

# Nghiên cứu chế tạo và tính chất dẫn điện AC của các cấu trúc MTJ lai dạng hạt bằng kỹ thuật phổ trở kháng phức

Study of Preparation and AC Conducting Properties in Granular Hybrid-Type Magnetic Tunnel Junction Structures by Complex-Impedance Spectroscopy Technique

Nguyễn Tuấn Anh<sup>1,3</sup>, Lương Văn Sù<sup>1,4</sup>, Nguyễn Anh Tuấn<sup>1\*</sup>, Nguyễn Tuyết Nga<sup>2</sup>, Nguyễn Anh Tuệ<sup>2</sup>, Giáp Văn Cường<sup>4</sup>, Đinh Văn Tương<sup>1</sup>, Hoàng Quốc Khanh<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Viện ITIMS, Trường ĐHBK Hà Nội (HUST) – Số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội.

<sup>2</sup> Viện VLKT (IEP), trường ĐHBK Hà Nội (HUST); 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội.

<sup>3</sup> Trường Cao đẳng Công nghệ Hà Nội, 102 Trung Kính, Đống Đa, Hà Nội.

<sup>4</sup> Trường DHSPTK Hưng Yên (UTEHY); Khoái Châu, Hưng Yên.

Đến Tòa soạn 27-12-2013, chấp nhận đăng 25-08-2014

## Tóm tắt

Trong nghiên cứu này chúng tôi phát triển kỹ thuật phổ trở kháng phức (CIS) để nghiên cứu các tính chất dẫn điện xoay chiều (ac) và các đặc trưng cấu trúc nano của một loại cấu trúc tiếp xúc xuyên ngầm từ (MTJ) dựa trên các màng mỏng ba lớp Co/Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co - là một cấu trúc dạng lai giữa một MTJ đơn, như Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co, với một màng mỏng từ dạng hạt nano Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> đóng vai trò của lớp rào thế xen ở giữa - được gọi là MTJ kiểu lai (hybrid-type MTJ, hay HMTJ). Các cấu trúc HMTJ được chế tạo bằng kỹ thuật phun xạ ca-tốt tần số cao với cách chế tạo dày các lớp khác nhau, từ 20 đến 130 nm, và có thành phần nguyên tử Co ở lớp xen giữa thay đổi từ 8 đến 35 % ng từ. Các đặc trưng phổ CIS đã được khảo sát với các cấu trúc HMTJ được lắng đọng bởi từ trường ngoài có cường độ khác nhau.

Từ khóa: Tiếp xúc xuyên ngầm từ (MTJ), phổ trở kháng phức (CIS), màng mỏng từ dạng hạt nano, MTJ kiểu lai (HMTJ).

## Abstract

In this work, we developed the complex impedance spectroscopy (CIS) technique to study ac electronic properties and nanostructure characteristics of magnetic tunnel junctions (MTJ) based on trilayer thin films Co/Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co - a hybrid type between a single MTJ, such as Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co, and a nanogranular thin film Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> played the role of an inserted barrier layer - the so called hybrid-type MTJ, or HMTJ. The HMTJs prepared by sputtering technique with various thicknesses, from 20 to 130 nm, and various component of atom Co of the Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interlayers, from 8% to 35%. The CIS characteristics are investigated in various intensities of external magnetic field applied on these HMTJs.

Keywords: MTJ, CIS, Nanogranular thin film, HMTJ.

## 1. Giới thiệu

Một cấu trúc tiếp xúc xuyên ngầm từ đơn (single magnetic tunnel junction – SMTJ) tương tự như một tụ điện ba lớp, trong đó hai điện cực là những lớp kim loại sắt từ, như Co, NiFe, CoFe,... được phân cách bởi một lớp phi từ cách điện mỏng, đóng vai trò là lớp rào thế, như SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO,... Tuy nhiên chiều dày của các lớp trong các cấu trúc SMTJ như vậy thường chỉ từ vài đến vài chục nanômét, đặc biệt là lớp rào thế ngăn cách các điện cực chỉ được phép có chiều dày cỡ một vài nanômét để quá trình xuyên ngầm lượng tử có thể diễn ra. Một cấu trúc SMTJ thường được ký hiệu như sau: F1/F, ví dụ Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co. Hiện tượng vật lý quan trọng nhất, và được quan tâm nhiều ở các cấu trúc SMTJ chính là hiệu ứng từ điện trở xuyên ngầm (tunneling magneto-

resistance - TMR) do hiện tượng xuyên ngầm phụ thuộc spin gây ra [1], mà ứng dụng chính của nó chủ yếu ở trong lĩnh vực spintronics [2].

