

TỔNG HỢP VÀ PHÂN TÍCH ĐẶC TÍNH QUANG CỦA CÁC VI HẠT CẦU ZnO

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF OPTICAL PROPERTIES OF ZnO MICROSPHERES

Nguyễn Thanh Hội, Nguyễn Linh Nam

Trường Cao đẳng Công nghệ, Đại học Đà Nẵng; nlnam911@dct.udn.vn

Tóm tắt - Trong lĩnh vực khoa học vật liệu, việc nghiên cứu tổng hợp các loại vật liệu mới có cấu trúc nano/micro với hình dạng đồng nhất rất được quan tâm nghiên cứu. Ở đây, hạt ZnO hình cầu kích thước micro mét với bề mặt trơn được tổng hợp bằng phương pháp tăng trưởng thủy nhiệt. Đặc tính cấu trúc của hạt ZnO được phân tích chi tiết bằng kỹ thuật tán xạ tia X và phổ tán xạ đàn hồi Raman. Bằng việc sử dụng bộ điều khiển nano với đầu dò làm từ sợi cáp quang, chúng tôi có thể tạo ra hạt ZnO với các cấu trúc khác nhau như đơn, đôi và ba hạt. Đặc tính phát quang của các cấu trúc này được đo và khảo sát cho thấy nhiều đặc tính nổi bật như khả năng hấp thụ tia cực tím rất tốt và đặc biệt là sự xuất hiện các đỉnh cộng hưởng trong phổ phát quang của các cấu trúc khác nhau của hạt ZnO.

Từ khóa - ZnO; hạt cầu micro mét; tổng hợp vật liệu; đặc tính phát quang; phổ tán xạ tia X.

Abstract - In the field of material science, the study of synthesis of new materials with uniform nano/micro structures has attracted more and more attention. In this work, the ZnO microspheres with smooth particle surface are synthesized by hydrothermal growth technique. The structural properties of ZnO microsphere are characterized by X-ray diffraction and Raman spectrum techniques. By using nano-manipulator with optical fiber tip mounted inside a field emission scanning electron microscope we can form single, dimer and trimer ZnO structures. When photoluminescence properties of these structures are measured, they exhibit many new features such as strong ultraviolet light absorption and, especially, the appearance of the resonance peaks in the photoluminescence spectrum of different structures of ZnO microsphere particles.

Key words - ZnO; microsphere particle; material synthesis; photoluminescence properties; X-ray diffraction.

1. Giới thiệu

Trên thế giới, trong lĩnh vực khoa học vật liệu, việc nghiên cứu tổng hợp các loại vật liệu mới với hình dạng, cấu trúc khác nhau rất được quan tâm nghiên cứu. Đặc biệt là vật liệu có cấu trúc nano/micro với hình dạng đồng nhất đã thể hiện rất nhiều đặc tính lý, hóa đặc trưng và cho thấy khả năng ứng dụng rất lớn trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Nhiều nghiên cứu về tổng hợp vật liệu cấu trúc nano/micro đã được báo cáo, tiêu biểu như Si [1], Ge [2], TiO₂ [3] và kể cả vật liệu ZnO [4, 5]. ZnO là một vật liệu bán dẫn II-VI có nhiều đặc tính nổi bật: với độ rộng vùng cấm lớn (3.37eV) tương ứng vùng tia cực tím (Ultraviolet-UV) cùng hiệu suất tái hợp bức xạ cao tại nhiệt độ phòng bởi có năng lượng liên kết exciton lớn (60meV), đã và đang thu hút được sự chú ý, quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu do các tính chất điện và quang điện độc đáo và cho thấy tiềm năng ứng dụng rất lớn trong lĩnh vực huỳnh quang, quang xúc tác, hóa điện, cảm biến, pin năng lượng mặt trời. Đặc biệt, khi vật liệu ZnO hình thành ở cấu trúc nano/micro, nó sẽ thể hiện nhiều đặc tính lý hóa mới mà cũng vật liệu đó ở kích thước lớn hơn không thể hiện được. Hơn nữa, do có giá thành thấp và thân thiện với môi trường, ZnO được xem có khả năng thay thế các vật liệu bán dẫn khác như TiO₂, GaN ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau.

