

CHẾ TẠO DÂY NANO TRÊN ĐỀ SI BẰNG PHƯƠNG PHÁP HOÁ HỌC ĐƠN GIẢN VỚI THỜI GIAN CHẾ TẠO RẤT NGẮN

FABRICATION OF Si NANOWIRES BY A SIMPLE CHEMICAL PROCESS WITH VERY SHORT FABRICATION TIME

Mai Thị Kiều Liên^{1*}

¹Trường Đại học Sư phạm - Đại học Đà Nẵng

*Tác giả liên hệ: mtklien@ued.udn.vn

(Nhận bài: 15/4/2021; Chấp nhận đăng: 05/7/2021)

Tóm tắt - Để sản xuất dây nano Si có năng suất cao ở quy mô lớn với chi phí thấp, giải pháp hợp lý là dùng các kỹ thuật dựa trên dung dịch. Trong nghiên cứu này, kỹ thuật dựa trên dung dịch được dùng để chế tạo dây nano Si trực tiếp trên đế Si (100) trong thời gian rất ngắn với các bước thí nghiệm đơn giản, sử dụng bạc là chất xúc tác và tiến hành ở nhiệt độ phòng, áp suất khí quyển. Các kết quả thực nghiệm cho thấy, độ dài và độ hấp thụ của dây nano Si tăng theo thời gian nhúng trong dung dịch ăn mòn hoá học. Tuy nhiên, thời gian ăn mòn không làm ảnh hưởng đến chất lượng của các dây nano Si. Phương pháp hoá học đơn giản này cũng được thử nghiệm trên đế Ge (100) nhưng không thành công. Đề chế tạo dây nano Ge cần dùng dung dịch ăn mòn hoá học khác hoặc thử nghiệm bằng phương pháp khác.

Từ khóa - Dây nano; Si; kỹ thuật khắc hoá học; ăn mòn hoá học

1. Giới thiệu

Các nghiên cứu về chế tạo và phát triển dây silic (Si) trải qua hơn 60 năm kể từ xuất bản lần đầu tiên về lĩnh vực này bởi Treuting và Arnold vào năm 1957 [1]. Tính đến nay đã có nhiều phương pháp được sử dụng như: Lắng đọng pha hơi hoá học (Chemical Vapor Deposition – CVD), nung trong môi trường phản ứng (Annealing in Reactive Atmosphere), bốc bay oxit silic (Evaporation of SiO), epitaxy chùm phân tử (Molecular Beam Epitaxy – MBE), cắt/bđốt bằng lade (Laser Ablation), các kỹ thuật dựa trên dung dịch (Solution-Based Techniques),...

Phương pháp CVD cho phép chế tạo dây Si với tốc độ phát triển dây biến thiên trong khoảng khá lớn (từ 10^{-2} đến 10^{+3} nm/phút), các tính chất của dây Si có thể điều chỉnh được dễ dàng, phụ thuộc vào nhiệt độ và tiền chất sử dụng [2-5]. Tuy nhiên, hai nhược điểm chính của phương pháp này là dây Si phải được chế tạo trong môi trường chân không rất cao để hạn chế sự oxy hoá Si khi tiếp xúc với oxy ở nhiệt độ cao và sự không điều khiển được hướng phát triển của dây Si.

Phương pháp nung trong môi trường phản ứng có ưu điểm nổi trội ở sự đơn giản về mặt kỹ thuật. Vì vậy, phương pháp này được sử dụng trong những nghiên cứu đầu tiên về sự phát triển của dây Si. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là phải được tiến hành trong môi trường nhiệt độ rất cao [6-8].

Một phương pháp hiệu quả, tiết kiệm chi phí để sản xuất dây nano Si ở quy mô lớn là bốc bay oxit đơn silic (SiO) [9].

Abstract - To produce high-yield Si nanowires at a large scale and low cost, a reasonable solution is to use solution-based techniques. In this study, a solution-based technique was used to fabricate Si nanowires directly on Si (100) substrates in a very short time with simple experimental steps, using silver as the catalyst and performed at room temperature, atmospheric pressure. The experimental results showed that, the length and absorbance of Si nanowires increased with dipping time in etchant solution. However, the etching time did not affect the quality of the Si nanowires. This simple chemical method was also tested on Ge (100) substrates but unsuccessful. Fabrication of Ge nanowires requires different etchant solution or other methods.

Key words - Nanowire; Si; metal assisted chemical etching; etchant solution

Với phương pháp này, hai kỹ thuật phát triển dây Si đã được đề xuất là có và không có chất xúc tác kim loại. Thông thường, nếu dùng chất xúc tác kim loại thì tốc độ phát triển dây sẽ nhanh hơn [10]. Điều quan trọng để tạo dây Si bằng phương pháp này là nhiệt độ lò nung phải trên 900°C [9] và tiến hành trong nhiều giờ để tạo được dây Si với chiều dài cỡ milimet và đường kính cỡ 5-100 nm [11-13].