Một kiểu tiếp xúc xuyên ngầm từ đặc biệt khác, với mức độ tiếp xúc chỉ diễn ra trong phạm vi giữa các hạt nano sắt từ, nhưng với số lượng lớn, được phân tán trong một nền phi từ cách điện. Đó là kiểu MTJ dạng hạt (granular magnetic tunnel junction – GMTJ). Cấu trúc này được hình thành khi các nguyên tử sắt từ, với số lượng ít hơn số lượng các nguyên tử “nền” phi từ cách điện, không bị “hòa tan” vào “nền” để hình thành hợp chất hay hợp kim, mà kết tụ lại thành các cụm nguyên tử kim loại, hay hình thành bên các hạt nano. Những cấu trúc GMTJ điển hình gồm có Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-SiO<sub>2</sub>, Fe-MgO,... Ở những cấu trúc kiểu GMTJ này cũng diễn ra quá trình xuyên ngầm phụ thuộc spin giữa các hạt sắt từ nano, nghĩa là cũng làm xuất hiện hiệu ứng TMR như ở các cấu trúc SMTJ [3].

\* Địa chỉ liên hệ: Tel . (04) 3868 0787  
Email: tuanna@itims.edu.vn

Việc kết hợp cả hai kiểu cấu trúc SMTJ và GMTJ trên đây dẫn đến một loại cấu trúc MTJ lai giữa các kiểu dạng hạt và dạng lớp đơn, gọi là cấu trúc HMTJ (hybrid magnetic tunnel junction). Với những cấu trúc lai như vậy không chỉ có hiện tượng xuyên ngầm phụ thuộc spin (biểu ứng TMR) mà còn xuất hiện hiệu ứng chắn Coulomb (Coulomb blockage - CB) [4] và chắn spin [5]. Những cấu trúc HMTJ như vậy được hướng tới ứng dụng cho các linh kiện vận chuyển kiểu đơn điện tử (single electron transport - SET) [6]. Từ các cấu trúc HMTJ này người ta có thể tiến tới thực hiện được sự vận chuyển đơn spin điện tử để tạo ra các linh kiện kiểu SSET (single spin electron transport) [7].

Trong bài báo này chúng tôi đề cập đến một số kết quả nghiên cứu chế tạo các cấu trúc HMTJ và tính chất dẫn điện trong điện trường xoay chiều (ac) sử dụng kỹ thuật phổ trở kháng phức (complex impedance spectroscopy - CIS). Những kết quả thu được sẽ góp phần quan trọng trong việc nhận biết về các tính chất liên quan đến cấu trúc cũng như các quá trình đáp ứng tần số, đặc biệt là các quá trình vận chuyển phụ thuộc spin, trong điện trường xoay chiều tần số cao như thế nào, của các phần tử linh kiện kiểu HMTJ.

**2. THỰC NGHIỆM**

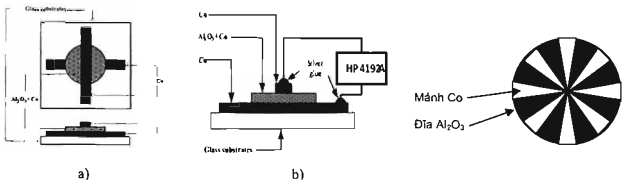
Trong nghiên cứu này, các mẫu với cấu trúc kiểu HMTJ được chế tạo bằng kỹ thuật phún xa catốt, có cấu tạo gồm 3 lớp: Co/Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co, với đế bằng các phiến thủy tinh mỏng có kích thước 20 x 20 mm<sup>2</sup>, dày 0,5 mm. Lớp xen giữa Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> chính là một cấu trúc GMTJ. Hình 1(a) mô tả hình dạng và cấu tạo của các mẫu HMTJ được chế tạo và nghiên cứu. Các thông số chế tạo mẫu gồm: Thiết bị sử dụng là hệ phún xạ Alcatel SCM 400 hoạt động ở tần số phát công suất là 13,56 MHz; môi trường plasma để phún xạ là khí Argon; chân không cơ sở ~ 10<sup>-6</sup> mbar và áp suất khí Argon cho phún xạ là ~ 5.10<sup>-3</sup> mbar; công suất phún xạ là 300 W. Để tạo ra các lớp Co, bia có dạng đĩa làm bằng vật liệu Co sạch (4N) đã được sử dụng. Lớp rào thế dạng hạt Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> được hình thành với bia là đĩa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> được gắn các mảnh Co với số

lượng được tính toán sao cho các mẫu có tỷ lệ Co trong nền Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> được dự kiến trước (hình 2).

