다층형 Fe/Cr 자성박막에서 계면확산의 방사광 x-선 연구

조태식, 정지욱

국립상주대학교 신소재공학과

Interfacial diffusion in Fe/Cr magnetic multilayers studied by synchrotron x-ray techniques

Tae-Sik Cho and Ji-Wook Jeong

Abstract

The interfacial diffusion in Fe/Cr/MgO(001) multilayers has been studied using synchrotron x-ray techniques, such as x-ray reflectivity, extended x-ray absorption fine structures (EXAFS), and anomalous x-ray scattering (AXS). The results of x-ray reflectivity indicated that the interfacial roughness of Fe/Cr multilayers with Cr-40Å-thick was larger than that with Cr-4Å-thick. The results of EXAFS indicated that the Fe element dominantly diffuse into the stable Cr layers at the Fe/Cr interface. The AXS was certified the existence of the interdiffused Fe element in the Cr layers. Our study revealed that the rough interface of the Fe/Cr multilayers was caused by the interfacia diffusion of Fe element into the Cr layers.

Key Words : interfacial diffusion, Fe/Cr multilayers, synchrotron x-ray techniques

1. 서 론

거대자기저항 (GMR)용 다층박막형 Fe/Cr 자성박막에서 Fe/Cr 계면의 연구는 매우 중요하다.[1] 이는 결정구조가 같고 격자상수의 차이가 적어 계면의 정합성이 우수하고, 계면에서 2종류 전도전자 (스핀↑ 및 스핀↓)의 산란과 투과의 선택성이 우수하여 대부분의 스핀의존산란 (spin dependent scattering)이 계면에서 일어나기 때문이다. Fe/Cr 다층박막의 계면 거칠기 (interfacial roughness)가 증가하면 산란계면의 증가로 GMR비가 증가하는 것으로 알려져 있다.[1,2]

본 연구에서는 Fe/Cr 다층박막의 계면이 거칠어지는 원인을 방사광 x-선 기법으로 규명하고자 하였다. 그리하여 Fe/Cr 다층박막의 거친 계면은 Cr층 속으로 Fe 원소의 확산에 의하여 주로 야기된다는 사실을 규명하였다.

2. 실 험

Fe/Cr 다층박막은 Fe층의 두께를 10 Å으로 고정하고, Cr층의 두께를 monatomic 수준인 4 Å과 상대적으로 두꺼운 40 Å으로 구분하여 MgO(100) 기판 위에 초고진공에서 전자건 가열방식으로 제작되었다. 그림 1에는 Fe/Cr 다층박막의 계면확산을 연구하기 위한 2종류 다층박막의 기본 개념도를 나타내었다. 제조된 2종류 Fe/Cr 다층박막의 정확한 구성은 아래와 같다. 방사광 x-선 실험은 포항방사광가속기의 K-JIST(5C2)빔라인에서 수행되었다.

A형: Fe(10)/[[Fe(10)/**Cr(40)**$]_{29}$]/Cr(50)/MgO(100)

B형: Fe(10)/[[Fe(10)/**Cr(4)**$]_{24}$]/Cr(50)/MgO(100)

3. 결과 및 고찰

방사광 x-선 반사법을 이용하여 Cr층의 두께가 서로 다른 Fe/Cr/MgO(100) 자성 다층박막의 계면

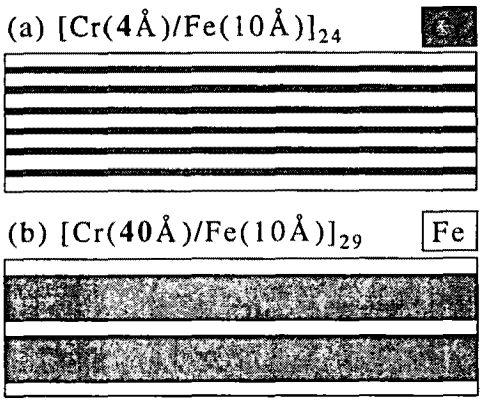

그림 1. Cr층의 두께에 따른 Fe/Cr 다층박막.

