CHẾ TẠO VẬT LIỆU NANOCOMPOSIT ZnO@Cu_2O BẰNG PHƯƠNG PHÁP THỦY NHIỆT - CẤU TRÚC VÀ CÁC ĐẶC TÍNH CỦA VẬT LIỆU

FABRICATION OF ZnO@Cu_2O NANOCOMPOSITE BY HYDROTHERMAL METHOD - STRUCTURE AND CHARACTERIZATION OF MATERIALS

Tạ Ngọc Dũng[1], Nguyễn Thị Tuyết Mai[1,*], Nguyễn Kim Ngà[1]

DOI: https://doi.org/10.57001/huih5804.98

TÓM TẮT

Vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O (vật liệu nano Cu_2O pha tạp 50% ZnO theo số mol) và vật liệu so sánh nano Cu_2O đã được chế tạo bằng phương pháp thủy nhiệt. Các tính chất cấu trúc và đặc tính của vật liệu đã được khảo sát bằng các phương pháp đo vật lý bao gồm: XRD, SEM/EDX và UV-vis rắn. Kết quả khảo sát cho thấy, vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O chế tạo bao gồm hai pha tinh thể nano ZnO wurtzit và nano Cu_2O octahedra với tỷ lệ số mol ZnO pha tạp được vào vật liệu Cu_2O là ~42% mol (theo kết quả phổ EDX). Mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O có kích thước tinh thể trung bình được xác định theo Debye Scherrer là 16,09nm nhỏ hơn so với kích thước tinh thể trung bình của mẫu so sánh nano Cu_2O (22,02nm). Thông số ô mạng tinh thể của mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O và mẫu so sánh nano Cu_2O tính toán được là phù hợp với các tài liệu tham khảo. Năng lượng vùng cấm quang (Eg) của mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O tính được theo phương trình Tauc là 2,65eV đạt giá trị nằm trung gian giữa giá trị Eg của ZnO đơn pha (~3,37eV) và Cu_2O đơn pha (~2,17eV) và vẫn đạt được giá trị Eg trong vùng kích thích được ánh sáng nhìn thấy.

Từ khóa: *Nanocomposit ZnO@Cu_2O, hạt nano Cu_2O và ZnO, bức xạ ánh sáng nhìn thấy.*

ABSTRACT

The ZnO@Cu_2O nanocomposites (50 mol% ZnO doped Cu_2O nanomaterials) and Cu_2O comparative nanomaterials were fabricated by hydrothermal method. The structural properties and characterization of the materials were investigated by physical measurement methods including: XRD, SEM/EDX and solid UV-vis spectra. The results showed that, the ZnO@Cu_2O nanocomposite consists of two crystals phase of ZnO wurtzite and Cu_2O octahedra with the molar ratio of ZnO doped into Cu_2O as ~42 mol% (according to EDX spectra results). The ZnO@Cu_2O nanocomposite sample had an average crystal size determined according to Debye Scherrer of 16.09nm, which was smaller than the average crystal size of the Cu_2O comparative sample (22.02nm). The lattice parameters of the ZnO@Cu_2O nanocomposite and the comparative Cu_2O nano sample were in agreement with the references. The optical bandgap energy (Eg) of the ZnO@Cu_2O nanocomposite sample calculated by the Tauc equation was 2.65eV, reached an intermediate value between the Eg value of single-phase ZnO (~3.37eV) and single-phase Cu_2O (~2.17eV), and still achieved the Eg value in the visible light excitation region.

Keywords: *ZnO@Cu_2O nanocomposite, Cu_2O and ZnO nanoparticles, visible light radiation.*

[1]Viện Kỹ thuật Hóa học, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội
[*]Email: mai.nguyenthituyet@hust.edu.vn
Ngày nhận bài: 05/10/2022
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/12/2022
Ngày chấp nhận đăng: 23/12/2022