Các chế độ sử dụng để chế tạo mẫu trên đây tương ứng với các thông số lắng đọng màng mỏng (đã được xác định bằng thực nghiệm) như sau: tốc độ phủ màng mỏng ~ 0,5Å/s đối với các lớp Co, ~ 0,2 - 0,3Å/s đối với các lớp Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Chiều dày của các lớp được xác định thông qua thời gian phún xạ và các tốc độ lắng đọng đưa ra ở trên. Ở đây các lớp Co được cố định với chiều dày ~ 90 nm, chiều dày của lớp Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thay đổi trong khoảng 20 - 90 nm. Để có hiệu ứng xuyên ngầm phụ thuộc spin trong các cấu trúc SMTJ, chiều dày các lớp rào thế thường chỉ vài nanômét; nhưng với các cấu trúc HMTJ, do có lớp GMTJ xen giữa đóng vai trò của rào thế, nên chiều dày có thể lớn hơn nhiều, lên tới vài chục nanômét. Tỷ lệ thành phần Co trong các lớp Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thay đổi trong phạm vi 8 - 35 % ng. từ đối với Co. Đây là phạm vi dễ hình thành nên các đám hạt sắt từ nano Co với cấu trúc đơn đômen và có tính chất siêu thuận từ [8].

Để tạo ra cấu trúc mẫu có hình dạng và kích thước như mô tả ở hình 1, gồm các dải Co 1 x 10 mm<sup>2</sup> xếp chéo nhau hình chữ thập, với lớp Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> có dạng hình tròn đường kính 5 mm, chúng tôi đã chế tạo một bộ các mặt nạ (mask) có hình dạng và kích thước tương ứng bằng thép không gỉ có chiều dày 1 mm. Hình 3 mô tả bộ mask đã chế tạo và được sử dụng trong nghiên cứu này.

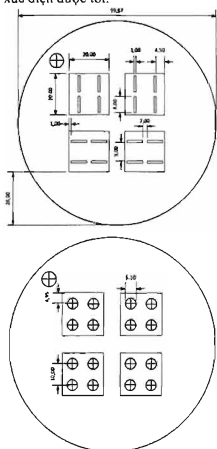
Tính chất điện của mẫu đã được khảo sát bằng thiết bị đo CIS môđen HP 4192A, và đã sử dụng điện áp có tần số 5 Hz - 13,5 MHz với biên độ của tín hiệu ac là 0,1 V. Các phép đo đều được thực hiện ở nhiệt độ phòng và dưới tác dụng của từ trường ngoài được đặt song song với bề mặt mẫu, với cường độ thay đổi trong khoảng H = 0 + 3 kOe. Hình 1(b) mô tả sơ đồ nguyên lý ghép nối mẫu đo với thiết bị đo CIS. Do các mẫu HMTJ có đế là thủy tinh mỏng (dày 0,5 mm), nên để thực hiện các phép đo CIS được thuận tiện và chắc chắn (cả về mặt cơ học lẫn tiếp xúc điện), các mẫu đã được dán chặt lên những tấm



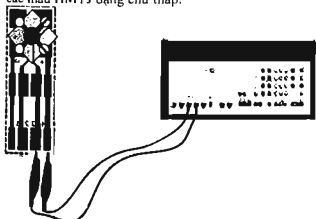
Hình 1. a) Cấu trúc của một HMTJ; b) Sơ đồ mạch đo phổ CIS sử dụng cầu đo tổng trở HP4192A

Hình 2. Bia ghép Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Co để tạo ra lớp rào thế

giá đỡ là các bản mạch in được chế tạo bằng kỹ thuật ăn mòn lớp đồng (Cu) sử dụng axit HCl, nhằm tạo ra các dải dẫn điện phù hợp với việc kết nối giữa mẫu và thiết bị đo. Hình 4 mô tả sự kết nối này. Giữa các dải Co của mẫu với dải Cu trên tấm mạch in (màu đen) được kết nối bằng keo bạc có độ dẫn điện tốt. Giữa các điện cực tương ứng trên tấm mạch in (nối với các dải Co thông qua kết dính keo bạc) được nối với thiết bị đo CIS bằng cặp cá sấu chuyên dụng trong các thiết bị đo điện. Toàn bộ tấm giá đỡ mẫu với các tiếp xúc được định vị chắc chắn nhằm đảm bảo cho các mối tiếp xúc điện được tốt.



Hình 3. Bộ mặt nạ (mask) được sử dụng để chế tạo các cấu trúc HMTJ dạng chữ thập.



Hình 4. (a) Tấm mạch in có gắn mẫu nghiên cứu. b) Thiết bị đo CIS môđen HP 4192A.