변화를 연구하였다. 그림 2에는 Cr층의 두께가 4 Å과 40 Å으로 서로 다른 Fe/Cr 다층박막의 x-선 반사법을 이용한 실험결과를 나타내었다. Cr층의 두께가 4 Å으로 얇은 Fe/Cr 다층박막과 비교하여 40 Å으로 두꺼운 다층박막의 전체 x-선 강도와 oscillation의 크기가 크게 감소하였다. 또한, 다층박막의 계면거칠기는 satellite 피크에서 rocking곡선의 반가폭 (full width half maximum; FWHM)을 측정함으로써 평가할 수 있다고 알려져 있다.[2] Cr층의 두께가 4 Å인 다층박막의 첫 번째 satellite 피크에서의 반가폭은 0.99° FWHM을 나타내었고, 40 Å으로 두꺼운 다층박막의 첫 번째 satellite 피크에서의 반가폭은 1.20° FWHM로 증가하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 Cr층의 두께가 두꺼워지면 Fe/Cr 계면의 거칠기가 증가한다는 사실을 나타낸다.

이는 Fe/Cr 계면에서 Fe나 Cr원소의 상호확산에 기인하리라 사료되며, 이를 규명하기 위하여 방사광 EXAFS 실험을 수행하였다. Fe/Cr 다층박막에서 Fe와 Cr 원소는 결정구조가 bcc로 같고 격자상수가 매우 유사하기 때문에 전통적인 XRD나 TEM을 사용해서는 조성 segregation의 구조적 정보를 얻기가 어렵다.[3] 방사광 EXAFS 기술은 나노구조 합금을 연구하는데 있어서 유용한 도구로써 널리 받아들여지고 있다.

방사광 EXAFS로 서로 다른 Cr층의 두께를 갖는 Fe/Cr 다층박막에서 얻은 실험결과를 Fourier Transform(FT)을 이용하여 분석된 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)에서 보듯이, 두꺼운 Cr층

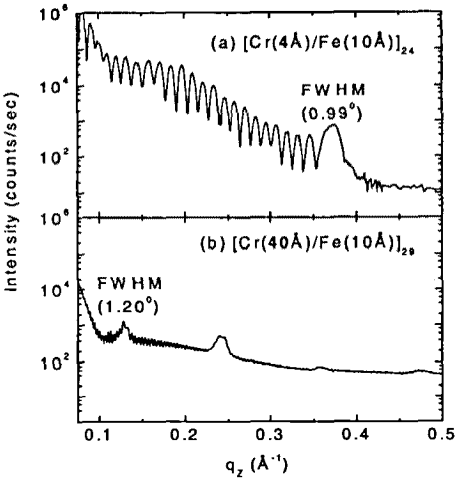

그림 2. Fe/Cr 다층박막의 x-선 반사법 결과. (a) Cr층(4 Å). (b) Cr층(40 Å).

의 Fe/Cr 다층박막과 얇은 Cr층의 다층박막의 FT-EXAFS 결과는 표준 Cr foils의 FT-EXAFS 결과와 비교하여 별다른 차이를 나타내지 않았다. 이는 Fe/Cr 다층박막에서 Cr원소가 상대적으로 움직이지 않고 Cr층을 유지하고 있는 것을 의미한다.

그러나 그림 3(b)에서 보듯이, 두꺼운 Cr층의 Fe/Cr 다층박막의 FT-EXAFS 결과는 얇은 Cr층의 다층박막과 표준 Fe foils의 FT-EXAFS 결과와 비교하여 고려할만한 차이를 나타내었다. Cr층의 두께가 monoatomic 수준인 Fe/Cr 다층박막의 결과와 비교하여 Cr층이 두꺼운 다층박막의 결과가 다른 것은 Fe/Cr 계면에서 Fe 원소가 Cr층 속으로 확산되어 intermixing 영역을 형성하기 때문이라 사료된다. Cr층이 얇은 Fe/Cr 다층박막에서의 결과는 Fe/Cr 계면에서 Fe 원소가 Cr층 속으로 확산이 가능하지만, Cr층의 두께가 monoatomic 수준이므로 확산 전후 Fe 원소 주위의 ordering에는 큰 차이가 없기 때문이다. EXAFS 결과를 종합하면, Fe 원소가 dominent diffusion atom으로서 Cr층 속으로 intermixing되며, 이로 인하여 Cr층의 두께가 증가하면 계면 거칠기가 증가하는 결과를 나타내었다.