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu oxit đồng I (Cu_2O) đã được biết đến là chất bán dẫn loại p có năng lượng vùng cấm quang hẹp (Eg ≈ 2,0 - 2,2eV), lợi thế cho việc sử dụng ánh sáng mặt trời so với các chất bán dẫn có vùng cấm quang rộng. Vật liệu Cu_2O sở hữu nhiều đặc tính có lợi là loại vật liệu có độc tính thấp, nguyên liệu đầu là đồng có sẵn tương đối nhiều trong tự nhiên, khả năng chấp nhận môi trường tốt, giá thành vật liệu thấp [1-2]. Cu_2O đã được nghiên cứu trong đa dạng các lĩnh vực ứng dụng như: pin mặt trời hiệu quả cao, quang điện, cảm biến khí, cảm biến sinh học, chất xúc tác, thuốc diệt nấm mốc, tác nhân kháng khuẩn,… [3-6]. Tuy nhiên, vật liệu Cu_2O có nhược điểm là đối với những ứng dụng cần kích thích của ánh sáng thì tốc độ tách và sự tái kết hợp cặp điện tử - lỗ trống tương đối nhanh chóng, làm giảm đi hiệu suất làm việc của vật liệu. Nhiều nghiên cứu đã đưa ra việc chế tạo vật liệu nanocomposit (hay vật liệu ghép) Cu_2O với một vật liệu bán dẫn có vùng cấm rộng khác như TiO_2, CeO_2 hay ZnO,… [7-12] để có sự thể kết hợp hỗ trợ được các tính chất của vật liệu nanocomposit, làm tăng khả năng tách và giảm tốc độ tái kết hợp của cặp điện tử - lỗ trống quang sinh, dẫn đến làm tăng hiệu quả ứng dụng của vật liệu nanocomposit so với vật liệu khi ở dạng đơn pha Cu_2O hay ZnO [1, 4, 9-13]. Tuy vậy, các nghiên cứu hiện tại về

loại vật liệu nanocomposit này vẫn còn đang rất cần thiết để có được sự nghiên cứu thống kê đầy đủ.

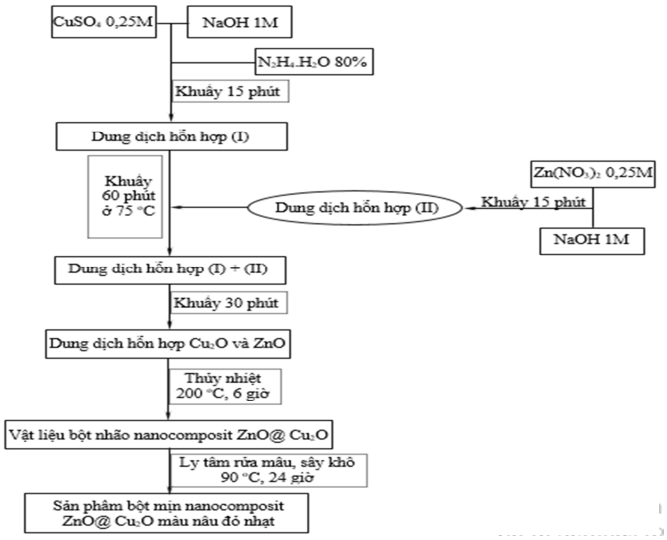
Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày về chế tạo vật liệu nanocomposit ZnO@ Cu_2O (vật liệu nano Cu_2O pha tạp 50% ZnO) bằng phương pháp thủy nhiệt đơn giản và khảo sát tính chất cấu trúc và các đặc tính của vật liệu nanocomposit (hay vật liệu ghép) này.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Hóa chất

Hóa chất sử dụng trong nghiên cứu gồm: Kẽm nitrat ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$ ≥ 98%, AR-China); đồng Sunphat ($CuSO_4.5H_2O$ 99,8%, AR-Trung Quốc); hydrazin hydrat ($N_2H_4.H_2O$ 80%, AR-China); natri hydroxyt (NaOH ≥ 98%, AR-China); nước cất 2 lần.