Phương pháp phổ trở kháng phức dựa trên kỹ thuật điện xoay chiều (*ac*) đã từ lâu được ứng dụng trong nghiên cứu tính chất điện - vật lý của các hệ vật liệu [9]. Về cơ bản đây là phương pháp nghiên cứu liên quan đến việc so sánh các đặc tính điện xoay chiều của hệ đã có với các mạch tương đương. Các thông số cơ bản để đánh giá và so sánh trong phương pháp này là trở kháng và hệ số điện môi phức. Trở kháng điện  $Z(\omega)$  được xác định như là tỷ số của điện áp hình sin  $U(\omega) = U_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi)}$  đặt lên hệ điện và dòng

xoay chiều thu được  $I(\omega) = I_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi)}$ . Và tổng trở được xác định như sau:  $Z(\omega) = U(\omega) / I(\omega) = U_0 / I_0 \cdot e^{-i\varphi}$ .  $Z(\omega)$  là một số phức, có thể được biểu diễn trong hệ tọa độ cực độ phức:  $Z(\omega) = Re Z + i Im Z$ , trong đó  $Re Z$  (hay  $Z'$ ) là phần thực, và  $Im Z$  (hay  $Z''$ ) là phần ảo của trở kháng phức  $Z(\omega)$ . Sự liên hệ giữa các đại lượng này được biểu

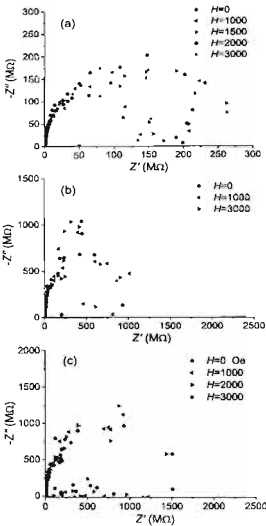
$$|Z|^2 = (Re Z)^2 + (Im Z)^2$$

diễn:  $\varphi = \arctan(Im Z / Re Z)$

$$Re Z = |Z| \cos \varphi, \quad Im Z = |Z| \sin \varphi$$

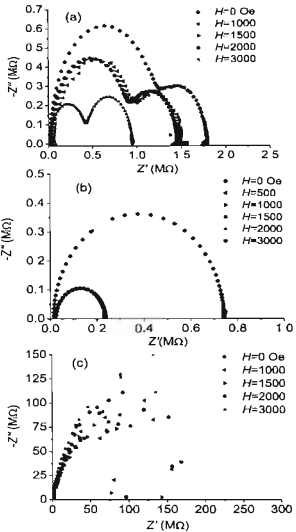
### 3. Kết quả và thảo luận

Trước hết, các màng mỏng GMTJ đơn lớp Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> đã được nghiên cứu tính chất từ từ trước, với tỷ lệ Co khác nhau, nhằm tìm hiểu hành vi từ cũng như đặc trưng cấu trúc dạng hạt của các hạt từ siêu mịn. Các kết quả (không trình bày ở đây) đã cho thấy hành vi từ thay đổi từ tính chất thuần từ khi tỷ lệ Co thấp, ~ 8% ng.từ, đến hành vi siêu thuận từ tiến gần đến kiểu sắt từ mềm khi tỷ lệ Co tăng dần đến ~ 35% ng.từ [10]. Điều đó đã cho phép xác nhận về cấu trúc màng được dùng làm lớp rào thế cho các cấu trúc HMTJ nghiên cứu ở đây. Chúng gồm các chòm và các hạt sắt từ nano bị phân tán bên trong các lớp màng mỏng Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Tiếp đến là những nghiên cứu tính chất từ đối với các cấu trúc HMTJ. Các kết quả (như đã chỉ ra trong [10]) đã phân ánh rõ có sự tổ hợp của cả tính chất siêu thuận từ lẫn biểu hiện của liên kết tinh từ giữa các lớp điện cực Co. Tùy theo chiều dày của lớp Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> xen giữa mà sự liên kết đó sẽ dẫn tới hệ quả là từ độ của các lớp điện cực Co sẽ sắp xếp song song hay phản song với nhau. Tính chất này sẽ tác động đến sự xuyên ngầm phụ thuộc spin qua các cấu trúc HMTJ. Sự xuyên ngầm phụ thuộc spin trong các cấu trúc MTJ nói chung sẽ diễn ra mạnh nhất khi từ độ các lớp Co sắp xếp hoàn toàn song song với nhau, và bị "khóa" khi sự sắp xếp này là phản song [11]. Phân tích các kết quả nghiên cứu đặc tính dẫn *ac* phụ thuộc spin thông qua các khảo sát phổ trở kháng phức CIS dưới tác dụng của từ trường ngoài (0-3 kOe) đối với các cấu trúc HMTJ được dựa trên những tính chất từ đã biết như đã nêu trên đây.



**Hình 5.** Phổ đặc trưng CIS của các mẫu được đặt trong từ trường có cường độ khác nhau: a) HMTJ(8-20), b) HMTJ(8-40), c) HMTJ(8-60).

