

Tổng hợp và đặc trưng tính chất điện của tiếp giáp dị thể graphene-MoS₂-graphene

Nguyễn Thị Huyền¹, Trần Văn Hậu¹, Mai Thị Phương¹, Phạm Văn Trinh¹, Bùi Hùng Thắng¹, Nguyễn Văn Chúc^{1*}, Phạm Văn Nhất², Phùng Việt Tiệp³, Vũ Đình Lâm⁴, Phan Ngọc Minh⁴, Ji-Yong Park⁵, Nguyễn Văn Tú^{1*}

¹Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

³Viện Vật lý, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

⁴Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

⁵Trường Đại học Ajou, 206 Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi, Hàn Quốc

Ngày nhận bài 11/1/2023; ngày chuyển phân biện 13/1/2023; ngày nhận phân biện 6/2/2023; ngày chấp nhận đăng 10/2/2023

Tóm tắt:

Với các đặc tính điện và quang nổi trội, vật liệu MoS₂ trở thành một trong những vật liệu tiềm năng cho các ứng dụng logic và photodetector. Tuy nhiên, sự hình thành các tiếp xúc Schottky giữa kim loại và MoS₂ sẽ giới hạn hiệu suất của thiết bị. Gần đây, nhiều nỗ lực đã được thực hiện để giải quyết thách thức này bằng việc sử dụng các điện cực kim loại có công thoát thấp, ủ ở nhiệt độ cao hay kỹ thuật chuyển pha. Graphene được biết đến như một điện cực lý tưởng cho các linh kiện điện tử thể hệ mới do tính dẫn điện ưu việt của nó cũng như có thể dễ dàng thay đổi mức Fermi. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã chế tạo thành công tiếp giáp dị thể graphene-MoS₂ bằng phương pháp lắng đọng hóa học pha hơi (CVD) ở áp suất khí quyển, trong đó, cạnh của khuôn mẫu graphene được sử dụng như các vị trí mầm cho quá trình mọc MoS₂. Sự hình thành của tiếp giáp dị thể được khẳng định thông qua phép đo ảnh quang học và lực nguyên tử. Phổ tán xạ Raman và Raman mapping được sử dụng để đánh giá chất lượng và sự đồng đều của tiếp giáp dị thể. Linh kiện được chế tạo trên tiếp giáp dị thể graphene-MoS₂ thể hiện đặc tính truyền dẫn như bán dẫn loại n, vật liệu MoS₂ đóng vai trò là kênh dẫn trong khi graphene đóng vai trò như điện cực. Thêm vào đó, đặc tính đầu ra chỉ ra rằng có sự hình thành tiếp xúc omic giữa graphene và MoS₂.

Từ khóa: graphene, lắng đọng pha hơi hoá học, MoS₂, tiếp giáp dị thể.

Chỉ số phân loại: 1.3, 1.4, 2.5

Synthesis and electrical characteristics of graphene-MoS₂-graphene lateral heterostructure

Thi Huyen Nguyen¹, Van Hau Tran¹, Thi Phuong Mai¹, Van Trinh Pham¹, Hung Thang Bui¹, Van Chuc Nguyen^{1*}, Van Nhat Pham², Viet Tiep Phung³, Dinh Lam Vu⁴, Ngọc Minh Phan⁴, Ji-Yong Park⁵, Van Tu Nguyen^{1*}

¹Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

²University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

³Institute of Physics, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

⁴Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

⁵Ajou University, 206 Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Korea

Received 11 January 2023; revised 6 February 2023; accepted 10 February 2023

Abstract:

With outstanding electronic and optical properties, molybdenum disulfide (MoS₂) has become one of the potential materials for logic applications and photodetector. However, Schottky barrier formation based on metal-MoS₂ contacts has limited device performance. Recently, many attempts have been devoted to addressing this challenge by using low-work function metal electrodes, high-temperature annealing, or phase engineering. Graphene is known as an ideal electrode for the interconnections and wiring of next-generation devices due to its superior electrical conductivity and ease of tuning its Fermi level. In this study, we successfully fabricated graphene-MoS₂ lateral heterostructure by the chemical vapour deposition (CVD) technique under atmospheric pressure, in which, the edges of the graphene template served as nucleation sites for the growth of MoS₂. The morphology of the heterojunction was confirmed by optical microscopy and atomic force microscopy. Raman and Raman mapping were used to estimate the quality and uniformity of the heterojunction. The device fabricated on the graphene-MoS₂ heterojunction exhibits n-type semiconductor transport characteristics, with MoS₂ serving as the conducting channel while graphene acts as the electrode. Additionally, the output characterisation showed that there is a formation of an ohmic contact between graphene and MoS₂.

Keywords: chemical vapour deposition, graphene, heterostructure, MoS₂.