Giống với phương pháp CVD, dây Si chế tạo bằng phương pháp MBE cũng cần phải tiến hành trong môi trường chân không rất cao. Ưu điểm chính của phương pháp MBE là khả năng điều khiển tuyệt vời về thông lượng chùm phân tử tới và định hướng dây Si phát triển được [14, 15]. Tuy nhiên, phương pháp này bị hạn chế bởi đường kính dây nano Si. Chỉ những dây có đường kính > 40 nm mới chế tạo được [15, 16]. Mặt khác, tốc độ phát triển dây Si cũng rất chậm (vài nm/phút) nên thời gian chế tạo khá lâu [16].

Phương pháp cắt/ đốt bằng lade có thể chế tạo dây nano Si vô cùng mỏng với tỉ lệ định hướng cao, không cần đế, tốc độ phát triển dây Si rất nhanh và là phương pháp khá đơn giản (chỉ cần một bước) [17-21]. Tuy nhiên, nhiệt độ chế tạo khá cao và chi phí dùng tia lade khá đắt. Đây là hai nhược điểm của phương pháp này.

Đối với các kỹ thuật dựa trên dung dịch, dây nano Si có thể được tạo ra với năng suất cao và được xem là phương pháp chế tạo dây Si hiệu quả nhất về mặt chi phí vì không cần đến các thiết bị giá cao, có thể chế tạo ở nhiệt độ phòng và áp suất khí quyển. Chiều dài, đường kính và tính chất

¹ The University of Danang - University of Science and Education (Mai Thi Kieu Lien)

của dây Si phụ thuộc vào loại dung dịch và chất xúc tác sử dụng [22-26].

So sánh các phương pháp nêu trên, mỗi phương pháp có ưu và nhược điểm riêng. Để sản xuất dây nano Si có năng suất cao ở quy mô lớn với chi phí thấp, giải pháp hợp lý là dùng các kỹ thuật dựa trên dung dịch. Trong nghiên cứu này, tác giả dùng kỹ thuật dựa trên dung dịch để chế tạo dây nano Si trực tiếp trên đế Si trong thời gian rất ngắn với các bước thí nghiệm đơn giản, sử dụng bạc (Ag) là chất xúc tác và tiến hành ở nhiệt độ phòng. Kỹ thuật này còn được gọi là kỹ thuật ăn mòn (khắc) hoá học với sự trợ giúp của kim loại (metal assisted chemical etching – MACE) [27-33]. Sau đó, sử dụng kỹ thuật này thử nghiệm trên một đế bán dẫn khác là gecmani (Ge) để kiểm nghiệm tính hiệu quả của kỹ thuật này.

2. Thực nghiệm

2.1. Chế tạo dây nano Si trực tiếp trên đế Si (100) bằng phương pháp MACE

Đế Si (100) pha tạp loại P với điện trở suất $\rho = 1-5 \Omega.m$ sau khi cắt thành nhiều mảnh nhỏ được rửa sạch theo quy trình bốn bước gồm: axeton, nước ion hoá, dung dịch HF 5% và nước ion hoá. Sau đó, dây Si sẽ được tạo trực tiếp trên các đế Si đã được rửa sạch này bằng phương pháp MACE gồm các bước như sau (minh hoạ trong Hình 1).

- Đế Si được nhúng vào hỗn hợp dung dịch $H_2O:HF$ 46% : $AgNO_3$ (40 ml:10 ml:0,12 g) để phủ một lớp Ag trên bề mặt nó.

- Đế Si sau khi đã được phủ Ag được nhúng vào dung dịch ăn mòn hoá học. Đó là hỗn hợp dung dịch HF 46% : H_2O_2 30% : H_2O (20 ml:1,4 ml:80 ml). Thời gian ăn mòn thay đổi từ 1 đến 5 phút.

- Rửa đế Si sau khi ăn mòn hoá học với nước khử ion 3 lần.

- Nhúng đế Si vào dung dịch HNO_3 70% trong 10 phút để loại bỏ lớp Ag trên bề mặt của nó.

- Đế Si được nhúng vào dung dịch HF 5% trong 1 phút để loại bỏ lớp oxit do bước trước đó tạo ra.

- Rửa sạch đế Si với nước khử ion 3 lần.

Lưu ý rằng, tất cả các bước của quá trình MACE đều được tiến hành ở nhiệt độ phòng và áp suất khí quyển. Kết quả của quá trình này là dây nano Si được tạo thành.

