

TỔNG HỢP THANH NANO DỊ THỂ MoS_2/Si : NGHIÊN CỨU HÌNH THÁI HỌC, CẤU TRÚC VÀ TÍNH CHẤT QUANG

SYNTHESIS OF MoS_2/Si NANOROD HETEROSTRUCTURE:
STUDY ON MORPHOLOGICAL, STRUCTURAL, AND OPTICAL PROPERTIES

Trần Hữu Toàn¹, Nguyễn Cao Khang²,
Nguyễn Tiến Đại^{3,4,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/hu1h5804.2025.398>

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, chúng tôi trình bày quy trình chế tạo thành công cấu trúc thanh nano dị thể $\text{MoS}_2/\text{Si}(100)$ thông qua sự kết hợp giữa kỹ thuật ăn mòn ướt và lắng đọng hơi hóa học sử dụng tiền chất kim loại hữu cơ (MOCVD). Các thanh nano $\text{Si}(100)$ được hình thành với đường kính dao động từ 150 đến 350nm, chiều cao khoảng 10 μm và định hướng thẳng đứng trên nền đế $\text{Si}(100)$. Trên bề mặt các thanh này, các tấm nano MoS_2 độ dày xấp xỉ 60nm, dạng tai nấm được hình thành, với độ dày chỉ vài chục nm. Phân tích cấu trúc tinh thể cho thấy MoS_2 kết tinh tốt với mặt phẳng (002) đặc trưng của cấu trúc lục giác, phản ánh mức độ tinh khiết và độ ổn định cao. Kết quả phân tích thành phần nguyên tố bằng phổ nhiễu xạ phân tán năng lượng (EDS) xác nhận sự hiện diện duy nhất của Mo (1,27% at.) và S (3,21% at), cho thấy vật liệu thu được có độ tinh khiết cao và không lẫn tạp chất. Phổ hấp thụ và huỳnh quang của MoS_2 ghi nhận hai điểm chuyển tiếp điện tử đặc trưng tại 632nm và 680nm, cùng với đỉnh phát xạ huỳnh quang rõ nét tại 665nm, đặc trưng cho MoS_2 tinh thể mỏng. Những kết quả thu được cho thấy phương pháp kết hợp giữa MOCVD và ăn mòn ướt là một hướng hiệu quả trong việc chế tạo các cấu trúc dị thể nano tích hợp MoS_2 , mở ra tiềm năng ứng dụng trong các thiết bị quang - điện tử hiệu năng cao.

Từ khóa: MoS_2/Si cấu trúc dị thể, thanh nano, ăn mòn ướt, MOCVD, linh kiện quang điện - điện tử.

ABSTRACT

In this paper, we demonstrate the controlled synthesis of $\text{MoS}_2/\text{Si}(100)$ nanorod heterostructures through a synergistic approach combining metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) and wet chemical etching. Vertically aligned $\text{Si}(100)$ nanorods with diameters ranging from 150 to 350nm and an average height of approximately 10 μm were successfully fabricated on $\text{Si}(100)$ substrates. Subsequently, ultrathin MoS_2 nanosheets - approximately 60 nm thick - were conformally grown on the top facets and sidewalls of the nanorods, forming a well-defined heterostructure. Energy-dispersive X-ray spectroscopy confirmed the presence of only Mo (1.27% at.%) and S (3.21% at.%), verifying the high chemical purity and structural integrity of the MoS_2 nanosheets. Optical absorption and photoluminescence measurements revealed two distinct peak excitonic transitions (632nm and 680nm) and a pronounced emission peak at 665nm, characteristic of two-dimensional crystalline MoS_2 . These results highlight the effectiveness of the combined MOCVD and wet etching strategy for engineering MoS_2 -based nanostructured heterojunctions, offering significant promise for optoelectronic devices with enhanced performance.

Keywords: MoS_2/Si heterostructure, nanorods, wet chemical etching, MOCVD, optoelectronic devices.

¹Trường Điện - Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trung tâm Khoa học và Công nghệ Nano, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội

³Viện Nghiên cứu Lý thuyết và Ứng dụng, Đại học Duy Tân

⁴Khoa Môi trường và Khoa học Tự nhiên, Đại học Duy Tân

*Email: nguyentienai@duytan.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/6/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/7/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Những năm gần đây, vật liệu bán dẫn MoS_2 cấu trúc hai chiều, vùng cấm thẳng và chứa mật độ tâm hoạt động xúc tác cao tại biên cạnh đã và đang được xem là vật liệu tiềm năng cho nhiều ứng dụng khác nhau [1-10]. Nhờ sở hữu hàng loạt đặc tính ưu việt như hiệu suất chuyển đổi quang điện cao, khả năng điều chỉnh được độ rộng vùng cấm thẳng trong khoảng 1,2 - 1,9 eV thông qua số lớp, hệ số hấp thụ ánh sáng lớn ($\sim 10^7 \text{ m}^{-1}$), diện tích bề mặt riêng cao ($\sim 900 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), cùng với độ bền nhiệt và hóa học tốt, ít độc hại và thân thiện với môi trường, MoS_2 được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực quang điện - điện tử, quang xúc tác, điện phân nước và siêu tụ [2, 3, 11-22]. Để tổng hợp MoS_2 , nhiều phương pháp đã được báo cáo: thủy nhiệt [16, 23, 24]; sol-gel [25]; lắng đọng hóa học hơi cơ kim (MOCVD) [11, 16, 20, 26]; bóc tách trong pha lỏng [18] và bóc tách cơ học [27, 28]. Trong đó phương pháp MOCVD đã được đánh giá có nhiều ưu thế vượt trội, nhờ khả năng tổng hợp cấu trúc hai chiều của MoS_2 với độ dày mỏng mỏng được kiểm soát chính xác đến đơn lớp, nhiệt độ tổng hợp thấp, đồng thời có thể thực hiện trên các đế có hình dạng phức tạp. Ngoài ra, MoS_2 cũng có thể được tích hợp dễ dàng với các vật liệu bán dẫn thấp chiều khác thông qua phương pháp này [9, 11, 14, 17, 29-34]. Bên cạnh đó, các hệ vật liệu dị thể giữa MoS_2 và các chất bán dẫn khác cũng được quan tâm nhờ khả năng cải thiện hiệu suất chuyển đổi quang điện, quang xúc tác, quang điện hóa. Những hiệu quả được cho là nguyên nhân từ độ linh động hạt tải cao, mật độ khuyết tật, diện tích bề mặt lớn, cùng với quá trình phân tách và truyền tải cặp hạt tải được thúc đẩy thông qua điện thể nội hình thành tại vùng tiếp giáp dị thể [3, 8, 22, 32, 33, 35-37]. Mặc dù vậy, trong nhiều nghiên cứu, các hệ dị thể trên vẫn còn tồn tại những hạn chế như độ linh động hạt tải chưa cao; hệ số hấp thụ ánh sáng còn thấp; điện trở tiếp giáp lớn; tốc độ tái hợp cặp hạt tải nhanh và mật độ khuyết tật cao, làm suy giảm khả năng hoạt động của linh kiện [2, 22, 38]. Để cải thiện các yếu tố này, nhiều giải pháp đã được đề xuất như biến đổi cấu trúc MoS_2 nhằm tăng mật độ tâm hoạt động xúc tác [39-41], giảm mật độ khuyết tật [42], ổn định pha và pha tạp kim loại quý (Pt, Au, Ag) [43-45]. Bên cạnh đó, các phương pháp chế tạo màng mỏng MoS_2 cũng đã được nghiên cứu và tối ưu hóa [16] nhằm nâng cao độ linh động điện tử và hiệu suất chuyển đổi tổng thể của vật liệu. Từ những phân tích trên, có thể thấy việc thiết kế và tổng hợp vật liệu MoS_2 với cấu trúc nano phù hợp, kết hợp cùng phương pháp chế tạo hiệu quả, đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất quang điện và

quang điện hóa. Trong nghiên cứu này, vật liệu MoS_2 đã được tổng hợp bằng phương pháp MOCVD với mục tiêu nâng cao chất lượng tinh thể, độ linh động điện tử và hiệu suất chuyển đổi tổng thể.

