

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
ĐẠI HỌC OSAKA, NHẬT BẢN

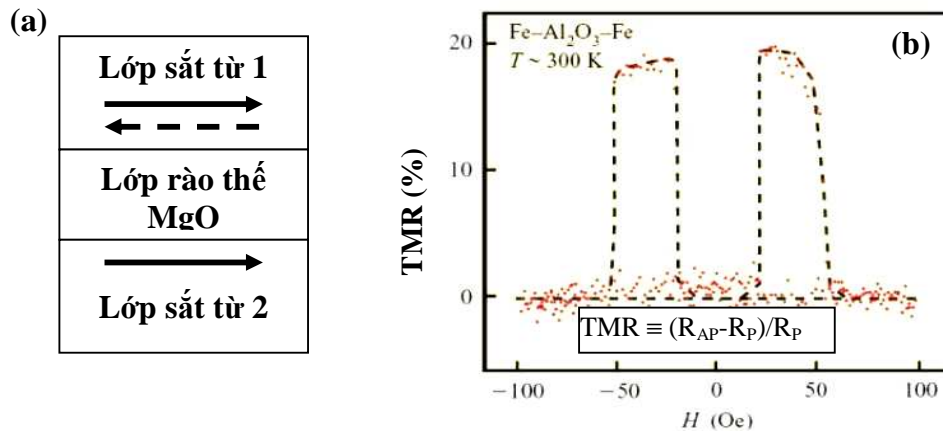
CÁC HIỆU ỨNG LƯỢNG TỬ
TRONG CÁC CHUYỂN TIẾP VỚI
HÀNG RÀO THỂ MgO

ĐỒ BẰNG

THÁNG 9, 2010

I. TỔNG QUAN

Hiệu ứng từ trở xuyên ngầm (Tunnel magnetoresistance effect – TMR) trong cấu trúc chuyển tiếp từ (Magnetic tunnel junction – MTJ) với hàng rào thế là lớp đơn tinh thể MgO định hướng (100) (xem hình 1a) đặc biệt được quan tâm nghiên cứu ứng dụng hiện nay [1]. Giá trị từ trở được xác định bởi sự khác nhau về điện trở khi chuyển tiếp từ có các lớp sắt từ 1 (lớp quay tự do) và lớp sắt từ 2 (lớp bị ghim) ở trạng thái song song (R_p) và phản song song (R_{ap}) với nhau trong từ trường ngoài (hình 1b). Do hiệu ứng này cho giá trị từ trở lớn tại nhiệt độ phòng và cho phép ứng dụng vào các linh kiện spin-điện tử thế hệ mới. Hiệu ứng từ trở của cấu trúc này được biết không chỉ bị ảnh hưởng lớn bởi lớp tiếp xúc giữa các bề mặt của các lớp màng mỏng với nhau mà còn bị ảnh hưởng bởi các hiệu ứng lượng tử xảy ra bên trong các lớp và tại các bề mặt, ví dụ như các hiệu ứng tán xạ hoặc giao thoa của các điện tử dẫn.



Hình 1. (a). Cấu trúc chuyển tiếp sắt từ với hàng rào thế MgO ở trạng thái song song và phản song song. (b). Kết quả thí nghiệm đầu tiên của hiệu ứng từ

Cũng như các hiệu ứng gây ra bởi các tán xạ của các phonon, các tán xạ của các điện tử dẫn với các tạp từ có thể gây ra các hiệu ứng Kondo và magnon tại nhiệt độ đủ thấp và làm giảm đáng kể giá trị từ trở. Trong đó, hiệu ứng Kondo được xem là hiện tượng tăng giá trị điện trở của mẫu có chứa các tạp từ khi nhiệt độ mẫu giảm quá một giá trị nhất định (nhiệt độ Kondo) do tán xạ không bảo toàn của các điện tử dẫn với các tạp từ [2]. Hiệu ứng magnon gây ra bởi các tán xạ không bảo toàn spin của điện tử dẫn khi chúng tán xạ với các tạp