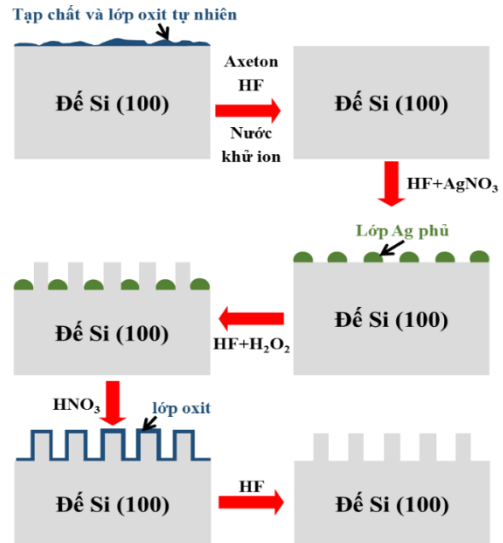
2.2. Thử nghiệm phương pháp MACE trên đế Ge (100)

Sau khi chế tạo thành công dây nano Si trong thời gian rất ngắn bằng phương pháp MACE với các bước và hoá chất đơn giản, quy trình trên được thử nghiệm với một đế bán dẫn khác là Ge (100). Các bước thí nghiệm giống hệt Mục 2.1 nhưng thay đế Si (100) bằng đế Ge (100).

2.3. Các phương pháp khảo sát dây Si và Ge

Hình thái bề mặt và cắt ngang, cũng như chiều dài của các dây nano được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM; JEOL JSM-7001-FA) với điện áp tăng tốc là 20 kV. Tính chất kết tinh của các dây nano Si được đo bằng máy nhiễu xạ tia X (Bruker Discover D8) sử dụng bức xạ $Cu K\alpha$ và máy đo phổ Raman (Tokyo Instruments Nanofinder) sử dụng chùm laser ion Ar^+ với bước sóng kích thích là 488 nm. Để khảo sát các tính chất quang, máy đo phổ JASCO Ubest V-570 dùng đèn halogen được sử dụng để đo

độ truyền qua T và độ phản xạ R của các dây Si. Từ đó, độ hấp thụ A được tính bằng công thức $A = I - R - T$.



Hình 1. Hình ảnh cắt ngang minh họa quá trình chế tạo dây nano Si trên đế Si (100) bằng phương pháp MACE

3. Kết quả và thảo luận

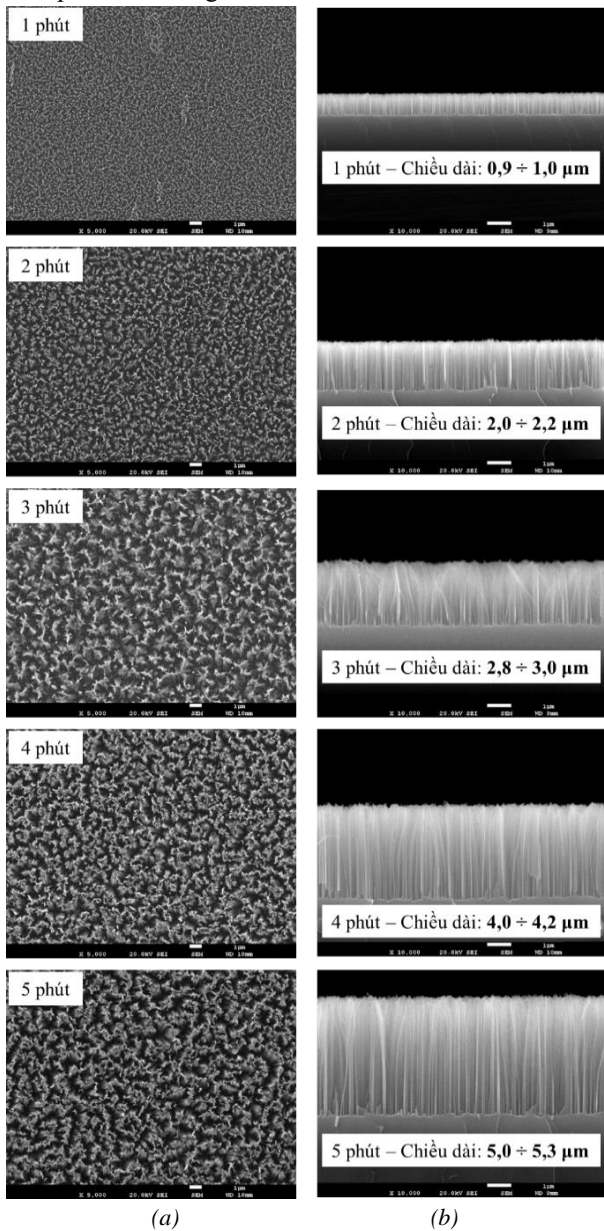
3.1. Dây Si trên đế Si (100)