ZnO là một vật liệu được nghiên cứu sâu rộng từ lâu bởi các nhóm nghiên cứu trên thế giới, tuy nhiên trên thực tế vẫn còn nhiều hướng nghiên cứu mới, mở ra triển vọng mới và cả những thách thức mới đòi hỏi cần tập trung nghiên cứu thêm. Đặc biệt là việc nghiên cứu đưa ra các quy trình tổng hợp ZnO đơn giản, giá thành rẻ và phân tích chi tiết về đặc tính của vật liệu để từ đó có thể đề xuất, triển khai việc ứng dụng vật liệu này trong thực tế. Vật liệu ZnO cấu trúc nano/micro được tổng hợp có hình thái vô cùng phong phú tùy thuộc vào các phương pháp tổng hợp khác nhau như dạng màng, dạng dây, dạng từ

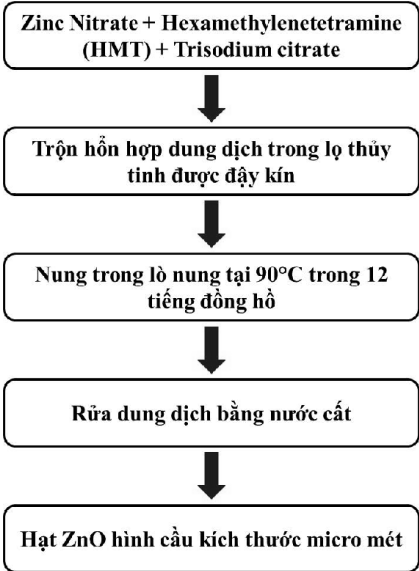
giác, dạng lục giác, dạng ống, dạng đĩa, cấu trúc đa chiều hình zig zag, hình bông hoa. Trong các hình dạng này, thì ZnO hình cầu luôn thu hút được sự quan tâm nghiên cứu đặc biệt là trong lĩnh vực chế tạo bộ cộng hưởng quang và laser. Thêm nữa, vật liệu ZnO với bề mặt trơn sẽ giúp hạn chế sự tiêu hao năng lượng tại các góc cạnh của vật liệu so với hình lục giác [6] hay vật liệu có bề mặt quá lồi lõm [7]. Do đó, để nâng cao hiệu suất quang thì việc tổng hợp vật liệu có dạng đồng nhất như ZnO hình cầu với bề mặt tương đối trơn là một yêu cầu thiết yếu cần đạt được.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành thực nghiệm tổng hợp hạt ZnO hình cầu, kích thước micro mét với bề mặt trơn bằng phương pháp tăng trưởng thủy nhiệt. Đặc tính cấu trúc của hạt được phân tích chi tiết bằng kỹ thuật tán xạ tia X và phổ tán xạ đàn hồi Raman. Bằng bộ điều khiển nano với đầu dò làm từ sợi cáp quang, các cấu trúc đơn, đôi và ba hạt có thể được tạo thành. Toàn bộ quá trình điều khiển này được thực hiện và quan sát trực tiếp trong kính hiển vi điện tử quét. Đặc tính phát quang của các cấu trúc này được đo và khảo sát cho thấy nhiều đặc tính nổi bật như khả năng hấp thụ tia cực tím mạnh và đặc biệt là sự hình thành các đỉnh cộng hưởng trong phổ phát quang.

2. Vật liệu và phương pháp

Hạt ZnO hình cầu, kích thước micro được tổng hợp bằng phương pháp tăng trưởng thủy nhiệt theo quy trình được mô tả trong Hình 1. Trước tiên chúng tôi chuẩn bị 20ml 0.05M(mol/l) dung dịch Zinc Nitrate (Zn(NO₃)₂.6H₂O) + Hexamethylenetetramine (HMT). Tiếp đó, chúng tôi chuẩn bị tiếp 20ml 0.03M(mol/l) dung dịch Trisodium Citrate (Na₃C₆H₅O₇). Trộn dung dịch Zinc Nitrate+HMT với dung dịch Trisodium Citrate theo tỉ lệ 2:1 trong lọ thủy tinh được đậy kín, dùng máy rung trộn hỗn hợp dung dịch trong 30 giây và đặt hỗn hợp dung dịch trong lò nung tại nhiệt độ 90°C trong 12 tiếng đồng hồ. Sau quá trình này hạt ZnO màu trắng sẽ được hình

thành và lắng xuống dưới đáy lọ. Chúng tôi tiến hành rửa dung dịch chứa hạt ZnO với nước cất để loại bỏ các dung môi hòa tan và tiếp tục rửa dung dịch chứa hạt này với alcohol và cho vào tủ lạnh (4°C) để bảo quản. Để tăng chất lượng tinh thể của hạt ZnO, chúng tôi có thể ủ hạt trong lò sấy tại nhiệt độ 550°C khoảng 12 tiếng đồng hồ trong môi trường không khí thông thường.