từ hoặc các sai hỏng cấu trúc mạng tinh thể do đó làm thay đổi xác suất chuyển động xuyên ngầm qua lớp hàng rào thế [3]. Nhiều mô hình hiệu ứng Kondo và magnon đã được nghiên cứu và áp dụng cho các mẫu cấu trúc đơn lớp, đa lớp và cấu trúc chuyển tiếp từ với hàng rào thế là nhôm ôxít, Al-O. Tuy nhiên cơ chế của các hiệu ứng này chưa được thống nhất và rõ ràng, đặc biệt là trong cấu trúc chuyển tiếp sắt từ - MgO.

Trong khi đó, hiệu ứng giao thoa của các điện tử dẫn trong một lớp sắt từ siêu mỏng có thể tạo ra các trạng thái cộng hưởng tham gia vào quá trình dẫn và làm tăng giá trị từ trở của cấu trúc gồm có lớp sắt từ siêu mỏng đó [4]. Việc nghiên cứu và khảo sát hiệu ứng giao thoa lượng tử tại nhiệt độ phòng vẫn chưa đạt được các kết quả cao. Do vậy bên cạnh việc nghiên cứu các hiệu ứng Kondo và magnon trong cấu trúc chuyển tiếp sắt từ-MgO để làm rõ cơ chế cũng như hạn chế các hiệu ứng này, việc nghiên cứu hiệu ứng giao thoa lượng tử tại nhiệt độ phòng sẽ góp phần làm rõ cơ chế chuyển động xuyên ngầm của các điện tử dẫn qua lớp cách điện MgO và làm tăng giá trị từ trở của mẫu là các mục tiêu nghiên cứu của luận án.

II. THỰC NGHIỆM

Các mẫu đã sử dụng trong nghiên cứu và khảo sát các hiệu ứng Kondo và magnon được chế tạo bởi công nghệ phún xạ trên hệ (Canon ANELVA C-7100) với cấu trúc đa lớp gồm: CoFeB(3 nm)/MgO(1,75 nm)/CoFeB(t nm)/CoFe(3- t nm). Trong đó thành phần Boron được thay đổi với mục đích khảo sát sự ảnh hưởng của nó tới các hiệu ứng trên. Ngoài ra, các mẫu sử dụng để khảo sát hiệu ứng giao thoa lượng tử được chế tạo bằng phương pháp epitaxy đơn tinh thể với một lớp sắt từ siêu mỏng từ 0 – 1,43 nm.

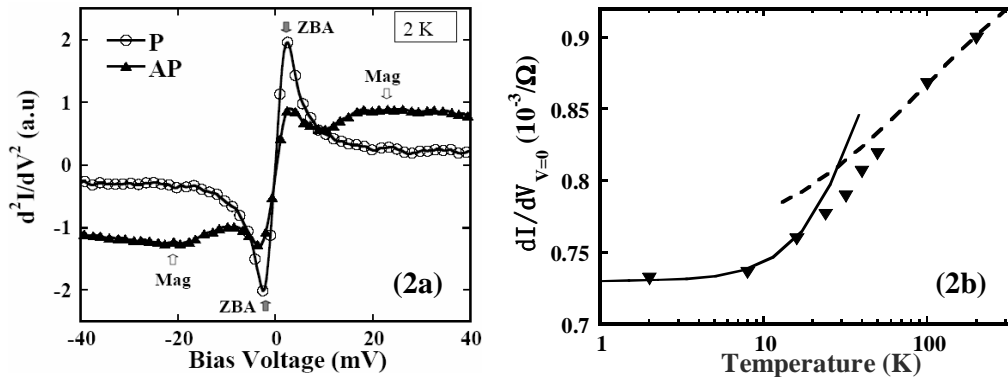
Các mẫu được chế tạo thành các chuyển tiếp từ có kích thước từ 0.2×0.5 đến $3 \times 10 \mu\text{m}^2$ bằng phương pháp tạo ảnh bằng chùm điện tử. Với các mẫu nghiên cứu hiệu ứng giao thoa lượng tử được chế tạo trên cùng một đế MgO nhằm đảm bảo tính đồng nhất về chất lượng mẫu và tính hệ thống khi độ dày của lớp sắt từ Fe thay đổi từ 0 – 1,43 nm.