Vì hai lớp Co trong các mẫu đều có cùng chiều dày cố định ở 90 nm, các mẫu chỉ khác nhau về chiều dày  $t$  và tỷ lệ thành phần Co  $x$  của lớp  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  xen giữa, nên để thuận tiện cho việc theo dõi khi phân tích, các mẫu được ký hiệu như sau: HMTJ( $x-t$ ), trong đó  $x = 8, 10, 25, 35\%$  ng.từ; còn  $t = 20, 30, 40, 45, 60,$  và  $90$  nm. Ví dụ HMTJ(10-20) có nghĩa là ứng với cấu trúc HMTJ Co(90nm)/Co10%- $\text{Al}_2\text{O}_3$ (20nm)/Co(90nm). Các hình 5-8 trình bày kết quả thu được từ các phép đo phổ CIS đối với các cấu trúc HMTJ như vậy. Sử dụng chương trình ZSimpWin Version 3.00 để khớp (fit) các số liệu CIS [12], chúng tôi nhận được các mạch điện tương đương chủ yếu có kiểu mạch cơ bản, gồm hai phần tử là tụ điện C và điện trở R song song với nhau, (CR); hay kiểu mạch Randles gồm một điện trở  $R_0$  nối tiếp với mạch cơ bản trên,  $R_0(\text{CR})$ . Nhận thấy những kiểu mạch này mô tả rất sát với cấu trúc kiểu tụ điện thực của các mẫu nghiên cứu, vì vậy ở đây chúng tôi không trình bày và đi sâu phân tích định lượng các mạch điện cụ



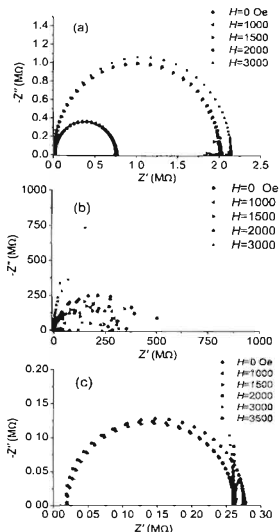
**Hình 6.** Phổ đặc trưng CIS của các mẫu được đặt trong từ trường có cường độ khác nhau: a) HMTJ(10-20), b) HMTJ(10-40), c) HMTJ(10-60).

thể với các thông số tương ứng của các phần tử mạch ( $R_0, R$  và  $C$ ), mà chủ yếu phân tích định tính (dựa trên các số liệu CIS) chỉ để thấy được tương quan và mối liên hệ giữa cách sắp xếp từ độ của các lớp điện cực Co và ảnh hưởng khi bị từ hóa của các hạt nano Co xen giữa trong lớp điện môi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  đối với dòng điện ac phụ thuộc spin như thế nào (thông qua trở kháng Z thay đổi).

Trước hết xét trình tự các mẫu theo tỷ lệ thành phần Co, tăng từ 8 đến 35% ng.từ, có thể nhận thấy ngay rằng với tỷ lệ Co rất thấp, ví dụ mẫu HMTJ(8- $t$ ) với 8% (xem bình 5), các điểm số liệu CIS chỉ thể hiện tương đối rõ hình dạng của một đoạn nửa cung tròn ở vùng tần số cao, nghĩa là ở phía trở kháng Z thấp. Mật độ trở kháng chung rất cao, hàng trăm hay hàng nghìn  $\text{M}\Omega$ . Điều này cho thấy rằng có thể các cụm nguyên tử Co rất nhỏ và thưa, thậm chí chỉ là những nguyên tử Co đơn lẻ phân tán trong lớp rào thế  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  đóng vai trò là những tâm bắt điện tử, hơn nữa lại phụ thuộc spin, làm tăng cường mạnh

hằng số điện môi. Đây có thể hy vọng là hệ quả của việc lớp rào thế  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  đã trở thành một loại vật liệu điện môi có hằng số  $k$  rất cao – *super-k*, khi tồn tại các chòm nguyên tử kim loại trong điện môi như đã được chứng tỏ trong [13]. Nhưng do bị cạnh tranh với sự thăng giáng nhiệt làm thay đổi phương mômen từ của các chòm hạt Co so với từ độ của hai lớp điện cực Co, nên đã gây ra sự nhiễu động lớn đối với sự dẫn của dòng *ac*. Như thấy rõ ở hình 6, khi tần số thấp, ứng với vùng trở kháng  $Z'$  cao, các số liệu trở kháng  $Z$  không tuân theo dạng của bất kỳ đường nửa cung tròn nào, mà bị phân tán một cách ngẫu nhiên. Trở kháng rất cao ở các mẫu HMTJ(8-*r*) này so với các mẫu còn lại khác có tỷ lệ Co lớn hơn, thậm chí cho dù trong số đó có những mẫu còn có lớp xen giữa dày hơn (mà về nguyên tắc đối với dòng *ac* chúng phải có trở kháng lớn hơn, nhưng ngược lại trở kháng *ac* lại thấp hơn đến nhiều bậc), đã thể hiện sự sắp xếp từ độ giữa hai lớp điện cực Co có khả năng theo kiểu phân song với liên kết rất mạnh. Vì thế đã ngăn chặn mạnh sự xuyên ngầm *ac* phụ thuộc spin.