Classification numbers: 1.3, 1.4, 2.5

*Tác giả liên hệ: Email: chucnv@ims.vast.vn; tunv@ims.vast.vn

1. Đặt vấn đề

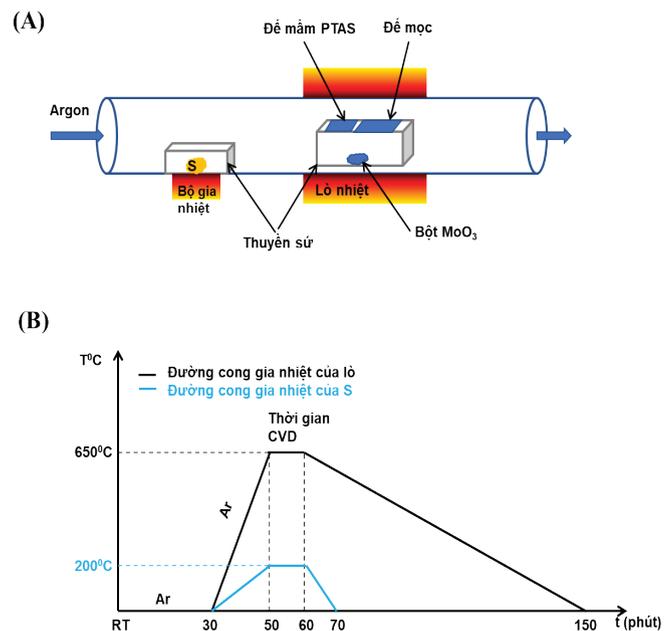
Vật liệu molybden sun phua (MoS_2), một thành viên của họ vật liệu được hình thành từ kim loại chuyển tiếp (Mo, W,...) và chalcogen (S, Se, Te...) đã và đang thu hút sự quan tâm nghiên cứu của các nhà khoa học vì các tính chất quang học và điện tử có thể điều chỉnh được. Những đặc tính này làm cho nó trở thành vật liệu tiềm năng cho bóng bán dẫn hiệu ứng trường (FET), linh kiện quang điện tử. Tuy nhiên, việc hình thành rào cản Schottky dựa trên các tiếp điểm kim loại- MoS_2 đã hạn chế hiệu suất của thiết bị [1-3]. Gần đây, nhiều nghiên cứu đã khắc phục những hạn chế trên bằng cách sử dụng các điện cực kim loại có công thoát thấp, ở nhiệt độ cao hoặc kỹ thuật thay đổi pha [4-6]. Tuy nhiên, các cách tiếp cận này vẫn tồn tại một số mặt hạn chế. Những năm gần đây, graphene (Gr), tinh thể hai chiều được nghiên cứu rộng rãi đầu tiên, là một bán kim loại với độ linh động cao và mức Fermi có thể điều chỉnh dễ dàng. Các đặc tính này khiến nó trở thành một vật liệu lý tưởng và tiềm năng cho các kết nối và dây dẫn của các thiết bị thế hệ tiếp theo [7-10]. Một vài nhóm nghiên cứu đã sử dụng graphene như một tiếp xúc điện với linh kiện MoS_2 vì nó có khả năng làm tăng sự bơm điện tử vào vùng dẫn của MoS_2 thông qua độ cao của hàng rào Schottky thấp hơn [11-15]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này thường sử dụng phương pháp chuyển màng để hình thành các cấu trúc dị thể. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tổng hợp cấu trúc dị thể graphene- MoS_2 -graphene trên một diện tích lớn (vài mm^2 đến cm^2) bằng kỹ thuật CVD nhiệt. Hình thái học bề mặt của cấu trúc dị thể đã được xác nhận bằng kính hiển vi quang học (OM) và kính hiển vi lực nguyên tử (AFM). Phổ tán xạ Raman và Raman mapping được sử dụng để ước tính chất lượng và tính đồng nhất của chuyển tiếp dị thể. Linh kiện được chế tạo dựa trên tiếp giáp graphene- MoS_2 -graphene thể hiện đặc tính của bán dẫn loại n. Đặc tính đầu ra của linh kiện thể hiện sự hình thành tiếp xúc Omic giữa graphene và lớp MoS_2 .

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Chuẩn bị khuôn hình graphene

Đầu tiên, màng graphene được tổng hợp trên lá đồng (25 μm , 99,8%, Alfa Aesar) bằng phương pháp CVD áp suất thấp ở nhiệt độ 1000°C trong 20 phút sử dụng hỗn hợp khí hydro và metan. Sau khi tổng hợp, mẫu graphene được bao phủ bởi màng poly(methyl methacrylate) (PMMA, A8) và theo sau là quá trình ăn mòn để đồng trong dung dịch muối $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$. Sau khi quá trình ăn mòn xảy ra hoàn toàn, màng PMMA/graphene được rửa bằng nước khử ion (DI) vài lần để loại bỏ hết dung dịch ăn mòn còn dư thừa. Tiếp theo, màng PMMA/graphene được chuyển lên đế SiO_2/Si . Mẫu được để khô tự nhiên trong 10 giờ. Tiếp đến, mẫu được ủ ở nhiệt độ 180°C trong 2 phút và PMMA được loại bỏ bằng cách nhúng mẫu vào axeton trong 24 giờ ở nhiệt độ phòng. Cuối cùng, các khuôn hình graphene được chế tạo bằng kỹ thuật quang khắc và quá trình ăn mòn khô (RIE).

