

TỔNG HỢP DÂY NANO $Ga_2O_3/GaAs$ (100) BẰNG PHƯƠNG PHÁP HƠI LỎNG RẮN SỬ DỤNG XÚC TÁC HẠT NANO Ag

VAPOR-LIQUID-SOLID METHOD FOR SYNTHESIZING Ga_2O_3 ON $GaAs$ (100) SUBSTRATE USING Ag NANOPARTICLES CATALYST

Nguyễn Văn Mạnh¹, Trần Hữu Toàn², Đào Văn Phong³,
Nguyễn Đức Ba^{4,5}, Vũ Thị Bích^{4,5}, Nguyễn Tiến Đại^{4,5,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2024.091>

TÓM TẮT

Dây nano Ga_2O_3 trên đế $GaAs$ (100) đã được nghiên cứu chế tạo thành công bằng phương pháp hơi lỏng rắn (VLS) sử dụng xúc tác hạt nano Ag qua hai quá trình gia nhiệt (T_1 , T_2). Bằng phương pháp đồng kết tủa trong dung dịch $HF/AgNO_3$, hạt nano Ag có đường kính 30 - 70nm được lắng đọng lên đế $GaAs$ (100). Với sự có mặt của hạt nano Ag, dây nano Ga_2O_3 được hình thành trên đế $GaAs$ (100) trong dải nhiệt độ từ 750 - 820°C tại chân không $\sim 10^{-3}$ Torr, gần nhiệt độ cùng tinh eutectic (T_e) của hợp chất Ag-GaAs. Đường kính của dây nano nhận được thay đổi trong khoảng từ 35nm đến 45nm và độ dài từ vài chục nm đến vài trăm μm phụ thuộc vào đường kính hạt Ag và thời gian tổng hợp tại nhiệt độ T_2 . Kết quả khảo sát hình thái học, cấu trúc, thành phần và phổ tán xạ Raman cho thấy dây nano $Ga_2O_3/GaAs$ (100) thu được có chất lượng tốt. Từ các kết quả nhận được, hướng sử dụng xúc tác Ag mới trong chế tạo dây nano bằng phương pháp VLS ứng dụng trong các linh kiện nano hiệu năng cao được đề xuất.

Từ khóa: Dây nano Ga_2O_3 , $GaAs$ (100), hạt nano Ag, phương pháp hơi lỏng rắn.

ABSTRACT

$Ga_2O_3/GaAs$ (100) nanowires were synthesized by the vapor-liquid-solid (VLS) method, using Ag nanoparticles as a catalyst with two annealing processes of T_1 and T_2 . The Ag nanoparticles were deposited on $GaAs$ (100) with a diameter ranging from 30 - 70nm, using precursors of $AgNO_3$ and HF solution by employing the co-precipitation approach. As working pressure of $\sim 10^{-3}$ Torr and at the T_2 from 750 - 820°C, Ga_2O_3 nanowires were grown with a 35 - 45nm of diameter and lengths ranging from several tens of nm to a few hundred μm , which strongly depends on the pre-Ag nanoparticles and growth time. The results showed the excellent nanowire quality of as-synthesized morphology, structure, and element characterizations. Beyond this finding, we suggest an Ag nanoparticle catalyst to grow semiconductor nanowires for nanodevices.

Keywords: Ga_2O_3 nanowires, $GaAs$ (100), Ag nanoparticles, vapor-liquid solid method.

¹Khoa Công nghệ Hóa, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trung tâm Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Trường Cao Đẳng Kỹ thuật Công nghiệp, Bắc Giang

⁴Viện Nghiên cứu Lý thuyết và Ứng dụng, Đại học Duy Tân

⁵Khoa Khoa học Cơ bản, Trường Đại học Duy Tân

*Email: nguyentien dai@duytan.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/9/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/12/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/3/2024

1. MỞ ĐẦU

Chất bán dẫn và ô xít kim loại bán dẫn có cấu trúc dây nano, thanh nano và cột nano đang được quan tâm nghiên cứu mạnh mẽ trong nhiều thập kỷ qua do tính chất nổi bật của hệ thấp chiều giảm giam giữ lượng tử [1-7]. Các vật liệu cấu trúc nano tạo cho chúng tiềm năng ứng dụng rộng lớn trong nghiên cứu khoa học, công nghệ và chế tạo linh kiện nano hiệu năng cao. Khi thay đổi kích thước, hình thái học và chiều của vật liệu nano, các tính chất vật lý (khe năng lượng vùng cấm, độ linh động hạt tải, diện tích bề mặt/thể tích, năng lượng liên kết và tán xạ bề mặt đối với điện tử/ photon) cũng được thay đổi theo [1, 7]. Nổi bật trong nhóm vật liệu ô xít kim loại bán dẫn trên là dây nano Ga_2O_3 [8] bởi vì dây nano này có nhiều ứng dụng trong các lĩnh vực khác nhau như điện - điện tử, quang - điện tử [8, 9], cảm biến khí [10], vật liệu cách điện trong suốt [11], pin Li [12], quang điện hóa tách nước và siêu tụ [5, 10, 12-17]. Đặc biệt, do độ rộng khe năng lượng vùng cấm của Ga_2O_3 lớn ($E_g > 4,8eV$), vật liệu hấp thụ chủ yếu ánh sáng trong vùng tử ngoại, vì vậy rất phù hợp đối với các linh kiện quang điện - điện tử hoạt động trong vùng tử ngoại, chất cách điện và xúc tác tách khí H_2 từ nước [11, 16]. Vật liệu có nhiệt độ nóng chảy cao ($\sim 1900^\circ C$) [8], trong suốt nên được ứng dụng nhiều trong các lớp truyền ánh sáng có độ bền nhiệt cao.

