếng nhỏ, có kích thước 10 x 10 mm. Các điều kiện phun điện được sử dụng như sau: Điện áp 10 kV, nhiệt độ buồng phun 35 °C, tốc độ phun 0,03 ml/h, kích thước kim 0,12 mm, khoảng cách từ kim đến các đế ITO 10 cm. Các mẫu sau khi phun được nung nhiệt trong không khí ở 500 °C trong 2

giờ. Tiếp theo các dây nano ZnO được mọc xung quanh các sợi nano bằng phương pháp thủy nhiệt ở 90 °C trong thời gian 4 giờ hình thành cấu trúc ZnO phân nhánh.

2.2. Quy trình chế tạo cấu trúc ZnO/BiVO₄ phân nhánh

Một lớp vật liệu BiVO₄ được mọc trên đế điện cực ZnO/ITO chế tạo ở bước trên sử dụng phương pháp quay phủ. Dung dịch quay phủ gồm: 0,07 M Bismuth nitrate pentahydrate (Bi(NO₃)₃·5H₂O) và 0,07 M vanadyl acetylacetonate (VO(acac)₂) trong dung môi 2-methoxyetanol. Sau khi hòa tan bằng rung siêu âm trong thời gian 2 phút, dung dịch thu được có màu xanh nhạt. Lớp BiVO₄ được quay phủ với hai điều kiện: 1 vòng và 3 vòng quay phủ với tốc độ quay 2000 vòng/phút. Mẫu sau khi quay phủ được nung ở nhiệt độ 500 °C với thời gian 10 phút trong môi trường không khí. Các mẫu được kí hiệu là ZnO/BiVO₄-1 và ZnO/BiVO₄-3.

2.3. Đo thuộc tính quang điện hóa tách nước (PEC)

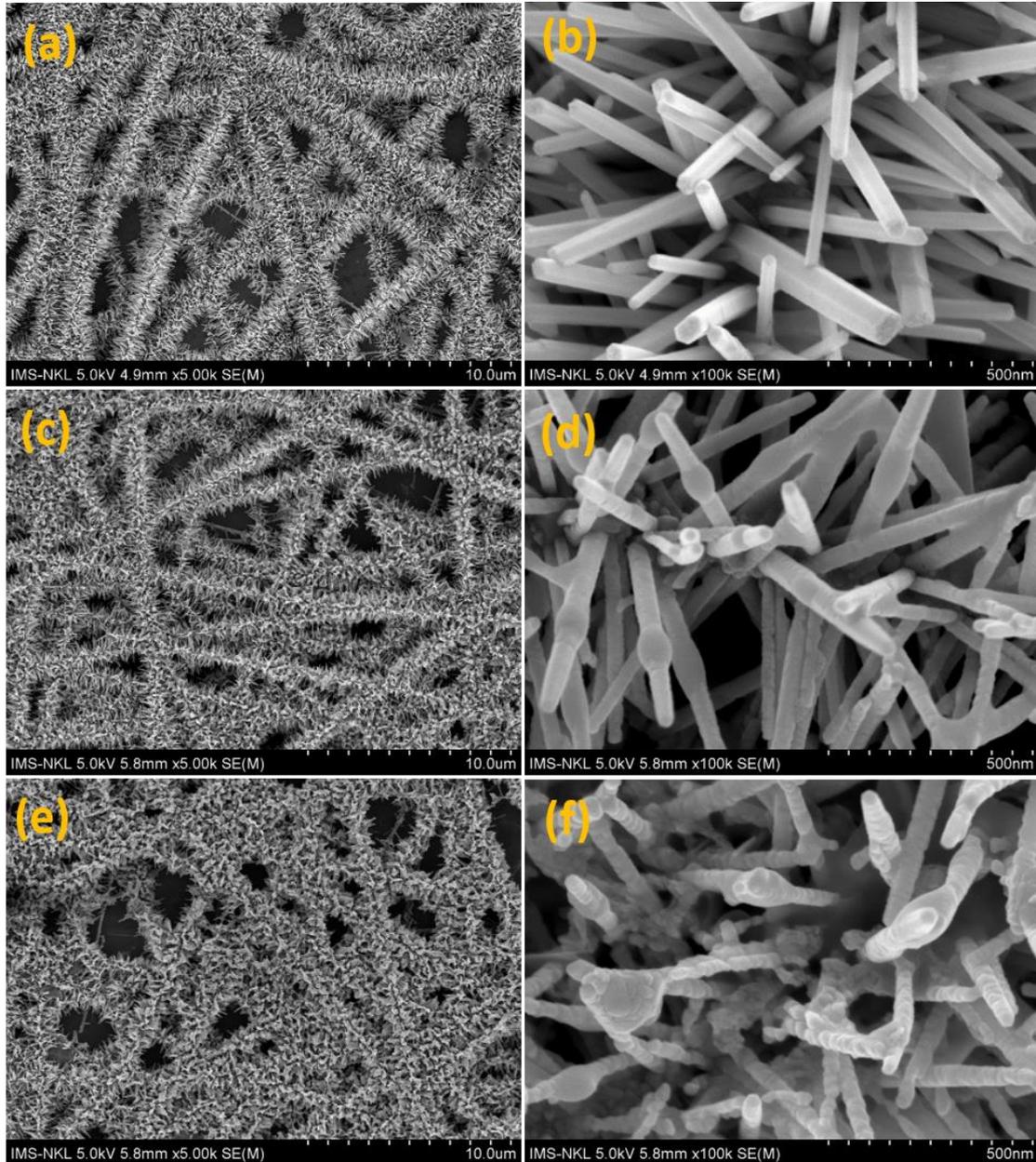
Thuộc tính PEC được đo sử dụng hệ điện hóa ba điện cực (Potentiostat, Model CS350, USA) với phần mềm kết nối máy tính. Điện cực ZnO và ZnO/BiVO₄ chế tạo được sử dụng như những điện cực làm việc, điện cực đối là điện cực lưới Pt và điện cực tham chiếu là Ag/AgCl bão hòa trong KCl. Để đánh giá hiệu suất tách nước ta sử dụng dung dịch điện phân Na₂SO₄ nồng độ 0,5 M, nguồn ánh sáng đèn Xenon, mật độ công suất 100 W/cm². Thế quét tuyến tính được quét tại tốc độ 20 mV/s, và dòng quang tương ứng theo thế được ghi lại và hiển thị trên máy tính. Hiệu suất quang điện hóa tách nước được tính toán sử dụng công thức trong tài liệu [4].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình thái cấu trúc vi mô của các điện cực chế tạo được đo trên máy SEM (S-4800) tại Viện khoa học vật liệu Việt Nam như cho thấy trong Hình 1. Hình 1 (a) là cấu trúc ZnO phân nhánh. Quan sát ảnh SEM cho thấy mô hình cấu trúc phân nhánh được hình thành bởi sự mọc ra tua tủa của các thanh nano nhỏ xung quanh một sợi nano ZnO lớn hơn. Ảnh phóng đại ở hình 1 (b) cho thấy rõ hơn các thanh nano có tiết diện ngang dạng lục giác với kích thước tiết diện trung bình khoảng từ 20-60 nm và chiều dài khoảng 1 μm với một bề mặt khá trơn mịn và mật độ các nhánh mọc ra rất dày. Điều này cho thấy cấu trúc phân nhánh có diện tích bề mặt riêng rất lớn, do đó cấu trúc này đang được quan tâm nghiên cứu rất nhiều trong tất cả các lĩnh vực.