Tổng hợp cấu trúc dị thể graphene- MoS_2 -graphene bằng phương pháp CVD: Các tấm và màng MoS_2 được tổng hợp trên đế chứa các khuôn hình graphene sử dụng phương pháp CVD ở áp suất khí quyển với molybden trioxide (MoO_3) (99,95%, Sigma-Aldrich) và bột lưu huỳnh (S) (99,98%, Sigma-Aldrich) làm tiền chất, và muối của kali và axit 3,4,9,10-tetracarboxylic (PTAS) như là chất tạo mầm. Sơ đồ của quá trình thiết lập thí nghiệm được chỉ ra như trong hình 1A. Đế mầm và đế mọc chứa khuôn hình graphene được đặt cạnh nhau và đặt úp hướng vào vị trí của bột MoO_3 với sự trợ giúp của thuyền gốm. Thuyền chứa bột S được đặt ở phía trước và nhiệt độ của nó được điều khiển bởi bộ gia nhiệt. Trước khi mọc, hệ CVD được thổi khí Ar với lưu lượng 500 sccm ($\text{cm}^3/\text{phút}$) trong 30 phút để làm sạch ống lò. Tiếp theo, lò nhiệt và bộ gia nhiệt được nâng lên 650 và 200°C với tốc độ lên nhiệt tương ứng 32°C/phút và 10°C/phút. Sau 10 phút mọc, lò được tắt và hạ nhiệt độ về nhiệt độ phòng. Sơ đồ quá trình gia nhiệt được chỉ ra trong hình 1B.



Hình 1. (A) Sơ đồ của cài đặt bằng phương pháp lắng đọng hóa học pha hơi, (B) quy trình tổng hợp MoS_2 .

2.2. Chế tạo linh kiện

Để chế tạo linh kiện FET trên đế SiO_2/Si có các cấu trúc dị thể graphene- MoS_2 -graphene, kỹ thuật quang khắc được sử dụng. Đầu tiên, màng kim loại titan/vàng (độ dày: 3 nm/47 nm) được lắng đọng bằng cách sử dụng kỹ thuật bay hơi chùm tia điện tử và theo sau bởi quá trình lift-off trong dung dịch N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) trong 24 giờ. Cuối cùng, một quy trình khắc lần 2 kết hợp quá trình ăn mòn khô được sử dụng để định hình kênh dẫn cấu trúc graphene- MoS_2 -graphene với chiều dài và chiều rộng xác định.

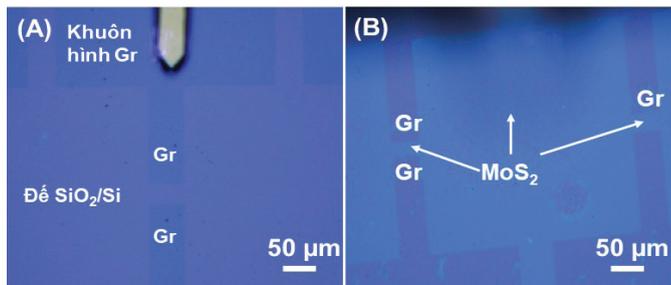
2.3. Các phương pháp khảo sát đặc tính vật liệu

Kính hiển vi quang học được sử dụng để khảo sát nhanh các kết quả tổng hợp vật liệu tổ hợp cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene. Kính hiển vi lực nguyên tử AFM (XE-100 của Park Systems) được sử dụng để quan sát hình thái học bề mặt và ước tính số lớp của MoS₂. Độ kết tinh và chất lượng của graphene-MoS₂-graphene được khảo sát bằng quang phổ Raman với bước sóng kích thích 532 nm. Máy phân tích thông số (4200-SCS của Keithley) được sử dụng để mô tả đặc tính điện của các linh kiện với kênh dẫn là các cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Hình thái học bề mặt của vật liệu graphene-MoS₂-graphene