Dây nano Ga_2O_3 đã được tổng hợp thành công bằng nhiều phương pháp khác nhau như: hơi lỏng rắn (VLS) [2, 3, 6], lắng đọng hơi hóa học cơ kim (CVD) [18], lắng đọng epitaxy chùm phân tử (MBE) [19], phún xạ [20]. Trong các phương pháp trên, VLS thường được lựa chọn vì có thể tổng hợp trên các đế khác nhau ở nhiệt độ không cao và điều khiển được đường kính dây nano do phụ thuộc vào đường kính hạt xúc tác ban đầu. Bên cạnh đó, ô xít Ga_2O_3 tổng hợp bằng phương pháp VLS cũng cho thấy được hiệu suất tăng cường và ổn định nhiệt cao hơn các phương pháp

khác [3, 8]. Tuy nhiên, phương pháp VLS [2] cần kim loại xúc tác để tạo mầm cho quá trình hình thành dây nano ban đầu. Hiện nay, các hạt nano Au, Pt, Cr, Ni và Fe [1-2, 13, 21] đang được sử dụng khá phổ biến làm vật liệu xúc tác, nhưng giá thành cao và phương pháp lắng đọng hạt nano lên đế ban đầu phức tạp. Các phương pháp lắng đọng hạt nano xúc tác lên đế chủ yếu là phương pháp vật lý như: phun xạ, bốc bay nhiệt, lắng đọng laser chùm phân tử, các phương pháp này đòi hỏi thiết bị phức tạp và giá thành cao. Chính vì thế, chúng tôi đề xuất thay thế phương pháp lắng đọng kim loại xúc tác ban đầu bằng phương pháp lắng đọng hóa học đồng kết tủa lên đế với chi phí không cao và thiết bị đơn giản. Hạt nano sử dụng để lắng đọng lên đế là Ag, sử dụng hai tiền chất là muối $AgNO_3$ và axit HF giá thành thấp, sẵn có trên thị trường. Mặc dù, kim loại Ag vẫn còn một số hạn chế như: dễ bị ô xít trong điều kiện không khí và nhiệt độ eutectic của hợp chất Ag-GaAs so với một số kim loại khác còn cao ($\sim 830^\circ C$) [3].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tổng hợp dây nano $Ga_2O_3/GaAs$ (100) sử dụng hạt xúc tác nano Ag (đường kính 20 - 80nm) bằng phương pháp hơi lỏng rắn (VLS) với hai quá trình biến tính nhiệt (T_1, T_2). Khảo sát sự thay đổi nhiệt độ biến tính (T_2) đến quá trình hình thành dây nano, hình thái học, cấu trúc, thành phần hóa học của dây nano. Kết quả mở ra một hướng nghiên cứu nhằm tìm kiếm và thay thế các kim loại xúc tác truyền thống phục vụ chế tạo các dây nano ô xít kim loại chất lượng tốt ứng dụng trong chế tạo các linh kiện nano hiệu năng cao trong tương lai.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và thiết bị nghiên cứu

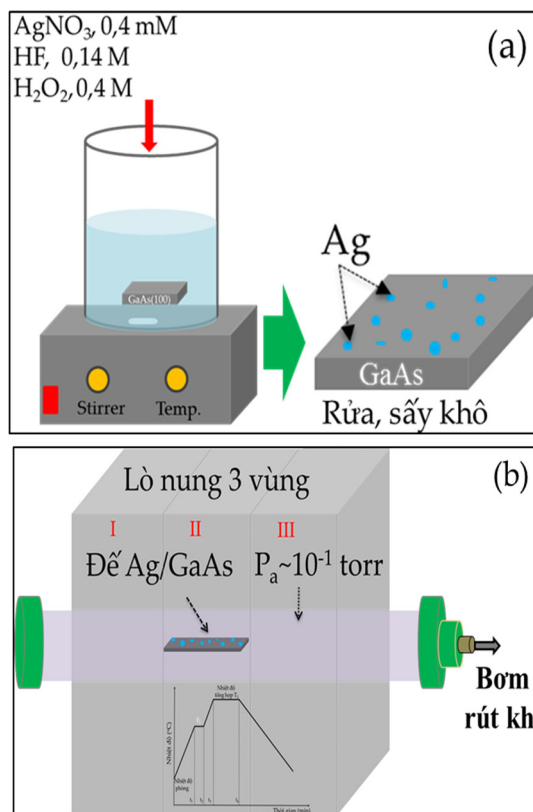
Để đơn tinh thể GaAs (100) có điện trở suất $1,5 - 3,1 \times 10^8 \Omega m$, độ dày $500 \mu m$, đường kính $5,08 cm$ (Công ty AXT, Hoa Kỳ); axit hydrofluoric (HF, 40%) và muối bạc nitrat ($0,4 mM AgNO_3, 2,5\% w/v$) (Hãng Sigma Aldric, Singapore); methanol ($C_2H_5OH, 96\%$); acetone ($C_3H_6O, 99,5\%$) và hydrogen peroxide ($H_2O_2, 35\%$) (Hãng Chang chum plastic, Đà Loan). Lò chân không thấp ($\sim 10^{-3} Torr$) có 3 vùng nhiệt độ hoạt động (Blue M Three-Zone Tube Furnace STF55566C, Cole Parmer, Hòa Kỳ).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

