

DIODE CỘNG HƯỞNG ĐƯỜNG HẦM LÀM TỪ VẬT LIỆU LỚP NGUYÊN TỬ MoS₂

RESONANT TUNNELING DIODE MADE UP OF ATOMIC-LAYERED MoS₂ MATERIALS

Nguyễn Linh Nam

Trường Cao đẳng Công nghệ, Đại học Đà Nẵng; nlnam911@dct.udn.vn

Tóm tắt - Vật liệu cấu trúc lớp hai chiều molybdenum disulfide (MoS₂) thu hút sự chú ý và nghiên cứu rất nhiều gần đây bởi đặc tính đặc biệt của về độ rộng vùng cấm trực tiếp và có tiềm năng ứng dụng rất lớn trong các thiết bị điện tử và quang điện tử. Trong nghiên cứu này, chúng tôi chế tạo và đo đạc khảo sát một diode cộng hưởng đường hầm làm từ vật liệu lớp nguyên tử MoS₂ dựa trên linh kiện cấu trúc lỗ nano. Những màng mỏng có cấu trúc tinh thể cao MoS₂ được tổng hợp và được đặt trên đỉnh của lỗ nano. Sau đó, kim loại nhôm được cho bốc hơi bám vào hai mặt của lớp màng MoS₂ này để tạo thành các điện cực cho việc đo và khảo sát đặc tính dẫn điện. Đặc tính dòng - áp của linh kiện diode thể hiện điện trở khác biệt âm, đây là một trong những đặc điểm nổi bật để nhận biết diode cộng hưởng đường hầm. Sự phụ thuộc nhiệt độ và từ trường của các đặc tính linh kiện cũng được đo và thảo luận.

Từ khóa - vật liệu lớp nguyên tử; MoS₂; lỗ nano; điện trở khác biệt âm; diode cộng hưởng xuyên hầm.

1. Giới thiệu

Từ khi Chang cùng cộng sự [1] chế tạo và giải thích nguyên lý hoạt động của diode cộng hưởng đường hầm (RTD: resonant tunneling diode), có nhiều nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đã được thực hiện tìm hiểu về loại diode này nhằm mục đích giải thích các tính năng đặc biệt của nó để có thể dùng loại linh kiện này vào các ứng dụng trên thực tế. Đặc tính điện trở khác biệt âm (NDR: negative differential resistance) làm cho loại linh kiện này có khả năng ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực điện tử như bộ logic đa giá trị [2], bộ chuyển đổi tương tự - số [3], và bộ dao động cộng hưởng tần số cao [4, 5]. Trong đó việc sử dụng linh kiện RTD trong các bộ dao động tần số cao có khả năng ứng dụng rất lớn trong thực tế. Diode cộng hưởng đường hầm là một diode có cấu trúc cộng hưởng - đường hầm trong đó các electron hoặc lỗ trống có thể xuyên hầm qua một số mức cộng hưởng với giá trị năng lượng nhất định. RTD có thể được chế tạo sử dụng nhiều loại vật liệu bán dẫn khác nhau thuộc các loại III-V, loại IV và loại II-VI, và nhiều dạng cấu trúc cộng hưởng đường hầm khác nhau như tiếp giáp pn Esaki diode, cấu trúc hai rào thế, ba rào thế, cấu trúc giếng lượng tử, dây lượng tử và chấm lượng tử. Gần đây Britnell và cộng sự [6] đã nghiên cứu thành công quá trình cộng hưởng xuyên hầm trong vật liệu có cấu trúc lớp graphene, một trong những vật liệu màng mỏng được nghiên cứu nhiều nhất trong thời gian gần đây. Bên cạnh graphene, một vật liệu có cấu trúc lớp nguyên tử khác cũng thu hút được nhiều sự chú ý là molybdenum disulfide (MoS₂) với rất nhiều công trình nghiên cứu được xuất bản trên các tạp chí khoa học có uy tín hàng đầu thế giới [7-9]. MoS₂ là vật liệu có cấu trúc lớp trong đó nguyên tử Mo liên kết cộng hoá trị xen kẽ với hai nguyên tử S. Mỗi lớp nguyên tử MoS₂ có độ dày 0,72nm và khoảng cách giữa các lớp MoS₂ là 0,65nm. Một khối MoS₂ do nhiều lớp tạo thành thường được sử dụng tạo chất bôi trơn rắn, tuy nhiên đặc tính vật lý như đặc tính điện tử và quang tử của từng