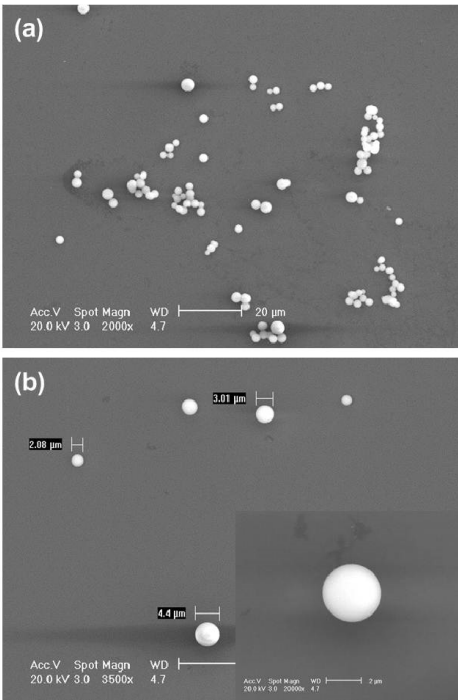
Hình 1. Quy trình tổng hợp hạt ZnO hình cầu kích thước micro mét bằng phương pháp tăng trưởng thủy nhiệt

Kết quả phân tích hình dạng của hạt ZnO được thực hiện bằng kính hiển vi điện tử quét SEM (Scanning Electron Microscope). Đặc tính cấu trúc của hạt nano ZnO được khảo sát bằng cách sử dụng máy phân tích tán xạ tia X (XRD: X-ray Diffraction) dùng nguồn Cu:K α ($\lambda=1.5415\text{\AA}$) và thiết bị đo phổ tán xạ không đàn hồi Raman (Horiba Jobin Yvon HR-800 dùng nguồn kích thích He-Cd laser bước sóng 325nm). Thành phần tỷ lệ nguyên tử hạt ZnO được phân tích bằng máy đo phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS: Energy-dispersive X-ray Spectroscopy) được cài đặt trong kính hiển vi điện tử quét đường hầm TEM (Tunneling Electron Microscope). Đây cũng là các phương pháp phân tích cấu trúc vật liệu được dùng rất phổ biến trong các công trình nghiên cứu về vật liệu.

Thực nghiệm điều khiển hạt ZnO được tiến hành bằng cách sử dụng bộ điều khiển nano (Zyvex S100) cài đặt trong kính hiển vi điện tử quét SEM. Đây là một công cụ hết sức hữu ích cho nghiên cứu và ứng dụng nano/micro. Sự di chuyển của các đầu dò ở kích thước nano/micro mét được thực hiện bởi hệ tay cầm điều khiển bên ngoài và giao diện điều khiển trên máy tính. Các đầu dò được sử dụng trong nghiên cứu này là các đầu dò sợi quang với đầu mũi kích thước khoảng 1 μm , được chế tạo bằng kỹ thuật đốt nóng và kéo [8]. Nguồn nhiệt laser khí CO $_2$ được dùng để đốt nóng tập trung vào một điểm trên sợi cáp quang đã được tách lớp vỏ bảo vệ bên ngoài, sau đó thiết bị kéo cáp (Sutter-Instruments P-2000) được sử dụng để kéo sợi quang ở cả hai bên điểm đốt cho đến khi tách rời thành hai sợi cáp. Bằng cách cài đặt thời gian đốt và lực kéo, các đầu dò sợi quang với đầu mũi kích thước micro mét có thể được chế tạo thành công.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Hình dạng của hạt ZnO sau khi được tổng hợp bằng phương pháp tăng trưởng thủy nhiệt được kiểm tra bằng kính hiển vi điện tử quét SEM (Scanning Electron Microscope), các kết quả phân tích này được trình bày trên Hình 2. Kết quả phân tích ảnh SEM cho thấy, hạt ZnO được tổng hợp thành công có dạng hình cầu rất đồng nhất. Kết quả kiểm tra kích thước hạt thể hiện hầu hết các hạt đều có kích thước micro mét. Thêm nữa, chúng ta thấy rất rõ ràng, bề mặt của hạt sau khi tổng hợp khá trơn. Hình cầu đồng nhất với bề mặt trơn sẽ giúp tăng cường hiệu suất quang học của vật liệu [6, 7].