a) Chế tạo dây nano $Ga_2O_3/GaAs$

Đế GaAs (100) được cắt nhỏ theo diện tích $0,5 \times 0,5 cm$ và được làm sạch bề mặt bằng rung siêu âm trong các dung dịch theo quy trình sau: (1) acetone, thời gian 10 phút; (2) methanol, thời gian 10 phút; (3) rửa bằng nước khử ion thời gian 10 phút/ 3 - 5 lần và (4) sấy khô bằng khí N_2 . Tiếp theo, hạt nano Ag được lắng đọng lên đế GaAs đã làm sạch bằng phương pháp đồng kết tủa trong 10ml dung dịch gồm $AgNO_3, 0,4 mM$ và $HF, 0,14 M$ và $H_2O_2, 0,4 M$ trong thời gian 30 giây tại nhiệt độ phòng, (hình 1a). Nồng độ và thời gian lắng đọng Ag trên GaAs được thực hiện theo điều kiện đã được công bố [2, 6]. Sau khi lắng đọng hạt nano Ag lên GaAs (100), mẫu được ủ trong chân không ($\sim 10^{-3} Torr$) và biến tính nhiệt với hai quy trình khác nhau $T_1 = 400^\circ C$, thời gian 20 phút và

$T_2 = 700 - 860^\circ C$ (hình 1b), tốc độ gia nhiệt $3^\circ C/phút$. Nhiệt độ và thời gian biến tính tại nhiệt độ T_2 có thể thay đổi tùy mục đích khảo sát. Mẫu sau khi tổng hợp xong tại nhiệt độ T_2 sẽ được giảm tự động về nhiệt phòng.



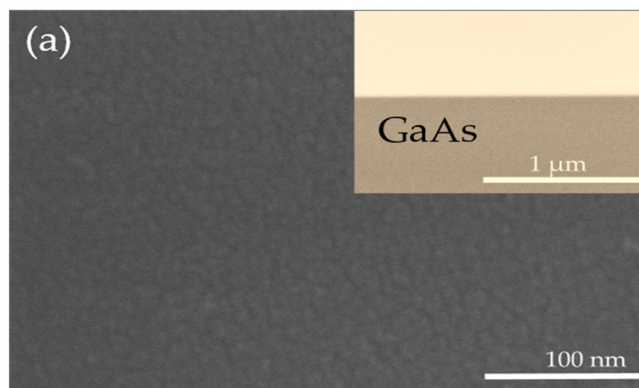
Hình 1. (a) Quy trình lắng đọng hạt nano Ag lên GaAs (100) bằng phương pháp đồng kết tủa và (b) Hình ảnh mô hình hóa thiết bị lò ủ nhiệt chân không trong quá trình gia nhiệt tổng hợp dây nano Ga_2O_3

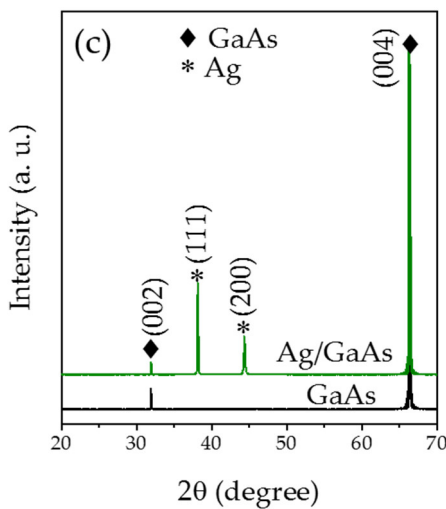
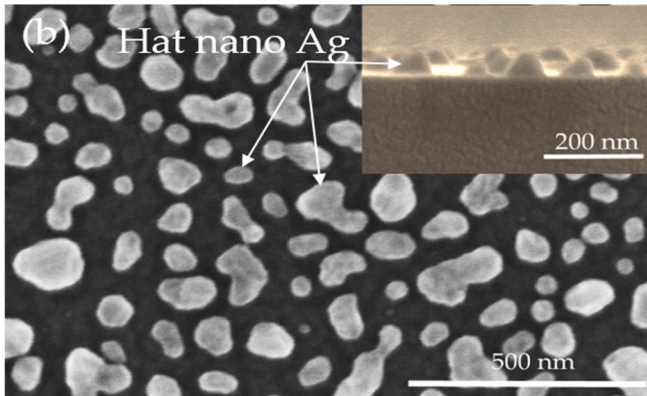
b) Xác định các tính chất của vật liệu

Hình thái học và thành phần hóa học của mẫu được nghiên cứu bằng kính hiển vi điện quét phân giải cao (FE-SEM, Hitachi, Japan S-4800) và phổ kế tán xạ năng lượng tia X (EDS). Cấu trúc của dây nano được khảo sát bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD, nguồn bức xạ $Cu_K\alpha, \lambda = 1,54 \text{ \AA}$, Rigaku) và phổ kế Raman (micro ANDOR, diode laser) sử dụng bước sóng kích thích $532 nm$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Nghiên cứu đặc trưng tính chất của vật liệu