Abstract - The two - dimensional layer of molybdenum disulfide (MoS₂) has recently attracted much interest due to its direct-gap property and potential applications in electronic and optoelectronic devices. Here we fabricated and measured a resonant tunneling diode made up of atomic-layered MoS₂ based on nanopore structure device. High - quality crystalline MoS₂ films were synthesized and transferred on the top of nanopore. After transferring of the trilayer MoS₂, Al films were subsequently thermally evaporated onto the both sides of the chip to form top and bottom electrodes for electrical measurement. The current-voltage characteristics displayed the negative differential resistance, which is a signature for resonant tunneling diode. Temperature and magnetic field dependences of device properties were performed and discussed.

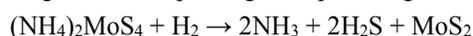
Key words - atomic-layered material; MoS₂; nanopore; negative different resistance; resonant tunneling diode.

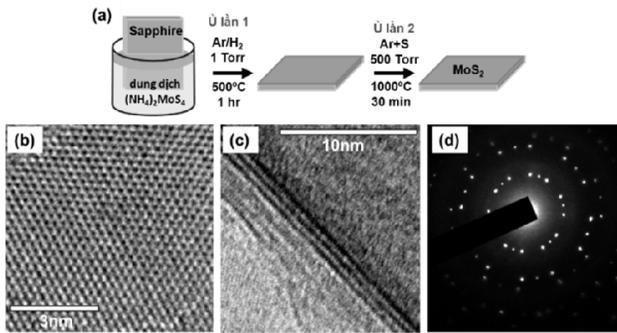
lớp MoS₂ thì hoàn toàn khác biệt so với cấu trúc khối của nó [10, 11]. Trong khi vật liệu cấu trúc khối MoS₂ là chất bán dẫn có độ rộng vùng cấm không trực tiếp với mức năng lượng 1,2eV thì các đơn lớp MoS₂ lại có độ rộng vùng cấm trực tiếp với mức năng lượng 1,8eV. Bên cạnh đó, tương tự như graphene, MoS₂ cũng có những đặc tính nổi bật như độ trong suốt cao, cấu trúc hai chiều linh hoạt. Với những tính chất đặc biệt này, MoS₂ có tiềm năng ứng dụng rất lớn trong lĩnh vực điện tử và quang điện tử [7-9].

Trong nghiên cứu này, chúng tôi chế tạo và khảo sát linh kiện diode cộng hưởng đường hầm được làm từ vật liệu có cấu trúc lớp nguyên tử MoS₂. Quá trình tổng hợp và phân tích đặc tính của vật liệu cùng như các bước chế tạo linh kiện diode cũng được trình bày. Kết quả đo đạc đặc tính dòng áp cho thấy linh kiện diode được chế tạo thể hiện đặc tính NDR, một trong những biểu hiện quan trọng của các RTD. Kết quả khảo sát linh kiện tại các mức nhiệt độ và từ trường khác nhau cũng được thực hiện và thảo luận.