Khi tỷ lệ Co tăng lên, ví dụ 10% ng.từ như ở các mẫu HMTJ(10-*r*) (xem hình 6), các đường cung dạng nửa hình tròn đã bắt đầu xuất hiện rõ hơn, thể hiện một cấu trúc tụ điện hoàn chỉnh hơn về mặt dẫn dòng *ac*. Một mặt, hiện tượng tăng cường hệ số điện môi  $k$  về mặt *dc* đã bị suy giảm đáng kể do số lượng và kích thước các chòm Co tăng lên. Do đó trở kháng chung của mẫu đã giảm đi cỡ 1000 lần so với các mẫu HMTJ(8-*r*). Mặt khác, vai trò sắp xếp từ độ giữa các lớp điện cực Co ở hệ mẫu này đã có tác dụng dẫn dòng *ac* phụ thuộc spin rõ hơn, trong khi đó còn có sự phối hợp sắp xếp từ độ của các hạt nano Co xen giữa cũng trở nên rõ rệt hơn. Các đường nửa cung tròn dạng đơn thể hiện một quá trình hồi phục đơn của các điện tử dẫn trong cấu trúc tụ điện với lớp rào thế thuần nhất [9]. Nghĩa là lớp rào thế  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  chỉ đóng vai trò là một lớp có độ cách điện thuần nhất. Điều này cũng thể hiện rõ ở một số mẫu khác như thấy trong các hình 7 và 8. Các đường nửa cung tròn dạng kép, nghĩa là đường đặc trưng CIS có dạng gồm 2 nửa cung tròn, như thấy ở hình 6(a), thể hiện hệ HMTJ có hai quá trình hồi phục điện từ dẫn khác nhau. Điều này có nghĩa là lớp rào thế  $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$  phải gồm có hai thành phần với các hằng số điện môi khác nhau. Có thể ở đây các hạt nano Co đã đóng vai trò như một pha thứ hai nằm trong pha thứ nhất là nền  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Đối với các mẫu này, hiện tượng trở kháng  $Z$  không ổn định ở vùng tần số thấp (hình 6(c)) tương tự như trong trường hợp các mẫu HMTJ(8-*r*) có tỷ lệ Co rất thấp (hình 5), là ứng với mẫu có lớp rào thế khá dày, 60 nm. Tổng trở ở mẫu này cũng lớn hơn nhiều so với các mẫu còn lại với cùng tỷ lệ 10% Co. Tính chất từ cho thấy mẫu này có liên kết từ độ kiểu phân song khá rõ so với các mẫu còn lại, nên hạn chế mạnh dòng spin xuyên ngầm.



Hình 7. Phổ đặc trưng CIS của các mẫu được đặt trong từ trường có cường độ khác nhau: a) HMTJ(25-30), b) HMTJ(25-60), c) HMTJ(25-90).

Đối với các mẫu HMTJ(25-*r*) ứng với 25% ng.từ (xem hình 7), các đường nửa cung tròn đơn nổi trội thể hiện rằng các cấu trúc HMTJ có lớp rào thế khá thuần pha điện môi, nghĩa là có quá trình hồi phục đơn. Nhìn chung so với 2 loạt mẫu có tỷ lệ Co thấp, 8 và 10 %, tổng trở của các mẫu 25 % Co có xu hướng giảm mạnh nhất trong số 4 loạt mẫu được nghiên cứu ở đây. Có thể với tỷ lệ Co như vậy, tính siêu thuận từ là điển hình nhất như đã được quan sát thấy [10], và các hạt/chùm hạt Co trong lớp điện môi như thế chủ yếu sẽ có kích thước ứng với cấu trúc đơn đômen thuần túy, nên dễ dàng phối hợp vận chuyển phụ thuộc spin với 2 lớp điện cực Co hơn. Tuy nhiên với mẫu HMTJ(25-60) lại có trở kháng *ac* cao hơn nhiều so với hai mẫu còn lại. Có thể ở mẫu này lớp rào thế với chiều dày 60 nm đã làm cho cặp từ độ của 2 lớp điện cực Co có liên kết kiểu phân song mạnh hơn hai mẫu còn lại, nên cản trở mạnh hơn sự xuyên ngầm *ac* qua cấu trúc HMTJ. Các

ngiên cứu tính chất từ đối với mẫu này đã chứng tỏ điều đó [10].