Cấu trúc ZnO/BiVO₄ được chế tạo bởi phương pháp quay phủ một lớp vật liệu BiVO₄ trên đế điện cực ZnO phân nhánh với số vòng quay phủ khác nhau. Hình 1 (c, d) là ảnh SEM của cấu trúc ZnO/BiVO₄ với 1 vòng quay phủ. Ảnh cho thấy, cấu trúc vẫn là cấu trúc phân nhánh. Tuy nhiên, bề mặt các thanh nano trở nên khá nhám, các nhánh có tiết diện tròn và một vài vị trí trên nhánh có các hạt nano nhỏ neo đậu. Điều này cho thấy cấu trúc ZnO/BiVO₄ đã được hình thành, các hạt nano nhỏ có thể là vật liệu BiVO₄.

Hình 1 (e, f) là các ảnh SEM của cấu trúc ZnO/BiVO₄ với 3 vòng quay phủ. Ảnh cho thấy các hạt nano BiVO₄ có kích thước to hơn, bề mặt các thanh nano được phủ kín hoàn toàn và có hiện tượng tích tụ thành cụm của các hạt nano. Điều này chứng minh BiVO₄ đã mọc một lớp khá dày và hình thành cấu trúc ZnO/BiVO₄.



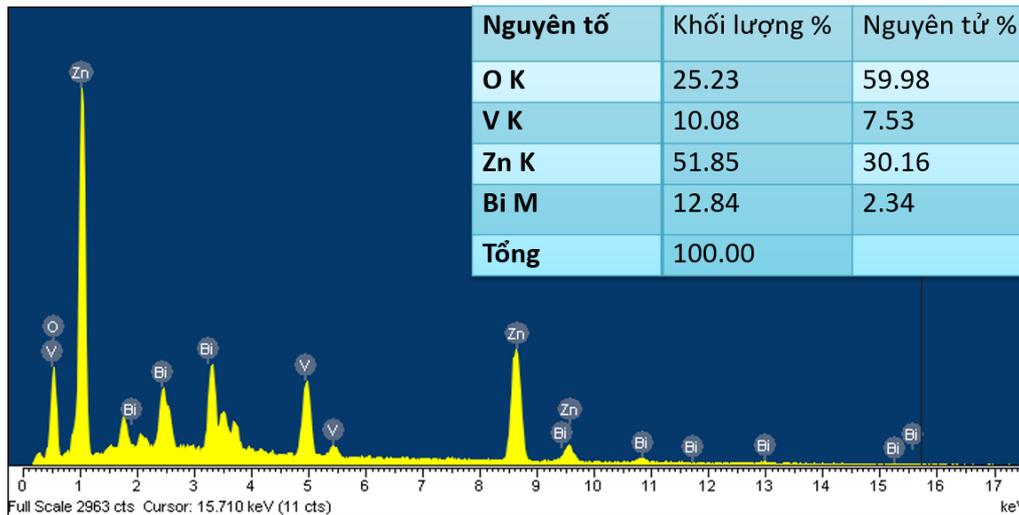
Hình 1. Ảnh SEM bề mặt với các độ phóng đại khác nhau của:

(a, b) cấu trúc ZnO phân nhánh;

(c, d) và (e, f) cấu trúc ZnO/BiVO₄ tương ứng với 1 vòng và 3 vòng quay phủ theo thứ tự

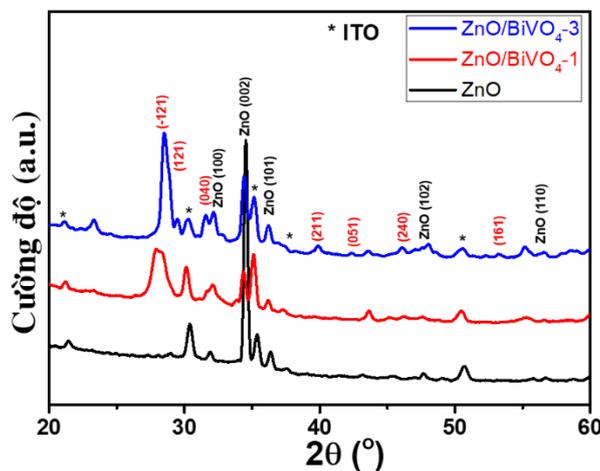
Hình 2 là phổ EDS được đo cho mẫu ZnO/BiVO₄ 3 vòng quay phủ để xác định thành phần cũng như tỉ lệ phần trăm của các nguyên tố. Kết quả phổ EDS, cho thấy có

sự xuất hiện các đỉnh đặc trưng của các nguyên tố O, V, Zn, Bi, với các tỉ lệ phần trăm nguyên tử và khối lượng được tính toán từ phổ và được tổng kết bảng lồng vào trong hình 2. Phổ EDS không thấy xuất hiện các đỉnh đặc trưng khác. Chứng minh mẫu chế tạo có độ tinh khiết tốt.



Hình 2. Phổ EDS của mẫu ZnO/BiVO₄ 3 vòng quay phủ

Để minh chứng thêm về cấu trúc tinh thể, các mẫu ZnO phân nhánh và ZnO/BiVO₄ 1 vòng và 3 vòng quay phủ được đặc trưng bởi phổ nhiễu xạ tia X trên máy Bruker D2 tại Đại học Quy Nhơn như cho thấy trên hình 3.

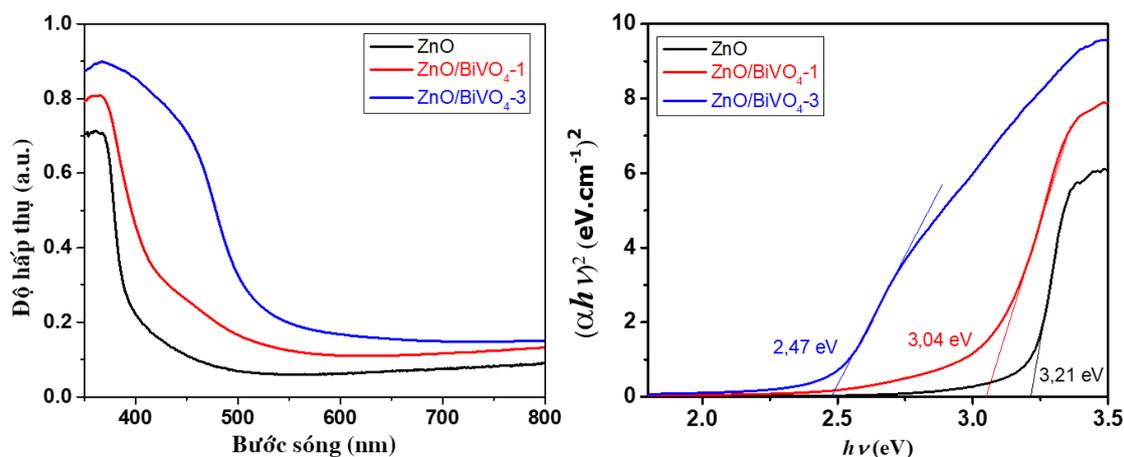


Hình 3. Giản đồ XRD của mẫu ZnO và ZnO/BiVO₄

Trên giản đồ XRD của cả ba mẫu ngoài các đỉnh sao đến từ đế ITO, ta nhận được 5 đỉnh nhiễu xạ có cường độ mạnh nhất ở các vị trí $2\theta = 31,98^\circ; 34,63^\circ; 36,35^\circ; 47,80^\circ$ và $56,75^\circ$ tương ứng với các mặt mạng (100), (002), (101), (102) và (110) của cấu trúc lục giác wurtzite của ZnO. Kết quả này hoàn toàn trùng khớp với thẻ chuẩn (PDF Card – ZnO-00-036-1451) của ZnO. Đồng thời, trên giản đồ nhiễu xạ tia X của hai mẫu ZnO/BiVO₄ 1 vòng và 3 vòng quay phủ ta còn nhận được các đỉnh ở vị trí $28,82^\circ; 28,95^\circ; 30,54^\circ; 39,78^\circ;$

