Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption
Tạp chí xúc tác và hấp phụ Việt Nam

http://chemeng.hust.edu.vn/jca/

Ảnh hưởng của các tham số tổng hợp lên sự hình thành MoS_2 chất lượng cao trên diện tích lớp bằng phương pháp lắng đọng pha hơi hoá học

Effect of CVD parameters on large area growth of highly crystalline MoS_2 thin flakes

Nguyễn Văn Tú[1,2*], Phạm Văn Trình[2], Nguyễn Văn Chúc[2], Vũ Đình Lãm[1], Phan Ngọc Minh[1]

[1]Học Viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội
[2]Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội
**Email: tunv@ims.vast.ac.vn*

ARTICLE INFO

Received: 25/5/2021
Accepted: 25/7/2021
Published: 15/10/2021

Keywords:

MoS_2, chemical vapor deposition, field effect transistor.

ABSTRACT

In this study, we presented a report on effect of growth parameters (seeding promoter, growth temperature, Ar gas flow rate) on the formation of MoS_2 monolayer. The morphology and structure of as-grown MoS_2 were investigated in detail by optical microscopy, atomic force microscopy, Raman and photoluminesence spectroscopy techniques. The results showed that a highly reproducible growth of dense MoS_2 triangular flakes with the size of ~35 µm over large area (~1.5x1 cm^2) can be obtained by using a optimized parameters. The MoS_2 field effect transistors based on the as-grown MoS_2 exhibited carrier mobility of 0.5–2 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ and On/Off ratio of ~10^4. Our results can provide a useful information to realize large area, high quality of MoS_2 for real electronic applications.

Giới thiệu chung

Trong những năm gần đây, MoS_2, một vật liệu đặc trưng của họ vật liệu 2 chiều của kim loại chuyển tiếp (Mo, W) và chalcogen (S, Se, Te), thu hút được rất nhiều sự quan tâm của cộng đồng khoa học trên toàn thế giới do các đặc tính vật lý và hoá học hấp dẫn. Những đặc tính này làm cho MoS_2 trở thành một vật liệu tiềm năng trong các ứng dụng như transistor hiệu ứng trường [1](1), đầu dò quang học [2](2), cảm biến khí [3](3), các thiết bị điện tử dẻo [4](4). Do đó, việc chế tạo màng MoS_2 có diện tích lớn và chất lượng cao là một yêu cầu cấp thiết cho các ứng dụng thực tế. Gần đây, có nhiều phương pháp được thực hiện để tổng hợp màng MoS_2 như bóc tách cơ học [5](5), bóc tách pha lỏng [6](6), lắng đọng lớp nguyên tử [7](7), lắng đọng pha hơi hoá học (CVD) [8](8). Tuy nhiên, các phương pháp bóc tách như bóc tách cơ học, bóc tách pha lỏng và tổng hợp thuỷ nhiệt tiêu tốn nhiều thời gian, hiệu suất thấp, kích thước các tấm MoS_2 nhỏ với độ dày và hình thái học không thể điều khiển được. Ngược lại, phương pháp CVD là phương pháp phổ biến, đơn giản để tổng hợp màng MoS_2 với diện tích lớn, đồng đều và có chất lượng tinh thể cao do những lợi thế của nó như độ lặp lại cao, giá thành thấp. Trong kỹ thuật CVD, bột MoO_3 và lưu huỳnh là nguồn tiền

https://doi.org/10.51316/jca.2021.128

chất được sử dụng phổ biến để tổng hợp MoS_2 do chúng có giá thành rẻ, dễ dàng thiết kế thí nghiệm. Tuy nhiên, khác với tổng hợp graphene, quá trình hình thành MoS_2 diễn ra phức tạp và phụ thuộc vào rất nhiều tham số chế tạo như nhiệt độ, thời gian, lưu lượng khí, áp suất, loại đế. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung nghiên cứu một cách hệ thống ảnh hưởng của bộ tham số gồm nhiệt độ, chất tạo mầm PTAS, lưu lượng khí lên mật độ, kích thước, số lớp của các tấm MoS_2. Các phép đo ảnh hiển vi quang học, ảnh lực nguyên tử, phổ tán xạ Raman và phổ quang phát quang được sử dụng để nghiên cứu hình dạng, số lớp và chất lượng của MoS_2 trên đế SiO_2/Si. Bên cạnh đó, tính chất điện của vật liệu MoS_2 cũng được chỉ ra trong nghiên cứu này. Từ những nghiên cứu đó, chúng tôi đưa ra được một bộ tham số tối ưu để tổng hợp các tấm, màng mỏng MoS_2 với diện tích lớn, chất lượng và độ lặp lại cao phù hợp cho các ứng dụng trong tương lai.

Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

Hoá chất

Bột MoO_3 (độ sạch 99.95%) và bột S (độ sạch 99.98%) được cung cấp bởi Sigma-Aldrich (Mỹ). Chất tạo mầm PTAS ($C_{24}H_8K_4O_8$, độ tinh khiết 99.997%) được mua từ 2dsemiconductors.com (Mỹ). Đế Si (loại n, điện trở <0.005 Ω·cm, được phủ một lớp SiO_2 (300 nm)) cung cấp bởi Silicon Technology Corp (Nhật Bản).

Chuẩn bị đế

Đế SiO_2/Si với kích thước 2x2 cm^2 được cắt từ các phiến SiO_2/Si. Sau đó, đế được làm sạch bằng cách ngâm trong dung dịch piranha trong 5 giờ ở nhiệt độ 70 ^{0}C để loại bỏ hết các tạp chất trên bề mặt. Tiếp đó, đế được rửa sạch bằng nước khử ion với sự hỗ trợ của sóng siêu âm và được làm khô bằng khí N_2 trước khi được sử dụng để CVD.

Quá trình tổng hợp MoS_2

MoS_2 được lắng đọng trên đế SiO_2/Si bằng phương pháp CVD nhiệt ở áp suất khí quyển (760 Torr). Sơ đồ bố trí thí nghiệm và qui trình tổng hợp được chỉ ra trong Hình 1a &1b. Cụ thể, một đế sạch SiO_2/Si với chất tạo mầm PTAS được phủ trên bề mặt và một đế SiO_2/Si khác được sử dụng làm đế mọc được đặt gần nhau và mặt được đánh bóng hướng vào bột MoO_3 được đặt dưới thuyền sứ. Sau đó, thuyền được đẩy vào tâm lò nhiệt. Thuyền sứ thứ hai chứ 500 mg lưu huỳnh được đặt ở trước so với thuyền chứa đế mọc (gần đầu cấp khí). Nhiệt độ hoá hơi của lưu huỳnh được điều khiển độc lập bằng việc sử dụng một bộ gia nhiệt. Trước khi nâng nhiệt, toàn bộ hệ thống CVD được làm sạch bằng cách thổi một dòng khí Ar với lưu lượng 300 sccm trong thời gian 30 phút để loại bỏ tạp chất trong đường ống dẫn khí cũng như ống phản ứng. Sau đó, lò nhiệt và bộ gia nhiệt cho lưu huỳnh được bật để đạt đến nhiệt độ CVD và 200 ^{0}C tương ứng. Sau 10 phút mọc, toàn bộ hệ thống được tắt và hạ nhiệt về nhiệt độ phòng.

Chế tạo linh kiện

Quá trình chế tạo linh kiện MoS_2 được mô tả như sau: Đầu tiên, các khuôn mẫu điện cực được hình thành trên đế chứa vật liệu MoS_2 thông qua quá trình quang khắc sử dụng cản quang 2 lớp (LOR 3A và GXR 601). Tiếp đó, kim loại Ti (1.5 nm)/Au (28.5 nm) được lắng đọng sử dụng phương pháp bốc bay nhiệt. Tiếp theo, quá trình lift-off được thực hiện trong dung môi N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) để hình thành điện cực. Sau đó, kênh dẫn MoS_2 giữa 2 điện cực được hình thành thông qua quá trình quang khắc lần 2 và theo sau bởi quá trình ăn mòn khô sử dụng khí O_2.

Các phương pháp nghiên cứu

Hình thái học của màng được đánh giá nhanh thông qua phép đo ảnh hiên vi quang học. Phép đo AFM được sử dụng để quan sát rõ nét hình thái học bề mặt cũng như độ dày của lớp màng. Cấu trúc và chất lượng của mẫu được đánh quá thông qua phổ Raman và phổ quang phát quang. Đặc tính của linh kiện MoS_2 được đánh giá sử dụng bộ phân tích tham số vật liệu bán dẫn (4200-SCS của hãng Keithley).