Công nghệ bán dẫn silic (Si) đã phát triển từ những năm 1954 và đến nay vẫn là một trong những vật liệu quang trong trong ngành công nghiệp chip bán dẫn. Si đã được chứng minh vượt trội so với germani (Ge) nhờ các đặc tính nổi bật [46]. Chất bán dẫn Si hiện nay được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực quang điện - điện tử bao gồm pin mặt trời, đầu thu quang, linh kiện phát quang, quang điện hóa tách nước và pin nhiên liệu [9, 47-51]. Các linh kiện quang điện tử sử dụng Si có hiệu suất chuyển đổi quang điện đạt được theo tính toán lý thuyết lên đến 29,4% [48]. Khi được kết hợp với các chất bán dẫn khác như (GaAs, GaInP, perovskite), hiệu suất này có thể tăng lên gần 50% [47]. Đặc biệt, cấu trúc một chiều (dây, thanh nano) của Si [52-54] đã và đang thu hút sự quan tâm lớn trong các ứng dụng quang điện - điện tử nhờ vào một số đặc trưng hóa lý nổi bật như hiệu ứng giam giữ lượng tử. Cấu trúc này có diện tích bề mặt lớn ($323 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) tạo ra nhiều tính chất hóa lý thú vị, chẳng hạn như hệ số hấp thụ ánh sáng mặt trời trong vùng năng lượng lớn hơn 1,1 eV và có độ linh động hạt tải cao $1400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ như hiệu ứng giam giữ điện tử theo hai chiều [55-57]. Do đó, thanh nano Si được chế tạo thành công bằng nhiều phương pháp khác nhau bao gồm ăn mòn ướt [9, 58]; sol-gel [59]; epitaxy chùm phân tử (MBE) [60]; phún xạ [61] và lắng đọng hóa học hơi cơ kim (MOCVD) [62] cũng như phương pháp hơi lỏng rắn (VLS) [63]. Tuy nhiên hiệu suất chuyển đổi quang điện của các linh kiện chế tạo từ thanh nano Si vẫn cho thấy chưa đạt được mức lý thuyết dù đã sử dụng các phương pháp chế tạo này. Nguyên nhân của vấn đề này được cho là do một số hạn chế bao gồm phương pháp chế tạo, tốc độ tái hợp cặp hạt tải lớn, điện trở tiếp giáp lớn và cấu trúc chưa tối ưu. Mặc dù vậy, khi vật liệu nano Si được kết hợp với các chất bán dẫn khác, hiệu suất chuyển đổi quang điện, quang xúc tác đã được cải thiện đáng kể [9, 47-51, 64]. Quá trình tăng cường này được cho là nhờ vào lớp tiếp giáp dị thể giữa hai vật liệu, nơi hiệu thế nội được hình thành, giúp thúc đẩy quá trình truyền tải cặp hạt tải giữa các vật liệu dưới điều kiện kích thích. Sự kết hợp này còn giúp giảm điện trở tiếp xúc và điện trở mặt do ngăn cản quá trình tự ôxi hóa trên bề mặt Si. Thêm vào đó, việc kết hợp nhiều tiếp giáp giúp mở rộng hệ số hấp thụ ánh sáng từ vùng hồng ngoại đến vùng tử ngoại, nâng cao độ ổn định và độ bền nhiệt-hóa học. Các vật liệu bán dẫn chứa mật độ

tâm hoạt động xúc tác cao cũng đóng vai trò quan trọng trong việc phát sinh và truyền tải hạt tải qua cấu trúc tiếp giáp dị thể. Tuy nhiên, các cơ chế này vẫn còn chưa được tường minh, và cần có những nghiên cứu tiếp theo để tối ưu hóa cấu trúc, từ đó nâng cao hiệu suất của các linh kiện quang điện - điện tử nano.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung chế tạo thanh nano Si đồng nhất bằng phương pháp ăn mòn ướt, với đế Si(100) được sử dụng định hướng thanh. Các thanh nano Si thu được hình thành thẳng đứng trên đế Si có đường kính dưới 500nm và chiều dài khoảng 10 μ m. Trên cơ sở đó, các tấm nano MoS₂ được lắng đọng bao phủ xung quanh thanh nano Si sử dụng phương pháp MOCVD, từ đó tạo thành cấu trúc dị thể (MoS₂/Si). Trong hệ MoS₂/Si, các tấm MoS₂ có dạng tai nấm, độ dày dao động từ vài nm tới hàng chục nm, được hình thành và định hướng mọc thẳng đứng dọc theo thành của thanh nano Si. Cấu trúc dị thể MoS₂/Si, chúng tôi chế tạo thanh nano Si đồng nhất thông qua phương pháp ăn mòn ướt, sử dụng đế Si(100). Thanh nano Si thẳng đứng trên đế Si có đường kính dưới 500nm, chiều dài 10 μ m. Sau đó chế tạo tấm nano MoS₂ mọc xung quanh thanh nano Si (MoS₂/Si) sử dụng phương pháp MOCVD. Cấu trúc nano dị thể MoS₂/Si có các tấm nano MoS₂ dạng tai nấm độ dày vài nm tới hàng chục nm mọc thẳng đứng dọc theo thành của thanh nano Si. Cấu trúc dị thể MoS₂/Si đã được khảo sát toàn diện cũng như thảo luận về hình thái học, cấu trúc tinh thể và tính chất quang học. Những kết quả nghiên cứu thu được cho thấy tiềm năng trong việc khai thác sử dụng kết hợp giữa vật liệu hai chiều MoS₂ và chất bán dẫn thấp chiều Si, hướng tới cải thiện hiệu suất chuyển đổi quang - điện trong các linh kiện quang - điện tử. Đồng thời, nghiên cứu này cũng được kỳ vọng sẽ đóng góp một cách thiết thực vào việc tìm kiếm và phát triển các cấu trúc vật liệu dị thể mới với hiệu năng cao hơn.

2. THỰC NGHIỆM

2.1. Hóa chất và vật liệu

Tấm bán dẫn silic thuần định hướng tinh thể (100), được đánh bóng hai mặt, độ dày độ dày 500 μ m, nồng độ $\sim 10^{14}$ hạt/cm³, hệ số dẫn nở nhiệt 2,6 μ m⁻¹K⁻¹, được mua từ hãng AXT, Hoa Kỳ. Các chất AgNO₃ (độ sạch 99,9%), HNO₃ (độ sạch 60 - 65%), HF (48% khối lượng), H₂O₂ (30%), C₂H₅OH (độ sạch 95%), C₃H₆O (độ sạch 99,5%) được mua từ hãng Samchun, Hàn Quốc. Các tiền chất sử dụng H₂S (độ tinh khiết 99,99%) và Mo(CO)₆ (độ tinh khiết 99,9%) được mua từ hãng Sigma Aldrich, Hoa Kỳ

2.2. Chế tạo thanh nano MoS₂/Si

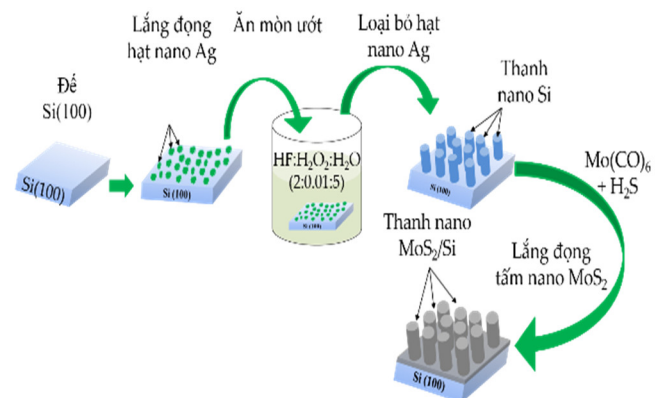
2.2.1. Chế tạo thanh nano Si

Phiến đế Si(100) được xử lý làm sạch bề mặt theo quy trình chuẩn [9, 65] nhằm loại bỏ các tạp chất hữu cơ và vô cơ trên đế. Cụ thể, phiến được rung siêu âm lần lượt trong các dung dịch: C₃H₆O trong 10 phút, C₂H₅OH trong 10 phút và nước khử ion (DI) trong 15 - 20 phút (lặp lại 3 - 5 lần). Sau đó phiến được rửa sạch bằng nước DI và sấy khô bằng khí N₂ ở nhiệt độ phòng.