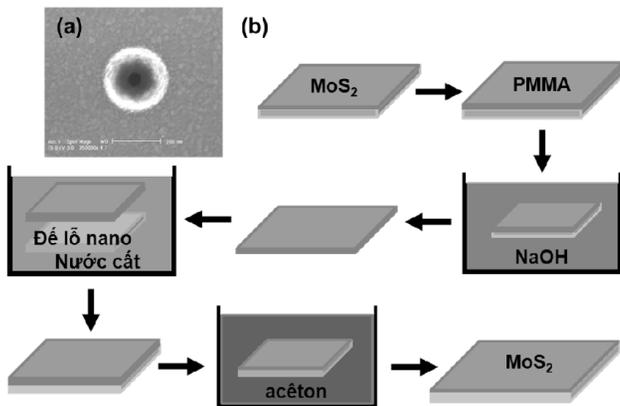
2. Vật liệu và phương pháp

Hình 1a mô tả quá trình tổng hợp vật liệu cấu trúc lớp nguyên tử MoS₂ [12]. 0,25g (NH₄)₂MoS₄ (AlfaAesar, độ tinh khiết: 99,99%) được hòa tan trong 20ml dung môi phân cực dimethylformamide (DMF) với nồng độ là 1,25wt%. Một tấm đế cách điện Sapphire được nhúng vào trong dung môi hòa tan này và sau đó được từ từ kéo lên (vận tốc khoảng 0,5mm/s) để hình thành những lớp màng mỏng (NH₄)₂MoS₄ trên bề mặt đế sapphire. Sau đó đế sapphire được sấy khô ở nhiệt độ 120°C trong thời gian 30 phút. Đế sapphire với lớp màng (NH₄)₂MoS₄ trên bề mặt được ủ lần thứ nhất trong buồng nung trong môi trường là hỗn hợp khí Ar/H₂ (theo tỉ lệ lưu lượng 4:1) dưới áp suất 1 Torr tại 500°C trong thời gian 1 giờ. Trong quá trình ủ này, khí H₂ sẽ phản ứng với lớp màng (NH₄)₂MoS₄ trên đế sapphire để tạo thành những lớp màng mỏng MoS₂ theo phương trình phản ứng sau:





Hình 1. (a) Quá trình tổng hợp vật liệu lớp nguyên tử MoS₂ qua hai bước ủ trong lò nung. (b) Ảnh TEM hiển thị cấu trúc tinh thể của màng MoS₂. (c) Cấu trúc 3 lớp của màng MoS₂. (d) Ảnh phân tích nhiễu xạ electron trong vùng quan sát (250nm) cho thấy màng MoS₂ thể hiện 3 tổ hợp cấu trúc lưới hình lục giác đều tương ứng với 3 lớp nguyên tử MoS₂

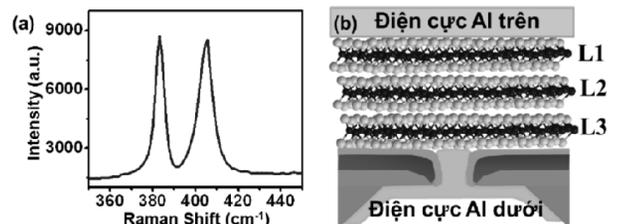


Hình 2. (a) Lỗ nano được chế tạo trên màng cách điện Si₃N₄. (b) Quá trình đặt màng MoS₂ trên đỉnh lỗ nano

Toàn bộ các hỗn hợp thừa và tạp chất sẽ bị loại bỏ sau quá trình này. Đế sapphire với lớp màng mỏng MoS₂ trên bề mặt sẽ tiếp tục được đưa vào buồng nung và trải qua quá trình ủ lần thứ hai dưới áp suất 500Torr tại 1000°C trong 30 phút. Trong quá trình ủ này, khí Ar sẽ được điều khiển đưa vào buồng với lưu lượng khí 20sccm kết hợp với khí sulfur (S). Lưu ý rằng, sulfur được đưa vào buồng nung ở dạng bột và bột sulfur này sẽ bị bay hơi do nhiệt độ trong buồng nung rất cao (1000°C) để tạo thành khí S. Việc đưa thêm khí S trong quá trình ủ thứ hai sẽ giúp cải thiện cấu trúc tinh thể của lớp màng MoS₂. Khí S sẽ được sử dụng như một lớp khí bảo vệ chống lại tác động oxy hóa bề mặt của MoS₂. Các kết quả nghiên cứu khác đã cho thấy sự có mặt của các phân tử oxy có thể xuất hiện do hơi ẩm bám trên bề mặt MoS₂ sẽ phá vỡ liên kết tinh thể của màng [12]. Bằng cách kiểm soát và tối đa hoá các thông số kỹ thuật trong hai quá trình này, chúng ta có thể tạo ra các lớp vật liệu cấu trúc lớp nguyên tử MoS₂ với xác suất lên đến 90% qua hai quá trình ủ này. Đặc tính về cấu trúc tinh thể của những lớp màng MoS₂ này được phân tích bằng kính hiển vi điện tử đường hầm (TEM: Tunneling Electron Microscope), kết quả được thể hiện trên Hình 1b-d. Hình 1b cho thấy lớp màng MoS₂ có cấu trúc tinh thể rất tốt, chúng ta có thể thấy rõ các nguyên tử được sắp xếp theo một trật tự nhất định và đồng nhất trên cả bề mặt. Quan sát bằng kính hiển vi điện tử tại cạnh của các lớp màng MoS₂ này, kết quả chụp cho thấy rõ các lớp màng này do 3 lớp