Kết quả và thảo luận

Sự hình thành và chất lượng của màng MoS_2 trên đế rất nhạy với các tham số CVD. Do đó, trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số như chất hoạt hoá, nhiệt độ mọc, lưu lượng khí, và lượng bột MoO_3 lên sự lắng đọng màng MoS_2 để tìm ra điều kiện tối ưu để đạt được mẫu MoS_2 với diện tích lớn, chất lượng và độ lặp lại cao.

Ảnh hưởng của PTAS lên quá trình tổng hợp màng MoS_2

Để nghiên cứu ảnh hưởng của chất tạo mầm lên sự lắng đọng MoS_2, chúng tôi đã tiến hành tổng hợp MoS_2 với việc sử dụng và không sử dụng PTAS dưới các điều kiện nhiệt độ 650 ^{0}C, thời gian 10 phút, lưu lượng khí 100 sccm, lượng bột MoO_3 là 5 mg. Hình 1c, 1d chỉ ra ảnh quang học của mẫu có sử dụng và không sử dụng PTAS tương ứng. Bằng việc sử dụng PTAS, chúng tôi quan sát thấy rất nhiều tấm MoS_2 hình dạng tam giác ở một diện tích lớn (~1.5x1 cm^2, Hình nhỏ trong Hình 1d) trong khi những tấm này không được quan sát thấy trên đế không sử dụng PTAS. AFM cũng cũng được sử dụng để quan sát chi tiết hơn hình thái bề mặt cũng như độ dày của các tấm MoS_2. Mẫu có sử dụng PTAS cho các tấm MoS_2 hình tam giác có kích thước khoảng 35 µm và độ dày 0.86 nm, tương ứng với độ dày của đơn lớp (Hình 1f) trong khi mẫu không sử dụng PTAS cho các tấm MoS_2 có kích thước vài chục nanômét với hình dạng không theo quy tắc nào (Hình 1e). Thêm vào đó, người ta cũng chỉ ra rằng phổ tán xạ Raman cũng là một công cụ hữu ích để ước lượng độ dày của các tấm MoS_2. Phổ Raman của mẫu tổng hợp sử dụng và không sử dụng PTAS được chỉ ra trong Hình 1g. Hai đỉnh Raman đặc trưng của các tấm tinh thể MoS_2 là E_{2g} và A_{1g} tương ứng với sự dao động của nguyên tử Mo, S trong mặt phẳng và vuông góc với mặt phẳng được quan sát thấy. Điều thú vị là ta có thể ước lượng được số lớp của MoS_2 dựa vào khoảng cách giữa 2 đỉnh E_{2g} và A_{1g}. Mẫu sử dụng PTAS (đường màu đỏ) có khoảng cách giữa 2 đỉnh là 20.7 cm^{-1} phù hợp với đơn lớp MoS_2 [9], mẫu không sử dụng PTAS chỉ ra các tấm MoS_2 có độ dày vài lớp với khoảng cách 2 đỉnh là 22.9 cm^{-1}. Bên cạnh đó, phổ quang phát quang của mẫu MoS_2 được tổng hợp sử dụng PTAS chỉ xuất hiện một đỉnh duy nhất ở ~ 662 nm với cường độ mạnh (đường màu đỏ Hình 1h), tương ứng sự phát quang của đơn lớp MoS_2 với vùng cấm thẳng, trong khi phổ của mẫu không sử dụng PTAS thể hiện một sự dịch chuyển về vùng đỏ tới vị trí ~ 675 nm và cùng với một cường độ nhỏ, tương ứng với vùng cấm của vài lớp MoS_2 [10]. Từ kết quả trên, thấy rằng việc sử dụng PTAS trong tổng hợp MoS_2 cho phép hình thành đơn lớp các tấm MoS_2 kích thước lớn một cách dễ dàng.