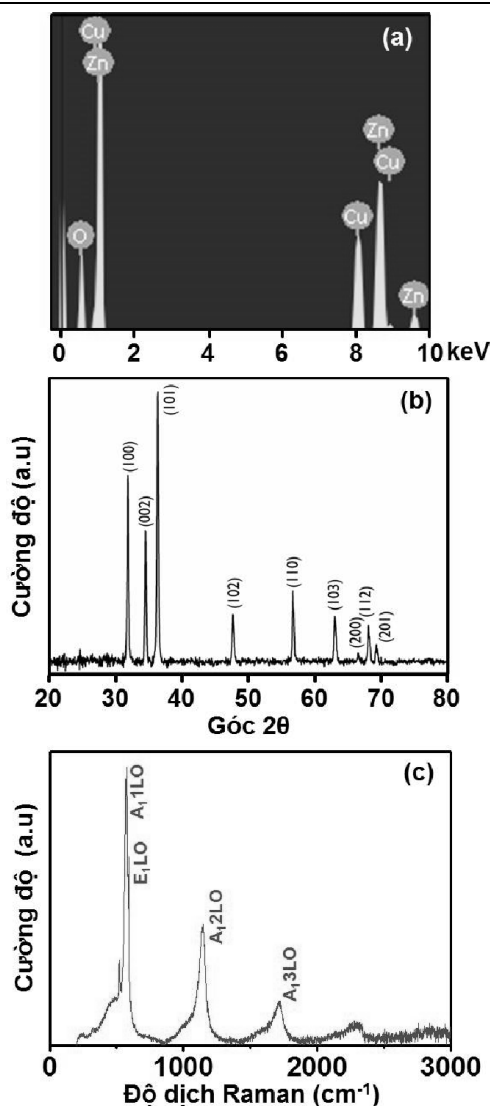


Hình 2. (a) và (b) Ảnh SEM hạt cầu ZnO sau khi tổng hợp

Đặc tính cấu trúc của hạt cầu ZnO được phân tích bằng cách sử dụng các kỹ thuật phân tích tán xạ tia X (XRD: X-ray Diffraction) và phổ năng lượng liên kết phân tử Raman. Thành phần tỷ lệ nguyên tử hạt ZnO được phân tích bằng máy đo phổ tán xạ năng lượng tia X (TEM-EDS). Các hạt ZnO được phân tích nằm trong các lưới đồng (Cu) có kích thước 20×20 μm^2 . Phổ năng lượng tán xạ tia X cho từng hạt ZnO sẽ được phân tích và kết quả được trình bày ở trên Hình 3a. Kết quả thể hiện trên phổ tán xạ cho thấy sự có mặt của các nguyên tử Zn, O và Cu. Chi tiết về tỷ lệ của hai nguyên tử Zn và O được thể hiện trong Bảng 1 cho thấy tỷ lệ Zn và O gần đạt tỷ lệ 1:1 với tỷ trọng nguyên tử Zn:O là 4:1, theo đúng đặc tính cấu trúc cũng như thành phần cấu tạo của phân tử ZnO trên thực tế.

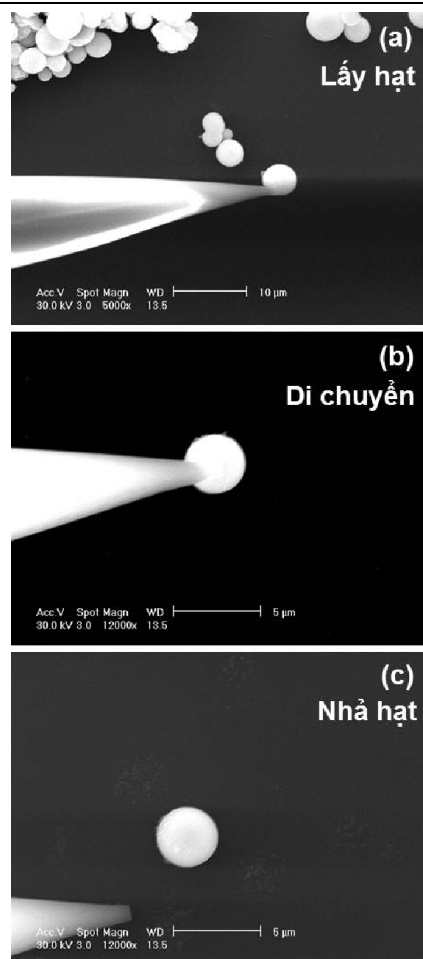
Bảng 1. Kết quả phân tích thành phần nguyên tử của hạt cầu ZnO