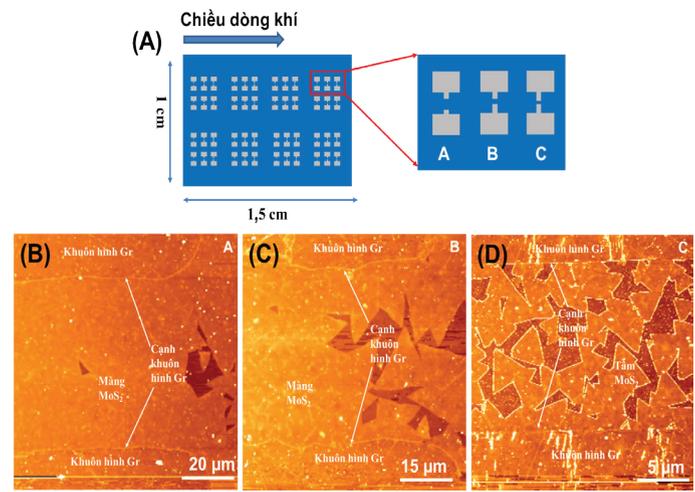
Hình 2A là ảnh kính hiển vi quang học của các khuôn hình graphene được tạo ra trên đế SiO₂/Si. Sau quá trình tổng hợp MoS₂, chúng tôi quan sát thấy các cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene trên một diện tích lớn, trong đó các khuôn hình graphene được biểu thị là vùng màu xám trong khi MoS₂ được biểu thị thành màu xanh lam nhạt, xung quanh các khuôn hình graphene (hình 2B).



Hình 2. Ảnh chụp kính hiển vi quang học của (A) khuôn hình graphene được chế tạo trên đế SiO₂/Si, (B) cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene được hình thành sau quá trình lắng đọng hóa học pha hơi.

Kính hiển vi lực nguyên tử (AFM) cũng được sử dụng để quan sát chi tiết hơn các cấu trúc dị thể được chỉ ra trong hình 2B. Chúng tôi nhận thấy rằng, có sự khác biệt trong việc hình thành các dị cấu trúc, phụ thuộc vào khoảng cách giữa các khuôn hình graphene và nguồn MoO₃ (hình 3A). Kết quả này cũng tương tự với kết quả được tìm thấy trong quá trình tổng hợp MoS₂ trên đế SiO₂/Si [16, 17]. Ở vị trí xa nhất, chúng tôi quan sát thấy nhiều tấm MoS₂ hình tam giác trong các khuôn hình graphene (hình 3D). Ở vị trí gần với nguồn MoO₃ hơn, các tấm MoS₂ hình tam giác có kích

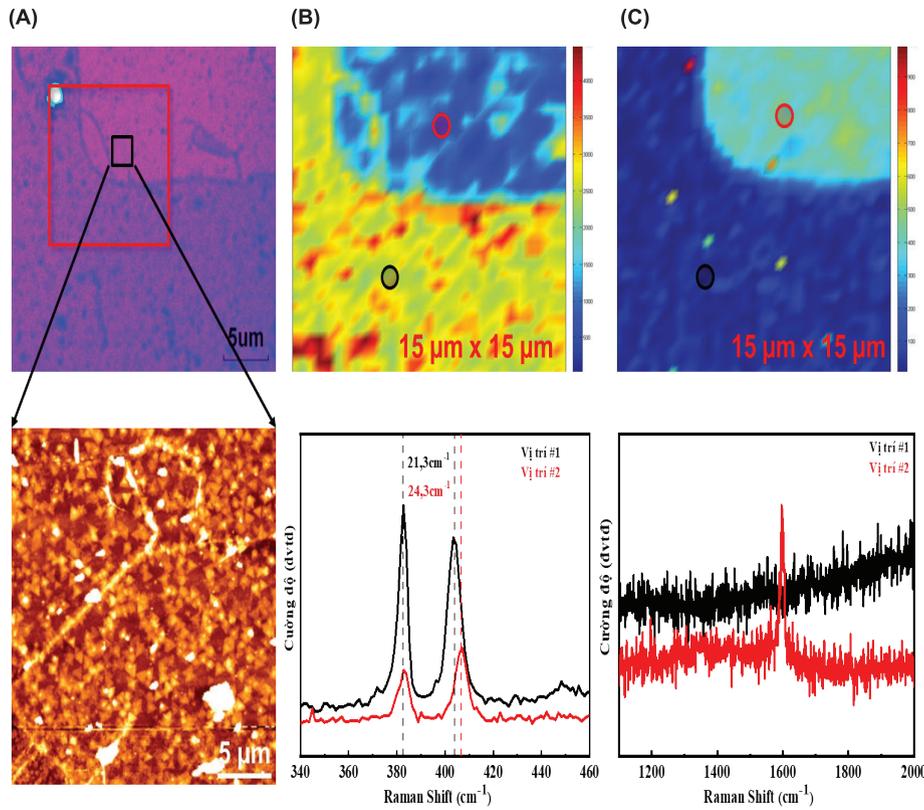
thước và mật độ lớn hơn và chúng có khuynh hướng hợp nhất với nhau để tạo thành màng MoS₂ (hình 3C). Cuối cùng, màng MoS₂ được hình thành khi khoảng cách đủ gần (hình 3B). Điều thú vị là chúng tôi đã quan sát thấy các hình dạng bán tam giác MoS₂ được hình thành dọc theo các cạnh của khuôn hình graphene để tạo thành các điểm nối (hình 3D). Điều này cho thấy rằng, rìa của các khuôn hình graphene có vai trò như một mỏ neo thuận lợi cho sự hình thành mầm và sự tổng hợp của MoS₂.