Để hiểu được vai trò của chất hoạt hoá PTAS, chúng ta cần hiểu về cơ chế tạo mầm và cơ chế mọc của MoS_2. Cụ thể, hai cơ chế đã đề xuất để giải thích cho sự hình thành màng MoS_2: (1) MoO_3 bị khử bởi hơi lưu huỳnh để hình thành các phân tử dễ bay hơi MoO_{3-x}. Các phân tử này được hấp phụ một cách ngẫu nhiên trên bề mặt đế thông qua dòng khí mang. Khi được hấp thụ trên bề mặt, các phần tử này tiếp tục bị khử để hình thành mầm MoS_2 cho quá trình mọc các tấm MoS_2 theo phương trình phản ứng:

$$MoO_3 + \frac{x}{2}S = MoO_{3-x} + \frac{x}{2}SO_2 \quad (1)$$

$$MoO_{3-x} + \frac{7-x}{2}S = MoS_2 + \frac{3-x}{2}SO_2 \quad (2)$$

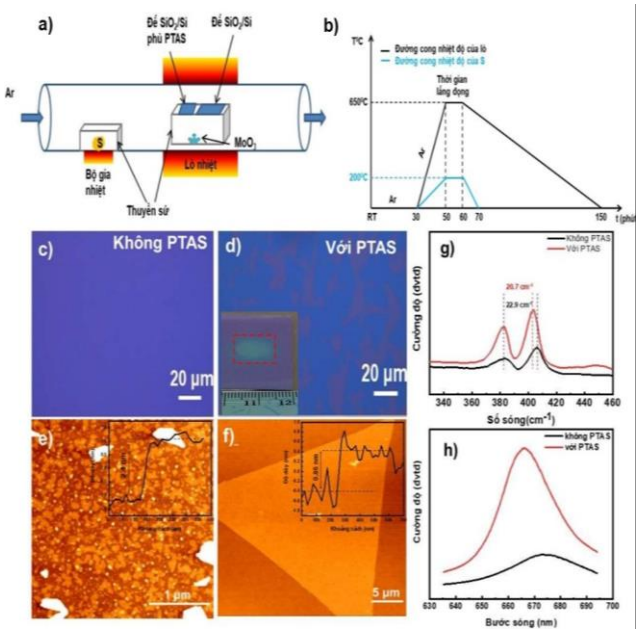
(2) MoO_{3-x} sẽ phản ứng ở pha khí để hình thành mầm và lắng đọng lên đế. Trong cả 2 trường hợp, sự hình thành mầm thể hiện một vai trò rất quan trọng trong quá trình hình thành các tấm MoS_2. Theo lý thuyết mầm, sự hình thành mầm đồng nhất yêu cầu một năng lượng tự do lớn trong khi sự hình thành mầm hỗn tạp diễn ra ở vị trí của mầm khác và cần một năng lượng tụ do nhỏ hơn. Năng lượng tự do yêu cầu cho sự hình thành mầm không đồng nhất được biểu hiện qua công thức sau:

$$\Delta G_{Hetero} = \Delta G_{Homo} f(\theta)$$

trong đó $f(\theta)$ là hệ số dính ướt và

$$f(\theta) = 1/2 - 3/4\cos\theta + 1/4\cos\theta, \Delta G_{Homo}$$

là năng lượng tự do cần cho sự hình thành mầm đồng nhất. θ là góc tiếp xúc giữa vị trí mầm sẵn có với vật liệu cần được lắng đọng. Khi góc tiếp xúc là $\theta = 180^o, f(\theta) = 1$, chỉ ra sự không dính ướt trên bề mặt dẫn đến mầm đồng nhất. Khi $\theta = 0^o, f(\theta) = 0$, chỉ ra sự dính ướt hoàn toàn của bề mặt, dẫn đến sự hình thành mầm trên bề mặt một cách dễ dàng.



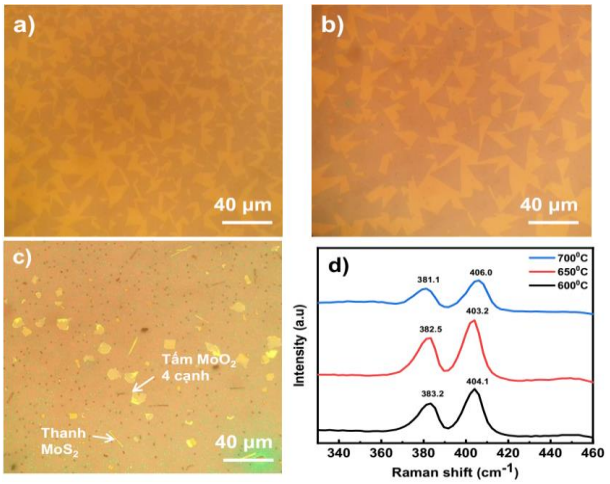
Hình 1: a) Sơ đồ bố trí thí nghiệm. b) Qui trình tổng hợp MoS_2. Ảnh quang của mẫu MoS_2 được mọc c) không sử dụng, d) sử dụng PTAS. (e, f) và (g, h) là ảnh AFM và Phổ Raman, PL của các mẫu được chỉ ra trong (c, d).