Hình 2. Ảnh hiển vi điện tử quét phân giải cao (FE-SEM) của (a) Đế GaAs(100) đã làm sạch trước khi lắng đọng hạt nano Ag, (b) Sau khi lắng đọng hạt nano Ag bằng phương pháp đồng kết tủa, thời gian 30 giây và (c) Giản đồ nhiễu xạ XRD của đế trước và sau khi lắng đọng hạt nano Ag

Hình 2a trình bày ảnh hiển vi điện tử quét phân giải cao (FE-SEM), bề mặt đế GaAs (100) sau khi được xử lý loại bỏ các chất hữu cơ và vô cơ trên bề mặt. Từ ảnh SEM ta thấy bề mặt của đế phẳng, không có hiện tượng gồ ghề. Bề mặt phẳng, đồng đều chứng tỏ quá trình tẩy rửa các chất hữu cơ và vô cơ trên bề mặt và quá trình cắt để thành các mẫu nhỏ không bị phá hủy và ăn mòn bề mặt. Đây là một yếu tố quan trọng đảm bảo mật độ lắng đọng hạt nano Ag lên đế bằng phương pháp hóa học được đồng đều. So sánh ảnh SEM bề mặt của đế GaAs (100) trước và sau khi được lắng đọng hạt nano Ag sau thời gian 30 giây (hình 2b) cho thấy hạt nano Ag đã được lắng đọng lên đế có đường kính từ 35 - 80nm, độ cao khoảng 20 - 70nm và mật độ khoảng $1,5 - 2,1 \times 10^{10}$ hạt/cm². Kích thước và mật độ của hạt Ag tổng hợp được rất phù hợp đối với phương pháp tổng hợp dây nano bằng phương pháp VLS. Nếu hạt nano phân bố không đồng đều sẽ ảnh hưởng đến đường kính của dây nano trong suốt quá trình tổng hợp [22]. Dựa trên kích thước hạt nano Ag ban đầu chúng ta cũng có thể dự đoán được đường kính của dây nano Ga₂O₃ sau này. Đối với việc chế tạo các đơn linh kiện nano, các dây nano phải có đường kính vừa phải, nếu đường kính của hạt nano lớn quá sẽ làm giảm tốc độ hình thành dây nano, gây tiêu tốn và lãng phí năng lượng, ngược lại, nếu dây nano có

đường kính nhỏ quá sẽ gây khó khăn trong việc chế tạo linh kiện. Do đó lựa chọn kích thước hạt nano Ag phù hợp để xúc tác quá trình tổng hợp dây nano Ga₂O₃/GaAs cũng là một yếu tố quan trọng của phương pháp VLS.

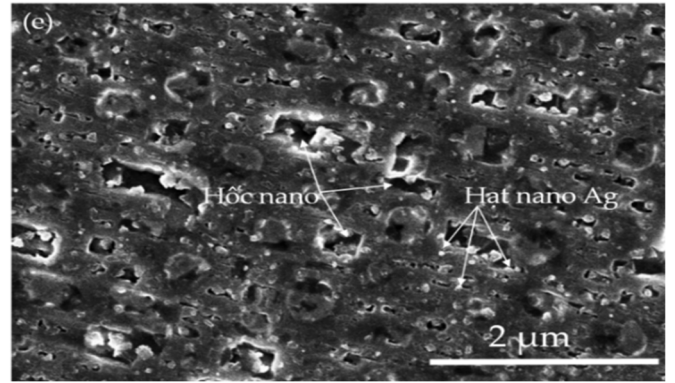
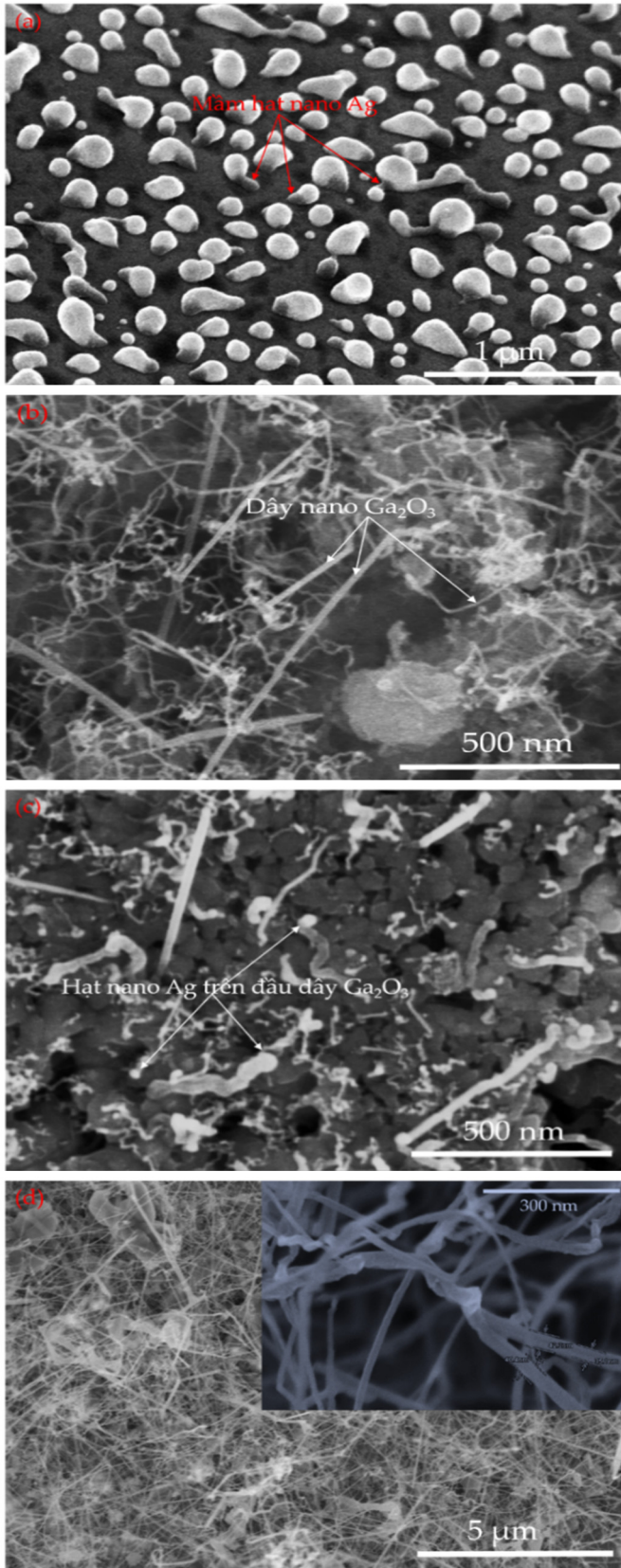
Phương pháp nhiễu xạ điện tử tia X với góc nhiễu xạ 2θ từ 20° - 70° đã được sử dụng để khẳng định hạt nano Ag đã được lắng đọng thành công trên đế GaAs (100). Từ ảnh phổ nhiễu xạ XRD (hình 2c) ta thấy khi chưa có hạt nano Ag, đế GaAs xuất hiện các đỉnh XRD tại vị trí 2θ = 31,7° và 66,34° được xác định là các mặt mạng tinh thể (002) và (004) của tinh thể zine-blende GaAs(100), tương ứng [13, 23]. Trong khi để được lắng đọng Ag, ta thấy xuất hiện hai đỉnh nhiễu xạ tại vị trí góc 2θ = 38,34° và 44,47° được cho là mặt tinh thể (111) và (200) của Ag (theo thẻ chuẩn JCPDS No. 04-0783) [24]. Cường độ mặt nhiễu xạ mặt tinh thể (111) và (200) của Ag là thấp so với đế GaAs và đỉnh nhiễu xạ sắc nét, độ rộng bán phổ (FWHM) hẹp chứng tỏ hạt nano Ag được lắng đọng trên đế ít và sự kết tinh của Ag theo hướng (111) là mạnh hơn so với hướng (200). Chất lượng kết tinh hạt nano Ag tốt cũng tạo tiền đề cho các mầm tinh thể Ga₂O₃ được định hướng và mọc theo dễ dàng hơn trong cơ chế VLS sau này.