Điện trở và độ dẫn động của mẫu được đo bằng phương pháp look-in ở các điều kiện nhiệt độ và từ trường khác nhau trong hệ Physics Properties Measurement System (PPMS). Hiệu ứng spin-diode được đo với các thế một chiều có giá trị thay đổi từ - 400 đến + 400 mV nhằm khảo sát ảnh hưởng của các trạng thái cộng hưởng tới tín hiệu cộng hưởng của chuyển động tiến động spin điện tử với tần số dòng xoay chiều.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

1. Hiệu ứng Kondo trong chuyển tiếp sắt từ - MgO

Kết quả từ phép đo phổ d^2I/dV^2 tại nhiệt độ 2 K của mẫu có cấu trúc CoFeB/MgO/CoFeB_(x) ở các trạng thái song song (P) và phản song song (AP) (hình 2a), ta có thể quan sát thấy các đỉnh tại điện thế khoảng 3 – 4 mV (được đánh dấu: ZBA (Zero Bias Anomaly)). Các đỉnh này đã được khảo sát và kết luận do hiệu ứng Kondo trong các mẫu có chứa các tạp từ gây ra.



Hình 2. (a). Phổ d^2I/dV^2 của mẫu có cấu trúc CoFeB/MgO/CoFeB_(x) ở các trạng thái song song (P) và phản song song (AP) tại nhiệt độ 2 K. Kết quả khớp phương trình lý thuyết (1) và kết quả thực nghiệm.

Để tìm ra cơ chế của hiệu ứng Kondo trong mẫu, các phổ d^2I/dV^2 đã được khảo sát tại các nhiệt độ khác nhau. Kết quả thu được tích phân để có thể thu được phổ dI/dV . Giá trị dI/dV ($V = 0$) tại điện thế bằng 0 được vẽ như một hàm phụ thuộc vào nhiệt độ (hình 2b). Các kết quả thực nghiệm này sau đó được khớp với phương trình lý thuyết của mô hình hiệu ứng Kondo gây ra bởi

hiệu ứng giao thoa Fano của các điện tử chuyển động xuyên ngầm trực tiếp và gián tiếp qua các tán xạ với các tạp từ [5]:

$$\Delta\left(\frac{dI}{dV}\right) \propto (q^2 - f)/(1 - f), \quad (1)$$

$$f(T^*) \propto \begin{cases} -\frac{\pi^2}{2}T^{*2}, & T^* \ll 1 \\ (\ln T^* + \sqrt{\ln^2 T^* + a})/(\ln T^* - \sqrt{\ln^2 T^* + a}), & T^* \gg 1 \end{cases} \quad (1a)$$

$$f(T^*) \propto \begin{cases} -\frac{\pi^2}{2}T^{*2}, & T^* \ll 1 \\ (\ln T^* + \sqrt{\ln^2 T^* + a})/(\ln T^* - \sqrt{\ln^2 T^* + a}), & T^* \gg 1 \end{cases} \quad (1b)$$

Kết quả thu được nhiệt độ Kondo của các tạp từ là trong khoảng 80-100 K. Các phép đo tương tự được thực hiện với các mẫu có thành phần Boron khác nhau. Tuy nhiên kết quả thu được cho thấy nhiệt độ Kondo không phụ thuộc vào thành phần Boron trong mẫu. Do vậy ta có thể kết luận là hiệu ứng Kondo trong mẫu gây ra bởi tán xạ của các điện tử dẫn với các tạp từ Fe, Co, Mn trong các lớp CoFeB và MgO do sự khuếch tán trong quá trình ủ mẫu ở nhiệt độ 360°C.