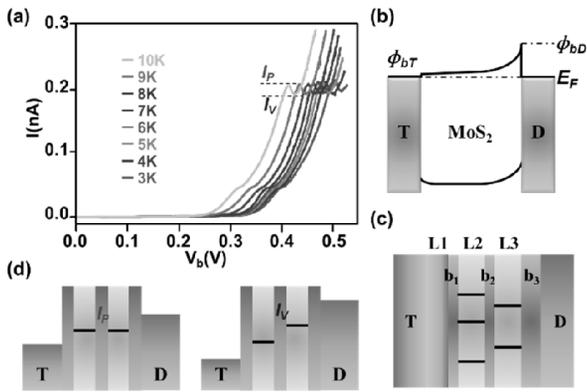
MoS₂ tạo thành (Hình 1c). Thí nghiệm phân tích nhiễu xạ electron trong vùng quan sát (250nm) trong Hình 1d cho thấy màng MoS₂ thể hiện 3 tổ hợp cấu trúc lưới hình lục giác đều tương ứng với 3 lớp nguyên tử MoS₂. Kết quả này một lần nữa chứng minh các lớp nguyên tử MoS₂ được tổng hợp có cấu trúc 3 lớp như đã trình bày trong Hình 1c. Từ kết quả phân tích vật liệu bằng TEM, có thể thấy rằng các màng mỏng MoS₂ được tổng hợp gồm 3 lớp nguyên tử tạo thành với đặc tính cấu trúc tinh thể rất cao.

Quá trình chế tạo RTD làm từ lớp màng nguyên tử 3 lớp MoS₂ dựa trên cấu trúc lỗ nano được thực hiện theo các bước sau. Đầu tiên một lỗ nano có đường kính 36nm (Hình 2a) được tạo ra trên màng Si₃N₄ (30nm) bằng cách kết hợp kỹ thuật quang khắc dùng chùm electron và kỹ thuật khắc vật lý dựa trên hiệu ứng phản ứng ion. Sau đó một màng phim nhôm (Al-20nm) và màng phim ôxit nhôm (Al₂O₃-8nm) được lắng đọng trên bề mặt lỗ nano bằng kỹ thuật bốc hơi kim loại dùng máy phát chùm electron, màng Al bao quanh và giúp làm hẹp lỗ nano còn màng Al₂O₃ tạo thành lớp cách điện với các điện cực trên và dưới sẽ được chế tạo sau này [13]. Sau đó lớp nguyên tử MoS₂ sẽ được đặt trên đỉnh của lỗ nano này thông qua quá trình chuyển đổi được mô tả trong Hình 2b. Lớp MoS₂ trên đế sapphire được phủ một lớp PMMA và được nhúng vào trong dung dịch NaOH để ăn mòn đế sapphire này. Lớp PMMA cùng với MoS₂ còn lại sẽ được làm sạch bằng nước cất và đặt trên màng Si₃N₄ có lỗ nano. Sau khi đặt xong, toàn bộ sẽ được đưa vào dung dịch acetone để loại bỏ PMMA và quá trình chuyển MoS₂ lên đỉnh lỗ nano đã hoàn thành. Kết quả phân tích cấu trúc vật liệu lớp nguyên tử MoS₂ trên lỗ nano bằng thiết bị đo phổ tán xạ không đàn hồi Raman được trình bày trên Hình 3a. Từ phổ Raman, chúng ta thấy có hai đỉnh năng lượng tại vị trí 383,3 và 405,6cm⁻¹ tương ứng với hai mức năng lượng E_{2g1} and A_{1g} tiêu biểu cho vật liệu MoS₂. Hơn nữa, khoảng cách năng lượng của hai mức này là 22,3cm⁻¹, tham khảo theo tài liệu nghiên cứu [12], khoảng cách năng lượng này chỉ rõ màng MoS₂ này do 3 lớp MoS₂ tạo thành. Sau khi đặt màng MoS₂ trên lỗ nano, các lớp phim nhôm (Al) dày 40nm được chế tạo bằng kỹ thuật nhiệt - bốc hơi kim loại lên phía trên và dưới màng để tạo thành các điện cực cho việc đo đặc tính dòng-áp (*I-V*) qua màng. Hình 3b minh họa cấu trúc hoàn chỉnh của linh kiện MoS₂-RTD. Đặc tính điện tử của linh kiện sẽ được khảo sát đo lường trong hệ đo đặc tính vật lý (Physics Properties Measurement System-PPMS) kết hợp với các bộ khuếch đại dòng áp tự chế tạo có khả năng kiểm soát mức nhiễu tín hiệu ở mức 10fA.