https://doi.org/10.51316/jca.2021.128

Bằng việc lắng đọng PTAS trên bề mặt, chúng ta có thể cung cấp các mầm cho sự hình thành MoS_2. Hơn nữa, sự xuất hiện của PTAS có thể làm tăng lực bám dính về mặt của MoS_2, thuận lợi cho việc mọc lớp tiếp lớp.

Ảnh hưởng của nhiệt độ

Nhiệt độ là một tham số rất quan trọng tác động đến sự hoá hơi của bột MoO_3 cũng như phản ứng để hình thành MoS_2. Để nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ lên quá trình tạo màng MoS_2, chúng tôi tiến hành tổng hợp MoS_2 ở các nhiệt độ khác nhau trong khoảng từ 600-700 ^{0}C khi các tham số khác được cố định (khối lượng bột MoO_3 5mg, thời gian 10 phút và lưu lượng khí Ar 100 sccm). Hình 2 chỉ ra ảnh hiển vi quang học của các mẫu MoS_2 tổng hợp ở các nhiệt độ khác nhau. Rõ ràng, mật độ cao các tấm MoS_2 hình tam giác với kích thước trung bình khoảng 20 µm có thể đạt được ở nhiệt độ tương đối thấp 600 ^{0}C. Khi nhiệt độ tăng lên 650 ^{0}C, các tấm MoS_2 vẫn duy trì hình dạng tam giác nhưng kích thước của chúng tăng lên 35 µm (Hình 2b). Tuy nhiên khi nhiệt độ tiếp tục tăng lên 700 ^{0}C, chúng ta thu được các màng dày với nhiều chấm màu đen kích thước nano, các thanh MoS_2 và các tấm MoO_2 trên bề mặt (Hình 2c) [11].

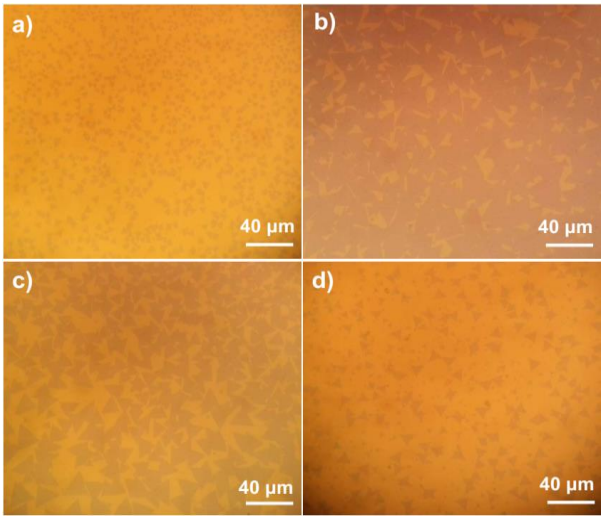


Hình 2: Ảnh hiển vi quang học của mẫu MoS_2 tổng hợp ở các nhiệt độ khác nhau a) 600 ^{0}C, b) 650 ^{0}C, c) 700 ^{0}C và d) Phổ Raman của các mẫu được chỉ ra trong (a-c).

Hình 2d là phổ Raman của MoS_2 được lắng đọng trên đế SiO_2/ Si ở các nhiệt độ khác nhau. Khoảng cách giữa 2 đỉnh được tính toán là 20.7 cm^{-1} và 20.9 cm^{-1} cho mẫu được tổng hợp ở 600 ^{0}C và 650 ^{0}C tương ứng. Các giá trị này phù hợp với đơn lớp MoS_2. Ở 700 ^{0}C, khoảng cách giữa 2 đỉnh tăng lên 24.9 cm^{-1} tương ứng với đa lớp MoS_2. Những kết quả này có thể được giải thích là do một lượng lớn MoO_{3-x} được tạo ra và mang vào vùng phản ứng ở nhiệt độ cao, dẫn đến phản ứng giữa MoO_{3-x} và S diễn ra rất nhanh trong môi trường thiếu lưu huỳnh mà có thể tạo ra lớp màng dày MoS_2 và các sản phẩm phụ như được đề cấp ở trên [11]. Từ kết quả tổng hợp trên, chúng ta có thể thấy rằng đơn lớp MoS_2 có thể hình thành ở nhiệt độ tương đối thấp là 600-650 ^{0}C. Tuy nhiên, kích thước và mật độ đơn lớp MoS_2 lớn hơn khi tổng hợp ở nhiệt độ 650 ^{0}C. Do đó, 650 ^{0}C là nhiệt độ phù hợp để tổng hợp các tấm đơn lớp MoS_2 với kích thước lớn (~ 35µm).