Hình 2 cho thấy, hình ảnh SEM được chụp từ trên xuống và chụp cắt ngang của các dây Si chế tạo trực tiếp trên đế Si (100) với thời gian ăn mòn hoá học rất ngắn, thay đổi từ 1 đến 5 phút. Chiều dài của dây Si tỉ lệ thuận với thời gian ăn mòn trong khi đường kính của chúng thì dao động từ 50÷100 nm. Đường kính của dây Si chịu ảnh hưởng trực tiếp từ kích thước của các hạt Ag trong lớp Ag được phủ. Ứng với thời gian ăn mòn ≥ 3 phút, hiện tượng kết bó xuất hiện do chiều dài của dây lớn hơn nhiều (hơn 25 lần) so với đường kính của chúng. Các kết quả thu được từ hình ảnh SEM cho thấy, dây nano Si đã được chế tạo thành công bằng phương pháp MACE đơn giản.

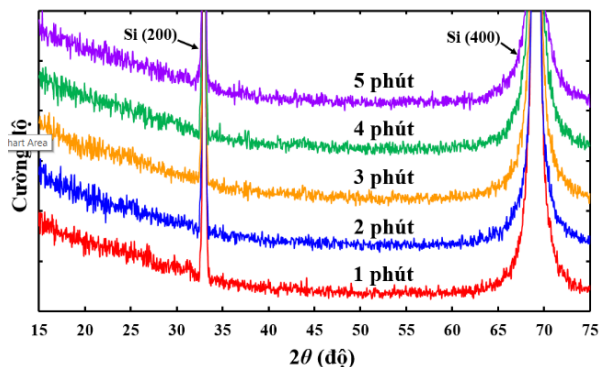
Hình 3 và 4 lần lượt là hình ảnh nhiễu xạ tia X và phổ Raman của các dây Si chế tạo trực tiếp trên đế Si (100) với thời gian ăn mòn hoá học thay đổi từ 1 đến 5 phút. Các kết quả cho thấy, các dây Si chế tạo được ở dạng kết tinh và có định hướng giống với đế Si (100). Thời gian ăn mòn không làm ảnh hưởng đến chất lượng kết tinh cũng như sự định hướng của các dây nano Si.

Kết quả đo các phổ quang học, bao gồm: (a) Độ truyền qua T ; (b) Độ phản xạ R ; (c) Độ hấp thụ A của các dây Si chế tạo trực tiếp trên đế Si (100) với thời gian ăn mòn hoá học thay đổi từ 1 đến 5 phút được thể hiện trong Hình 5. Từ Hình 5(a) ta thấy, trong vùng bước sóng dài hơn 1100 nm khi năng lượng chùm photon tới nhỏ hơn hoặc gần với vùng cấm của Si, chùm photon tới có thể dễ dàng xuyên qua các dây Si. Kết quả là độ truyền qua trong vùng này khá cao. Ngược lại, khi năng lượng chùm tia tới trong vùng bước sóng ngắn hơn có thể so sánh được với vùng cấm của Si. Lúc này sự tán xạ chùm tia tới trở nên chiếm ưu thế, và kéo dài quang lộ của chùm tia tới. Kết quả là chùm tia tới bị giam hãm làm T bị giảm đi đáng kể [34, 35]. Từ các Hình 5(b) và 5(c), ta có thể thấy, sự thay đổi về R là nguyên nhân chính làm thay đổi A của chùm photon tới trên các dây Si. R và A lần lượt giảm và

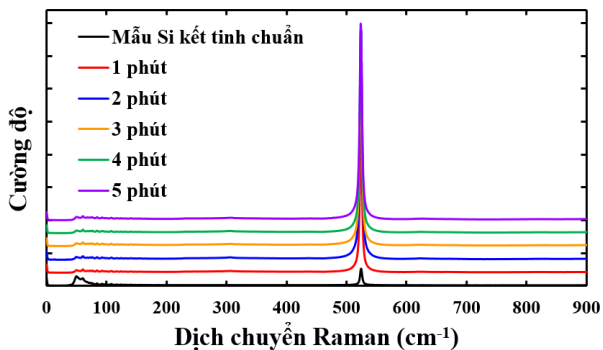
tăng khi tăng thời gian ăn mòn của các dây Si. Điều này là để hiểu vì dây Si càng dài thì khả năng giam hãm, làm tán xạ chùm photon tới càng cao.