Hình 3. (a) Phổ năng lượng Raman màng MoS₂ cấu trúc 3 lớp nguyên tử. (b) Cấu trúc hoàn chỉnh của linh kiện MoS₂-RTD sau khi chế tạo xong. Màng MoS₂ 3 lớp (ký hiệu L1, L2, L3) được đặt giữa 2 điện cực Al trên (T) và dưới (D) để đo dòng điện chạy theo trục vuông góc với màng MoS₂

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận



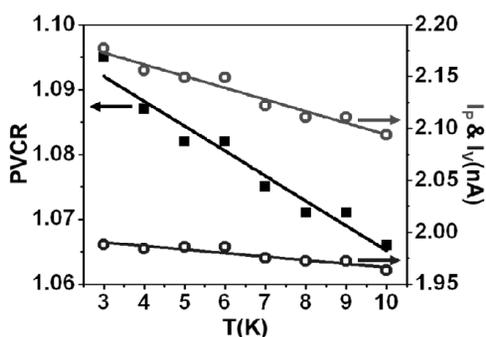
Hình 4. (a) Đặc tính dòng-áp (I - V) của linh kiện 3 lớp nguyên tử MoS_2 được đo tại các nhiệt độ khác nhau. (b) Sơ đồ rào thế Schottky hình thành tại các tiếp xúc kim loại Al với lớp nguyên tử MoS_2 . (c) Mô hình hoá cấu trúc linh kiện MoS_2 -RTD gồm hai giếng lượng tử hình thành bởi sự giam hãm lượng tử hạt dẫn trong hai lớp L2, L3 và mỗi giếng lượng tử được xen kẽ giữa các rào thế. (d) Mô tả quá trình dòng cộng hưởng đường hầm trong hai trường hợp đặt đỉnh và đáy

Đặc tính dòng-áp (I - V) của linh kiện màng MoS_2 được trình bày trong Hình 4a, có thể thấy rằng linh kiện thể hiện đặc tính chỉnh lưu rất tốt và đây cũng là đặc tính I - V thông thường của các linh kiện diode với rào thế Schottky. Tiếp xúc Schottky giữa kim loại Al và lớp nguyên tử MoS_2 được hình thành do có sự khác biệt giữa mức năng lượng tự do của Al (4,28eV) với ái lực điện tử của MoS_2 (4,0eV). Chúng ta cũng đồng thời lưu ý rằng, như cấu trúc linh kiện mô tả trong Hình 3b, điện cực Al trên (T) có bề mặt tiếp xúc rất lớn với MoS_2 ngược lại do bề mặt tiếp xúc bị giới hạn bởi lỗ nano nên điện cực Al dưới (D) có bề mặt tiếp xúc rất nhỏ với màng. Tỷ lệ khác biệt giữa hai mặt tiếp xúc T/D này là rất lớn dẫn đến sự khác nhau về điện trở tiếp xúc hay bất đối xứng về chiều cao rào thế Schottky ở hai mặt tiếp xúc [13]. Như mô tả trong Hình 4b, do có bề mặt tiếp xúc rất nhỏ bị giới hạn với lỗ nano rào thế Schottky giữa điện cực Al dưới với MoS_2 là Φ_{bD} sẽ cao hơn so với rào thế Schottky Φ_{bT} hình thành giữa điện cực Al trên với MoS_2 (bề mặt tiếp xúc lớn), kết quả, linh kiện thể hiện khả năng chỉnh lưu trong đặc tính I - V của mình. Đặc biệt chúng ta cũng lưu ý rằng, đặc tuyến I - V của linh kiện biểu hiện hai lần thay đổi giá trị của dòng điện, một độ gợn nhỏ ở vùng điện áp đặt thấp và một đỉnh dòng điện ở vùng điện áp đặt cao. Đặc biệt, ở vùng điện áp đặt cao, dòng điện tăng dần và đạt đến giá trị đỉnh (I_P) sau đó giảm dần xuống giá trị đáy (I_V) và tăng trở lại. Đặc tính đỉnh dòng này chính hay hiện tượng điện trở khác biệt âm là hiển thị rõ nét nhất quá trình các hạt dẫn di chuyển cộng hưởng đường hầm từ các điện cực đo điện qua các mức năng lượng gián đoạn. Những hiện tượng tương tự đã được trình bày trong các nghiên cứu về quá trình di chuyển hạt dẫn cộng hưởng đường hầm qua các mức năng lượng gián đoạn hình thành bởi hiệu ứng lượng tử trong các linh kiện có cấu trúc hai giếng lượng tử làm từ các vật liệu đa lớp như Ge/Si [14]. Chính vì vậy, có thể giải thích rằng, trong linh kiện MoS_2 này, đỉnh dòng điện trong đặc tuyến I - V là do các hạt dẫn di chuyển cộng hưởng đường hầm qua các mức năng lượng gián đoạn sinh ra bởi sự giam hãm lượng tử hạt dẫn trong