2.2. Thực nghiệm chế tạo vật liệu



Hình 1. Quy trình chế tạo mẫu vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O

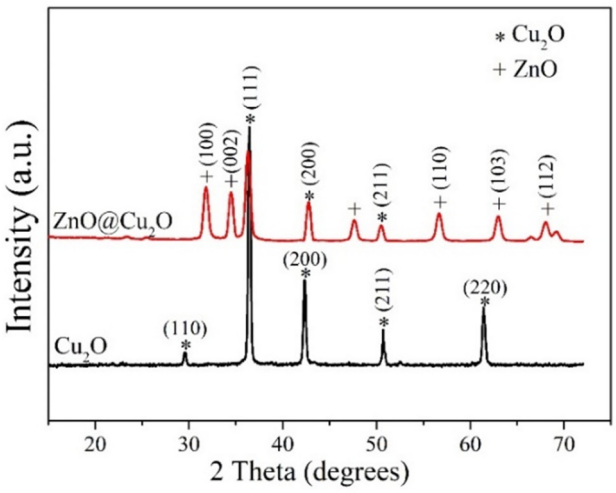
Dung dịch hỗn hợp (I) gồm 100ml dung dịch $CuSO_4$ 0,25M, 40ml dung dịch NaOH 1M và 10ml dung dịch $N_2H_4.H_2O$ 80% được khuấy trộn đồng đều trên máy khuấy từ trong 60 phút ở nhiệt độ 75°C. Dung dịch hỗn hợp (II) gồm 100ml dung dịch $Zn(NO_3)_2$ 0,25M và 50ml NaOH 1M được trộn lẫn đồng đều trên máy khuấy từ trong 15 phút. Tiếp theo, nhỏ từ từ dung dịch (II) vào dung dịch (I) và tiếp tục cho dung dịch hỗn hợp khuấy đều trên máy khuấy từ trong 30 phút. Sau đó, dung dịch hỗn hợp này được cho vào autoclave đặt ở chế độ thủy nhiệt 200°C trong 6 giờ. Bột nhão thu được sau thủy nhiệt được ly tâm rửa sạch với 5 lần nước cất, rồi đem sấy khô ở 90°C trong 24 giờ. Mẫu sản phẩm thu được là bột mịn có màu nâu đỏ hơi nhạt Cu_2O pha tạp ZnO (pha tạp theo tỷ số mol Cu^{2+}:Zn^{2+}=1:0,5, tức là ZnO được pha tạp thêm vào vật liệu Cu_2O với số mol là 50% mol so với số mol của Cu^{2+} trong dung dịch ban đầu), ký hiệu mẫu là ZnO@Cu_2O. Một mẫu so sánh Cu_2O không pha tạp ZnO được chế tạo theo quy trình hoàn toàn tương tự như trên nhưng không có thêm dung dịch (II), được sử dụng trong nghiên cứu để làm mẫu so sánh. Quy trình chế tạo mẫu vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O được thể hiện trên hình 1.

Các phương pháp nghiên cứu đặc tính của vật liệu: Phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD, X'pert Pro (PANalytical), tia bức xạ Cu-K^{α} (λ = 1,54065Å), tốc độ quét 0,03°/2s, góc quét 2θ ≈ 25 - 75°); phương pháp hiển vi điện tử quét (SEM, HITACHI TM4000 Plus); phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX, Oxford 300); phương pháp phổ hấp thụ UV-Vis rắn (Jasco V-750) sử dụng quả cầu tích hợp 60mm (ISV-922), tốc độ quét 200nm/min.

3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

3.1. Đặc tính cấu trúc vật liệu

Hình 2 là phổ nhiễu xạ tia X (XRD) của các mẫu vật liệu chế tạo ZnO@Cu_2O và mẫu so sánh Cu_2O. Trên hình phổ XRD cho thấy, mẫu vật liệu Cu_2O có các đỉnh phổ nhiễu xạ ở vào các vị trí góc nhiễu xạ 2θ lần lượt là 29,6°, 36,5°, 42,4°, 50,6° và 61,6° tương ứng với các họ mặt mạng tinh thể (110), (111), (200), (211) và (220) của tinh thể Cu_2O bát diện (octahedra). Mẫu vật liệu chế tạo ZnO@Cu_2O có các đỉnh phổ nhiễu xạ ở các vị trí góc nhiễu xạ 2θ ≈ 36,5°, 42,4°, 50,6° tương ứng với các họ mặt mạng (111), (200) và (211) của tinh thể Cu_2O bát diện (octahedra) [1-3,8,12]. Ở mẫu ZnO@Cu_2O thì các đỉnh phổ ở vị trí 2θ ≈ 29,6° và 61,6° tương ứng với các họ mặt mạng (110) và (220) của tinh thể Cu_2O là không xuất hiện.