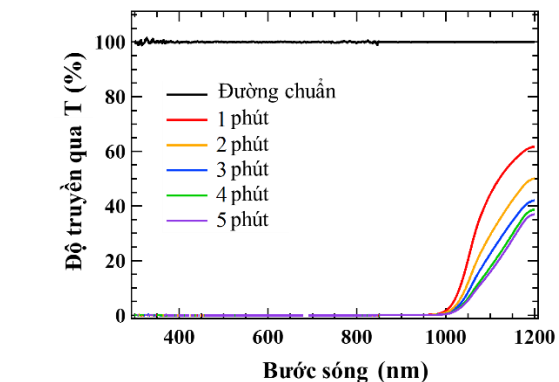
Hình 2. Hình ảnh SEM được chụp (a) từ trên xuống và (b) cắt ngang của các dây Si chế tạo trực tiếp trên đế Si (100) với thời gian ăn mòn hoá học thay đổi từ 1 đến 5 phút



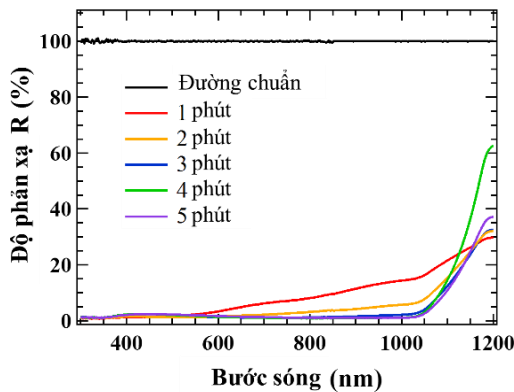
Hình 3. Hình ảnh nhiễu xạ tia X của các dây Si chế tạo trực tiếp trên đế Si (100) với thời gian ăn mòn hoá học thay đổi từ 1 đến 5 phút



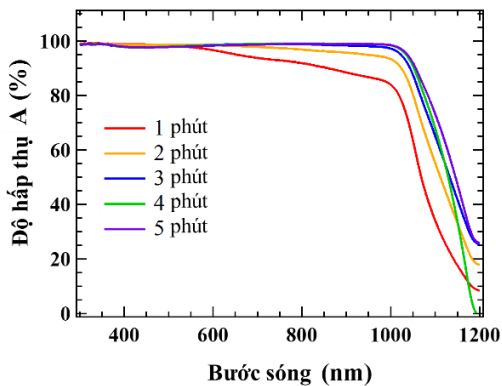
Hình 4. Phổ Raman của các dây Si chế tạo trực tiếp trên đế Si (100) với thời gian ăn mòn hoá học thay đổi từ 1 đến 5 phút



(a)



b)



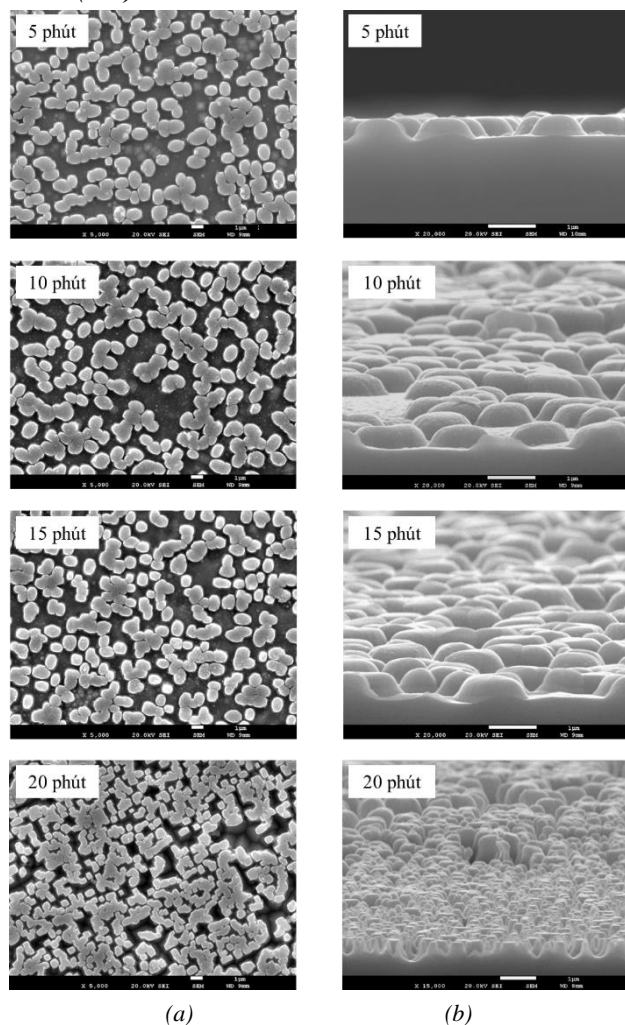
c)

Hình 5. Các phổ (a) truyền qua, (b) phản xạ, và (c) hấp thụ của các dây Si chế tạo trực tiếp trên đế Si (100) với thời gian ăn mòn hoá học thay đổi từ 1 đến 5 phút

Các kết quả trên cho thấy, dây nano Si trong nghiên cứu này có tính ưu việt hơn so với các nghiên cứu đã công bố

[36, 37] về mặt thời gian chế tạo nhưng vẫn đảm bảo được chất lượng kết tinh và tính chất quang học nhằm ứng dụng trong chế tạo pin mặt trời, thiết bị quang điện tử,... Điều này là do hỗn hợp dung dịch phủ lớp Ag và dung dịch ăn mòn hoá học sử dụng trong nghiên cứu này có sự khác biệt đáng kể về nồng độ, thành phần so với các nghiên cứu trước. Kết quả này cũng mở ra tiềm năng chế tạo dây nano Si trên quy mô rộng lớn.