Ảnh hưởng của lưu lượng khí

Hình 3 là ảnh quang học của MoS_2 được tổng hợp với lưu lượng khí Ar khác nhau. Khi lưu lượng khí thấp (50 sccm) thì mật độ các tấm MoS_2 là rất thấp, đồng thời kích thước của các tấm khá nhỏ ~5 µm (Hình 3a). Bằng việc tăng lưu lượng khí lên 100 sccm, mật độ và kích thước các tấm MoS_2 cũng tăng lên đáng kể (~35 µm). Đặc biệt, các tấm MoS_2 này có khuynh hướng kết hợp với nhau để hình thành màng (hình 3b). Tuy nhiên, khi lưu lượng khí tăng lên 150 sccm thì có hiện tượng giảm độ bao phủ cũng như kích thước của các tấm MoS_2 (Hình 3c).

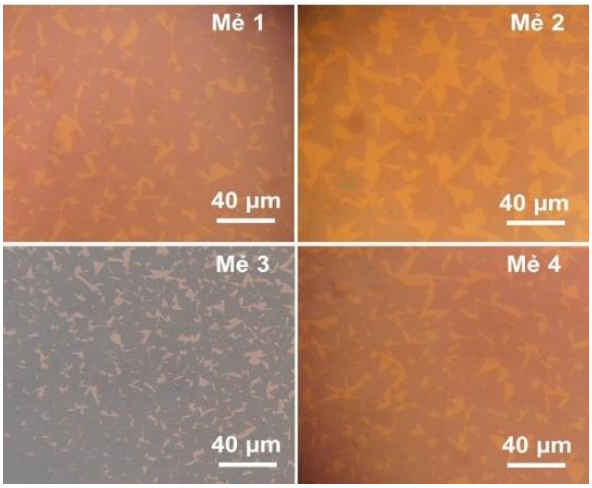


Hình 3: Ảnh hiển vi quang học của các mẫu MoS_2 được tổng hợp với các lưu lượng khí Ar khác nhau a) 50 sccm, b) 100 sccm, c) 150 sccm, d) 250 sccm.

Cuối cùng, khi MoS_2 mọc với lưu lượng khí 200 sccm, mật độ các tấm MoS_2 giảm đáng kể, thậm trí mật độ thấp hơn mật độ MoS_2 được tổng hợp với lưu lượng khí 50 sccm. Kết quả này có thể được giải thích rằng khi lưu lượng Ar 50 sccm là khá thấp khó mang đủ lượng MoO_{3-x} vào bề mặt của đế, còn lưu lượng khí Ar lớn có thể mang khỏi bề mặt đế một lượng lớn MoO_{3-}

https://doi.org/10.51316/jca.2021.128

x. Kết quả là mật độ và kích thước các tấm MoS_2 sẽ giảm khi được tổng hợp với lưu lượng khí thấp hoặc lưu lượng khí quá cao. Do đó, trong thực nghiệm của chúng tôi, lưu lượng khí Ar (100 sccm) là tối ưu để đạt được mật độ cao và kích thước lớn các tấm MoS_2.