42,46°; 46,71° và 53,31° tương ứng với các mặt mạng (-121), (121), (040), (211), (051), (240) và (161) của BiVO₄ với cấu trúc đơn tà (PDF Card-BiVO₄-00-014-0688). Ngoài ra, một vài đỉnh phổ trên mẫu BiVO₄ với 1 vòng quay phủ không xuất hiện, chứng tỏ các hạt nano có kích thước rất bé và với hàm lượng ít. Điều này khá trùng khớp với sự quan sát ảnh SEM.

Hình 4 (a) là phổ UV-vis-DRS của các mẫu ZnO và ZnO/BiVO₄ với các vòng quay phủ khác nhau được đo trên máy Jasco-V770 tại Trường Đại Học Quy Nhơn và tương ứng hình 4 (b) là kết quả tính toán khe năng lượng từ phổ sử dụng phương pháp Tauc.



Hình 4. Phổ phản xạ khuếch tán từ ngoại khả kiến UV-vis-DRS

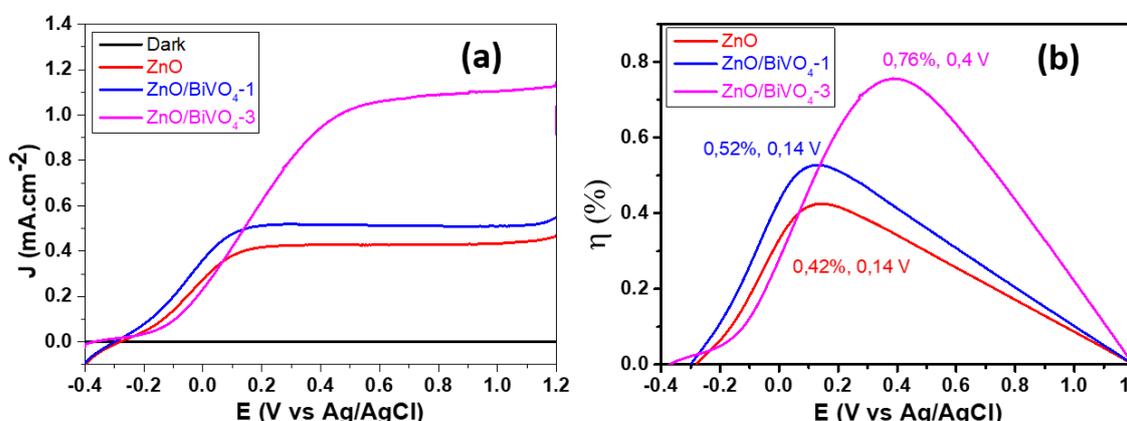
Kết quả đo cho thấy, cấu trúc ZnO phân nhánh hấp thụ ánh sáng chỉ trong vùng UV tại bước sóng 390 nm, tương ứng với khe năng lượng tính toán là 3,21 eV. Sau khi mọc vật liệu BiVO₄ trên cấu trúc ZnO phân nhánh thì biên hấp thụ mở rộng đến vùng nhìn thấy. Cụ thể, mẫu BiVO₄ 1 vòng quay phủ có biên hấp thụ khoảng 450 nm tương ứng khe năng lượng là 3,04 eV và mẫu BiVO₄ 3 vòng quay phủ có biên hấp thụ khoảng 550 nm tương ứng khe năng lượng là 2,47 eV. Việc thu hẹp vùng năng lượng sau khi mọc BiVO₄ có thể được giải thích bởi hai lý do: Thứ nhất là sự tạo thành composite giữa BiVO₄ và ZnO nên khe năng lượng là trung gian giữa hai vật liệu. Thứ hai là; với 1 vòng quay phủ thì kích thước hạt BiVO₄ khá nhỏ nên có khe năng lượng lớn hơn và với 3 vòng quay phủ thì kích thước hạt lớn nên khe năng lượng thu được gần với vật liệu khối, điều này đã được quan sát thấy rõ trong ảnh SEM, hình 1. Như vậy với 3 vòng quay phủ thì vật liệu BiVO₄ đủ dày để hấp thụ ánh sáng gần với vật liệu khối 2,4 eV với khe vùng trực tiếp.

Thuộc tính PEC của những điện cực chế tạo, được đo trong điều kiện chiếu sáng của đèn Xenon (mô phỏng ánh sáng mặt trời), sử dụng dung dịch điện phân 0,5 M Na₂SO₄ như cho thấy trong Hình 5.