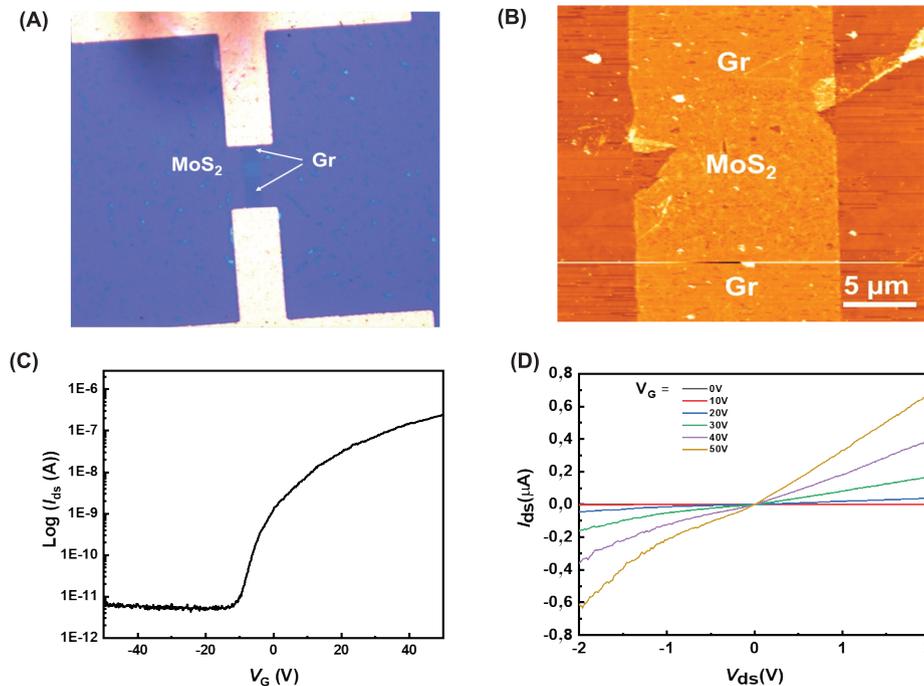
Hình 3. (A) Hình vẽ mô tả cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene ở các vị trí khác nhau theo chiều dòng khí Ar thổi vào ống phản ứng. Ảnh AFM của (B), (C) và (D) được đo ở các vị trí được đánh dấu A, B, C trong hình (A).

3.2. Đặc trưng cấu trúc vật liệu graphene-MoS₂-graphene

Để khẳng định về sự tồn tại của cấu trúc dị thể graphene-MoS₂, chúng tôi đã tiến hành lập bản đồ phổ Raman. Các vùng được sử dụng để lập bản đồ được đánh dấu bằng hình vuông màu đỏ trong hình 4A. Hình 4B và 4C cho thấy, bản đồ hoá phổ Raman cho MoS₂ sử dụng cường độ đỉnh A_{1g} và cho graphene sử dụng cường độ đỉnh G. Các bản đồ cho thấy, mặt phân cách sắc nét giữa graphene và MoS₂ của cấu trúc dị thể, khẳng định sự hình thành cấu trúc dị thể của graphene và MoS₂. Hơn nữa, phổ Raman cho các diện tích được biểu thị bằng các vòng tròn có cùng màu trong hình 4B và 4C cũng cho thấy, diện tích phía trên là màng graphene trong khi phía dưới là màng MoS₂ hai lớp với khoảng cách đỉnh là 21,3 cm⁻¹ [18-20]. Chúng tôi cũng quan sát phổ Raman của MoS₂ ở phía trên có cường độ đỉnh yếu hơn và khoảng cách giữa các đỉnh lớn. Điều này chỉ ra rằng, có các tấm dày MoS₂ kích thước nhỏ trên màng graphene như thể hiện trong ảnh AFM của hình 4A.



Hình 4. Ảnh kính hiển vi quang học của tiếp giáp dị thể graphene-MoS₂ (A). Hình chữ nhật màu đỏ là diện tích được chọn để mapping trong (B) và (C). (B) và (C) là Raman mapping của cường độ đỉnh A_{1g} cho MoS₂ và cường độ đỉnh G cho graphene. Dưới mỗi hình là phổ Raman tương ứng cho diện tích được chỉ ra bởi vòng tròn với cùng màu trong hình.