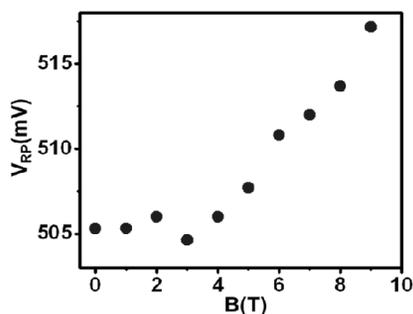
từng lớp MoS_2 bị giới hạn bởi lỗ nano [15]. Có thể giải thích rằng, bên ngoài lỗ nano, lớp MoS_2 tiếp xúc trực tiếp với vật liệu nền là $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ nên cấu trúc vùng năng lượng bị làm nhiễu bởi tác động trong liên kết với vật liệu nền, trong khi đó cấu trúc vùng năng lượng bên trong lỗ nano không bị ảnh hưởng và hình thành các mức năng lượng gián đoạn bởi hiệu ứng lượng tử hạt dẫn. Kết quả có thể xem các lớp MoS_2 bên trong lỗ nano như các giếng lượng tử bị bao quanh bởi rào thế. Trong linh kiện MoS_2 cấu trúc 3 lớp nguyên tử, như đã mô tả ở trên trong Hình 3b, lớp đầu tiên (L1) tạo liên kết rất tốt với điện cực Al vì có bề mặt tiếp xúc lớn, trong khi đó sẽ có một rào thế Schottky hình thành giữa lớp MoS_2 thứ 3 (L3) với điện cực Al dưới. Thêm nữa giữa các lớp MoS_2 luôn tồn tại điện dung liên kết giữa các lớp này bởi lực liên kết Vander Waal. Cho nên, trong khi cấu trúc vùng năng lượng gián đoạn sẽ tồn tại trong hai lớp L2, L3 thì cấu trúc năng lượng này trong lớp L1 sẽ bị đồng nhất với mức năng lượng Fermi của kim loại Al. Kết quả, có thể xem cấu trúc linh kiện MoS_2 3 lớp nguyên tử này được cấu thành bao gồm hai giếng lượng tử (hình thành bởi sự giam hãm lượng tử hạt dẫn L2, L3) với các mức năng lượng gián đoạn xen kẽ giữa ba rào thế b1, b2 (sinh ra bởi điện dung liên kết giữa các lớp) và b3 (rào thế Schottky) như mô tả trong Hình 4c. Khi đặt điện áp giữa hai đầu điện cực Al, các hạt dẫn sẽ di chuyển cộng hưởng đường hầm từ cực phát, qua các mức năng lượng gián đoạn trong hai lớp L2, L3 và đến cực thu. Như mô tả trong Hình 4d, khi mức năng lượng của hai giếng lượng tử ngang nhau, giá trị dòng điện cộng hưởng đường hầm sẽ đạt giá trị đỉnh (P) con ngược lại khi hai mức năng lượng này lệch nhau thì giá trị dòng điện sẽ giảm xuống mức thấp nhất (V). Một tham số quan trọng của các linh kiện RTD đó là tỉ số dòng đỉnh/dòng đáy $\text{PVCR} = I_P/I_V$ (Peak to Valley Current Ratio) cũng được phân tích và kết quả sự phụ thuộc của PVCR vào nhiệt độ được trình bày trong Hình 5. Giá trị của tỉ số PVCR này phụ thuộc vào độ rộng của mức năng lượng cộng hưởng cũng như lực liên kết điện dung giữa hai mức năng lượng trong hai giếng lượng tử với nhau. Về mặt nguyên tắc, lực liên kết điện dung không thay đổi theo nhiệt độ bởi độ rộng của rào thế là không đổi theo nhiệt độ. Tuy nhiên, khi nhiệt độ càng giảm, thì độ rộng của các mức năng lượng cộng hưởng sẽ rõ và hẹp hơn do sự suy giảm tác động của hiệu ứng mở rộng vùng năng lượng nhiệt. Khi nhiệt độ đo càng giảm thì dòng cộng hưởng đường hầm sẽ có biên độ đỉnh I_P cao hơn do các hạt dẫn di chuyển cộng hưởng đường hầm qua các mức năng lượng hẹp hơn, trong khi dòng I_V sẽ thay đổi rất ít bởi hiện tượng này. Kết quả đo sự phụ thuộc theo nhiệt độ của dòng I_P và I_V được trình bày trong Hình 5 cho thấy, giá trị thực nghiệm hoàn toàn phù hợp với các lý giải vật lý nêu trên. Kết quả là, khi nhiệt độ giảm dòng I_P tăng mạnh trong khi dòng I_V ít thay đổi dẫn đến tỉ số PVCR này tăng theo sự suy giảm của nhiệt độ như trình bày trong Hình 5. Kết quả thực nghiệm tương tự đã được nghiên cứu và báo cáo cho các Ge/Si-RTD trong tài liệu tham khảo số 14.