Nguyên tử	Tỉ lệ tỷ trọng (%)	Tỉ lệ nguyên tử (%)
O	17.81	46.96
Zn	82.19	53.04
Tổng	100	100



Hình 3. (a) Phân tích TEM-EDS về tỷ lệ thành phần nguyên tử cho đơn hạt ZnO; (b) Phổ X-ray của hạt ZnO; (c) Phổ năng lượng Raman của hạt ZnO.

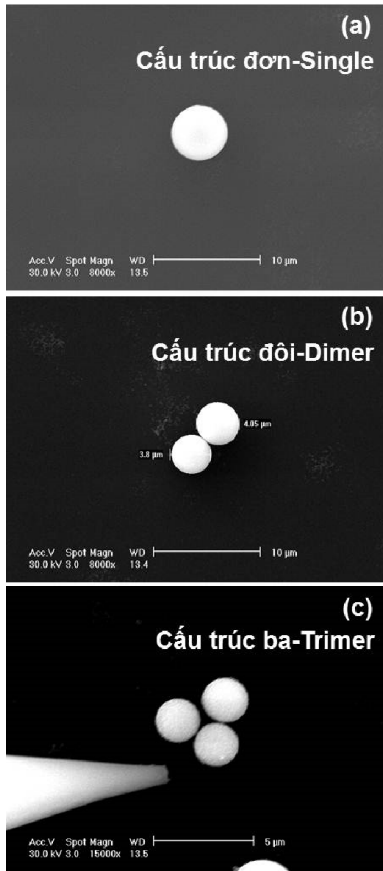
Kết quả phân tích hạt cầu ZnO bằng máy quét tia X (dùng nguồn Cu:K α , $\lambda=1.5415\text{\AA}$) được thể hiện trong Hình 3b. Phổ tán xạ XRD của hạt ZnO xuất hiện các đỉnh phổ rất rõ, chứng tỏ hạt ZnO có cấu trúc khá tinh khiết và tất cả những đỉnh phổ này đều tương ứng với các mặt trong cấu trúc tinh thể wurtzit của ZnO [9]. Để phân tích rõ hơn về sự tinh khiết trong cấu trúc tinh thể của hạt ZnO, chúng tôi cũng đồng thời sử dụng máy phân tích phổ tán xạ không đàn hồi Raman. Hình 3c trình bày kết quả phân tích phổ Raman được quét từ 200cm^{-1} đến 2500cm^{-1} dùng nguồn kích thích He-Cd laser bước sóng 325nm với các đỉnh phổ tương ứng với sự rung lưới tinh thể của cấu trúc wurtzit ZnO [10]. Theo đó, đỉnh phổ tại 574cm^{-1} và 590cm^{-1} tương ứng với hai chế độ đối xứng dao động quang ngang A₁(LO) và E₁(LO) trong cấu trúc tinh thể của ZnO, còn hai đỉnh phổ sau tương ứng với sóng hài bậc hai và bậc ba của chế độ dao động quang ngang A₁(LO). Những kết quả phân tích cấu trúc vật liệu ở trên cho thấy, hạt cầu ZnO có cấu trúc tinh thể tốt với rất ít pha tạp sau quá trình tổng hợp.



Hình 4. Quá trình điều khiển hạt ZnO bằng bộ điều khiển nano với đầu dò làm từ sợi cáp quang cài đặt trong kính hiển vi điện từ quét SEM