Hình 5 (a) là đường cong đặc trưng J-V được đo trong mức thế quét tuyến tính từ -0,4 (V) đến 1,2 (V). Kết quả cho thấy trong mức thế đo, tất cả ba điện cực khi chưa

chiếu sáng mật độ dòng gần như bằng không, khi chiếu sáng thì mật độ dòng quang tăng nhanh và đạt bão hòa sớm, chứng tỏ các điện cực chế tạo cho phản ứng quang điện hóa tốt. Cụ thể mật độ dòng quang điện cực đại của ZnO là $0,37 \text{ mA.cm}^{-2}$; ZnO/BiVO₄ 1 vòng quay phủ là $0,55 \text{ mA.cm}^{-2}$ và ZnO/BiVO₄ 3 vòng quay phủ là $1,15 \text{ mA.cm}^{-2}$, tương ứng với các hiệu suất tính toán là 0,42 % tại thế 0,14 V, 0,52 % tại thế 0,14 V và 0,76 % tại thế 0,4 V theo thế điện cực Ag/AgCl theo thứ tự (hình 5 b).

So sánh hiệu suất chuyển đổi quang của các điện cực cho thấy, điện cực ZnO/BiVO₄ 3 vòng quay phủ là tốt nhất, cao hơn 1,8 và 1,5 lần so sánh với điện cực ZnO và điện cực ZnO/BiVO₄ 1 vòng quay phủ. Hiệu suất chuyển đổi quang của mẫu BiVO₄ với 3 vòng quay phủ cao hơn so với 1 vòng quay phủ có thể là do hàm lượng BiVO₄ cao hơn dẫn đến sự hấp thụ quang hiệu quả hơn.



Hình 5. Thuộc tính PEC của các cấu trúc: (a) Mật độ dòng quang và (b) Hiệu suất chuyển đổi quang tương ứng

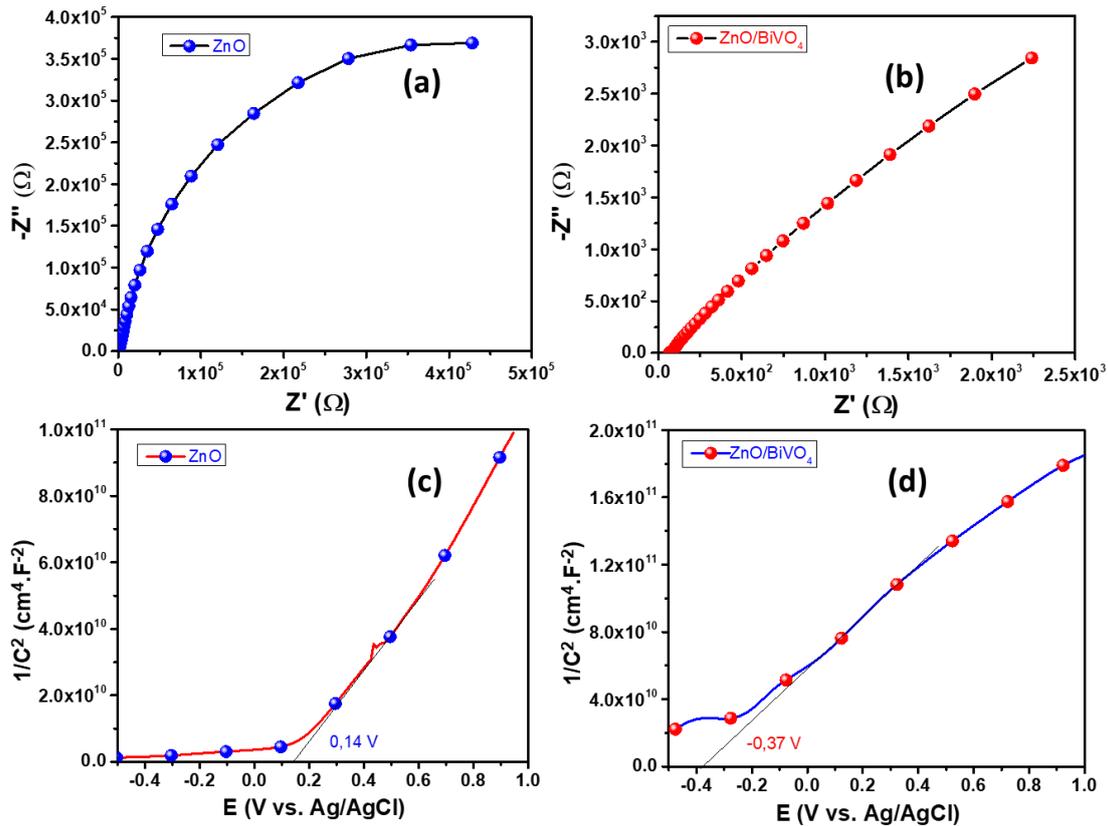
Kết quả hiệu suất cao hơn của cấu trúc ZnO/BiVO₄ so với ZnO có thể được giải thích bởi hai lý do: Thứ nhất là sự hấp thụ ánh sáng cao trong vùng nhìn thấy của quang phổ mặt trời của vật liệu BiVO₄. Thứ hai là do sự hình thành lớp tiếp giáp khác loại giữa ZnO và BiVO₄, điều này làm tăng khả năng tách cặp điện tử - lỗ trống và tăng tốc độ vận chuyển hạt tải tại bề mặt tiếp xúc. Để chứng minh điều này, phổ tổng trở điện hóa (EIS) và phổ Mott-schottky được đo và cho thấy như Hình 6.