Các hạt Ag có đường kính từ 50 - 120nm được lắng đọng lên bề mặt phiến Si thông qua phương pháp đồng kết tủa. Trước hết, 20mL AgNO₃ nồng độ 0,4mM được khuấy trong 10 phút ở tốc độ 1200 vòng/phút. Sau đó, 10mL dung dịch và HF (48%) nồng độ 0,14M được thêm vào dung dịch AgNO₃ và tiếp tục được khuấy trong 5 phút ở tốc độ 1500 vòng/phút. Đế Si được nhúng vào hỗn hợp dung dịch nói trên trong thời gian 60 giây để thực hiện quá trình lắng đọng hạt Ag. Mẫu đế Ag/Si được rửa bằng nước DI và sấy khô bằng khí N₂.

Tiếp theo, đế Ag/Si được chuyển vào dung dịch ăn mòn gồm HF (nồng độ 4,6M) và H₂O₂ (nồng độ 0,4M) với tổng thể tích 20mL, thời gian ăn mòn kéo dài 3 giờ. Sau quá trình ăn mòn, mẫu được chuyển sang dung dịch HNO₃ trong 60 giây để loại bỏ hoàn toàn các hạt Ag còn lại. Cuối cùng, các thanh nanoSi/Si(100) được rửa lại bằng nước DI (lặp lại 3 - 5 lần) và sấy khô bằng khí N₂ ở nhiệt độ phòng trước khi chuyển sang bước lắng đọng tấm nano MoS₂.

2.2.2. Lắng đọng tấm nano MoS₂/Si



Hình 1. Sơ đồ tổng hợp cấu trúc dị thể MoS₂/Si

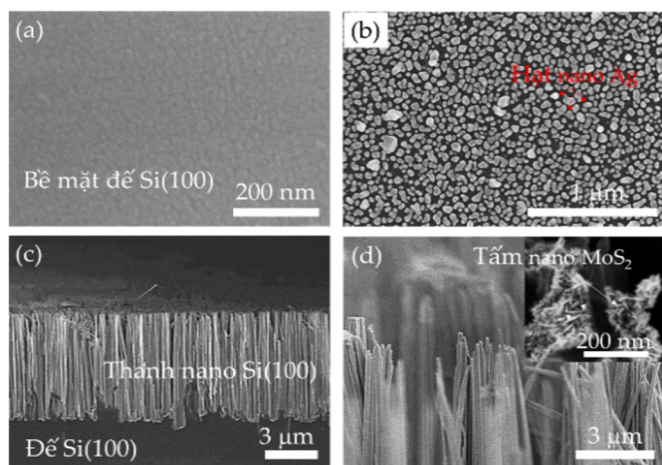
Tấm nano MoS₂ được lắng đọng trực tiếp lên thanh Si bằng phương pháp MOCVD với trong điều kiện: áp suất làm việc 1,0mtorr, nhiệt độ đế là 180°C, thời gian 60 giây. Trong quá trình này, các tiền chất Mo(CO)₆ (được hóa hơi ở 20°C, lưu lượng dòng khí 75sccm) và khí H₂S (trộn với 5% khí N₂, lưu lượng dòng khí 75sccm) được chuẩn bị sẵn.

$\text{Mo}(\text{CO})_6$ được làm lạnh đến 5°C trước khi được trộn với H_2S và đưa vào buồng phản ứng MOCVD nhờ một khí mang Ar với lưu lượng dòng khí là 25sccm. Quá trình lắng đọng được tiến hành tại một điều kiện duy nhất, được lựa chọn dựa trên các nguyên cứu của chúng tôi trước đó [11, 19, 66]. Sau khi quá trình lắng đọng kết thúc, mẫu được làm lạnh tự nhiên đến nhiệt phòng. Tóm tắt quy trình chế tạo thanh nano di thể MoS_2/Si được mô tả trong hình 1.

2.3. Đặc trưng và tính chất vật liệu

Các đặc trưng hình thái học, cấu trúc, và thành phần hóa học của vật liệu nghiên cứu thông qua phương pháp hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM, Hitachi, Japan, S4800), nhiễu xạ tia X (XRD, JD2584 N, Rigaku, nguồn bức xạ $\text{Cu}_\text{K}\alpha$ $\lambda = 1,54\text{\AA}$), phổ Raman (micro-ANDOR, SR303i, sử dụng bước sóng kích thích 532nm) và phổ nhiễu xạ phân tán năng lượng tia X (EDS, JED 2300, Hitachi, Japan). Để khảo sát tính chất quang của mẫu, phổ hấp thụ (UV-2600) và phổ huỳnh quang (M-PEX-2, sử dụng nguồn sáng kích thích $\lambda_{\text{ex.}} = 325\text{nm}$) đã được tiến hành.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

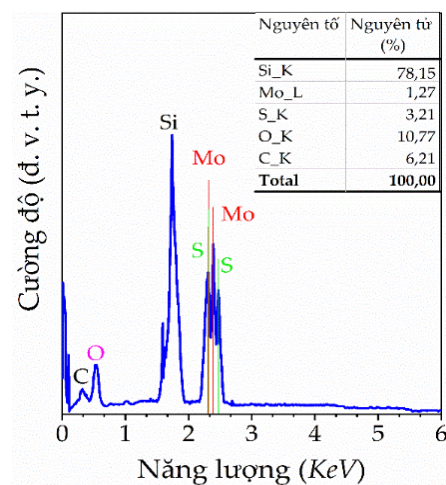


Hình 2. Ảnh FE-SEM của (a) Đế Si(100), (b) Hạt nano Ag lắng đọng trên đế Si, (c) Thanh nano Si(100) và (d) Tấm nano MoS_2 lắng đọng trên thanh nano Si với thời gian 45 giây

Hình 2(a) trình bày hình thái học bề mặt của đế Si(100) sau xử lý. Bề mặt đế quan sát được phẳng, nhẵn và không xuất hiện các khuyết tật như trầy xước hay gồ ghề, cho thấy quá trình làm sạch đã được thực hiện hiệu quả không gây tác động ăn mòn hoặc phá hủy cơ học. Điều kiện xử lý này được cho là phù hợp để đảm bảo sự phân bố đồng đều các hạt Ag và kích thước trong quá trình lắng đọng. Hình 2(b) cho thấy, ảnh FE-SEM của các hạt nano Ag sau khi lắng đọng lên bề mặt Si trong thời gian 60 giây. Các hạt Ag có đường kính phân bố trong khoảng 200 - 450nm và được phân bố khá đồng đều trên toàn bộ

bề mặt, với mật độ xấp xỉ 2.10^9 hạt/cm². Khoảng cách giữa các hạt Ag nằm trong dải từ 40 - 60nm. Sự phân bố nêu trên đảm bảo cho quá trình ăn mòn hóa học, từ đó hình thành các thanh Si có kích thước đồng nhất và kiểm soát được. Hình 2(c) là ảnh FE-SEM của các thanh nano Si sau thời gian ăn mòn 3 giờ ăn mòn trong dung dịch $\text{HF}/\text{H}_2\text{O}_2$, sử dụng các hạt Ag làm mặt nạ. Các thanh nano có đường kính dao động từ 150 - 350nm, chiều dài khoảng 10μm và thẳng đứng trên đế với khoảng cách trung bình giữa các thanh trong khoảng 70 - 130nm. Các thanh nano có mật độ không quá mau, và không quá thưa, thẳng đứng, đồng đều, bề mặt nhẵn, cho thấy quá trình ăn mòn diễn ra ổn định và tuân theo cơ chế ăn mòn đẳng hướng trong môi trường có mặt đồng thời HF và H_2O_2 [9].