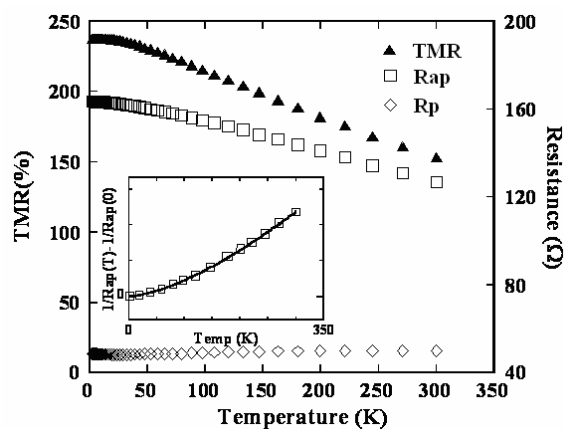
2. Hiệu ứng Magnon trong chuyển tiếp sắt từ - MgO

Bên cạnh việc quan sát được các đỉnh gây ra bởi hiệu ứng Kondo trên phổ d^2I/dV^2 (hình 2a) như đã trình bày, chúng ta còn có thể quan sát được một đỉnh khá rộng tại điện thế cao hơn từ khoảng 10 - 40 mV (đánh dấu: mag). Tuy nhiên, đỉnh này chỉ quan sát được khi mẫu ở trạng thái phản song song và được xem là gây ra bởi hiệu ứng magnon, hiệu ứng đảo spin của điện tử sau khi tán xạ với các tạp từ hoặc các sai hỏng cấu trúc mạng. Như vậy, hiệu ứng magnon góp phần làm tăng độ dẫn, giảm điện trở của mẫu ở trạng thái phản song song khi điện thế hoặc nhiệt độ tăng. Kết quả là làm giảm giá trị từ trở của mẫu khi so sánh với các kết quả thu được tại nhiệt độ và điện thế thấp xấp xỉ 0 (các điểm thực nghiệm biểu diễn bằng hình tam giác trong hình 3).

Tương tự, các kết quả thực nghiệm được khớp với các phương trình của các mô hình lý thuyết dưới đây [6, 7]

$$\left(\frac{1}{R_{AP}(T)} - \frac{1}{R_{AP}(0)}\right) \propto \begin{cases} -kT \ln\left(1 - e^{-\frac{E_c}{kT}}\right), & (2a) \\ kT^{\frac{3}{2}}, & (2b) \end{cases}$$

Từ kết quả thu được và dạng phổ d^2I/dV^2 , ta có thể kết luận được là hiệu ứng magnon trong các mẫu chuyển tiếp sắt từ - MgO, CoFeB/MgO/CoFeB, là phù hợp với mô hình sóng spin 2 chiều (2D) được biểu diễn bởi phương trình 2a. Điều đó có nghĩa là hiệu ứng magnon trong các mẫu này gây ra bởi các tán xạ của các điện tử dẫn với các tạp từ tại bề mặt tiếp xúc giữa các lớp CoFeB và MgO có kích thước rất mỏng từ 1 đến 2 lớp nguyên tử (2D).

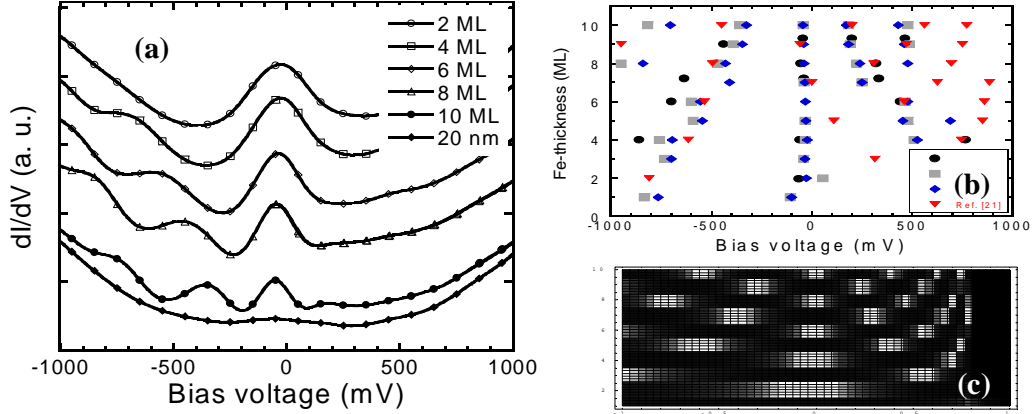


Hình 3. Sự phụ thuộc nhiệt độ của giá trị điện trở của mẫu CoFeB/MgO/CoFeB ở các trạng thái song song (R_p) và phản song song (R_{ap}), và giá trị từ trở.