Khi tăng tỷ lệ Co đến 35 % ng.từ như ở các mẫu HMTJ(35-r) (xem hình 8), hành vi dẫn điện *ac* kiểu xuyên ngầm giữa các điện cực Co có xu hướng tăng lên đôi chút so với các mẫu HMTJ(25-r) có thành phần 25% Co. Mặc dù ở các mẫu này (tính chất liên kết kiểu song song mạnh hơn so với các mẫu HMTJ(25-r) [10], nhưng với lượng Co lớn hơn, 35% ng.từ, thành phần siêu thuận từ giảm đi, trong khi thành phần sắt từ tăng lên. Đây có thể là hệ quả của việc hình thành nhiều hơn những hạt Co có cấu trúc đa đômen, và/hoặc tăng cường hơn các liên kết kiểu sắt từ giữa các đám hạt Co trong lớp rào thế. Điều này sẽ gây tán xạ lật spin mạnh hơn, do đó có trở kháng cao hơn, so với các trường hợp trong đó các hạt Co thuần nhất là đơn đômen và giữa chúng không có tương tác, hoặc tương tác rất yếu.

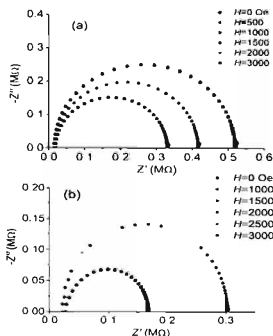
Một điều được nhận thấy từ nghiên cứu này là, đối với tất cả các mẫu có đường phổ đặc trưng CIS kiểu không xác định rõ rệt trong vùng tần số thấp (phía trở kháng cao), như thấy ở các hình 5, 6(c), 7(b), đều tương ứng với tính chất từ thể hiện rõ có sự liên kết từ độ kiểu phản song với liên kết khá mạnh [10]. Đây là kiểu liên kết dẫn đến ngăn chặn sự vận chuyển phụ thuộc spin mạnh nhất [11]. Trong khi đó các mẫu có dạng đường phổ CIS cung đơn với tổng trở *Z'* nhỏ, khoảng dưới 0.3 MΩ như thấy ở các hình 7(a,c) và 8(b), đều thể hiện tính chất từ tương ứng với kiểu sắp xếp từ độ song song và liên kết mạnh [10], vì thế dẫn dòng xuyên ngầm *ac* tốt hơn với trở kháng nhỏ hơn.

Xét theo ảnh hưởng của từ trường ngoài tác dụng lên các cấu trúc HMTJ đối với phổ tổng trở CIS, trong tất cả các trường hợp được nghiên cứu ở đây, dễ dàng nhận thấy có hai xu hướng nổi trội: Thứ nhất là trở kháng *ac* giảm mạnh khi cường độ từ trường tăng lên, như trường hợp ở các hình 6(a,b) và 8(b). Sau đó là quá trình ngược lại: trở kháng *ac* tăng lên khi cường độ từ trường tăng, như thấy rõ ở trường hợp các hình 7(a) và 8(a). Với trường hợp đầu, sự tăng cường độ từ trường đã làm tăng mạnh sự sắp xếp song song của cả từ độ của hai lớp điện cực Co lẫn các hạt Co trong lớp điện môi. Do đó giảm mạnh trở kháng xuyên ngầm *ac* đối với các spin cùng chiều với vec-tơ từ độ. Sự liên kết từ kiểu song song ở các mẫu này có thể rất mạnh, nên từ trường ngoài dễ dàng xoay toàn bộ cặp từ độ song song của 2 lớp điện cực Co lẫn từ độ của tất cả các hạt Co trong lớp điện môi theo hướng tác dụng. Ở trường hợp sau, do liên kết kiểu phản song mạnh đối với các cặp vec-tơ từ độ của 2 lớp điện cực Co, từ trường ngoài không đủ xoay chúng trở thành song song với nhau để làm giảm trở kháng xuyên ngầm *ac*, mà chỉ đủ để xoay từ độ của các hạt Co trong lớp điện môi. Khi các lớp điện cực Co vẫn đang có liên kết phản song đủ mạnh, dù các hạt Co đã trở nên sắp xếp song song với phương từ trường ngoài, nhưng lại vẫn ngược chiều với cặp từ độ của điện cực Co, nên đã trở thành những tâm bẫy ngăn cản sự xuyên ngầm "bắc cầu" của các spin có cùng hướng với cặp từ độ đó. Hiệu ứng này thể hiện rõ hơn khi phương từ trường tác dụng lệch nhiều so với phương liên kết phản song mạnh của cặp từ độ ở các lớp điện cực Co, và đặc biệt khi có dị hướng từ mạnh theo bề mặt mẫu. Nói khác đi, các hiện tượng liên quan đến tác dụng của từ trường trên đây chính là bằng chứng tiên biểu cho sự xuyên ngầm phụ thuộc spin trong điện trường *ac* của các cấu trúc HMTJ.