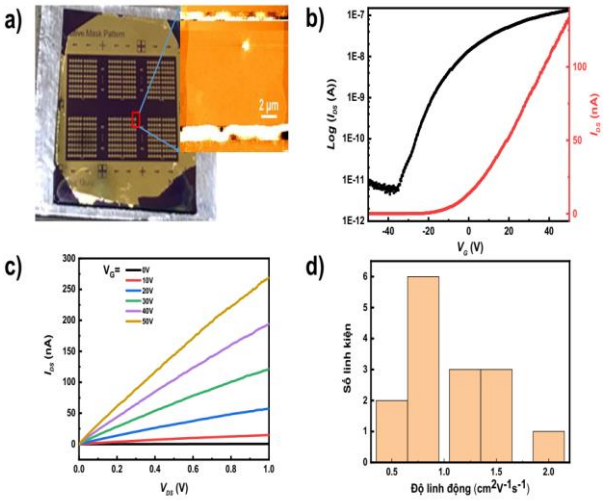
Hình 4: *Độ lặp lại của qui trình tổng hợp MoS_2.*

Từ các kết quả đã khảo sát ở trên, chúng tôi tiến hành đánh giá độ lặp lại của quá trình tổng hợp MoS_2. Hình 4 là ảnh quang học MoS_2 trên đế SiO_2/Si ở 4 lần khác nhau sử dụng cùng một bộ tham số gồm nhiệt độ mọc 650 ^{0}C, lưu lượng khí Ar 100 sccm, sử dụng PTAS. Kết quả chỉ ra rằng độ lặp lại của quá trình tổng hợp MoS_2 là tương đối cao.

Đặc tính điện của linh kiện MoS_2

Sau khi nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số CVD lên quá trình hình thành các tấm MoS_2 chúng tôi tiến hành chế tạo và nghiên cứu đặc tính điện của linh kiện MoS_2. Hình 5a là ảnh chụp của mảng gồm một ma trận linh kiện với kênh dẫn MoS_2 được tạo thành sau quá trình quang khắc lần 2 và theo sau bởi quá trình ăn mòn khô (ảnh nhỏ trong Hình 5a). Hình 5b chỉ ra đặc tính truyền hạt tải điện ở thang tuyến tính (đường cong màu đen) và thang logarit (đường cong màu đỏ). Linh kiện MoS_2 chỉ ra đặc tính của bán dẫn loại n với tỉ lệ mở/đóng là 10^4. Thêm vào đó, độ linh động điện tử của hạt tải điện của linh kiện được tính toán từ công thức

$\mu = (dI_{ds} / dV_{bg}) \times [L / (WC_{ox}V_{ds})]$, trong đó L là chiều dài kênh dẫn (15 µm) và W là độ rộng kênh dẫn (10 µm), C_{ox} =11.5 nFcm^{-2} (300 nm SiO_2) là điện dung giữa kênh dẫn và điện cực cổng trên một đơn vị diện tích, dI_{ds} / dV_{bg} là độ dốc được xác định từ đường cong dịch chuyển của hạt mang điện trong vùng tuyến tính. Độ linh động của hạt mang điện được tính toán là ~0.8 cm^{2}V^{-1}s^{-1} mà tương đương với giá trị đã được báo cáo trên các linh kiện FET được chế tạo bằng CVD [12]. Đặc tính đầu ra được đo ở điện thế cực cổng trong dải từ 0V đến 50V, mà thể hiện một sự phụ thuộc mạnh vào điện thế cực cổng như được chỉ ra trong hình 5c. Chúng tôi cũng thể hiện biểu đồ về độ linh động của các hạt tải từ một nhóm 15 linh kiện được đo ngẫu nhiên từ ma trận linh kiện được chế tạo (Hình 5d) mà chỉ ra rằng độ linh động hạt tải của các linh kiện MoS_2 trong dải từ 0.5 đến 2 cm^{2}V^{-1}s^{-1}



Hình 5: a) Ảnh chụp của các linh kiện MoS_2 sau khi chế tạo. b) Đặc tính truyền dẫn hạt tải của linh kiện MoS_2 ở thang tuyến tính (đường cong màu đỏ) và tháng logarit (đường cong màu đen) (V_{DS} = 0.5V). c) Đặc tính đầu ra của linh kiện với các điện cực cổng khác nhau. d) Biểu đồ về độ linh động của các hạt tải từ một nhóm 15 linh kiện được lấy ngẫu nhiên từ các linh kiện được chế tạo trong Hình 5a.