3.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ đến đặc trưng tính chất của vật liệu

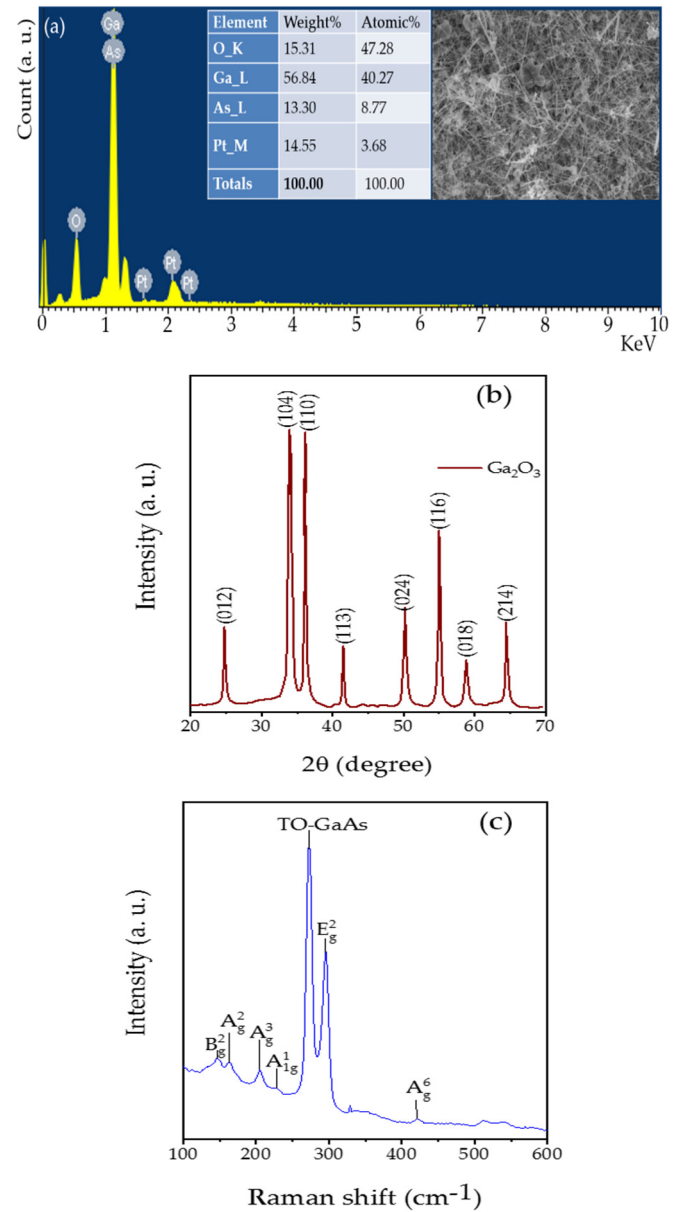
Hình 3 trình bày ảnh hiển vi điện tử phân giải cao của dây nano Ga₂O₃ được tổng hợp tại các nhiệt độ T₂ khác nhau trong dải từ 700°C đến 860°C, trong cùng một điều kiện chân không (~10⁻³ Torr), nhiệt độ T₁ = 400°C và thời gian biến tính. Từ ảnh SEM chúng ta thấy dây nano chưa hình thành thành tại nhiệt độ biến tính thấp (T₂ = 700°C, hình 3a). Khi tăng nhiệt độ biến tính T₂ lên từ 750°C đến 820°C, dây nano hình thành với đường kính khác nhau (hình 3b, 3c và 3d). Cấu trúc dây nano có giọt Ag trên đầu của mỗi dây (hình 3c). Đặc biệt, khi nhiệt độ T₂ = 820°C, dây nano hình thành rất mạnh với đường kính trong khoảng 35 - 45nm và chiều dài dây nano lên tới vài trăm μm (hình 3d). Khi tiếp tục tăng nhiệt độ biến tính lên tới T₂ = 860°C, dây nano Ga₂O₃ không hình thành mà thay vào đó là hình thành các hốc nano (hình 3e).