Hình 6 (a, b) là đường cong Nyquist được đo dưới điều kiện chiếu sáng tại thế 0,0 V theo thế điện cực Ag/AgCl, trong mức tăng số quét từ 0,1 (Hz) đến 100 (kHz). Đường cong Nyquist có dạng hình bán nguyệt là đặc tính của điện tích trong quá trình vận chuyển, đường kính của hình bán nguyệt chính là điện trở truyền điện tích. Như thể hiện trong hình điện trở truyền điện tích của cấu trúc ZnO/BiVO₄ là nhỏ hơn so với ZnO. Điều này cho thấy điện cực ZnO/BiVO₄ có khả năng truyền dẫn điện tử hiệu quả hơn. Hình 6 (c, d) là phổ Mott-schottky (M-S) của ZnO và ZnO/BiVO₄ được đo dưới sự chiếu sáng tại tần số 10 kHz, sử dụng chất điện phân 0,5 M Na₂SO₄. Về cơ bản, phép đo M-S dựa trên đo hàng rào Schottky được hình thành tại mặt tiếp xúc giữa vật liệu bán dẫn

và chất điện phân và được sử dụng để xác định loại chất dẫn điện, nồng độ hạt tải và thế dải phẳng theo mối quan hệ từ phương trình sau:

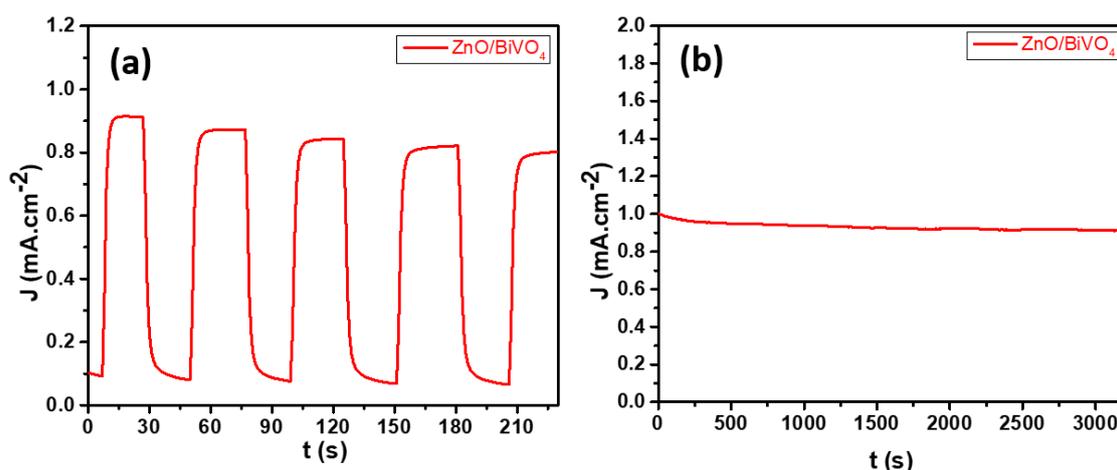
$$\frac{1}{C^2} = \pm \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 N_d} \left(V - V_{FB} - \frac{kT}{q} \right)$$

(+ đại diện cho loại n và - đại diện cho loại p) trong đó C là điện dung, q là điện tích electron, ϵ là độ thấm tương đối, ϵ_0 là độ thấm chân không, N_d là mật độ hạt tải điện, V là thế áp dụng tại điện cực, và V_{FB} là thế dải phẳng của chất bán dẫn [12]. Kết quả đồ thị M-S cho thấy rằng, ZnO và ZnO/BiVO₄ thể hiện độ dốc dương, điều này cho thấy cả hai là bán dẫn loại n. V_{FB} tại mặt tiếp xúc của chất bán dẫn/chất điện phân được xác định bằng cách ngoại suy, đó là điểm giao nhau của vùng tuyến tính với trục x trong đồ thị Mott-Schottky. Kết quả là, V_{FB} tương đối của ZnO và ZnO/BiVO₄ lần lượt là 0,14 V, và -0,37 V so với Ag/AgCl như cho thấy trong Hình 6 (c, d). Sự dịch chuyển âm của V_{FB} và độ dốc nhỏ hơn của ZnO/BiVO₄ so với ZnO chứng minh sự tích tụ nhiều điện tử và nồng độ điện tử N_d cao hơn của điện cực ZnO/BiVO₄. Những kết quả cho thấy sự phân tách và vận chuyển điện tử tốt hơn trong điện cực ZnO/BiVO₄ dẫn đến hiệu suất cao mang lại cho điện cực ZnO/BiVO₄.