Hình 5. (A) Ảnh kính hiển vi quang học và (B) ảnh kính hiển vi lực nguyên tử của linh kiện được chế tạo với kênh dẫn là cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene, (C) đặc tính truyền dẫn ($V_{ds}=0,5$ V), (D) đặc tính đầu ra của linh kiện với các điện áp cực cổng trong dải từ 0-50 V.

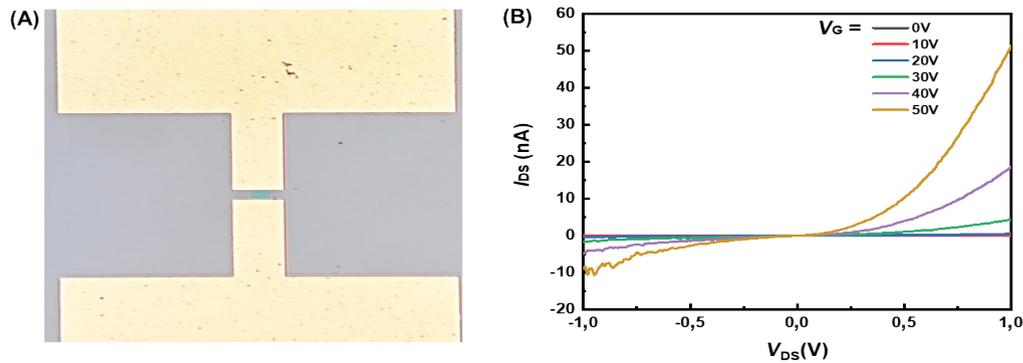
3.3. Đặc tính điện của vật liệu graphene-MoS₂-graphene

Để nghiên cứu đặc tính truyền tải và tiếp xúc điện giữa graphene và MoS₂, chúng tôi tập trung vào việc chế tạo linh kiện sử dụng cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene như là kênh dẫn. Quá trình chế tạo chi tiết được mô tả trong phần thực nghiệm.

Hình 5A là ảnh quang học và hình 5B là ảnh kính hiển vi lực nguyên tử của linh kiện với kênh dẫn là cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene. Đặc tính truyền dẫn và đặc tính đầu ra của linh kiện được thể hiện trong hình 5C và 5D. Hình 5C cho thấy đặc tính truyền (I_{ds} vs V_{gs}) ở thang đo logarit. Linh kiện hiển thị đường cong đặc trưng của bán dẫn loại n. Điều này cho thấy, MoS₂ là kênh dẫn trong linh kiện được chế tạo sử dụng cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene và graphene chỉ đóng vai trò như điện cực. Thêm vào đó, độ linh động hạt tải của linh kiện được tính toán theo công thức:

$$\mu = (dI_{ds} / dV_{bg}) \times [L / (WC_{ox}V_{ds})]$$

trong đó: $L=16 \mu\text{m}$ và $W=12 \mu\text{m}$ lần lượt là chiều rộng và chiều dài của kênh dẫn. $C_{ox}=11,5 \text{ nFcm}^{-2}$ là điện dung giữa kênh dẫn và cực cổng mặt sau trên một đơn vị diện tích. dI_{ds}/dV_{bg} là độ dốc của đường cong truyền dẫn. Độ linh động điện tử được tính toán $\sim 3,5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Đặc biệt, đặc tính đầu ra của linh kiện thể hiện sự tuyến tính với V_{ds} từ -2 đến 2 V (hình 5D), điều này ngụ ý rằng, có sự hình thành tiếp xúc Omic giữa graphene và MoS₂ [21].



Hình 6. (A) Ảnh kính hiển vi quang học và (B) đặc tính đầu ra của linh kiện MoS₂ với các điện áp cực cổng trong dải từ 0-50 V.

Bảng 1. So sánh đặc trưng tính chất điện của vật liệu graphene-MoS₂-graphene chế tạo được so với một số công bố trước đó.

Vật liệu	Phương pháp chế tạo	Đặc tính linh kiện	Tài liệu tham khảo
MoS ₂	Lắng đọng pha hơi hoá học	$\mu=1,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ Tỷ lệ đóng/mở $\sim 10^4$	[22]
Graphene-MoS ₂	Lắng đọng pha hơi hoá học	$\mu\sim -0,46 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ Tỷ lệ đóng/mở $= 10^6$	[23]
MoS ₂	Lắng đọng pha hơi hoá học	$\mu\sim -0,8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ Tỷ lệ đóng/mở $= 10^5$	[24]
MoS ₂	Phương pháp bóc tách	$\mu=0,12 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ Tỷ lệ đóng/mở $\sim 10^7$	[25]
Graphene-MoS ₂	Phương pháp bóc tách cơ học	$\mu=2,63 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ Tỷ lệ đóng/mở $\sim 10^2$	[26]
MoS ₂	Lắng đọng pha hơi hoá học	$\mu=0,02 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, Tỷ lệ đóng/mở $\sim 10^4$	[27]
MoS ₂	Lắng đọng pha hơi hoá học	$\mu=1,2 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ Tỷ lệ đóng/mở $= 10^4$	[28]
Graphene-MoS ₂ -graphene	Lắng đọng pha hơi hoá học	$\mu=3,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ Tỷ lệ đóng/mở $\sim 10^5$	Nghiên cứu này