Sự phụ thuộc từ trường của các đặc tính linh kiện 3 lớp MoS_2 cũng được đo và khảo sát. Hướng của từ trường được đặt vuông góc với bề mặt của màng MoS_2 theo chiều di chuyển của hạt dẫn. Hình 6 biểu thị sự phụ thuộc của điện áp đỉnh cộng hưởng (V_{RP}) dưới tác động của các giá trị từ

trường khác nhau, từ 0 đến 9T. Kết quả đo cho thấy, điện áp đỉnh cộng hưởng thay đổi theo độ lớn của từ trường. Đặc biệt giá trị điện áp này bắt đầu tăng tuyến tính theo từ trường tại 3T. Sự thay đổi tuyến tính này tương tự như các nghiên cứu khác đã được báo cáo [14] và được giải thích do sự dịch chuyển của các mức Landau dưới tác động của từ trường. Khi từ trường được đưa vào, các hạt dẫn trong từng lớp nguyên tử MoS₂ sẽ chịu tác động và di chuyển theo quỹ đạo cyclotron với các mức năng lượng lượng tử gọi là mức Landau. Dưới tác động của từ trường năng lượng của mức Landau này thay đổi tuyến tính với từ trường theo công thức $\Delta E = e\hbar B / m^*$, trong đó, E, e, \hbar và m^* lần lượt là năng lượng, điện tích cơ bản, độ lớn từ trường và khối lượng hiệu dụng hạt dẫn. Chúng ta có thể thấy rằng sự phụ thuộc tuyến tính của điện áp đỉnh cộng hưởng theo từ trường đo trong thực nghiệm hoàn toàn phù hợp với lý thuyết vật lý. Giá trị của điện áp cộng hưởng thay đổi từ 3T có thể được giải thích là do quỹ đạo cyclotron chỉ có thể tồn tại trên MoS₂ bị giới hạn trong lỗ nano, ngoài lỗ này quỹ đạo sẽ bị phá vỡ bởi tán xạ với cạnh của lỗ nơi màng MoS₂ bắt đầu tiếp xúc trực tiếp với đế cách điện Al₂O₃/Si₃N₄.



Hình 5. Sự phụ thuộc theo nhiệt độ của tham số PVC của linh kiện MoS₂-RTD



Hình 6. Sự phụ thuộc theo từ trường của điện áp đỉnh của linh kiện MoS₂-RTD

4. Kết luận

Tóm lại, trong nghiên cứu này, chúng tôi đã thành công trong việc chế tạo và khảo sát đặc tính hoạt động của linh kiện diode cộng hưởng đường hầm làm từ vật liệu lớp nguyên tử MoS₂ dựa trên linh kiện cấu trúc lỗ nano. Các màng cầu bởi 3 lớp MoS₂ với cấu trúc tinh thể cao, được tổng hợp và sử dụng để chế tạo linh kiện cho nghiên cứu. Hiệu ứng giam hãm lượng tử hạt dẫn trong từng lớp MoS₂ hình thành nên giếng lượng tử với các mức năng lượng gián

đoạn cho các hạt dẫn di chuyển cộng hưởng đường hầm. Sự thành công của nghiên cứu này mở ra khả năng ứng dụng rất lớn của việc sử dụng vật liệu lớp nguyên tử trong các ứng dụng điện tử và quang điện tử.