Các kết quả nhận được cho thấy cơ chế hình thành dây nano bằng phương pháp VLS có thể liên quan nhiều tới điểm cùng tinh (eutectic, T_e) của các hợp chất. Dây nano chỉ có thể hình thành xung quanh nhiệt độ eutectic. Tại nhiệt độ T_{eutec}, năng lượng hoạt hóa (E_a) của hợp chất là thấp nhất, khi đó dây nano dễ hình thành. Khi nhiệt độ biến tính thấp hơn điểm eutectic của hợp chất Ag-GaAs (T_{eutec} = 810 - 820°C), dây nano chưa hình thành (hình 3a). Các mầm nano Ag-Ga₂O₃ chưa hình thành nhiều trên đế, bởi các phân tử O₂ và Ga không tập trung vào mầm tạo hợp chất dẫn tới dây nano khó phát triển. Trên bề mặt đế chỉ là các hạt nano Ag được phân tán, co cụm hoặc chia nhỏ ra và trải rộng trên bề mặt đế. Tăng nhiệt độ biến tính T₂ lên gần nhiệt độ eutectic, các hạt Ag tiếp tục được phân nhỏ hơn, các phân tử O₂ và Ga tập trung nhiều vào điểm có năng lượng thấp nhất (điểm eutectic), tại đây, dây nano được hình thành nhanh hơn với đường kính phụ thuộc vào đường kính của mầm Ag ban đầu. Tuy nhiên khi tăng nhiệt độ lên cao hơn

điểm eutectic, dây nano lại không hình thành mà thay vào là hiện tượng ăn mòn để tạo thành các hốc nano [25, 26]. Cơ chế này cần được tiếp tục nghiên cứu kỹ hơn để giải thích tường minh trong thời gian tới.



Hình 3. Ảnh hiển vi điện tử phân giải cao của dây nano Ga₂O₃ được tổng hợp trên đế GaAs (100) ở các nhiệt độ khác nhau (a) 700°C, (b) 750 °C, (c) 780°C, (d) 820°C và (e) 860°C trong thời gian 1 giờ



Hình 4. (a) Phổ nhiễu xạ phân tán năng lượng tia X, (b) Giản đồ nhiễu xạ XRD và (c) Phổ tán xạ Raman của dây nano Ga₂O₃ được tổng hợp tại nhiệt độ 820°C trong thời gian 1 giờ

Hình 4a là kết quả khảo sát phổ phân tán năng lượng tia X (EDS) của dây nano Ga₂O₃ tại nhiệt độ tổng hợp T₂ = 820°C. Kết quả chỉ ra rằng mẫu chỉ có thành phần galium (Ga), ôxi (O) và asen (As) với thành phần khối lượng là 56,84% và 15,31% và 13,3%, tương ứng. Thành phần As được cho là từ đế GaAs, thành phần Ga là từ cả đế GaAs và dây nano Ga₂O₃, trong khi thành phần Pt (14,55%) đến từ lượng Pt lắng đọng lên mẫu khi mẫu được chuẩn bị để đo ảnh hiển vi điện tử phân giải cao, do mẫu là vật liệu ô xít có độ dẫn điện tử kém nên cần phủ lượng Pt lên mẫu để tăng độ dẫn trong suốt quá trình đo. Thành phần Ag không thể hiện trong mẫu do lượng bạc trên mẫu rất nhỏ nên cường độ phân tán năng lượng tia X của Ag là nhỏ so với các vật liệu khác. Kết quả thành phần nguyên tố thu được trong mẫu dây nano Ga₂O₃ chứng tỏ mẫu có độ tinh khiết cao và không bị lẫn tạp chất bên ngoài. Bên cạnh đó, chúng tôi cũng tiến hành khảo sát tính chất tinh thể của dây nano Ga₂O₃ bằng phương pháp nhiễu xạ điện tử XRD và tán xạ Raman. Kết quả trong hình 4b cho thấy, các đỉnh nhiễu xạ XRD tại vị trí 2θ = 24,6°; 33,9°; 36,2°; 41,5°; 50,25°; 55,07°; 58,8° và 64,3° được xác định là các mặt mạng tinh thể (012), (104), (110), (113), (024), (116), (018) và (214) của tinh thể Ga₂O₃, tương ứng (theo thẻ chuẩn JCPDS No. 04-002-2609) [27].