3.2. Kết quả thử nghiệm phương pháp MACE trên đế Ge (100)



Hình 6. Hình ảnh SEM được chụp (a) từ trên xuống và (b) cắt ngang của các đế Ge (100) khi thử nghiệm PP MACE với thời gian ăn mòn hoá học thay đổi từ 5 đến 20 phút

Hình 6 cho thấy, hình ảnh SEM được chụp từ trên xuống và chụp cắt ngang của các đế Ge (100) khi thử nghiệm phương pháp MACE với thời gian ăn mòn hoá học thay đổi từ 5 đến 20 phút. Mặc dù, thời gian ăn mòn khác nhau khá lớn nhưng sự khác biệt về hình thái học trên bề mặt đế Ge không nhiều và dây nano Ge không được tạo thành. Điều này chứng tỏ phương pháp MACE đã áp dụng trên đế Si không áp dụng được với đế Ge để tạo ra dây nano Ge. Nguyên nhân chủ yếu là do Ge phản ứng rất chậm với axit HF. Thông thường, vùng đế bên dưới Ag được ăn mòn đi nhanh hơn nhiều so với vùng không được bao phủ Ag, điển hình như trong trường hợp đế Si. Kết quả là, Ag chìm dần vào bề mặt Si, tạo ra các lỗ xốp hay các dây trên bề mặt

đế Si. Trong trường hợp đế Ge, do phản ứng với HF trong dung dịch ăn mòn hoá học rất chậm nên hình thái học bề mặt đế Ge thay đổi không nhiều mặc dù thời gian ăn mòn lên đến 20 phút so với thời gian ăn mòn 5 phút. Để áp dụng phương pháp MACE trên đế Ge, dung dịch ăn mòn hoá học cần thay đổi thành phần axit (ví dụ sử dụng HCl hoặc HNO₃ thay cho HF). Tuy nhiên, quy trình thực nghiệm cần nhiều bước thử nghiệm và tác giả sẽ tiến hành trong các nghiên cứu tiếp theo.

4. Kết luận

Dây nano Si được chế tạo thành công trực tiếp trên đế Si (100) bằng phương pháp hoá học đơn giản ở nhiệt độ phòng và áp suất khí quyển. Các kết quả thực nghiệm cho thấy, độ dài và độ hấp thụ của dây nano Si tăng theo thời gian nhúng trong dd etchant. Tuy nhiên, thời gian khắc không làm ảnh hưởng đến chất lượng của các dây nano Si. PP MACE cũng được thử nghiệm trên đế Ge (100) nhưng không thành công. Để chế tạo dây nano Ge cần dùng dd etchant khác hoặc thử nghiệm bằng PP khác.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2019-DN03-34.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. G. Treuting, S. M. Arnold, "Orientation habits of metal whiskers", *Acta Metallurgica*, 5(10), Elsevier, 1957, 1 (598-598).
- [2] V. A. Nebol'sin, A. A. Shchetinin, A. A. Dolgachev, V. V. Korneeva, "Effect of the Nature of the Metal Solvent on the Vapor-Liquid-Solid Growth Rate of Silicon Whiskers", *Inorganic Materials*, 41, Springer, 2005, 4 (1256-1259).
- [3] S. Kodambaka, J. Tersoff, M. C. Reuter, F. M. Ross, "Diameter-Independent Kinetics in the Vapor-Liquid-Solid Growth of Si Nanowires", *Physical Review Letters*, 96(096105), The American Physical Society, 2006, 4 (1-4).
- [4] L. D. Toan, E. Moyen, M. R. Zamfir, J. Joe, Y. W. Kim, and D. Pribat, "Si nanowires grown by Al-catalyzed plasma-enhanced chemical vapor deposition: synthesis conditions, electrical properties and application to lithium battery anodes", *Material Research Express*, 3, IOPscience, 2016, 10 (015003-1-015003-10).
- [5] R. A. Puglisi, C. Bongiorno, S. Caccamo, E. Fazio, G. Mannino, F. Neri, S. Scalesi, D. Spucches, and A. L. Magna, "Chemical Vapor Deposition Growth of Silicon Nanowires with Diameter Smaller Than 5 nm", *ACS Omega*, 4, ACS Publications, 2019, 5 (17967-17971).
- [6] E. S. Greiner, J. A. Gutowski, W. C. Ellis, "Preparation of Silicon Ribbons", *Journal of Applied Physics*, 32(11), American Institute of Physics, 1961, 2 (2489-2490).
- [7] R. S. Wagner, W. C. Ellis, K. A. Jackson, S. M. Arnold, "Study of the Filamentary Growth of Silicon Crystals from the Vapor", *Journal of Applied Physics*, 35(10), American Institute of Physics, 1964, 8 (2993-3000).
- [8] Z. Yuan, C. Wang, K. Chen, Z. Ni, and Y. Chen, "Amorphous Silicon Nanowires Grown on Silicon Oxide Film by Annealing", *Nanoscale Research Letters*, 12(487), SpringerOpen, 2017, 8 (1-8).
- [9] Z. W. Pan, Z. R. Dai, L. Xu, S. T. Lee, Z. L. Wang, "Temperature-Controlled Growth of Silicon-Based Nanostructures by Thermal Evaporation of SiO₂ Powders", *The Journal of Physical Chemistry B*, 105(13), ACS Publications, 2001, 8 (2507-2514).
- [10] Q. Gu, H. Dang, J. Cao, J. Zhao, S. Fan, "Silicon nanowires grown on iron-patterned silicon substrates", *Applied Physics Letters*, 76(21), American Institute of Physics, 2000, 2 (3020-3021).
- [11] W. S. Shi, H. Y. Peng, Y. F. Zheng, N. Wang, N. G. Shang, Z. W. Pan, C. S. Lee, S. T. Lee, "Synthesis of Large Areas of Highly Oriented, Very Long Silicon Nanowires", *Advanced Materials*, 12(18), Wiley Online Library, 2000, 3 (1343-1245).