Kết quả tổng hợp vật liệu MoS₂ được thực hiện tại phòng thí nghiệm vật liệu 2D thuộc Viện Khoa học Phân tử, Viện Khoa học Đà Loan. Quá trình chế tạo và đo khảo sát linh kiện diode được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm Trọng điểm về Khoa học và Công nghệ Nano và Phòng Thí nghiệm Điện tử Lượng tử thuộc Viện Vật lý, Viện Khoa học Đà Loan.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. L. Chang, L. Esaki, R. Tsu, "Resonant tunneling in semiconductor double barriers", *Appl. Phys. Lett.* 24, 593, 1974.
- [2] R. C. Potter, A. A. Lakhani, D. Beyea, H. Hier, E. Hempfling, A. Fathimulla, "Three-dimensional integration of resonant tunneling structures for signal processing and three-state logic", *Appl. Phys. Lett.* 52, 2163, 1988.
- [3] Y. Yokoyama, Y. Ohno, S. Kishimoto, K. Maezawa, T. Mizutani, "A Delta-Sigma Analog-to-Digital Converter Using Resonant Tunneling Diodes", *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, L1005, 2001.
- [4] M. Asada, S. Suzuki, N. Kishimoto, "Resonant Tunneling Diodes for Sub-Terahertz and Terahertz Oscillators", *Jpn. J. Appl. Phys.* 47, 4375, 2008.
- [5] M. Shiraiishi, H. Shibayama, K. Ishigaki, S. Suzuki, M. Asada, H. Sugiyama, H. Yokoyama, "High Output Power (~400 μ W) Oscillators at around 550 GHz Using Resonant Tunneling Diodes with Graded Emitter and Thin Barriers", *Appl. Phys. Express* 4, 064101, 2011.
- [6] L. Britnell, R.V. Gorbachev, A.K. Geim, L.A. Ponomarenko, A. Mishchenko, M.T. Greenaway, T.M. Fromhold, K.S. Novoselov, L. Eaves, "Resonant tunnelling and negative differential conductance in graphene transistors", *Nature Communication* 4, 1794, 2013.
- [7] Y. Yoon, K. Ganapathi, S. Salahuddin, "How Good Can Monolayer MoS₂ Transistors Be?" *Nano Lett.* 11, 3768–3773, 2011.
- [8] J. Pu, Y. Yomogida, K. K. Liu, L. J. Li, Y. Iwasa, T. Takenobu, "Highly Flexible MoS₂ Thin-Film Transistors with Ion Gel Dielectrics" *Nano Lett.* 12, 4013–4017, 2012.
- [9] S. Wu, Z. Zeng, Q. He, Z. Wang, S. J. Wang, Y. Du, Z. Yin, X. Sun, W. Chen, H. Zhang, "Electrochemically Reduced Single-Layer MoS₂ Nanosheets: Characterization, Properties, and Sensing Applications" *Small* 8, 2264–2270, 2012.
- [10] Y. Feldman, E. Wasserman, D. J. Srolovitz, R. Tenne, "High-Rate, Gas-Phase Growth of MoS₂ Nested Inorganic Fullerenes and Nanotubes", *Science* 267, 222–225, 1995.
- [11] A. Splendiani, L. Sun, Y. Zhang, T. Li, J. Kim, J. F. Chim, G. Galli, F. Wang, "Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂" *Nano Lett.* 10, 1271–1275, 2010.
- [12] K. K. Li, W. Zhan, Y. H. Lee, Y. C. Lin, M. T. Chang, C.Y. Su, C. S. Chang, H. Y. Li, Y. Shi, H. Zhang, C. S. Lai, L. J. Li, "Growth of Large-Area and Highly Crystalline MoS₂ Thin Layers on Insulating Substrates", *Nano Lett.* 12, 1538–1544, 2012.
- [13] L. N. Nguyen, M. C. Lin, H. S. Chen, Y. W. Lan, C. S. Wu, K. S. Chang-Liao, C. D. Chen, "Photo-response of a nanopore device with a single embedded ZnO nanoparticle", *Nanotechnology* 23, 165201, 2012.
- [14] O. G. Schmidt, U. Denker, K. Eberl, O. Kienzle, F. Ernst, R. J. Haug, "Resonant tunneling diodes made up of stacked self-assembled Ge/Si islands", *Appl. Phys. Lett.* 77, 4341, 2000.
- [15] L. N. Nguyen, Y. W. Lan, J. H. Chen, T. R. Chang, Y. L. Zhong, H. T. Jeng, L. J. Li, C. D. Chen, "Resonant Tunneling through Discrete Quantum States in Stacked Atomic-Layered MoS₂", *Nano Lett.* 14, 2381–2386, 2014.