Trong khi đó, phổ tán xạ Raman (hình 4c) của mẫu thu được bao gồm các dao động phonon B_g², A_g², A_g³, A_{1g}¹, E_g² và A_g⁶ của tinh thể Ga₂O₃ tại vị trí 147cm⁻¹, 165cm⁻¹, 205cm⁻¹, 224cm⁻¹, 295cm⁻¹ và 422cm⁻¹, tương ứng [28]. Cường độ tần số dao động phonon lớn nhất tại vị trí 273cm⁻¹ thuộc dao động TO của tinh thể GaAs. Kết quả khảo sát bằng nhiễu xạ XRD và Raman cùng khẳng định vật liệu dây nano Ga₂O₃ tổng hợp được trên đế bằng phương pháp VLS có chất lượng tinh thể tốt, ít bị pha tạp, phù hợp đối với các nghiên cứu chế tạo vật liệu và linh kiện điện - điện tử nano trong tương lai.

4. KẾT LUẬN

Dây nano Ga₂O₃ trên đế GaAs (100) đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp hơi lỏng rắn (VLS) sử dụng xúc tác hạt nano Ag và biến tính nhiệt trong chân không (~10⁻³ Torr) Ảnh hưởng của nhiệt độ ủ (T₂) lên quá trình hình thành dây nano Ga₂O₃/GaAs đã được khảo sát, nghiên cứu. Dây nano hình thành thẳng đứng trên đế GaAs tuân theo cơ chế hơi lỏng rắn với hạt nano Ag trên đầu của mỗi dây. Phụ thuộc vào kích thước hạt Ag ban đầu, đường kính của dây nano Ag nhận được khoảng 35 - 45nm và phụ thuộc vào thời gian biến tính T₂ với chiều dài dây từ vài nm đến vài trăm μm. Dây nano hình thành có chất lượng tinh thể tốt, đảm bảo cho các nghiên cứu ứng dụng chế tạo linh kiện nano. Từ kết quả trên chúng tôi đề xuất một phương pháp hóa học đồng kết tủa để lắng đọng Ag lên đế nhằm thay thế các phương pháp vật lý vốn đòi hỏi thiết bị phức tạp và chi phí cao. Đây là một hướng tiếp cận mới giúp lựa chọn được phương pháp phù hợp để chế tạo vật liệu xúc tác ban đầu trong quá trình tổng hợp dây nano trên đế bằng phương pháp hơi lỏng rắn.

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về trang thiết bị của Phòng Thí nghiệm Công nghệ Nano Ứng dụng (LAN), Trường Đại học Duy Tân.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Bhushan B., Dresselhaus M., Lin Y.M., Rabin O., Black M., Dresselhaus G., *Nanowires*, in *Springer Handbook of Nanotechnology*. Springer Berlin Heidelberg. p. 99-146, 2004.
- [2]. Wagner R. S., Ellis W. C., "Vapor-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth," *Appl. Phys. Lett.*, 4(5), 89-90, 1964.
- [3]. Nguyen T. D., Kim E. T., Dao K. A., "Ag nanoparticle catalyst based on Ga₂O₃/GaAs semiconductor nanowire growth by VLS method," *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.*, 26(11), 8747-8752, 2015.
- [4]. Dayeh S. A., Susac D., Kavanagh K. L., Yu E. T., Wang D., "Structural and Room -Temperature Transport Properties of Zinc Blende and Wurtzite InAs Nanowires," *Adv. Funct. Mater.*, 19(13), 2102-2108, 2009.
- [5]. Zhang C., Miao X., Mohseni P.K., Choi W., Li X., "Site-Controlled VLS Growth of Planar Nanowires: Yield and Mechanism," *Nano Lett.*, 14(12), 6836-6841, 2014.
- [6]. Nguyen T. D., Kim E. T., Kim J. O., Lee S. J., Hoang V. V., Dao K. A., "Formation of GeO₂ complex composed nanostructures by the vapor liquid solid method," *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.*, 28(13), 9338-9343, 2017.
- [7]. Bharat Bhushan D. L., Scott R. Schricker, Wolfgang Sigmund, Stefan Zauscher, *Semiconducting nanowires & nanorods: synthesis, properties & applications, Handbook of nanotechnology*. New York: Springer, 2004.
- [8]. Badriyah A., Howard M., Saif I., *Ga₂O₃ Nanowire Synthesis and Device Applications*, in *Novel Nanomaterials*. Z.K. George and C.M. Athanasios, Editors, IntechOpen: Rijeka. p. Ch. 2, 2017.
- [9]. Zou X., Xie D., Sun Y., Wang C., "Nanowires mediated growth of β-Ga₂O₃ nanobelts for high-temperature (> 573K) solar-blind photodetectors," *Nano Res.*, 2022.
- [10]. Zhai H., Wu Z., Fang Z., "Recent progress of Ga₂O₃-based gas sensors," *Ceram. Int.*, 48(17), 24213-24233, 2022.
- [11]. Kumar N., Farva U., Patel M., Cha W.S., Lee J., Kim J., "n-Ga₂O₃/p-SnS heterojunction thin-films based transparent photovoltaic device," *J. Alloys Compd.*, 921, 166177, 2022.
- [12]. Tang X., Huang X., Huang Y., Gou Y., Pastore J., Yang Y., Xiong Y., Qian J., Brock J.D., Lu J., Xiao L., Abriña H.D., Zhuang L., "High-Performance Ga₂O₃ Anode for Lithium-Ion Batteries," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 10(6), 5519-5526, 2018.
- [13]. Akiyama T., Haneda Y., Nakamura K., Ito T., "Role of the Au/GaAs(111) interface on the wurtzite-structure formation during GaAs nanowire growth by a vapor-liquid-solid mechanism," *Phys. Rev. B*, 79(15), 153406, 2009.
- [14]. Dayeh S.A., Yu E.T., Wang D., "Surface Diffusion and Substrate - Nanowire Adatom Exchange in InAs Nanowire Growth," *Nano Letters*, 9(5), 1967-1972, 2009.
- [15]. Liu Z., Yamazaki T., Shen Y., Kikuta T., Nakatani N., Li Y., "O₂ and CO sensing of Ga₂O₃ multiple nanowire gas sensors," *Sens. Actuator B-Chem.*, 129(2), 666-670, 2008.