3. Hiệu ứng giao thoa lượng tử trong chuyển tiếp sắt từ - MgO

Các tính toán lý thuyết của hiệu ứng giao thoa lượng tử trong chuyển tiếp sắt từ -MgO cho thấy giá trị từ trở của mẫu tăng từ 1 đến 2 bậc tại điện thế tương ứng với năng lượng của các trạng thái cộng hưởng (quantum well resonant states). Mặt khác, hiện tượng giao thoa lượng tử có thể dễ dàng thu được bằng cách chèn một lớp kim loại siêu mỏng cỡ 1nm vào giữa lớp hàng rào thế MgO và điện cực. Trong nghiên cứu này, hiệu ứng giao thoa lượng tử được quan sát trong các lớp Fe có độ dày từ 0-1.43 nm được chèn vào giữa lớp MgO và lớp Cr của chuyển tiếp sắt từ - MgO, cấu trúc Cr/Fe(siêu mỏng)/MgO/Fe. Các trạng thái giao thoa cộng hưởng dễ dàng quan sát được bằng phép đo phổ dI/dV . Trong đó, các trạng thái cộng hưởng sẽ tương ứng với các đỉnh cực đại của phổ dI/dV khi mẫu ở trạng thái song song (hình 4a). Các phổ dI/dV được đo cho các mẫu có lớp Fe với các độ dày khác nhau. Kết quả

thu được các vị trí của các trạng thái cộng hưởng là phụ thuộc vào độ dày của lớp sắt. Kết quả của mối liên hệ giữa độ dày của lớp Fe và năng lượng của các trạng thái cộng hưởng được biểu diễn trong hình (4b).



Hình 4. (a) Phổ dI/dV của các chuyển tiếp sắt từ -MgO với các độ dày của lớp Fe khác nhau. Sự phụ thuộc vị trí năng lượng cộng hưởng vào độ dày của lớp Fe (b) thực nghiệm, (c) lý thuyết phương trình (3).

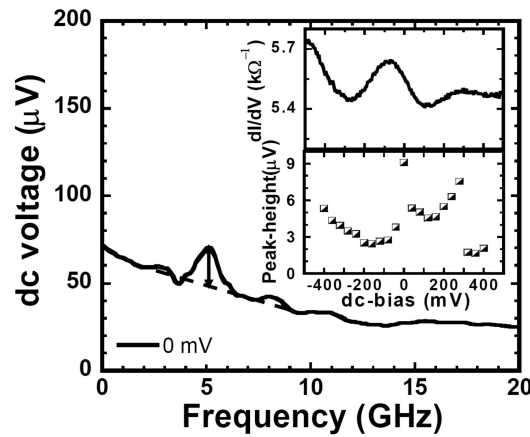
$$k_{Fe,\uparrow}(\bar{\Gamma}).d_{Fe} + \Delta\varphi_{Fe,MgO} + \Delta\varphi_{Fe,Cr} = 2n\pi \quad (3)$$

Qua việc so sánh giá trị thực nghiệm với tính toán lý thuyết bằng phương trình (3) cho thấy các kết quả thu được phù hợp với nhau và chất lượng mẫu không bị ảnh hưởng nhiều khi hàng rào thế MgO được bốc bay trên nền lớp Fe siêu mỏng.

4. Ảnh hưởng của trạng thái giao thoa cộng hưởng tới tính chất của phổ spin-diode.