Kết quả này lý giải tại sao linh kiện có tốc độ đóng/mở cao $\sim 10^5$. Để so sánh, chúng tôi cũng đã tiến hành chế tạo linh kiện với kênh dẫn là vật liệu MoS₂ và hai điện cực Ti/Au (hình 6A). Kết quả đo đặc tính đầu ra (hình 6B) chỉ ra một sự bất đối xứng khi V_{DS} thay đổi từ -1 đến 1 V ở các điện áp cực cổng khác nhau. Điều này chỉ ra rằng, điện trở hình thành ở tiếp giáp MoS₂/(Ti/Au) là lớn hơn điện trở được hình thành giữa tiếp giáp MoS₂-graphene. Các đặc trưng tính chất điện của vật liệu graphene-MoS₂-graphene chế tạo được như độ linh động điện tử (μ), tốc độ đóng/mở cũng đã được so sánh với một số công trình công bố trước đó (bảng 1). Kết quả này cho thấy, graphene có thể cung cấp một tiếp xúc điện tốt cho các linh kiện chế tạo trên cơ sở vật liệu MoS₂.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene đã được tổng hợp thành công thông qua kỹ thuật CVD hai bước. Hình thái của các cấu trúc dị thể phụ thuộc vào khoảng cách từ các khuôn hình graphene với nguồn MoS₂. Kết quả này được xác nhận thông qua kính hiển vi

lực nguyên tử. Bản đồ Raman đã thể hiện được sự hình thành và độ đồng đều của dị liên kết. Linh kiện được chế tạo sử dụng cấu trúc dị thể graphene-MoS₂-graphene chỉ ra đặc tính điện của bán dẫn loại n, được xác định bởi lớp MoS₂. Đặc tính đầu ra của linh kiện thể hiện rằng graphene là một điện cực tốt đối với vật liệu MoS₂.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ tài chính từ Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED), mã số 103.99-2020.36. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Wang, S. Liu, Q. Li, et al. (2021), "Schottky barrier heights in two-dimensional field-effect transistors: From theory to experiment", *Rep. Prog. Phys.*, **84**(5), DOI: 10.1088/1361-6633/abf1d4.
- [2] K. Noori, F. Xuan, S.Y. Quek (2022), "Origin of contact polarity at metal-2D transition metal dichalcogenide interfaces", *npg 2D Mater.*, **6**(73), pp.1-7, DOI: 10.1038/s41699-022-00349-x.
- [3] M.L. Urquiza, X. Cartoixa (2020), "Schottky barriers, emission regimes and contact resistances in 2H-1T²MoS₂ lateral metal-semiconductor junctions from first-principles", *2D Mater.*, **7**(4), DOI: 10.1088/2053-1583/aba449.