- [16]. Lam K. T., Wu Y. L., Chang S. J., "Photoelectrochemical Hydrogen Generation by Ga₂O₃ Nanowires," *Sci. Adv. Mater.*, 9(5), 810-815, 2017.
- [17]. Hu Y. L., Wang Z., Yuan R., Xu Z., Dai Y., Wang B., Fu Y., Ye M., Yang Y., Zou Z., Jiang C., "A hybrid GaN/Ga₂O₃ structure anchored on carbon cloth as a high-performance electrode of supercapacitors," *Dalton Trans.*, 51(44), 16945-16956, 2022.
- [18]. Yadav A., Fu B., Bonvicini S. N., Ly L. Q., Jia Z., Shi Y., "β-Ga₂O₃ Nanostructures: Chemical Vapor Deposition Growth Using Thermally Dewetted Au Nanoparticles as Catalyst and Characterization," *Nanomaterials*, 12(15), 2022.
- [19]. Sasaki K., Higashiwaki M., Kuramata A., Masui T., Yamakoshi S., "MBE grown Ga₂O₃ and its power device applications," *J. Cryst. Growth*, 378, 591-595, 2013.
- [20]. Park S. Y., Lee S. Y., Seo S. H., Noh D. Y., Kang H. C., "Self-Catalytic Growth of β-Ga₂O₃ Nanowires Deposited by Radio-Frequency Magnetron Sputtering," *Appl. Phys. Express*, 6(10), 105001, 2013.
- [21]. Schmidt V., Wittemann J. V., Senz S., Gösele U., "Silicon Nanowires: A Review on Aspects of their Growth and their Electrical Properties," *Adv. Mater.*, 21(25-26), 2681-2702, 2009.
- [22]. Phan A. Tuan, Nguyen T. Dai, Dao D. K., Dao K. A., Nguyen X. C., "Some results of the nanowires growth on gallium arsenic substrate by vls method: some theoretical aspects of the growth mechanisms and abnormal phenomena," *Proc. Natl. Conf. Theor. Phys.*, 36, 228-233, 2011.
- [23]. Lee K. H., Lee H. S., Lee J. Y., Kim T. W., Yoo K. H., Yoon Y. S., "Microstructural properties of Co thin films grown on p-GaAs (100) Substrates," *Mater. Res. Bull.*, 39(10), 1369-1374, 2004.
- [24]. Agasti N., Kaushik N. K., "One Pot Synthesis of Crystalline Silver Nanoparticles," *Am. J. Nanomater.*, 2(1), 4-7, 2014.
- [25]. Heyn C., Schnüll S., Jesson D. E., Hansen W., "Thermally controlled widening of droplet etched nanoholes," *Nanoscale Res. Lett.*, 9(1), 285, 2014.
- [26]. Fuster D., González Y., González L., "Fundamental role of arsenic flux in nanohole formation by Ga droplet etching on GaAs(001)," *Nanoscale Res. Lett.*, 9(1), 309, 2014.
- [27]. Sharma A., Varshney M., Saraswat H., Chaudhary S., Parkash J., Shin H. J., Chae K. H., Won S. O., "Nano-structured phases of gallium oxide (GaOOH, α-Ga₂O₃, β-Ga₂O₃, γ-Ga₂O₃, δ-Ga₂O₃, and ε-Ga₂O₃): fabrication, structural, and electronic structure investigations," *Int. Nano Lett.*, 10(1), 71-79, 2020.
- [28]. Osipov A. V., Sharofidinov S. S., Osipova E. V., Kandakov A. V., Ivanov A. Y., Kukushkin S. A., "Growth and Optical Properties of Ga₂O₃ Layers of Different Crystalline Modifications," *Coatings*, 12(12), 1802, 2022.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Van Manh¹, Tran Huu Toan², Dao Van Phong³,

Nguyen Duc Ba^{4,5}, Vu Thi Bich^{4,5}, Nguyen Tien Dai^{4,5}

¹Faculty of Chemical Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam

²Center for Post-Graduate Studies, Hanoi University of Industry, Vietnam

³College of Industrial Techniques, Bacgiang, Vietnam

⁴Institute of Theoretical and Applied Research, Duy Tan University, Vietnam

⁵Faculty of Basic Science, Duy Tan University, Vietnam