Để có thể đo khả năng hấp thụ và phát quang của hạt cầu ZnO với các cấu trúc khác nhau như hạt đơn, hạt đôi hay ba hạt liên kết, chúng tôi sử dụng bộ điều khiển nano với đầu dò làm bằng sợi cáp quang. Toàn bộ hệ thống điều khiển nano này được đặt bên trong kính hiển vi điện từ quét SEM để có thể quan sát trực tiếp việc điều khiển các vật thể (hạt cầu ZnO). Hình 4 trình bày quá trình điều khiển đơn hạt ZnO (đường kích hạt khoảng $3\mu\text{m}$). Theo đó, hạt ZnO sau khi được đặt trên đế silicon sẽ được kiểm soát và điều khiển bằng bộ điều khiển nano với đầu dò làm từ sợi cáp quang có kích thước khoảng $1\mu\text{m}$. Đầu dò quang được điều khiển để lấy các đơn hạt (Hình 4a) sao cho đơn hạt dính vào đầu dò, nhờ đó chúng ta có thể di chuyển đơn hạt (Hình 4b) trong không gian đến vị trí mong muốn để có thể thả hạt xuống lại đế (Hình 4c). Để thực hiện thành công thí nghiệm này, lực tiếp xúc giữa bề mặt, hạt và đầu dò phải được kiểm soát một cách chính xác. Tham khảo tài liệu 8 để biết thêm chi tiết về công dụng bộ điều khiển nano, kỹ thuật chế tạo đầu dò sợi cáp quang, và kỹ thuật điều khiển hạt. Bằng cách sử dụng kỹ thuật điều khiển nano chúng tôi có thể tạo ra hạt cầu ZnO với các cấu trúc khác nhau như cấu trúc đơn, cấu trúc đôi và cấu trúc ba như trình bày trên Hình 5. Cấu trúc đơn được hình thành đơn giản bằng việc điều khiển lấy-nhả từng đơn hạt, còn cấu trúc đôi hay ba chúng ta có thể chọn các đơn hạt cấu ZnO có kích thước tương đương nhau để điều khiển cho chúng tạo liên kết với

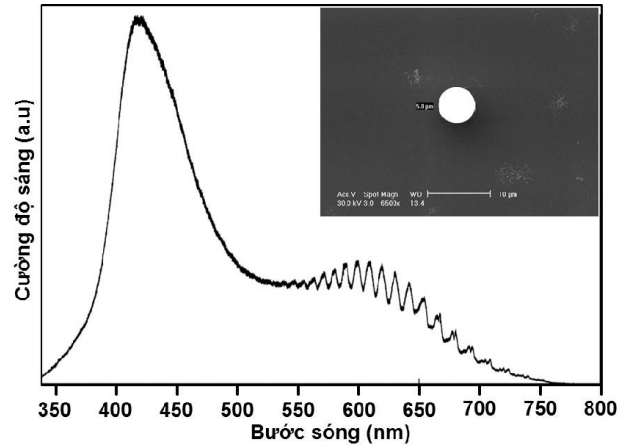
nhau. Rõ ràng rằng, nhiều cấu trúc hạt có thể được tạo ra, tuy nhiên để thể hiện khả năng thực hiện kỹ thuật điều khiển, ở đây chúng tôi chỉ trình bày các cấu trúc đôi và ba. Các cấu trúc hạt ZnO này sau đó sẽ được kích thích bởi nguồn sáng để có thể nghiên cứu, khảo sát đặc tính phát quang của vật liệu.



Hình 5. Các cấu trúc đơn (a), đôi (b) và ba (c) hạt có thể được tạo thành bằng kỹ thuật điều khiển hạt

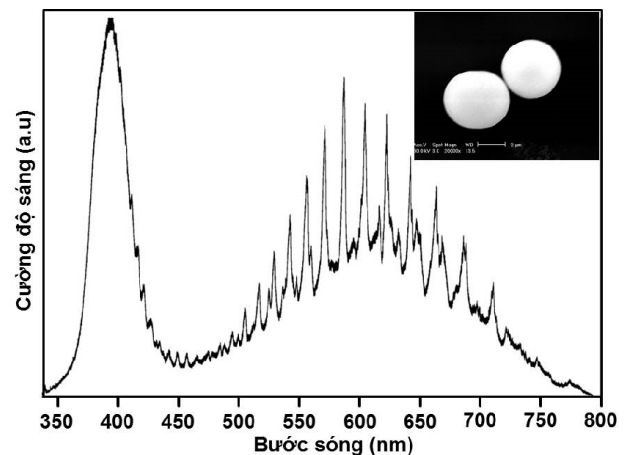
Phổ phát quang (350÷800nm) của các cấu trúc hạt ZnO được đo khi kích thích hạt ZnO bằng nguồn tia cực tím từ nguồn bước sóng 325nm. Hình 6 trình bày kết quả đo phổ phát quang của đơn hạt cầu ZnO với đường kính hạt khoảng 5.8 μ m. Kết quả phân tích phổ cho thấy hạt ZnO phát quang với cường độ mạnh tại vùng tia cực tím tương ứng với sự phát xạ ánh sáng giữa vùng hóa trị và vùng dẫn trong dải năng lượng của ZnO, điều này cho thấy khả năng hấp thụ tia cực tím rất mạnh của vật liệu. Thêm nữa, chúng ta cũng dễ dàng nhận thấy đỉnh phát xạ ánh sáng trong phổ phát quang tại vùng ánh sáng thấy được (~620nm). Những kết quả nghiên cứu và khảo sát tương tự cũng đã được báo cáo, mà nguyên nhân có thể bởi sự thiếu hụt một phần nguyên tử O trong cấu trúc tinh thể của ZnO [11, 12]. Điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả phân tích thành phần nguyên tử được thể hiện trong Bảng 1 đã được trình bày ở trên. Điều đặc biệt thú vị đó là sự xuất hiện của các đỉnh nhỏ tại các bước sóng cách đều nhau trong phổ phát quang của hạt cầu ZnO, mà nguyên nhân là do sự dao động cộng hưởng WGM (Whispering Gallery Modes). WGM là chế độ cộng hưởng của trường sóng bị giam hãm bên trong một vật liệu với bề mặt trơn