Để hiểu rõ hơn về cơ chế liên quan đến vai trò của hạt Ag, HF và H_2O_2 trong quá trình ăn mòn có thể tham khảo thêm trong một số tài liệu trước đó [67-69]. Hình 2(d) trình bày ảnh FE-SEM của tấm nano MoS_2 lắng đọng trên bề mặt các thanh Si, thời gian 45 giây. Có thể nhận thấy các tấm MoS_2 mọc thẳng đứng tại thành và đầu của mỗi thanh, làm cho bề mặt trở nên nhám hơn so với trạng thái ban đầu (hình 2(c)). Các tấm MoS_2 có độ dày xấp xỉ 60nm phân bố theo dạng vảy ốc hoặc nấm mọc bao phủ dọc theo các thanh Si (xem hình được chèn vào của Hình 2(d)). Trong phạm vi nghiên cứu này, các yếu tố ảnh hưởng tới hình thái học như thời gian lắng đọng hay nhiệt độ để chưa được khảo sát chi tiết, thay vào đó, các điều kiện tổng hợp đã được lựa chọn dựa trên các kết quả tối ưu từ các những nghiên cứu trước đây của chúng tôi [11, 70]. Kết quả tổng hợp cho thấy cấu trúc dị thể MoS_2/Si đã được chế tạo thành công thông qua sự kết hợp giữa phương pháp ăn mòn ướt và MOCVD.



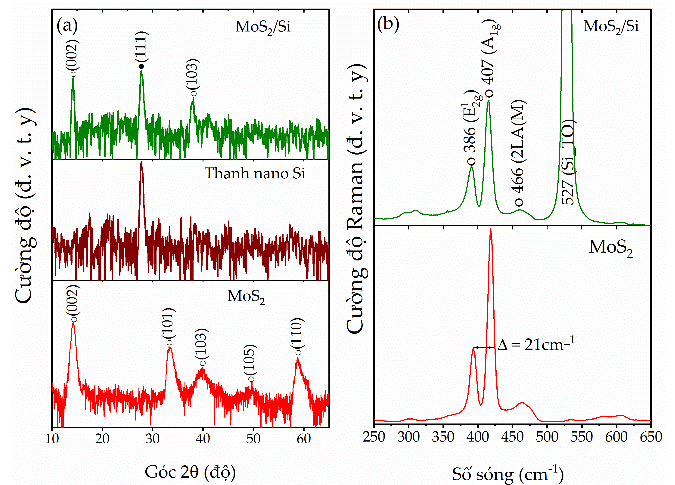
Hình 3. Phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS) của thanh nano di thể MoS_2/Si
Để xác định thành phần hóa học của cấu trúc dị thể MoS_2/Si , phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS)

đã được sử dụng. Kết quả khảo sát phổ EDS của thanh nano MoS_2/Si trong hình 3 cho thấy, các thành phần nguyên tố chủ yếu bao gồm silic (Si), molybden (Mo) và lưu huỳnh (S) với tỷ lệ nguyên tử lần lượt là 78,15%; 1,27% và 2,31%. Không có các nguyên tố khác xuất hiện trong cấu trúc dị thể này. Thành phần oxy (O) chiếm khoảng 10,77%, có thể là do oxy hấp phụ trên bề mặt hoặc do sự hình thành oxit của Mo và S trong quá trình lưu trữ mẫu. Lượng oxy này có thể giảm nếu mẫu được bảo quản trong môi trường chân không cao ($> 10^{-6}\text{torr}$) hoặc nếu một quá trình ăn mòn bằng tia ion được thực hiện trước khi tiến hành khảo sát EDS. Thành phần cacbon (C) chiếm 6,21%, được xác định từ bằng dính cacbon dùng để gá mẫu. Mặc dù không thể loại bỏ hoàn toàn cacbon, nhưng mức độ này có thể giảm thiểu bằng cách che chắn mẫu trước khi chiếu tia X vào bề mặt mẫu. Tuy nhiên, sự hiện diện của cacbon và oxy không ảnh hưởng lớn đến cấu trúc và tính chất của dị thể MoS_2/Si , vì vậy chúng có thể được loại bỏ trong các phép tính sau này.

Hình 4(a) trình bày giản đồ nhiễu xạ điện tử tia X (XRD) của thanh nano Si, MoS_2 và MoS_2/Si trong dải góc nhiễu xạ từ 10° tới 65° . Các đỉnh nhiễu xạ XRD ở các vị trí $2\theta = 14,2; 33,3; 39,8$ và $58,6^\circ$ được xác định tương ứng là các mặt mạng tinh thể (002), (010), (103), (105) và (110) của vật liệu MoS_2 , như đã được xác nhận từ thẻ chuẩn JCPDS N^o. 037-1492 [23, 64]. Đỉnh nhiễu xạ tại $2\theta = 27,9^\circ$ được cho là mặt tinh thể (111) của tinh thể Si [64]. Theo giản đồ nhiễu xạ, thanh nano khi chưa lắng đọng MoS_2 chỉ xuất hiện một đỉnh nhiễu xạ, trong khi thanh nano lắng đọng MoS_2 cho thấy sự xuất hiện hai đỉnh nhiễu xạ (002) và (103) bên cạnh đỉnh nhiễu xạ (111) Si. Sự dịch chuyển đỉnh của mặt mạng tinh thể (103) từ góc 37° đến 40° được giải thích là do sự giảm tỷ lệ Mo của tấm nano MoS_2 trên Si [64]. Hai pha tinh thể với cường độ đỉnh nhiễu xạ lớn và độ bán rộng nhỏ, điều này chứng tỏ mẫu MoS_2/Si được chế tạo ra có chất lượng tinh thể tốt, không bị pha tạp và không xuất hiện các pha tinh thể ngoài MoS_2 . Mặc dù các đỉnh nhiễu xạ có sự dịch nhỏ ($\pm 0,02^\circ$) so với các thẻ chuẩn, vị trí nhiễu xạ vẫn được xác định rõ ràng và đặc trưng cho MoS_2 và Si. Sự hiện diện của cả MoS_2 và Si trên cùng cấu trúc dị thể đã được xác nhận, chứng tỏ rằng vật liệu MoS_2 đã được lắng đọng thành công trên thanh nano Si.

Hình 4(b) trình bày phổ Raman của tấm nano MoS_2 và thanh nano MoS_2/Si . Các dao động Raman chính tại các số sóng 386cm^{-1} và 407cm^{-1} , tương ứng là dao động E_{2g}^1 và A_{1g} của tinh thể MoS_2 lục giác [28, 71-73]. Các dao động E_{2g}^1 và A_{1g} phản ánh các dao động bên trong và

bên ngoài mặt phẳng của các nguyên tử S-Mo và lưu huỳnh (S).