Hình 2. Phổ XRD của các mẫu nanocomposit ZnO@ Cu_2O và mẫu so sánh nano Cu_2O

Điều này cho thấy có thể là do có sự pha tạp ZnO đã làm ngăn cản sự phát triển tinh thể Cu_2O theo hướng mặt tinh thể (110) và (220). Mặt khác, trên hình phổ XRD cho thấy mẫu vật liệu ZnO@Cu_2O xuất hiện thêm các đỉnh phổ nhiễu xạ ở vị trí góc nhiễu xạ 2θ ≈ 31,5°, 34,2°, 47,3°, 56,4°, 62,6° và 67,7° tương ứng với các họ mặt mạng (100), (002), (102), (110), (103) và (112) của tinh thể ZnO wurtzit [7, 10, 12, 13]. Điều này cho thấy, vật liệu chế tạo ZnO@Cu_2O đã có sự phát triển của hai pha tinh thể Cu_2O và ZnO. Ngoài ra, trên phổ XRD của hai mẫu vật liệu chế tạo ZnO@Cu_2O và mẫu Cu_2O không thấy xuất hiện đỉnh phổ tạp lạ khác. Như vậy, mẫu vật

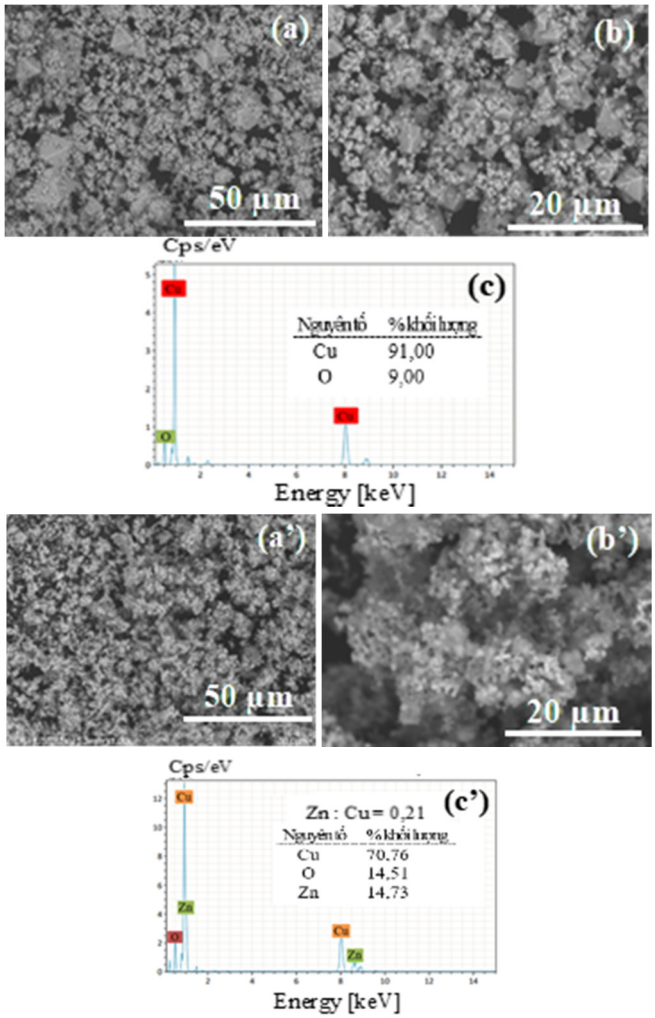
liệu Cu_2O chỉ có đơn pha tinh thể Cu_2O, mẫu vật liệu $ZnO@Cu_2O$ là có sự ghép của hai pha tinh thể ZnO và Cu_2O [9-12]. Áp dụng phương trình phương trình Debye Scherrer $D= K\lambda/\beta\cos\theta$ [3, 4, 10, 12] xác định được kích thước tinh thể trung bình của các mẫu vật liệu chế tạo $ZnO@Cu_2O$ và Cu_2O (trong đó, D là kích thước hạt tinh thể, K là hệ số phụ thuộc vào hình dạng của tinh thể, K = 0,9; λ là bước sóng nhiễu xạ với λ = 1,54056Å; β là độ bán mở rộng vạch của đỉnh phổ nhiễu xạ lớn nhất (FWHM), θ là góc nhiễu xạ ở vị trí mặt nhiễu xạ (111)). Thông số ô mạng tinh thể của mẫu vật liệu $ZnO@Cu_2O$ được tính cho hai loại tinh thể ZnO và Cu_2O của vật liệu. Mẫu Cu_2O được xác định thông số ô mạng tương ứng của tinh thể Cu_2O. Thông số ô mạng của tinh thể Cu_2O có cấu trúc tinh thể bát diện (octahedra), nhóm không gian Pn3m được xác định theo phương trình: $1/d_{(hkl)}^2 = (h^2 + k^2 + l^2)/a^2$ đối với pic nhiễu xạ của họ mặt mạng (111) (trong đó, giá trị $d_{(hkl)}$ được xác định theo định luật phản xạ Bragg $d_{(hkl)} = \lambda/2n\sin\theta$; hkl là chỉ số mặt phẳng tinh thể; a là thông số ô mạng tinh thể [3, 10, 12]. Thông số ô mạng của tinh thể ZnO cấu trúc wurtzit lục giác, nhóm không gian P63mc có các thông số a = b ≠ c được xác định theo phương trình $1/d_{(hkl)}^2 = (h^2 + k^2)/a^2 + l^2/c^2$ [10,12]: đối với 2 mặt mạng tinh thể (100) và (002) (tương ứng với mặt mạng $(h_1k_1l_1)$ có khoảng cách mặt mạng $d_{(h1k1l1)}$ và mặt mạng $(h_2k_2l_2)$ có khoảng cách mặt mạng $d_{(h2k2l2)}$), giá trị $d_{(hkl)}$ được xác định theo phương trình $\lambda = 2d_{(hkl)}\sin\theta$. Kết quả về kích thước tinh thể trung bình và thông số ô mạng tinh thể của các mẫu vật liệu nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ và nano Cu_2O được thể hiện ở bảng 1. Theo kết quả ở Bảng 1 cho thấy, mẫu vật liệu $ZnO@Cu_2O$ (mẫu có sự pha tạp thêm 50% mol ZnO vào Cu_2O) đạt được kích thước tinh thể trung bình nhỏ hơn so với mẫu Cu_2O không pha tạp. Điều này có thể được giải thích là do khi có sự pha tạp thêm một số lượng mol nhất định của ZnO vào vật liệu Cu_2O thì đã có sự tương tác ngăn cản lẫn nhau của hai pha tinh thể ZnO và Cu_2O, làm ngăn cản sự phát triển lớn lên của mỗi loại tinh thể ZnO và Cu_2O trong vật liệu nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ [11, 12]. Kết quả tính toán thông số ô mạng tinh thể của các mẫu nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ và nano Cu_2O cho thấy là phù hợp với kết quả của các tài liệu tham khảo [3, 10, 12, 13].

Bảng 1. Kích thước tinh thể trung bình, thông số ô mạng của các mẫu $ZnO@Cu_2O$ và Cu_2O

Mẫu vật liệu		Kích thước hạt tinh thể, D (nm)	Thông số ô mạng tinh thể, a, b, c (Å), V (Å^3)	
nanocomposit $ZnO@Cu_2O$	ZnO	16,09	a= b= 3,245 c= 5,201	47,428
	Cu_2O		a= b= c= 4,207	74,459
nano Cu_2O	Cu_2O	22,02	a= b= c= 4,228	75,580