- [4] S. Das, H.Y. Chen, A.V. Penumatcha, et al. (2013), “High performance multilayer MoS₂ transistors with scandium contacts”, *Nano Lett.*, **13**(1), pp.100-105, DOI: 10.1021/nl303583v.
- [5] B.W.H. Baugher, H.O.H. Churchill, Y. Yang, et al. (2013), “Intrinsic electronic transport properties of high-quality monolayer and bilayer MoS₂”, *Nano Lett.*, **13**(9), pp.4212-4216, DOI: 10.1021/nl401916s.
- [6] R. Kappera, D. Voiry, S.E. Yalcin, et al. (2014), “Phase-engineered low-resistance contacts for ultrathin MoS₂ transistors”, *Nat. Mater.*, **13**(12), pp.1128-1134, DOI: 10.1038/nmat4080.
- [7] S. Bae, H. Kim, Y. Lee, et al. (2010), “Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes”, *Nat. Nanotechnol.*, **5**(8), pp.574-578, DOI: 10.1038/nnano.2010.132.
- [8] J.H. Lee, E.K. Lee, W.J. Joo, et al. (2014), “Wafer-scale growth of single-crystal monolayer graphene on reusable hydrogen-terminated germanium”, *Science*, **344**(6181), pp.286-289, DOI: 10.1126/science.1252268.
- [9] F. Schwierz (2010), “Graphene transistors”, *Nat. Nanotechnol.*, **5**(7), pp.487-496, DOI: 10.1038/nnano.2010.89.
- [10] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, et al. (2005), “Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene”, *Nature*, **438**(7065), pp.197-200, DOI: 10.1038/nature04233.
- [11] Y. Liu, H. Wu, H.C. Cheng, et al. (2015), “Toward barrier free contact to molybdenum disulfide using graphene electrodes”, *Nano Lett.*, **15**(5), pp.3030-3034, DOI: 10.1021/nl504957p.
- [12] X. Cui, G.H. Lee, Y.D. Kim, et al. (2015), “Multi-terminal transport measurements of MoS₂ using a van der Waals heterostructure device platform”, *Nat. Nanotechnol.*, **10**(6), pp.534-540, DOI: 10.1038/nnano.2015.70.
- [13] G.H. Lee, Y.J. Yu, X. Cui, et al. (2013), “Flexible and transparent MoS₂ field-effect transistors on hexagonal boron nitride-graphene heterostructures”, *ACS Nano*, **7**(9), pp.7931-7936, DOI: 10.1021/nn402954e.
- [14] W.S. Leong, X. Luo, K.H. Khoo, et al. (2015), “Low resistance metal contacts to MoS₂ devices with nickel-etched-graphene electrodes”, *ACS Nano*, **9**(1), pp.869-877, DOI: 10.1021/nl506567r.
- [15] L. Yu, Y.H. Lee, X. Ling, et al. (2014), “Graphene/MoS₂ hybrid technology for large-scale two-dimensional electronics”, *Nano Lett.*, **14**(6), pp.3055-3063, DOI: 10.1021/nl404795z.
- [16] S. Wang, Y. Rong, Y. Fan, et al. (2014), “Shape evolution of monolayer MoS₂ crystals grown by chemical vapor deposition”, *Chem. Mater.*, **26**(22), pp.6371-6379, DOI: 10.1021/cm5025662.
- [17] X. Ling, Y.H. Lee, Y. Lin, et al. (2014), “Role of the seeding promoter in MoS₂ growth by chemical vapor deposition”, *Nano Lett.*, **14**(2), pp.464-472, DOI: 10.1021/nl4033704.
- [18] C. Lee, H. Yan, L.E. Brus, et al. (2010), “Anomalous lattice vibrations of single-and few-layer MoS₂”, *ACS Nano*, **4**(5), pp.2695-2700, DOI: 10.1021/nn1003937.
- [19] A. Zobel, A. Boson, P.M. Wilson, et al. (2016), “Chemical vapour deposition and characterization of uniform bilayer and trilayer MoS₂ crystals”, *J. Mater. Chem. C*, **4**(47), pp.11081-11087, DOI: 10.1039/C6TC03587F.
- [20] X. Zhang, H. Nan, S. Xiao, et al. (2019), “Transition metal dichalcogenides bilayer single crystals by reverse-flow chemical vapor epitaxy”, *Nat. Commun.*, **10**(1), pp.1-10, DOI: 10.1038/s41467-019-08468-8.
- [21] D. Seo, D.Y. Lee, J. Kwon, et al. (2019), “High-performance monolayer MoS₂ field-effect transistor with large-scale nitrogen-doped graphene electrodes for Ohmic contact”, *Applied Physics Letters*, **115**(1), DOI: 10.1063/1.5094682.
- [22] A. Behranginia, P. Yasaei, A.K. Majee, et al. (2017), “Direct growth of high mobility and low-noise lateral MoS₂-Graphene heterostructure electronics”, *Small*, **13**(30), DOI: 10.1002/sml.201604301.
- [23] X. Chen, Y.J. Park, T. Das, et al. (2016), “Lithography-free plasma-induced patterned growth of MoS₂ and its heterojunction with graphene”, *Nanoscale*, **8**(33), pp.15181-15188, DOI: 10.1039/C6NR03318K.
- [24] Y.C. Lin, W. Zhang, J.K. Huang, et al. (2012), “Wafer-scale MoS₂ thin layers prepared by MoO₃ sulfurization”, *Nanoscale*, **4**(20), pp.6637-6641, DOI: 10.1039/C2NR31833D.
- [25] Q.H. Wang, K.K. Zadeh, A. Kis, et al. (2012), “Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides”, *Nature Nanotechnology*, **7**, pp.699-712, DOI: 10.1038/nnano.2012.193.
- [26] S. Andleeb, J. Eom, N.R. Naz, et al. (2017), “MoS₂ field-effect transistor with graphene contacts”, *Journal of Materials Chemistry C*, **5**(32), pp.8308-8314, DOI: 10.1039/C7TC01736G.
- [27] Y.H. Lee, X.Q. Zhang, W. Zhang, et al. (2012), “Synthesis of large-area MoS₂ atomic layers with chemical vapor deposition”, *Advanced Materials*, **24**(17), pp.2320-2325, DOI: 10.1002/adma.201104798.
- [28] V.T. Nguyen, S. Ha, D.I. Yeom, et al. (2019), “Large-scale chemical vapor deposition growth of highly crystalline MoS₂ thin films on various substrates and their optoelectronic properties”, *Current Applied Physics*, **19**(10), pp.1127-1131, DOI: 10.1016/j.cap.2019.07.007.