Phổ spin-diode được xem là phép đo hữu hiệu để kiểm tra các tính chất của hiện tượng cộng hưởng chuyển động tiến động của spin điện tử tương ứng với tần số của dòng xoay chiều [8]. Khi hiện tượng cộng hưởng xảy ra, một thế một chiều được tạo ra trên mẫu và được quan sát bằng một đỉnh cực đại tại tần số cộng hưởng. Hình 5 biểu diễn đặc trưng của phổ spin-diode của mẫu chuyển tiếp từ - MgO có cấu trúc Cr/Fe(10 lớp nguyên tử)/MgO/Fe. Để khảo sát ảnh hưởng của các trạng thái giao thoa cộng hưởng tới giá trị biên độ của thế một

chiều, phổ spin-diode được đo với các giá trị dòng một chiều khác nhau. Biên độ của đỉnh cộng hưởng phụ thuộc vào thế một chiều được biểu diễn trên hình nhỏ phía dưới trong hình 5. So sánh với đặc trưng năng lượng của các trạng thái giao thoa lượng tử (hình nhỏ phía trên trong hình 5), ta có thể thấy biên độ của đỉnh cộng hưởng tăng từ 1 đến 2 lần tại các điện thế tương ứng với các vị trí năng lượng của các trạng thái cộng hưởng. Từ các kết quả trên cho thấy, hiệu ứng giao thoa lượng tử không chỉ góp phần làm tăng giá trị từ trở của mẫu mà còn làm thay đổi các tính chất của phổ spin-diode.



Hình 5. Phổ spin-diode của mẫu chuyển tiếp từ - MgO có cấu trúc Cr/Fe(10 lớp nguyên tử)/MgO/Fe và ảnh hưởng của các trạng thái giao thoa cộng hưởng.

IV. KẾT LUẬN

Qua việc khảo sát phổ d^2I/dV^2 của các mẫu CoFeB/MgO/CoFeB_(x) tại các nhiệt độ khác nhau, hiệu ứng Kondo được xem là có nhiệt độ Kondo trong khoảng 80 – 100 K và phù hợp với mô hình lý thuyết của hiệu ứng Kondo gắn liền với hiện tượng giao thoa Fano của các điện tử dẫn chuyển động không bị tán xạ và các điện tử bị tán xạ bởi các tạp từ. Kết quả cũng có thể cho thấy các tạp từ có thể là Fe, Co hoặc Mn khuếch tán vào trong các lớp điện cực và MgO trong quá trình ủ mẫu ở nhiệt độ cao.

Hiệu ứng magnon cũng đồng thời được khảo sát với các mẫu trên. Kết quả cho thấy mô hình magnon 2 chiều phù hợp với kết quả thực nghiệm. Các

tán xạ của điện tử với các tạp tử và các sai hỏng tại bề mặt tiếp xúc của các lớp điện cực và lớp MgO.

Hiệu ứng giao thoa lượng tử quan sát được trong các mẫu có cấu trúc Cr/Fe(độ dày vài lớp nguyên tử)/MgO/Fe không chỉ làm tăng giá trị từ trở của mẫu mà còn làm thay đổi các tính chất công hưởng spin trong mẫu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
- [2]. J. Kondo *Progr. Theore. Phys. (Kyoto)* **2**, 772 (1962).
- [3]. J. S. Moodera, J. Nowak, and R. J. M. van de Veerdonk, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 2941 (1998).
- [4]. Z. Y. Lu, X. -G. Zhang, and S. T. Pantelides, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 207210 (2005).
- [5]. E. Minamitani, H. Nakanishi, W. A. Diño, and H. Kasai, *J. Phys. Soc. Japan* **78**, 084705 (2009).
- [6]. S. Zhang, P. M. Levy, A. C. Marley, and S. S. P. Parkin, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 3744 (1997).
- [7]. X. G.-Zhang, Y. Wang, and X. F. Han, *Phys. Rev. B* **77**, 144431 (2008).
- [8]. H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe and Y. Suzuki, *Nature* **4**, 37 (2008).