3.2. Hình thái học bề mặt vật liệu

Hình 3(a,b,a',b') theo thứ tự là hình hiển vi điện tử quét (SEM) của các mẫu vật liệu nano Cu_2O và nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ ở các kích thước đo 5µm, 2µm. Hình 3(c,c') theo thứ tự là phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) của các mẫu nano Cu_2O và nanocomposit $ZnO@Cu_2O$. Trên hình SEM của mẫu nano Cu_2O (hình 3a, 3a') cho thấy các hạt tinh thể nhỏ được sắp xếp khít nhau tạo thành hạt tinh thể lớn hơn và được sắp xếp theo dạng hình bát diện (octahedra). Kích thước trung bình của hạt tinh thể Cu_2O cỡ khoảng 300 - 1µm. Trên hình SEM của mẫu nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ cho thấy cấu trúc tinh thể sắp xếp hình bát diện (octahedra) của Cu_2O bị phá vỡ và thay vào đó là các hạt tinh thể nhỏ được phân bố đồng đều và có độ bông xốp trên bề mặt vật liệu nanocomposit $ZnO@Cu_2O$. Kích thước trung bình của hạt tinh thể nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ cỡ ~100 - 200nm.



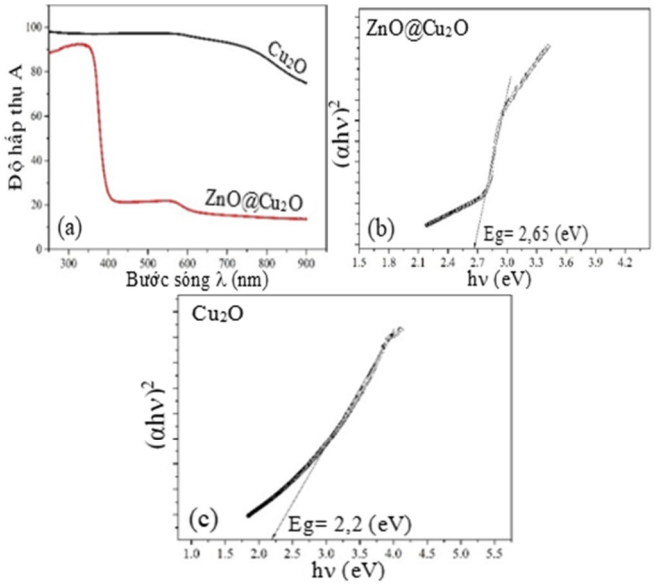
Hình 3. Hiển vi điện tử quét (SEM) của mẫu vật liệu nano Cu_2O ở kích thước 5µm (a), 2µm (b), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) của mẫu nano Cu_2O (c); hiển vi điện tử quét (SEM) của mẫu nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ ở kích thước 5µm (a'), 2µm (b'), phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) của mẫu nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ (c')

Trên hình phổ EDX của mẫu nano Cu_2O (hình 3c) cho thấy chỉ có xuất hiện các pic của các nguyên tố Cu, O. Trên hình phổ EDX của mẫu $ZnO@Cu_2O$ (hình 3c') cho thấy là ngoài các pic của các nguyên tố Cu, O thì còn xuất hiện thêm pic của nguyên tố Zn. Thành phần và hàm lượng các nguyên tố của mẫu nano Cu_2O cho thấy lượng đồng xấp xỉ gấp đôi lượng oxi, số liệu này phù hợp với các tài liệu tham khảo [4, 10 -12]. Mẫu nanocomposit $ZnO@Cu_2O$ cho thấy là hàm lượng của nguyên tố Zn chiếm ~21% so với hàm lượng

nguyên tố Cu, tính ra hàm lượng %mol của ZnO cỡ khoảng ~42% so với số mol của Cu_2O trong mẫu vật liệu. Hàm lượng ZnO pha tạp vào Cu_2O là có bị thất thoát ~8% so với hàm lượng đưa vào dung dịch hỗn hợp chế tạo vật liệu ban đầu. Như vậy, có thể thấy là mẫu nano Cu_2O có đủ thành phần nguyên tố của pha đơn tinh thể Cu_2O. Mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O có đủ thành phần nguyên tố của hai pha đơn tinh thể ZnO và Cu_2O [4, 7, 10-12].

3.3. Phổ hấp thụ UV-vis

Hình 4(a,b,c) theo thứ tự là phổ hấp thụ UV-vis của mẫu vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O và nano Cu_2O, đồ thị biểu thị sự phụ thuộc hàm "Tauc" [4,10,11] $(\alpha h\nu)^2$ với năng lượng hν của mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O và đồ thị phụ thuộc hàm "Tauc" $(\alpha h\nu)^2$ với năng lượng hν của mẫu nano Cu_2O.