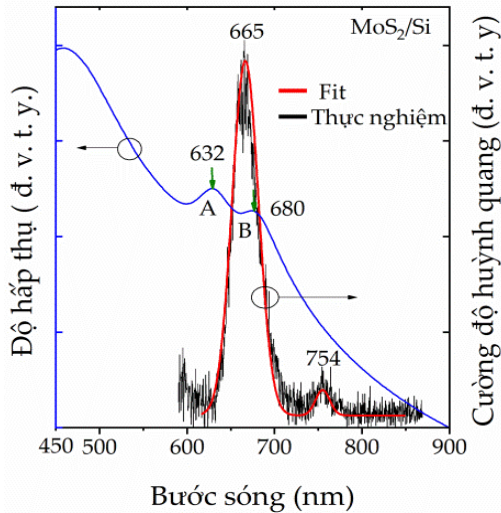


Hình 4. (a) Giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) của MoS_2 , thanh nano Si và MoS_2/Si ; (b) Phổ tán xạ Raman của MoS_2 và thanh nano MoS_2/Si với thời gian lắng đọng 45 giây

Dao động tại vị trí 466cm^{-1} được gán cho 2LA(M) , dao động bậc 2 của tinh thể MoS_2 , phát sinh từ phonon quang âm theo chiều ngang tại vị trí điểm M trong vùng Brillouin của tinh thể MoS_2 . Dao động này thường rất nhạy đối với số đơn lớp và thường được quan sát khi laser kích thích có bước sóng 532nm , cùng với hiệu ứng cộng hưởng. Điều này cho thấy khi số đơn lớp MoS_2 tăng, cường độ dao động giảm. Khi năng lượng kích thích trùng với năng lượng exciton thì cường độ dao động sẽ được khuếch đại rõ rệt [71, 74, 75]. Ngoài tỷ số cường độ và khoảng cách ($\Delta = 21\text{cm}^{-1}$) giữa hai dao động Raman chính là E_{2g}^1 và A_{1g} , cường độ dao động của 2LA(M) cũng có thể được sử dụng để ước lượng số đơn lớp MoS_2 . Cùng với các dao động của MoS_2 trong cấu trúc dị thể MoS_2/Si , một dao động tại vị trí 527cm^{-1} được xác định là dao động phonon quang học (TO) đặc trưng của tinh thể Si [9, 76, 77]. Vị trí dao động TO của Si dịch 5cm^{-1} về phía tần số thấp hơn so với giá trị lý thuyết $520 - 521\text{cm}^{-1}$, điều này được giải thích là do ảnh hưởng của kích thước thanh nano Si, sự xuất hiện lớp MoS_2 và lớp mỏng SiO_2 trên bề mặt của thanh, dẫn đến sự thay đổi ứng suất trong tinh thể Si [76, 77]. Dựa trên các kết quả khảo sát cấu trúc, hình thái học và thành phần hóa học của mẫu, có thể kết luận rằng cấu trúc thanh nano dị thể MoS_2/Si đã được chế tạo thành công và có tiềm năng ứng dụng trong các nghiên cứu tính chất hóa lý cũng như trong các linh kiện quang điện tử nano.

Hình 5 trình bày phổ huỳnh quang và phổ hấp thụ của vật liệu dị thể dạng thanh nano MoS_2/Si . Dựa trên phổ

hấp thụ, ba đỉnh đặc trưng đã được quan sát tại các bước sóng 632nm (A), 680nm (B) và xấp xỉ 450nm (C). Các vị trí này có thể được gán cho cấu trúc đặc trưng của màng mỏng MoS_2 . Cụ thể, hai đỉnh A và B thường được liên kết với quá trình chuyển tiếp điện tử xiên của vùng cấm năng lượng xảy ra tại điểm K trong vùng Brillouin [78-80].



Hình 5. Phổ hấp thụ và huỳnh quang của vật liệu thanh nano dị thể MoS_2/Si tại nhiệt độ phòng

Trong khi đỉnh C được cho là xuất phát từ các điện tử chuyển tiếp thẳng trong vùng cấm năng lượng tại điểm M [78]. Sự hiện diện đồng thời của hai loại chuyển tiếp trong cùng một mẫu vật liệu đã gợi ý rằng các điện tử có thể đã được kích thích đến mức năng lượng đủ để vượt qua vùng cấm, từ đó chuyển từ vùng hóa trị lên vùng dẫn. Nhờ đó, các quá trình truyền hạt tải và tái hợp phát quang đã được nâng lên. Thông qua phương pháp phổ Tauc, năng lượng vùng cấm tương ứng với các chuyển tiếp gián tiếp và trực tiếp đã được xác định lần lượt là $E_{g1} = 1,40\text{eV}$ và $E_{g2} = 2,16\text{eV}$. Các giá trị này cho thấy sự phù hợp tốt với các báo cáo trước đây về vật liệu MoS_2 có cấu trúc 2H. Phổ huỳnh quang thu được ở nhiệt độ phòng cho thấy hai đỉnh phát xạ rõ nét tại 665nm và 754nm, được quy cho hai loại chuyển tiếp thẳng và xiên tương ứng [78, 80-82]. Đáng chú ý, cường độ phát xạ tại 665nm cao hơn gần 10 lần so với đỉnh tại 754nm, đi kèm với độ bán rộng phổ hẹp. Điều này cho thấy xác suất chuyển dời điện tử trong vùng cấm thẳng là cao hơn, đồng thời cho thấy mật độ khuyết tật thấp và hiệu ứng giam giữ lượng tử có thể đã đóng vai trò quan trọng trong quá trình chuyển tiếp. Trong khi đó, đỉnh có cường độ yếu hơn tại 754nm được gán cho sự tái hợp của các điện tử kích thích trong vùng cấm xiên tại điểm K trong vùng Brillouin [78]. Mặc dù phổ huỳnh quang ghi nhận được có xuất hiện nhiều do điều kiện đo tại nhiệt độ phòng, các đỉnh đặc trưng vẫn cho

thấy sự phù hợp với các đường fit chuẩn và các tài liệu tham khảo trước đây [27, 75, 78, 80, 83]. Điều này cho thấy rằng lý thuyết về cơ chế phát xạ vẫn được duy trì trong vật liệu dưới điều kiện khảo sát. Cường độ phát quang đã bị chi phối bởi một số yếu tố, chẳng hạn như mật độ khuyết tật của các nguyên tử Mo và S, sự hiện diện của tạp chất bề mặt, sự gắn kết của nguyên tử oxy tại các vị trí khuyết tật của lưu huỳnh và các quá trình tán xạ phonon trong mạng tinh thể. Những yếu tố này đã góp phần làm suy giảm xác suất chuyển dời điện tử, từ đó dẫn đến cường độ huỳnh quang thấp hơn. Để giảm thiểu nhiễu và tăng cường độ phát quang, các phép đo ở nhiệt độ thấp và trên các mẫu có chất lượng tinh thể cao hơn là điều cần được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo. Trong phạm vi nghiên cứu này, chúng tôi ban đầu giới thiệu kết quả chế tạo thành công cấu trúc dị thể MoS_2/Si . Hình thái học, cấu trúc tinh thể và đặc tính quang học ở điều kiện nhiệt độ phòng đã được chúng tôi khảo sát sơ bộ. Các nghiên cứu chuyên sâu hơn nhằm làm rõ cơ chế chuyển tiếp điện tử và khả năng ứng dụng của hệ vật liệu dị thể này trong các lĩnh vực cụ thể sẽ tiếp tục được triển khai trong thời gian tới.