- [12] Y. F. Zhang, Y. H. Tang, C. Lam, N. Wang, C. S. Lee, I. Bello, S. T. Lee, "Bulk-quantity Si nanowires synthesized by SiO sublimation", *Journal of Crystal Growth*, 212(1-2), Elsevier, 2000, 4 (115-118).
- [13] Y. Shi, Q. Hu, H. Araki, H. Suzuki, H. Gao, W. Yang, T. Noda, "Long Si nanowires with millimeter-scale length by modified thermal evaporation from Si powder", *Applied Physics A*, 80, Springer, 2005, 4 (1733-1736).
- [14] P. Das Kanungo, N. Zakharov, J. Bauer, O. Breitenstein, P. Werner, U. Goesele, "Controlled in situ boron doping of short silicon nanowires grown by molecular beam epitaxy", *Applied Physics Letters*, 92(26), American Institute of Physics, 2008, 3 (263107-1 – 267107-3).
- [15] N. D. Zakharov, P. Werner, G. Gerth, L. Schubert, L. Sokolov, U. Goesele, "Growth phenomena of Si and Si/Ge nanowires on Si (111) by molecular beam epitaxy", *Journal of Crystal Growth*, 290(1), Elsevier, 2006, 5 (6-10).
- [16] P. Werner, N. D. Zakharov, G. Gerth, L. Schubert, U. Goesele, "On the formation of Si nanowires by molecular beam epitaxy", *International Journal of Materials Research*, 97(7), ScienceOpen, 2006, 8 (1008-1015).
- [17] Y. F. Zhang, Y. F. Tang, N. Wang, C. S. Lee, I. Bello, S. T. Lee, "Silicon nanowires prepared by laser ablation at high temperature", *Applied Physics Letters*, 72(15), American Institute of Physics, 1998, 3 (1835-1837).
- [18] L. Schubert, P. Werner, N. D. Zakharov, G. Gerth, F. M. Kolb, L. Long, U. Goesele, T. Y. Tan, "Silicon nanowires grown on (111) Si substrates by molecular-beam epitaxy", *Applied Physics Letters*, 84(24), American Institute of Physics, 2004, 3 (4968-4970).
- [19] N. Saddiqi, H. Javed, M. Islam, Dr. K. M. Ghauri, "A Review on Synthesis of Silicon Nanowires by Laser Ablation", *Chemistry and Materials Research*, 6(1), IISTE, 2014, 11 (76-86).
- [20] S. V. Zaboltnov et. al., "Nanoparticles Produced via Laser Ablation of Porous Silicon and Silicon Nanowires for Optical Bioimaging", *Sensors*, 20(4874), MDPI, 2020, 16 (1-16).
- [21] S. V. Zaboltnov et. al., "Pulsed Laser Ablation of Silicon Nanowires in Water and Ethanol", *Solid State Phenomena*, 312, Trans Tech Publications Ltd., 2020, 6 (200-205).
- [22] J. D. Holmes, K. P. Johnston, R. C. Doty, B. A. Korgel, "Control of thickness and orientation of solution-grown silicon nanowires", *Science*, 287(5457), ScienceMag, 2000, 3 (1471-1473).
- [23] X. M. Lu, T. Hanrath, K. P. Johnston, B. A. Korgel, "Growth of Single Crystal Silicon Nanowires in Supercritical Solution from Tethered Gold Particles on a Silicon Substrate", *Nano Letters*, 3(1), ACS Publications, 2003, 7 (93-99).
- [24] T. Hanrath, B. A. Korgel, "Supercritical Fluid-Liquid-Solid (SFLS) Synthesis of Si and Ge Nanowires Seeded by Colloidal Metal Nanocrystals", *Advanced Materials*, 15(5), Wiley Online Library, 2003, 5 (437-440).