Hình 4. a- Phổ hấp thụ UV-vis của các mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O và mẫu so sánh nano Cu_2O; b- đồ thị phụ thuộc hàm Tauc $(\alpha h\nu)^2$ - hν của mẫu ZnO@Cu_2O; c- đồ thị phụ thuộc hàm Tauc $(\alpha h\nu)^2$ - hν của mẫu so sánh Cu_2O

Theo hình phổ hấp thụ UV-vis của các mẫu vật liệu (hình 4a) cho thấy, mẫu nano Cu_2O có bờ hấp thụ mở rộng từ vùng ánh sáng tử ngoại gần đến vùng ánh sáng nhìn thấy $\lambda \approx 300$ -850nm. Ở vùng bước sóng dài $\lambda \geq 750$nm thì bờ hấp thụ của mẫu nano Cu_2O mới bắt đầu giảm xuống. Mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O có bờ hấp thụ mở rộng ở vùng bước sóng ngắn hơn (nhích một chút sang vùng ánh sáng nhìn thấy) $\lambda \leq 400$nm. Ngoài ra, mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O cho thấy là có thêm một bờ hấp thụ nhỏ nữa mở rộng ở vùng bước sóng ánh sáng nhìn thấy với $\lambda \approx 550$ - 600nm. Trên đồ thị phụ thuộc hàm "Tauc" $(\alpha h\nu)^2$ với năng lượng hν của mẫu vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O và mẫu nano Cu_2O (hình 4b, 4c), xác định được năng lượng vùng cấm quang của các mẫu vật liệu theo thứ tự là Eg ≈ 2,65eV và 2,2eV. Giá trị năng lượng vùng cấm quang theo tính toán Eg ≈ 2,65eV của mẫu vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O cho thấy là có sự giảm hơn so với vật liệu đơn pha ZnO ($Eg_{ZnO} \approx$ 3,37eV [12-13]) và lớn hơn so với vật liệu đơn pha Cu_2O ($Eg_{cu2O} \approx$ 2,17eV [1-4]). Điều này cho thấy là đã có sự tương tác của hai pha tinh thể ZnO và Cu_2O để làm thay đổi năng lượng vùng cấm quang của vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O. Sự thay đổi năng lượng vùng cấm quang để đạt giá trị trung gian giữa hai loại vật liệu cũng đang là điều mong muốn trong các nghiên cứu chế tạo vật liệu nanocomposit (hay vật liệu ghép), để từ đó có thể làm cải thiện được một số tính chất phù hợp với lĩnh vực ứng dụng cho loại vật liệu nanocomposit [9-12].

4. KẾT LUẬN

Vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O (vật liệu nano Cu_2O pha tạp 50% ZnO) đã được chế tạo thành công theo phương pháp thủy nhiệt đơn giản. Vật liệu chế tạo bao gồm 2 pha tinh thể nano ZnO wurtzit và nano Cu_2O octahedra với tỷ lệ số mol ZnO pha tạp được vào vật liệu Cu_2O là ~42% mol (theo kết quả phổ EDX). Số lượng mol ZnO pha tạp bị thất thoát nhưng không đáng kể so với số lượng mol ZnO pha tạp được đưa vào hỗn hợp dung dịch ban đầu. Kích thước tinh thể trung bình của mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O là 16,09nm nhỏ hơn so với mẫu so sánh nano Cu_2O (22,02nm). Thông số ô mạng tinh thể của hai pha tinh thể ZnO wurtzit và Cu_2O octahedra trong mẫu ZnO@Cu_2O và thông số ô mạng của mẫu so sánh Cu_2O tính được là phù hợp với các tài liệu tham khảo. Năng lượng vùng cấm quang (Eg) của mẫu nanocomposit ZnO@Cu_2O tính được theo phương trình Tauc là 2,65eV, giá trị Eg này nằm trung gian giữa giá trị Eg của ZnO đơn pha (3,37eV) và Cu_2O đơn pha (2,17eV). Giá trị Eg của mẫu so sánh tính được là 2,2eV. Như vậy, vật liệu nanocomposit ZnO@Cu_2O đã làm hẹp được năng lượng vùng cấm quang so với năng lượng vùng cấm quang rộng của ZnO và lớn hơn năng lượng vùng cấm quang của Cu_2O.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. S.S. Sawant, A.D. Bhagwat, C.M. Mahajan, 2016. *Synthesis of Cuprous Oxide (Cu_2O) Nanoparticles - a Review*. Journal of Nano- and Electronic Physics, 8(1), 01035(5pp).