Hình 6. (a, b) Phổ tổng trở điện hóa (EIS); (c, d) Phổ Mott-schottky của các điện cực ZnO và ZnO/BiVO₄ 3 vòng quay phủ.

Để cho thấy khả năng ứng dụng thực tế, độ ổn định và độ bền làm việc theo thời gian của điện cực ZnO/BiVO₄ được kiểm tra. Hình 7 (a) là mật độ dòng quang theo thời gian tại thế 0,4 V với 5 vòng bật tắt của ánh sáng và hình 7 (b) là mật độ dòng quang dưới thời gian chiếu sáng của 3200 giây. Kết quả cho thấy, điện cực hồi đáp quang rất tốt, bật và ngắt nhanh dưới điều kiện bật/tắt của ánh sáng. Độ bền làm việc của điện cực cũng khá tốt, mật độ dòng giảm không đáng kể sau một thời gian làm việc liên tục 3200 giây. Kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng của vật liệu làm điện cực quang cho tách nước PEC là rất cao.



Hình 7. Độ hồi đáp và độ ổn định làm việc điện cực ZnO/BiVO₄ theo thời gian được đo tại thế 0,4 V với 5 vòng bật tắt của ánh sáng (a) và chiếu sáng liên tục trong thời gian 3200 giây (b)

4. KẾT LUẬN

Bằng phương pháp phun điện kết hợp phương pháp mọc thủy nhiệt và phương pháp quay phủ đã chế tạo thành công các điện cực quang cấu trúc vật liệu ZnO phân nhánh, ZnO/BiVO₄. Thuộc tính quang điện hóa tách nước của các cấu trúc được đo dưới bức xạ của ánh sáng đèn mô phỏng ánh sáng mặt trời và cho thấy hiệu suất tách nước của cấu trúc ZnO/BiVO₄ đạt 0,76 % tại thế 0,4 V theo thế điện cực Ag/AgCl cao gấp 1,8 lần so sánh với điện cực ZnO. Điều này được giải thích là do sự hấp thụ ánh sáng cao của vật liệu BiVO₄ và do sự hình thành lớp tiếp giáp khác loại giữa ZnO và BiVO₄, làm tăng khả năng tách cặp điện tử - lỗ trống và tăng tốc độ vận chuyển hạt tải tại bề mặt tiếp xúc.

LỜI CẢM ƠN

Cảm ơn Trường Đại học Quy Nhơn đã tạo điều kiện hỗ trợ về mặt thiết bị và hóa chất để thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Fujishima, K. Honda, (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*, Vol. 238 (5358), 37–38.
- [2] T. Ling, J. G. Song and X. Y. Chen, (2013). Comparison of ZnO and TiO₂ nanowires for photoanode of dye-sensitized solar cells, *J. Alloys Compd.*, 546, 307–313.
- [3] G. Yang, B. Wang and W. Guo, (2013). Hydrothermal growth of low-density ZnO microrod arrays on nonseeded FTO substrates, *Mater. Lett.*, 90, 34–36.
- [4] H. N. Hieu, N. V. Nghia, N. M. Vuong, H. Van Bui, (2020). Omnidirectional Au-embedded ZnO/CdS core/shell nanorods for enhanced photoelectrochemical water-splitting efficiency, *Chem. Commun.*, 56, 3975.
- [5] M. Law, L. E. Greene and J. C. Johnson, (2005). Nanowire dye sensitized solar cells, *Nat. Mater.*, 4, 455–459.
- [6] S. H. Ko, D. Lee and H. W. Kang, (2011). Nanoforest of hydro thermally grown hierarchical ZnO nanowires for a high efficiency dye-sensitized solar cell, *Nano Lett.*, 11, 666–671.
- [7] J. Li and N. Wu, (2015). Semiconductor-based photocatalysts and photoelectrochemical cells for solar fuel generation: a review, *Catal. Sci. Technol.*, 5, 1360–1384.
- [8] H. Kim and K. Yong, (2014). A highly efficient light capturing 2D (nanosheet)-1D (nanorod) combined hierarchical ZnO nanostructure for efficient quantum dot sensitized solar cells, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15, 2109–2116.
- [9] M. Wang, F. Ren and J. Zhou, (2015). N Doping to ZnO Nanorods for Photoelectrochemical Water Splitting under Visible Light: Engineered Impurity Distribution and Terraced Band Structure, *Sci. Rep.*, 5.
- [10] H. Luo, A. H. Mueller and T. M. McCleskey, (2008). Structural and photoelectrochemical properties of BiVO₄ thin films, *J. Phys. Chem. C*, 112, 6099–6102.
- [11] C. Liu, J. Li and Y. Li, (2015). Epitaxial growth of Bi₂S₃ nanowires on BiVO₄ nanostructures for enhancing photoelectrochemical performance, *RSC Adv.*, 5, 71692–71698.
- [12] C. Liu, Y. Qiu, F. Wang, K. Wang, Q. Liang, Z. Chen, (2017). Design of Core–Shell-Structured ZnO/ZnS Hybridized with Graphite-Like C₃N₄ for Highly Efficient Photoelectrochemical Water Splitting, *Adv. Mater. Interfaces*, 4, 1700681.