Kết luận

Một bộ tham số CVD gồm nhiệt độ CVD 650 ^{0}C, lưu lượng khí Ar 100 sccm, sử dụng chất tạo mầm PTAS cho quá trình tổng hợp vật liệu MoS_2 đã được nghiên cứu và tìm ra. Thông qua việc sử dụng bộ tham số này, các mẫu MoS_2 được tổng hợp có mật độ cao, kích thước diện tích lớn và có độ lặp lại cao. Một lượng lớn linh kiện có thể được chế tạo sử dụng mẫu MoS_2 trên đế SiO_2/Si có thể đạt được bằng công nghệ quang khắc. Kết qua đo ngẫu nhiên 15 linh kiện cho thấy các linh kiện thể hiện bán dẫn loại n với độ linh động tương đối cao từ 0.5 đến 2 cm^{2}V^{-1}s^{-1}. Kết quả này mở ra một tiềm năng ứng dụng vật liệu MoS_2 trong lĩnh vực chế tạo linh kiện điện tử.

https://doi.org/10.51316/jca.2021.128

Lời cảm ơn

Tập thể tác giả xin cảm ơn sự hỗ trợ tài chính từ Học Viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam với mã số GUST.STS.ĐT2020-KHVL01.

Tài liệu tham khảo

1. B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti, A. Kis, Nat. Nanotechnol. 6(3) (2011) 147-150. http://doi.org/10.1038/nnano.2010.279.
2. O. Lopez-Sanchez, D. Lembke, M. Kayci, A. Radenovic, A. Kis, Nat. Nanotechnol. 8(7) (2013) 497-501. http://doi.org/10.1038/nnano.2013.100.
3. T. Pham, G. Li, E. Bekyarova, M.E. Itkis, A. Mulchandani, ACS Nano 13(3) (2019) 3196-3205 http://doi.org/10.1021/acsnano.8b08778.
4. E. Singh, P. Singh, K.S. Kim, G.Y. Yeom, H.S. Nalwa, ACS Appl. Mater. Interfaces 11(12) (2019) 11061-11105 http://doi.org/10.1021/acsami.8b19859.
5. S. Bertolazzi, J. Brivio, A. Kis, ACS Nano 5(12) (2011) 9703-9709. http://doi.org/10.1021/nn203879f.
6. J.N. Coleman, M. Lotya, A. O'Neill, S.D. Bergin, P.J. King, U. Khan, K. Young, A. Gaucher, S. De, R.J. Smith, I.V. Shvets, S.K. Arora, G. Stanton, H.-Y. Kim, K. Lee, G.T. Kim, G.S. Duesberg, T. Hallam, J.J. Boland, J.J. Wang, J.F. Donegan, J.C. Grunlan, G. Moriarty, A. Shmeliov, R.J. Nicholls, J.M. Perkins, E.M. Grieveson, K. Theuwissen, D.W. McComb, P.D. Nellist, V. Nicolosi, Science 331(6017) (2011) 568-571. http://doi.org/10.1126/science.1194975.
7. H. Liu, L. Chen, H. Zhu, Q.-Q. Sun, S.-J. Ding, P. Zhou, D.W. Zhang, Nano Res. 13(6) (2020) 1644-1650. http://doi.org/10.1007/s12274-020-2787-8.
8. D. Dumcenco, D. Ovchinnikov, K. Marinov, P. Lazić, M. Gibertini, N. Marzari, O.L. Sanchez, Y.-C. Kung, D. Krasnozhon, M.-W. Chen, S. Bertolazzi, P. Gillet, A. Fontcuberta i Morral, A. Radenovic, A. Kis, ACS Nano 9(4) (2015) 4611-4620. http://doi.org/10.1021/acsnano.5b01281.
9. Y. Zhan, Z. Liu, S. Najmaei, P.M. Ajayan, J. Lou, Small 8(7) (2012) 966-971. http://doi.org/10.1002/smll.201102654.
10. R. Laishram, S. Praveen, M. Guisan, P. Garg, J.S. Rawat, C. Prakash, Integr. Ferroelectr 194(1) (2018) 16-20. http://doi.org/10.1080/10584587.2018.1514889.
11. R. Guan, J. Duan, A. Yuan, Z. Wang, S. Yang, L. Han, B. Zhang, D. Li, B. Luo, CrystEngComm 23(1) (2021) 146-152. http://doi.org/10.1039/D0CE01354D.
12. Y.-C. Lin, W. Zhang, J.-K. Huang, K.-K. Liu, Y.-H. Lee, C.-T. Liang, C.-W. Chu, L.-J. Li, Nanoscale 4(20) (2012) 6637-6641. http://doi.org/10.1039/C2NR31833D.