[2]. P. He, X. Shen, H. Gao, 2005. *Size-controlled preparation of Cu_2O octahedron nanocrystals and studies on their optical absorption*. Journal of Colloid and Interface Science, 284, 510-515.

[3]. M.A. Khan, M. Ullah, T. Iqbal, H. Mahmood, A.A. Khan, M. Shafique, A. Majid, A. Ahmed, N.A. Khan, 2015. *Surfactant Assisted Synthesis of Cuprous Oxide (Cu_2O) Nanoparticles via Solvothermal Process.* Nanoscience and Nanotechnology Research, 3(1), 16-22.

[4]. M.M. Elmahdy, A. El-Shaer, 2019. *Structural, optical and dielectric investigations of electrodeposited p-type Cu_2O.* Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 1-12.

[5]. Y. Gao, Q. Wu, X. Liang, Z. Wang, Z. Zheng, P. Wang, Y. Liu, Y. Dai, M. H. Whangbo, B. Huang, 2020. *Cu_2O Nanoparticles with Both {100} and {111} Facets for Enhancing the Selectivity and Activity of CO_2 Electroreduction to Ethylene*. Advanced Sci., 1902820, 1-7.

[6]. S. Rasheeda, Z. Batoolb, A. Intisarc, S. Riazd, M. Shaheena, R. Kousar, 2021. *Enhanced photodegradation activity of cuprous oxide nanoparticles towards Congo red for water purification*. Desalination and Water Treatment, 227, 330-337.

[7]. X. Wang, D. Liu, J. Li, J. Zhen, H. Zhang, 2015. *Clean synthesis of $Cu_2O@CeO_2$ core@shell nanocubes with highly active interface*. NPG Asia Materials. 7(e158), 1-7.

[8]. S. Wang, B. Kavaipatti, S.J. Kim, X. Pan, R. Ramesh, J.W. Ager, L.W. Wang, 2014. *Atomic and electronic structures of lattice mismatched Cu_2O/TiO_2 interfaces.* Applied Physics Letters. 104, 211605.

[9]. R.C. Wanga, HY. Lin, 2010. *Simple fabrication and improved photoresponse of ZnO-Cu_2O core–shell heterojunction nanorod arrays.* Sensors and Actuators B, 149, 94-97.

[10]. O.I. Gyrdasova, E.V. Shalaeva, V.N. Krasil'nikov, L.Y. Buldakova, I.V. Baklanova, M.A. Melkozerova, M.V. Kuznetsov, M.Y. Yanchenko, 2021. *Effect of Cu^+ ions on the structure, morphology, optical and photocatalytic properties of nanostructured ZnO.* Materials Characterization, 179, 111384(1-12).

[11]. A. Abdolhoseinzadeh, S. Sheibani, 2019. *Enhanced photocatalytic performance of Cu_2O nano-photocatalyst powder modified by ball milling and ZnO.* Advanced Powder Technology, 1-11.

[12]. E.C. Jacobsen, 2015. *Analysis of the ZnO/Cu_2O Thin Film Heterojunction for Intermediate Band Solar Cell Applications.* Norwegian University of Science and Technology, 1-97.

[13]. A.K. Zak, R. Razali, W.H.A. Majid, M. Darroudi, 2011. *Synthesis and characterization of a narrow size distribution of zinc oxide nanoparticles.* International Journal of Nanomedicine, 6, 1399-1403.

AUTHORS INFORMATION

Ta Ngoc Dung, Nguyen Thi Tuyet Mai, Nguyen Kim Nga

School of Chemical Engineering, Hanoi University of Science and Technology