#### 4. Kết luận

Các cấu trúc xuyên ngầm từ dạng lai giữa kiểu lớp và kiểu hạt Co/Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co với chiều dày lớp xen giữa dạng hạt nano Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thay đổi từ trong khoảng 20-90 nm, và nồng độ Co trong lớp dạng hạt thay đổi trong khoảng 8-35% ng.từ, đã chế tạo được bằng kỹ thuật phun xạ catốt.

Nghiên cứu phổ trở kháng phức CIS trên các cấu trúc HMTJ đã được thực hiện. Kết quả đã phản ánh chung các mẫu có cấu trúc kiểu tụ điện điển hình. Hành vi xuyên ngầm phụ thuộc tần số *ac* giữa hai điện cực Co thông qua các chùm hạt Co ở lớp xen giữa cho thấy có sự thay đổi rõ rệt theo tỷ lệ thành phần hạt Co cũng như chiều dày của lớp Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Đã thấy được sự phụ thuộc từ trường ngoài của độ dẫn *ac* của các cấu trúc HMTJ Co/Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co. Quá trình xuyên ngầm phụ thuộc spin qua cấu trúc MTJ lai có thể được đánh giá qua các số liệu của phổ trở kháng phức CIS phụ thuộc vào từ trường ngoài tác



Hình 8. Phổ đặc trưng CIS của các mẫu được đặt trong từ trường có cường độ khác nhau: a) HMTJ(35-45), b) HMTJ(35-90).

dụng. Từ trường càng lớn dòng xuyên ngầm  $ac$  càng cao, do đó trở kháng càng thấp.

Ngoài ra trong nghiên cứu này chúng tôi cũng đã quan sát được những biểu hiện của sự phụ thuộc từ trường ngoài của hằng số điện môi ở cấu trúc MTJ dạng lai. Do đó nghiên cứu này cũng đã gợi mở về một khả năng tạo ra được một loại vật liệu có hằng số điện môi rất cao bằng cách bổ xung một lượng nhỏ thích hợp các nguyên tử kim loại. Để có thể làm thay đổi hay điều biến hằng số điện môi, ví dụ bằng tác dụng của từ trường ngoài, các nguyên tử kim loại bổ xung cần phải có tính chất sắt từ.

#### Lời cảm ơn

Công trình này được thực hiện dưới sự hỗ trợ kinh phí của Quỹ NAFOSTED, thông qua đề tài NCCB trong khoa học tự nhiên, mã số 103.02.2012.65.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] M. Julliere, *Phys. Lett.*, **54A**, (1975) 225-226.
- [2] S. S. P. Parkin, *Annu. Rev. Mater. Sci.* **25**, (1995) 357-388.
- [3] H. Fujimori, S. Mitani, S. Ohnuma, *Mater. Sci. Eng.* **B31**, 219 (1995); S. Mitani, S. Takanashi, K. Takanashi K. Yakushiji, S. Maekawa, H. Fujimori, *Phys. Rev. Lett.* **28**, (1998) 2799-2802.
- [4] H. Grabert and M. H. Devoret (Eds.), *Single Charge Tunneling*, Plenum Press, New York (1992).
- [5] J. Martinek and J. Bamaš, in *Concepts in spin electronics*, ed. by S. Maekawa, Oxford University Press, First published 2006, 145-194
- [6] K. Uchida, in *Nanoelectronics and Information Technology*, Ed. by Rainer Waser, Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2003) 427-443.
- [7] K. Yano, *et al.*, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **41**, (1994) 1628.
- [8] B. D. Cullity, *Introduction to magnetic materials*, Addison-Wesley Pub. Co., (1972) 383-418.
- [9] J. R. MacDonald, *Annals of Biomedical Engineering*, **20** (1992) 289
- [10] Lương Văn Sửu, *Luận văn thạc sỹ kỹ thuật*, Viện ITIMS trường ĐHBKHN & trường ĐHSPKT Hưng yên (2011).
- [11] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong and R. Meservey, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 3273.
- [12] Bruno Yeum *ZSimpWin Version 3.00* program, 2002.
- [13] S. K. Saha, M. D. Silva, Q. L. Hang, T. Sands and D. B. Janes, *Nanotech.* **17** (2006) 2284-2288