do sự phản xạ liên tục của trường sóng này tại bề mặt bên trong của vật liệu, kết quả này sẽ tạo ra một sóng dao động di chuyển xung quanh bề mặt của vật liệu. Hiện tượng này có thể được quan sát bằng thực nghiệm và tính toán bằng lý thuyết trong các vật liệu có cấu trúc đồng nhất với bề mặt trơn [9, 13].

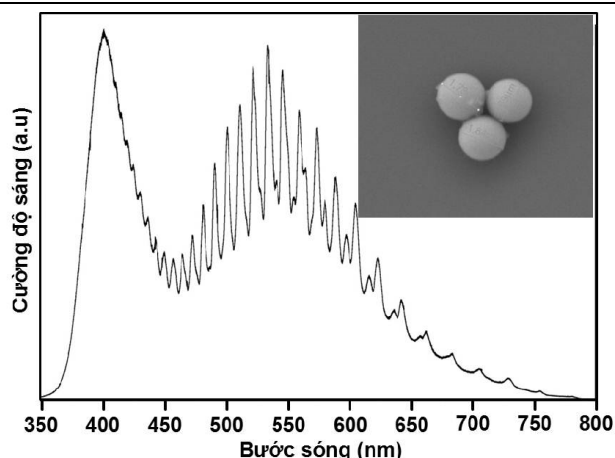


Hình 6. Phổ quang của đơn hạt đặt trên đế Si với kích thước hạt 5.8 μ m

Kết quả đo phổ phát quang của hạt ZnO với các cấu trúc đôi và cấu trúc ba được thể hiện trong Hình 7 và Hình 8. Chúng ta thấy rằng, phổ phát quang của các cấu trúc này về cơ bản cũng tương tự như phổ của hạt đơn gồm đỉnh phổ lớn ở vùng tia cực tím cũng như vùng ánh sáng thấy được, cũng như là các đỉnh phổ bởi sự dao động cộng hưởng WGM. Tuy nhiên, điểm khác biệt đó là cường độ sáng của các đỉnh cộng hưởng WGM có biên độ lớn hơn cũng như có hiện tượng chia tách các đỉnh phổ với sự xuất hiện của các đỉnh phổ cường độ nhỏ hơn bên cạnh. Hiện tượng này được dự đoán bằng lý thuyết [14], nguyên nhân có thể là do có sự liên kết phổ giữa các hạt đơn ZnO với nhau. Kết quả của sự liên kết phổ sẽ làm cho các đỉnh phổ có cường độ mạnh hơn, cũng như xuất hiện thêm các đỉnh phổ khác tại các bước sóng khác nhau trong dãy phổ phát quang của vật liệu. Tuy nhiên, cần có thêm nhiều khảo sát bằng thực nghiệm cũng như tính toán bằng lý thuyết để có thể giải thích chi tiết hơn về hiện tượng này.