4. KẾT LUẬN

Tấm nano MoS_2 đã được tổng hợp thành công trên thanh nano Si ($\text{MoS}_2/\text{Si}(100)$) thông qua quy trình kết hợp giữa phương pháp ăn mòn ướt và (MOCVD). Trong quá trình này, bề mặt đế Si(100) đã được xử lý bằng ăn mòn ướt trong 3 giờ, qua đó cho phép các thanh nano Si được hình thành theo phương thẳng đứng với đường kính trong khoảng 150 - 350nm và chiều cao đạt đến khoảng 10 μm . Sau đó, MoS_2 đã được lắng đọng một cách đồng đều lên cả bề mặt và thành bên của các thanh Si, tạo thành một lớp có độ dày xấp xỉ 60 nm. Cấu trúc tinh thể của MoS_2 được xác định thuộc pha lục giác với mặt tinh thể (002) đặc trưng tại vị trí $2\theta = 14,2^\circ$ và không ghi nhận sự hiện diện của các pha tạp. Hai nguyên tố Mo và S đã được phát hiện là thành phần chính trong lớp vật liệu. Khi tiến hành khảo sát tính chất quang học của cấu trúc dị thể MoS_2/Si , hai mức chuyển tiếp điện tử đã được ghi nhận tại các bước sóng 632nm và 680nm trong vùng ánh sáng khả kiến. Đồng thời, hai đỉnh phát quang rõ rệt tại 665nm và 754nm cũng đã được quan sát ở nhiệt độ phòng. Từ các kết quả thu được, một hướng tiếp cận tổng hợp cấu trúc dị thể đã được đề xuất, trong đó tấm nano MoS_2 được tích hợp với các vật liệu bán dẫn nền thông qua kết hợp giữa ăn mòn ướt và MOCVD. Phương pháp này được kỳ vọng sẽ góp phần cải thiện hiệu suất chuyển đổi trong các ứng dụng quang điện tử ở quy mô nano.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Duy Tân. Chúng tôi xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về trang thiết bị của Phòng Thí nghiệm Công nghệ nano Ứng dụng (LAN), Đại học Duy Tân.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Gopika, M.S., B. Bindhu, "Preparation and Characterization of Few Layered MoS₂ Nano Flakes," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, 8(253), 146-148, 2019.
- [2]. Taffelli A., S. Dirè, A. Quaranta, L. Pancheri, "MoS₂ Based Photodetectors: A Review," *Sensors*, 21(8), 2758, 2021.
- [3]. Tobis M., S. Sroka, E. Frąckowiak, "Supercapacitor with Carbon/MoS₂ Composites," *Front. Energy Res.*, 9, 2021.
- [4]. Hwangbo S., L. Hu, A.T. Hoang, J.Y. Choi, J.H. Ahn, "Wafer-scale monolithic integration of full-colour micro-LED display using MoS₂ transistor," *Nat. Nanotechnol.*, 17(5) 500-506, 2022.
- [5]. Kumari R., R. Kumar, "Review - Recent Advances in MoS₂ and Its Derivatives-Based Two-Dimensional Gas Sensors," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 11(9), 097003, 2022.
- [6]. Joshi K., K. Mistry, B. Tripathi, P. Chandra, S.M. Shinde, M. Kumar, D. Santola, H. Chokshi, P. Gurralla, "MoS₂ Nanostructures for Solar Hydrogen Generation via Membraneless Electrochemical Water Splitting," *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2023.
- [7]. Hu T., R. Zhang, J.P. Li, J.Y. Cao, F. Qiu, "Photodetectors based on two-dimensional MoS₂ and its assembled heterostructures," *Chip*, 1(3), 100017, 2022.
- [8]. Jubu P.R., B. Yusuf, A. Abdulkadir, O.S. Obaseki, K.M. Chahrour, Y. Yusof, H.D. Dehiin, N.S. Akiiga, G.F. Newton, M. Umar, B.T. Terngu, U.F. Onah, A.J. Atsor, "Enhanced photoelectrochemical transient photoresponse properties of molybdenum oxide film deposited on black silicon," *Mater. Sci. Eng. B-Adv. Funct. Solid-State Mater.*, 289, 116260, 2023.
- [9]. Dang T.C., V.T. Dang, T.D. Nguyen, T.H. Truong, M.T. Man, T.T.H. Bui, T.K.C. Tran, D.L. Tran, P.D. Truong, C.K. Nguyen, V.C. Nguyen, D.B. Seo, E.T. Kim, "MoS₂ hydrogen evolution catalysis on p-Si nanorod photocathodes," *Mater. Sci. Semicond. Proc.*, 121, 105308, 2021.
- [10]. Cha E., D.K. Kim, W. Choi, "Advances of 2D MoS₂ for High-Energy Lithium Metal Batteries. Front," *Energy Res.*, 9, 2021.
- [11]. Nguyen T.D., M.T. Man, M.H. Nguyen, D.B. Seo, E.T. Kim, "Effect of few-layer MoS₂ flakes deposited ZnO/FTO nanorods on photoelectrochemical characteristic," *Mater. Res. Express*, 6(8), 085070, 2019.
- [12]. Hassan M.A., M.W. Kim, M.A. Johar, A. Waseem, M.K. Kwon, S.W. Ryu, "Transferred monolayer MoS₂ onto GaN for heterostructure photoanode: Toward stable and efficient photoelectrochemical water splitting," *Sci. Rep.*, 9(1), 20141, 2019.
- [13]. Wang T., Y. Zhang, Y. Liu, J. Li, D. Liu, J. Luo, K. Ge, "Layer-Number-Dependent Exciton Recombination Behaviors of MoS₂ Determined by Fluorescence-Lifetime Imaging Microscopy," *J. Phys. Chem. C*, 122(32), 18651-18658, 2018.
- [14]. He H., J. Lin, W. Fu, X. Wang, H. Wang, Q. Zeng, Q. Gu, Y. Li, C. Yan, B.K. Tay, C. Xue, X. Hu, S.T. Pantelides, W. Zhou, Z. Liu, "MoS₂/TiO₂ Edge-On Heterostructure for Efficient Photocatalytic Hydrogen Evolution," *Adv. Energy Mater.*, 6(14), 1600464, 2016.
- [15]. Li Z., X. Meng, Z. Zhang, "Recent development on MoS₂-based photocatalysis: A review. J. Photochem. Photobiol," *C-Photochem. Rev.*, 35, 39-55, 2018.
- [16]. Xiaoli Z., "A review: the method for synthesis MoS₂ monolayer," *Int. J. Nanomanufacturing*, 10(5-6), 489-499, 2014.
- [17]. Li H., W. Dong, J. Zhang, J. Xi, G. Du, Z. Ji, "MoS₂ nanosheet/ZnO nanowire hybrid nanostructures for photoelectrochemical water splitting," *J. Am. Ceram. Soc.*, 101(9), 3989-3996, 2018.
- [18]. Ji S., Z. Yang, C. Zhang, Z. Liu, W.W. Tjiu, I.Y. Phang, Z. Zhang, J. Pan, T. Liu, "Exfoliated MoS₂ nanosheets as efficient catalysts for electrochemical hydrogen evolution. Electrochim," *Acta*, 109 269-275, 2013.
- [19]. Trung T.N., D.-B. Seo, N.D. Quang, D. Kim, E.T. Kim, "Enhanced photoelectrochemical activity in the heterostructure of vertically aligned few-layer MoS₂ flakes on ZnO," *Electrochim. Acta*, 260, 150-156, 2018.
- [20]. Seo D.B., S. Kim, T.N. Trung, D. Kim, E.T. Kim, "Conformal growth of few-layer MoS₂ flakes on closely-packed TiO₂ nanowires and their enhanced photoelectrochemical reactivity," *J. Alloys Compd.*, 770 686-691, 2019.
- [21]. Mao C.H., C.C. Chung, W.R. Syong, Y.C. Yao, K.Y. Hsiao, M.Y. Lu, M. Hofmann, Y.P. Hsieh, Y.J. Lu, T.J. Yen, "Bifunctional Semimetal as a Plasmonic Resonator and Ohmic Contact for an Ultrasensitive MoS₂ Photodetector," *ACS Photonics*, 2023.
- [22]. Tian X., S. Wang, H. Li, M. Li, T. Chen, X. Xiao, Y. Wang, "Recent advances in MoS₂-based nanomaterial sensors for room-temperature gas detection: a review," *Sens. Diagn.*, 2023.
- [23]. Feng G., A. Wei, Y. Zhao, J. Liu, "Synthesis of flower-like MoS₂ nanosheets microspheres by hydrothermal method," *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 26(10), 8160-8166, 2015.
- [24]. González-Anota D.E., E. Castañeda-Morales, S.P. Paredes-Carrera, A. Manzo-Robledo, "Modulating the HER-overpotential at the interface of nanostructured MoS₂ synthesized via hydrothermal route: An in-situ mass-spectroscopy approach," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2023.
- [25]. Taffelli A., G. Ligorio, L. Pancheri, A. Quaranta, R. Ceccato, A. Chiappini, M.V. Nardi, E.J.W. List-Kratochvil, S. Dirè, "Large area MoS₂ films fabricated via sol-gel used for photodetectors," *Opt. Mater.*, 135, 113257, 2023.
- [26]. Endler I., A. Leonhardt, U. König, H. van den Berg, W. Pitschke, V. Sottke, "Chemical vapour deposition of MoS₂ coatings using the precursors MoCl₅ and H₂S," *Surf. Coat. Technol.*, 120-121, 482-488, 1999.
- [27]. Splendiani A., L. Sun, Y. Zhang, T. Li, J. Kim, C.Y. Chim, G. Galli, F. Wang, "Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂," *Nano Lett.*, 10(4), 1271-1275, 2010.