- [25] Y.-H. Yang, S.-J. Wu, H. S. Chiu, P.-I. Lin, Y.-T. Chen, "Catalytic Growth of Silicon Nanowires Assisted by Laser Ablation", *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(3), ACS Publications, 2004, 7 (846-852).
- [26] H. Y. Tuan, A. Ghezalbash, B. A. Korgel, "Silicon Nanowires and Silica Nanotubes Seeded by Copper Nanoparticles in an Organic Solvent", *Chemistry of Materials*, 20(6), ACS Publications, 2008, 8 (2306-2313).
- [27] Y. Liu, G. Ji, J. Wang, X. Liang, Z. Zuo., and Y. Shi, "Fabrication and photocatalytic properties of silicon nanowires by metal-assisted chemical etching: effect of H₂O₂ concentration", *Nanoscale Research Letters*, 7(663), Springer, 2012, 9 (1-9).
- [28] T. Shimizu et. al., "Fabrication of nanocone arrays by two step metal assisted chemical etching method", *Microelectronic Engineering*, 153, Elsevier, 2016, 5 (55-59).
- [29] S. Kato, T. Yamazaki, Y. Kurokawa, S. Miyajima, and M. Konagai, "Influence of Fabrication Processes and Annealing Treatment on the Minority Carrier Lifetime of Silicon Nanowire Films", *Nanoscale Research Letters*, 12(242), SpringerOpen, 2017, 7 (1-7).
- [30] I. Leontis, M. A. Botzakaki, S. N. Georga, and A. G. Nassiopoulou, "Study of Si Nanowires Produced by Metal-Assisted Chemical Etching as a Light-Trapping Material in n-type c-Si Solar Cells", *ACS Omega*, 3, ACS Publications, 2018, 9 (10898-10906).
- [31] Y. Jeong, C. Hong, Y. H. Jung, R. Akter, H. Yoon, and I. Yoon, "Enhanced Surface Properties of Light-Trapping Si Nanowires Using Synergetic Effects of Metal-Assisted and Anisotropic Chemical Etchings", *Scientific Reports*, 9(15914), NatureResearch, 2019, 9 (1-9).
- [32] F. J. Wendisch, M. Rey, N. Vogel, and G. R. Bourret, "Large-Scale Synthesis of Highly Uniform Silicon Nanowire Arrays Using Metal-Assisted Chemical Etching", *Chemistry of Materials*, 32, ACS Publications, 2020, 10 (9425-9434).
- [33] A. A. Leonardi, M. J. L. Faro, and A. Irrera, "Silicon Nanowires Synthesis by Metal-Assisted Chemical Etching: A Review", *Nanomaterials*, 11(383), MDPI, 2021, 24 (1-24).
- [34] S. Pillai, K.R. Catchpole, T. Trupke, M.A. Green, "Surface plasmon enhanced silicon solar cells", *Journal of Applied Physics*, 101(9), American Institute of Physics, 2007, 8 (093105-1 – 09135-8).
- [35] J. Li, H. Yu, S.M. Wong, G. Zhang, X. Sun, P.G.Q. Lo, D.L. Kwong, "Si nanopillar array optimization on Si thin films for solar energy harvesting", *Applied Physics Letters*, 95(3), American Institute of Physics, 2009, 3 (033102-1 – 033102-3).
- [36] L. T. Q. Ngan, *Chế tạo, nghiên cứu tính chất quang và định hướng ứng dụng trong tán xạ Raman tăng cường bề mặt của các hệ dây nano silic xếp thẳng hàng*, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2016.
- [37] A.M.S. Salem, F. A. Hazzaz, S.M. El-Sheikh, S. I. Shah, "Novel Si nanostructures via Ag-assisted chemical etching route on single and polycrystalline substrates", *Materials Science & Engineering B*, 262(114793), Elsevier, 2020, 9 (1-9).