PHOTOELECTROCHEMICAL WATER SPLITTING PROPERTIES OF BRANCHED ZnO/BiVO₄ NANOSTRUCTURES

Hoang Nhat Hieu^{1*}, Nguyen Van Nghia¹, Nguyen Minh Vuong¹,
Nguyen Ngoc Khoa Truong¹, Nguyen Ngoc Se²

¹ Faculty of Nature Science, Quy Nhon University, Gia Lai

² Nguyen Thi Minh Khai High School, La Bang, Gia Lai

*Email: hoangnhathieu@qnu.edu.vn

ABSTRACT

The branched ZnO/BiVO₄ nanostructured photoelectrode was designed and fabricated for photoelectrochemical water splitting applications relying on the outstanding advantages: superior light-trapping ability due to the branched architecture; efficient visible-light absorption of BiVO₄; and fast electron transport resulting from effective electron-hole pair separation at the interface. The structural characteristics, optical absorption behavior, photoelectrochemical properties, and charge transport capability of the fabricated photoelectrodes were thoroughly investigated. Photoelectrochemical measurements revealed that, under simulated sunlight illumination, the photoelectrochemical water-splitting efficiency of the branched ZnO/BiVO₄ structure reached 0.76% at 0.4 V vs. Ag/AgCl, which is 1.8 times higher than that of the pristine branched ZnO photoelectrode.

Keywords: Photoelectrochemical water splitting, hydrogen energy, branched ZnO/BiVO₄ nanostructure.



Hoàng Nhật Hiếu sinh ngày 27/05/1979 tại Bình Định. Ông tốt nghiệp cử nhân ngành Sư phạm Lý-KTCN tại Trường Đại học Quy Nhon năm 2001; tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý kỹ thuật năm 2006 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; tốt nghiệp tiến sĩ năm 2014 tại Đại học Quốc gia Chungnam, Hàn Quốc; đạt chuẩn chức danh Phó giáo sư ngành Vật lý năm 2023. Hiện nay, ông công tác tại Trường Đại học Quy Nhon.

Lĩnh vực nghiên cứu: Nghiên cứu tổng hợp các cấu trúc vật liệu nano và ứng dụng chúng trong lĩnh vực cảm biến khí, cảm biến quang điện, tách nước quang điện hóa và xử lý môi trường.



Nguyễn Minh Vương sinh ngày 01/3/1983 tại Bình Định. Ông tốt nghiệp cử nhân ngành Sư phạm Vật lý tại Trường Đại học Quy Nhơn năm 2004; tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý chất rắn năm 2008 tại Trường Đại học Sư phạm I Hà Nội; tốt nghiệp tiến sĩ năm 2014 tại Đại học Quốc gia Chungnam, Hàn Quốc; đạt chuẩn chức danh Phó giáo sư ngành Vật lý năm 2019. Hiện nay, ông công tác tại Trường Đại học Quy Nhơn.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật liệu bán dẫn và Công nghệ nano; vật liệu hấp phụ ứng dụng xử lý môi trường; vật liệu ứng dụng cửa sổ thông minh, linh kiện cảm biến khí, cảm biến quang, pin quang điện hoá tách nước.



Nguyễn Văn Nghĩa sinh ngày 24/02/1982 tại Quảng Ngãi. Ông tốt nghiệp cử nhân chuyên ngành Cử nhân vật lý tại trường Đại học Quy Nhơn năm 2004; tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý chất rắn năm 2008 tại Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế; tốt nghiệp tiến sĩ chuyên ngành Vật lý chất rắn năm 2021 tại Trường Đại học Khoa học - Đại học Huế. Hiện nay, ông công tác tại Khoa Khoa học tự nhiên trường Đại học Quy Nhơn.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật liệu nano ứng dụng trong lĩnh vực năng lượng và môi trường.



Nguyễn Ngọc Khoa Trường sinh ngày 18/03/1982 tại Phú Yên (nay là Đăklăk). Ông tốt nghiệp đại học ngành cử nhân Vật lý tại trường Đại học Quy Nhơn năm 2004; tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý chất rắn năm 2008 tại trường Đại học Khoa học - Đại học Huế. Hiện nay, ông công tác tại Khoa Khoa học tự nhiên trường Đại học Quy Nhơn.

Lĩnh vực nghiên cứu: Vật liệu nano ứng dụng trong lĩnh vực năng lượng và môi trường.



Nguyễn Ngọc Sẻ sinh ngày 12/02/1977 tại Bình Định. Ông tốt nghiệp cử nhân ngành Sư phạm Lý-KTCN tại Trường Đại học Quy Nhơn năm 2001; tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý chất rắn năm 2023 tại Trường Đại học Quy Nhơn. Hiện nay, ông công tác tại Trường THPT Nguyễn Thị Minh Khai, Huyện Đak Đoa, tỉnh Gia Lai.

Lĩnh vực nghiên cứu: Chế tạo và nghiên cứu thuộc tính quang điện hóa tách nước của hệ vật liệu cấu trúc nano