- [28]. Mak K.F., C. Lee, J. Hone, J. Shan, T.F. Heinz, "Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor," *Phys. Rev. Lett.*, 105(13), 136805, 2010.
- [29]. Zhao Y.F., Z.Y. Yang, Y.X. Zhang, L. Jing, X. Guo, Z. Ke, P. Hu, G. Wang, Y.M. Yan, K.N. Sun, "Cu₂O Decorated with Co-catalyst MoS₂ for Solar Hydrogen Production with Enhanced Efficiency under Visible Light," *J. Phys. Chem. C*, 118(26), 14238-14245, 2014.
- [30]. Chen B., Y. Meng, J. Sha, C. Zhong, W. Hu, N. Zhao, "Preparation of MoS₂/TiO₂ based nanocomposites for photocatalysis and rechargeable batteries: progress, challenges, and perspective," *Nanoscale*, 10(1), 34-68, 2018.
- [31]. Tian N., Z. Li, D. Xu, Y. Li, W. Peng, G. Zhang, F. Zhang, X. Fan, "Utilization of MoS₂ Nanosheets To Enhance the Photocatalytic Activity of ZnO for the Aerobic Oxidation of Benzyl Halides under Visible Light," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 55(32), 8726-8732, 2016.
- [32]. Wu C., M. Shrishla, K.G. Motora, G.Y. Chen, D.H. Kuo, N.S. Gultom, "Highly Efficient MoS₂/Cs₂WO₃ Nanocomposite Hydrogen Gas Sensors," *Front. Mater.*, 9, 831725, 2022.
- [33]. Seok H., M. Kim, J. Cho, E. Kim, S. Son, K.W. Kim, J.K. Kim, P.J. Yoo, M. Kim, H.U. Kim, T. Kim, "Tailoring Polymorphic Heterostructures of MoS₂-WS₂ (1T/1T, 2H/2H) for Efficient Hydrogen Evolution Reaction," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 11(2), 568-577, 2023.
- [34]. Veeralingam S., S. Badhulika, "Ti@MoS₂ incorporated Polypropylene/Nylon fabric-based porous, breathable triboelectric nanogenerator as respiration sensor and ammonia gas sensor applications," *Sens. Actuator B-Chem.*, 380, 133346, 2023.
- [35]. Hu Y.H., J.H. Wang, Y. Chen, J.P. Tang, Z.Y. Wang, Y.J. Yuan, "Solar driven conversion of agricultural biomass to H₂ over few-layer MoS₂ modified ultra-small TiO₂ nanoparticle photocatalysts," *J. Mater. Chem. A*, 2025.
- [36]. Peng K., J. Ye, L. Zuo, Y. Wang, H. Wang, M. Niu, L. Su, L. Zhuang, X. Li, "Heteronanostructures constructed from vertical MoS₂ nanosheets on sepiolite nanofibers boosting electrocatalytic hydrogen evolution," *Appl. Clay Sci.*, 233, 106798, 2023.
- [37]. Jia L., C. Yang, X. Jin, D. Wang, F. Li, "Direct Z-scheme heterojunction Bi/Bi₂S₃/α-MoO₃ photoelectrocatalytic degradation of tetracycline under visible light," *Chemosphere*, 315, 137777, 2023.
- [38]. Polumati G., C.S.R. Kolli, V. Selamneni, M.F. Salazar, A. De Luna Bugallo, P. Sahatiya, "Modulation of Schottky Barrier Height by Nitrogen Doping and Its Influence on Responsivity of Monolayer MoS₂ Photodetector," *Adv. Mater. Interfaces*, 10(9), 2202108, 2023.
- [39]. Huang H., Y. Cui, Q. Li, C. Dun, W. Zhou, W. Huang, L. Chen, C.A. Hewitt, D.L. Carroll, "Metallic 1T phase MoS₂ nanosheets for high-performance thermoelectric energy harvesting," *Nano Energy*, 26, 172-179, 2016.
- [40]. Liu Y., V. Wang, M. Xia, S. Zhang, "First-principles Study on Structural, Thermal, Mechanical and Dynamic Stability of 1'-MoS₂," *J. Phys.: Condens. Matter*, 2016.
- [41]. Toh R.J., Z. Sofer, J. Luxa, D. Sedmidubský, M. Pumera, "3R phase of MoS₂ and WS₂ outperforms the corresponding 2H phase for hydrogen evolution," *Chem. Commun.*, 53(21), 3054-3057, 2017.
- [42]. Kushwaha A., M. Aslam, "Defect controlled water splitting characteristics of gold nanoparticle functionalized ZnO nanowire films," *RSC Adv.*, 4(40), 20955-20963, 2014.
- [43]. Liang P., B. Tai, H. Shu, T. Shen, Q. Dong, "Doping properties of MoS₂/ZnO (0001) heterojunction ruled by interfacial micro-structure: From first principles," *Solid State Commun.*, 204, 67-71, 2015.
- [44]. Tian-you P., L. Hong-jin, Z. Peng, Z. Xiao-hu, "Preparation of ZnO Nanoparticles and Photocatalytic H₂ Production Activity from Different Sacrificial Reagent Solutions," *Chin. J. Chem. Phys.*, 24(4), 464, 2011.
- [45]. Dubale A.A., C.J. Pan, A.G. Tamirat, H.M. Chen, W.N. Su, C.H. Chen, J. Rick, D.W. Ayele, B.A. Aragaw, J.F. Lee, Y.W. Yang, B.J. Hwang, "Heterostructured Cu₂O/CuO decorated with nickel as a highly efficient photocathode for photoelectrochemical water reduction," *J. Mater. Chem. A*, 3(23), 12482-12499, 2015.
- [46]. HistoryofInformation.com, https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=723&utm_source=chatgpt.com. 2024-2025.
- [47]. Antolín E., M.H. Zehender, S.A. Svatek, P. García-Linares, A. Martí. "III-V-on-silicon triple-junction based on the heterojunction bipolar transistor solar cell concept," in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2020.
- [48]. Shockley W., H.J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells," *J. Appl. Phys.*, 32(3), 510-519, 1961.
- [49]. Raza E., Z. Ahmad, "Review on two-terminal and four-terminal crystalline-silicon/perovskite tandem solar cells; progress, challenges, and future perspectives," *Energy Rep.*, 8, 5820-5851, 2022.
- [50]. Peng S., D. Liu, H. Bai, C. Liu, J. Feng, K. An, L. Qiao, K.H. Lo, H. Pan, "Progress on Si-based photoelectrodes for industrial production of green hydrogen by solar-driven water splitting," *EcoEnergy*, 3(1), 25-55, 2025.
- [51]. Douhan R., K. Lozovoy, A. Kokhanenko, H. Deeb, V. Dirko, K. Khomyakova, "Recent Advances in Si-Compatible Nanostructured Photodetectors," *Technology*, 11(1) 17, 2023.
- [52]. Wang X.X., G. Zeng, Q.J. Yu, L. Shen, C.Y. Shi, H.L. Lu, "Photodetectors integrating waveguides and semiconductor materials," *Nanoscale*, 16(11), 5504-5520, 2024.
- [53]. Srinivasan Raman, Ravi Sankar A, Sindhuja M, "Advances in silicon nanowire applications in energy generation, storage, sensing, and electronics: a review," *Nanotechnology*, 34(18), 2023.
- [54]. Bouaziz L., A. Lamouchi, M. Karyaoui, R. Chtourou, "Enhanced Optoelectronic and Electrical Properties of Silicon Nanowires by Electrodeposited ZnO Nanoparticles for Efficient Diode Performance," *Silicon*, 16(18), 6337-6347, 2024.
- [55]. Fonoberov V.A., A.A. Balandin, "Giant Enhancement of the Carrier Mobility in Silicon Nanowires with Diamond Coating," *Nano Lett.*, 6(11), 2442-2446, 2006.
- [56]. Patchett S., M. Khorasaninejad, N. O, S.S. Saini, "Effective index approximation for ordered silicon nanowire arrays," *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.*, 30(2), 306-313, 2013.