Hình 7. Phổ quang của đôi hạt đặt trên đế Si với kích thước mỗi hạt khoảng 4.3 μ m



Hình 8. Phổ quang của ba hạt đặt trên đế Si với kích thước mỗi hạt khoảng $1.8\mu\text{m}$

4. Kết luận

Tóm lại, trong nghiên cứu này chúng tôi tổng hợp thành công hạt ZnO hình cầu kích thước micro mét với bề mặt trơn. Kết quả phân tích đặc tính cấu trúc của hạt bằng kỹ thuật tán xạ tia X và tán xạ đàn hồi Raman cho thấy hạt cầu ZnO có cấu trúc tinh thể tốt với rất ít pha tạp. Đặc tính quang của hạt ZnO với các cấu trúc đơn, đôi và ba cũng được đo và phân tích. Đặc tính phát quang của các cấu trúc này thể hiện nhiều đặc tính nổi bật như khả năng hấp thụ tia cực tím mạnh và đặc biệt là sự hình thành các đỉnh dao động cộng hưởng WGM trong phổ phát quang.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. M. Silván, M. A. Hernández, V. T. Costa, R. J. Martín Palma, J. M. Martínez Duart, "Structured porous silicon sub-micrometer wells grown by colloidal lithography", *Europhys. Lett.* 76, 690 (2006).
- [2] C. O'Regan, S. Biswas, N. Petkovab, J. D. Holmes, "Recent advances in the growth of germanium nanowires: synthesis, growth dynamics and morphology control", *J. Mater. Chem. C* 2, 14-33 (2014).
- [3] L. Sang, Y. Zhao, C. Burda, "TiO₂ Nanoparticles as Functional Building Blocks", *Chem. Rev.* 114, 9283–9318 (2014).
- [4] H. M. Xiong, D. Xie, X. Guan, Y. Tana, Y. Xia, "Water-stable blue-emitting ZnO@polymer core-shell microspheres", *Journal of Materials Chemistry* 24, 2490 (2007).
- [5] A. Zhang, L. Zhang, L. Sui, D. Qian, M. Chen, "Morphology-controllable synthesis of ZnO nano-/micro-structures by a solvothermal process in ethanol solution", *Cryst. Res. Technol.* 48, 947–955 (2013).
- [6] R. Chen, B. Ling, X. W. Sun, and H. D. Sun, "Room temperature excitonic whispering gallery mode lasing from high-quality hexagonal ZnO microdisks", *Adv. Mater.* (Deerfield Beach Fla.) 23, 2199–2204 (2011).
- [7] M. Wang, Y. Zhou, Y. Zhang, E. J. Kim, S. H. Hahn, and S. G. Seong, "Near-infrared photoluminescence from ZnO", *Appl. Phys. Lett.* 100, 101906 (2012).
- [8] L. N. Nguyen, M. C. Lin, H. S. Chen, Y. W. Lan, C. S. Wu, K. S. Chang-Liao, C. D. Chen, "Photo-response of a nanopore device with a single embedded ZnO nanoparticle", *Nanotechnology* 23, 165201 (2012).
- [9] R. S. Moirangthem, P. Cheng, P. C. Chien, B. T. H. Ngo, S. Chang, C. Tien, Y. Chang, "Optical cavity modes of a single crystalline zinc oxide microsphere", *Optics Express* 21, 3010-3020 (2013).
- [10] R. Cuscó, E. A. Lladó, J. Ibáñez, L. Artús, J. Jiménez, B. Wang, M. J. Callahan, "Temperature dependence of Raman scattering in ZnO", *Phys. Rev. B* 75, 165202 (2007).
- [11] J. Liu, N. Motta, S. Lee, "Ultraviolet photodetection of flexible ZnO nanowire sheets in polydimethylsiloxane polymer", *Beilstein J. Nanotechnol.* 3, 353–359 (2012).
- [12] J. Liu, S. Lee, Y. H. Ahn, J. Y. Park, K. H. Koh, "Tailoring the visible photoluminescence of mass-produced ZnO nanowires", *Phys. D: Appl. Phys.* 42, 095401 (2009).
- [13] A. Paunoiu, R. S. Moirangthem, A. Erbe, "Whispering gallery modes in intrinsic TiO₂ microspheres coupling to the defect-related photoluminescence after visible excitation", *Physica status solidi (RRL)* 9, 241–244 (2015).
- [14] L. I. Deych, C. Schmidt, A. Chipouline, T. Pertsch, A. Tünnermann, "Propagation of the fundamental whispering gallery modes in a linear chain of microspheres", *Appl Phys B* 93, 21–30 (2008).

(BBT nhận bài: 28/07/2015, phân biên xong: 05/09/2015)