- [57]. Chen X., Q. Bi, M. Sajjad, X. Wang, Y. Ren, X. Zhou, W. Xu, Z. Liu, "One-Dimensional Porous Silicon Nanowires with Large Surface Area for Fast Charge Discharge Lithium-Ion Batteries," *Nanomaterials*, 8(5), 2018.
- [58]. Huang W., J. Wu, W. Li, G. Chen, C. Chu, C. Li, Y. Zhu, H. Yang, Y. Chao, "Fabrication of Silicon Nanowires by Metal-Assisted Chemical Etching Combined with Micro-Vibration," *Materials*, 16(15), 5483, 2023.
- [59]. Zha J., H. Roggendorf, "Sol-gel science, the physics and chemistry of sol-gel processing," *Adv. Mater.*, 3(10) 522-522, 1991.
- [60]. Bauer J., F. Fleischer, O. Breitenstein, L. Schubert, P. Werner, U. Gösele, M. Zacharias, "Electrical properties of nominally undoped silicon nanowires grown by molecular-beam epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, 90(1), 2007.
- [61]. Uchida G., K. Masumoto, M. Sakakibara, Y. Ikebe, S. Ono, K. Koga, T. Kozawa, "Single-step fabrication of fibrous Si/Sn composite nanowire anodes by high-pressure He plasma sputtering for high-capacity Li-ion batteries," *Sci. Rep.*, 13(1), 14280, 2023.
- [62]. Anthony C. J., H. Michael L., *Overview of chemical vapour deposition, in: Chemical Vapour Deposition: Precursors, Processes and Applications*. Cambridge, UK, p. 1-39, 2009.
- [63]. Wagner R.S., W.C. Ellis, "Vapor-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth," *Appl. Phys. Lett.*, 4(5), 89-90, 1964.
- [64]. Dwivedi P., S. Das, S. Dhanekar, "Wafer-Scale Synthesized MoS₂/Porous Silicon Nanostructures for Efficient and Selective Ethanol Sensing at Room Temperature," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9(24), 21017-21024, 2017.
- [65]. Nguyen T.D., E.T. Kim, K.A. Dao, "Ag nanoparticle catalyst based on Ga₂O₃/GaAs semiconductor nanowire growth by VLS method," *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.*, 26(11), 8747-8752, 2015.
- [66]. Seo D.B., S. Kim, T.N. Trung, D. Kim, E.T. Kim, "Conformal growth of few-layer MoS₂ flakes on closely-packed TiO₂ nanowires and their enhanced photoelectrochemical reactivity," *J. Alloy. Compd.*, 770, 686-691, 2019.
- [67]. Bian C., B. Zhang, Z. Zhang, H. Chen, D. Zhang, S. Wang, J. Ye, L. He, J. Jie, X. Zhang, "Wafer-Scale Fabrication of Silicon Nanocones via Controlling Catalyst Evolution in All-Wet Metal-Assisted Chemical Etching," *ACS Omega*, 7(2), 2234-2243, 2022.
- [68]. Gondek C., M. Lippold, I. Röver, K. Bohmhammel, E. Kroke, "Etching Silicon with HF-H₂O₂-Based Mixtures: Reactivity Studies and Surface Investigations," *J. Phys. Chem. C*, 118(4), 2044-2051, 2014.
- [69]. Rajkumar K., R. Pandian, A. Sankarakumar, R.T. Rajendra Kumar, "Engineering Silicon to Porous Silicon and Silicon Nanowires by Metal-Assisted Chemical Etching: Role of Ag Size and Electron-Scavenging Rate on Morphology Control and Mechanism," *ACS Omega*, 2(8), 4540-4547, 2017.
- [70]. Hien B.T.T., T.T.K. Chi, N.T. Thanh, M.M. Tan, N.T. Dai, N.M. Hung, T.D. Lam, V.T. Bich, "Photoelectrochemical characteristics of hybrid structure between ZnO nanorods and MoS₂ monolayers," *HueUni-JNS*, 129(1C), 15-22, 2020.
- [71]. Li H., Q. Zhang, C.C.R. Yap, B.K. Tay, T.H.T. Edwin, A. Olivier, D. Baillargeat, "From Bulk to Monolayer MoS₂: Evolution of Raman Scattering," *Adv. Funct. Mater.*, 22(7), 1385-1390, 2012.
- [72]. Frey G.L., R. Tenne, M.J. Matthews, M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, "Raman and resonance Raman investigation of MoS₂ nanoparticles," *Phys. Rev. B*, 60(4), 2883-2892, 1999.
- [73]. Deshpande M.P., S.V. Bhatt, V. Sathe, B.H. Soni, N. Garg, S.H. Chaki, "Raman scattering in 2H-MoS₂ single crystal," *AIP Conf. Proc.*, 1512(1), 808-809, 2013.
- [74]. Bera A., D.V.S. Muthu, A.K. Sood, "Enhanced Raman and photoluminescence response in monolayer MoS₂ due to laser healing of defects," *Journal of Raman Spectroscopy*, 49(1), 100-105, 2018.
- [75]. Livneh T., J.E. Spanier, "A comprehensive multiphonon spectral analysis in MoS₂," *2D Mater.*, 2(3), 035003, 2015.
- [76]. Iatsunskiy I., S. Jurga, V. Smytyna, M. Pavlenko, V. Myndrul, A. Zaleska, "Raman spectroscopy of nanostructured silicon fabricated by metal-assisted chemical etching," *SPIE Photonics Europe*, 9132, 2014.
- [77]. Roisin N., M.S. Colla, J.P. Raskin, D. Flandre, "Raman strain-shift measurements and prediction from first-principles in highly strained silicon," *J. Mater. Sci.-Mater. Electron.*, 34(5), 373, 2023.
- [78]. Mondal K.G., P.C. Jana, S. Saha, "Optical and structural properties of 2D transition metal dichalcogenides semiconductor MoS₂," *Bull. Mater. Sci.*, 46(1), 15, 2023.
- [79]. Ahmad R., R. Srivastava, S. Yadav, D. Singh, G. Gupta, S. Chand, S. Sapra, "Functionalized Molybdenum Disulfide Nanosheets for 0D-2D Hybrid Nanostructures: Photoinduced Charge Transfer and Enhanced Photoresponse," *J. Phys. Chem. Lett.*, 8(8), 1729-1738, 2017.
- [80]. Mak K.F., C. Lee, J. Hone, J. Shan, T.F. Heinz, "Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor," *Physical Review Letters*, 105(13), 136805, 2010.
- [81]. Mouri S., Y. Miyauchi, K. Matsuda, "Tunable Photoluminescence of Monolayer MoS₂ via Chemical Doping," *Nano Lett.*, 13(12), 5944-5948, 2013.
- [82]. Song S.H., B.H. Kim, D.H. Choe, J. Kim, D.C. Kim, D.J. Lee, J.M. Kim, K.J. Chang, S. Jeon, "Bandgap Widening of Phase Quilted, 2D MoS₂ by Oxidative Intercalation," *Adv. Mater.*, 27(20), 3152-3158, 2015.
- [83]. Park J.W., H.S. So, S. Kim, S.H. Choi, H. Lee, J. Lee, C. Lee, Y. Kim, "Optical properties of large-area ultrathin MoS₂ films: Evolution from a single layer to multilayers," *J. Appl. Phys.*, 116(18), 183509, 2014.

AUTHORS INFORMATION

Tran Huu Toan¹, Nguyen Cao Khang², Nguyen Tien Dai^{3,4}

¹School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

²Center for Nano Science and Technology, Hanoi National University of Education, Vietnam

³Institute of Theoretical and Applied Research, Duy Tan University, Vietnam

⁴Faculty of Natural Sciences, Duy Tan University, Vietnam