X-선의 에너지를 연속적으로 조절할 수 있는 방사광 x-선을 이용하여, 에너지 분해 x-선 산란의 일종인 비정상 x-선 산란 (anomalous x-ray sca-

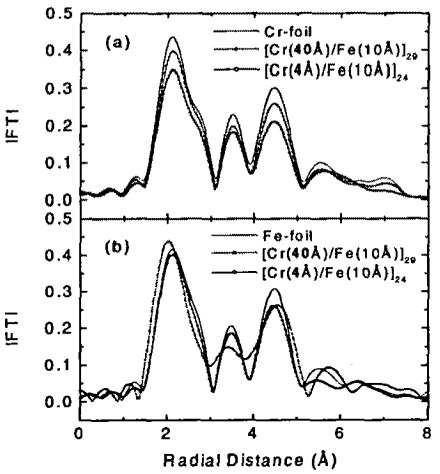

그림 3. Fe/Cr 다층박막의 방사광 FT-EXAFS 실험결과. (a) Cr-edge. (b) Fe-edge.

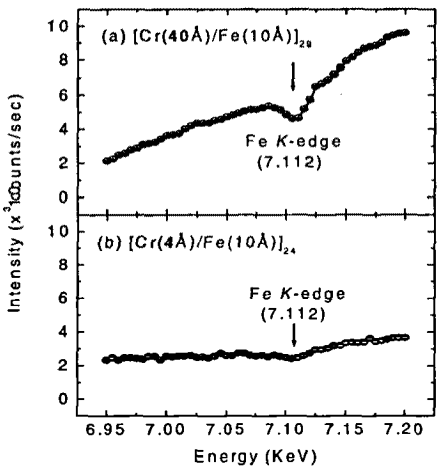

그림 4. Fe/Cr 다층박막의 AXS 실험결과. (a) Cr층(40 Å). (b) Cr층(4 Å).

ttering)을 활용하면 나노 물질의 구조와 화학적 조성을 동시에 연구하는 것이 가능하고 알려져 있다.[4] 비정상 x-선 산란은 기존의 x-선 흡수기법(EXAFS)과 x-선 산란기법을 조합한 기법이며, 시편 구성원소의 특성 흡수에너지 근처 (near-edge)에서 x-선 산란형태의 에너지 의존성을 연구하는 기법이다. 본 연구에서는 비정상 x-선 산란을 활용하여 Fe/Cr 다층박막에서 Cr층 속으로 확산된 Fe 원소의 존재를 확인하고자 하였다.

비정상 x-선 산란을 효과적으로 수행하기 위해서는 Cr(200) Bragg reflection의 정확한 위치를 결정하는 것이 중요하다. Fe/Cr 다층박막에서 Fe와 Cr 원소는 결정구조가 bcc로 같고 격자상수의 차이가 적어 Fe(200)와 Cr(200) Bragg reflection의 위치는 매우 유사하다 [Fe(200): q_z=4.384Å^{-1}, Cr(200): q_z=4.358Å^{-1}]. Cr(200) Bragg reflection의 정확한 위치를 결정하기 위하여, high resolution x-ray scattering을 이용하여 7.012 keV와 5.889 keV (just below the respective K-edges of Fe and Cr)의 x-선 에너지에서 서로 다른 Cr층의 두께를 갖는 Fe/Cr 다층박막의 powder diffraction 실험을 수행하였다. 각각의 Fe/Cr 다층박막에서 Cr/Fe(200) reflection 위치에서 관측된 peak는 single peak이었으며, peak position은 Cr(200) position과 일치하는 q_z=4.359Å^{-1}를 나타내었다.

그림 4에는 서로 다른 Cr층의 두께를 갖는 Fe/Cr 다층박막의 Cr(200) peak에서 비정상 x-선 산란으로 Fe의 *K*-흡수단 근처에서 측정된 실험결과를 나타내었다. 비정상 x-선 산란 측정동안 momentum transfer는 다층박막의 정확한 Cr(200) reflection 위치인 q_z=4.358Å^{-1}에서 고정되었다. 그림 4(a)와 그림 4(b)에서 보듯이, Cr층의 두께가 두꺼운 (40 Å) 다층박막의 비정상 x-선 산란 결과뿐만 아니라 얇은 (4 Å) 다층박막의 결과에서도 cusp이 존재하는 것으로 보아서 Cr층 속에 Fe 원소가 존재함을 확인할 수 있었다. 하지만 Cr층이 40 Å인 다층박막의 cusp의 크기와 비교하여, Cr층이 4 Å로 얇은 다층박막의 cusp의 크기가 매우 작은 것은 Cr층이 monoatomic 수준이기 때문에 Cr층 속에 Fe 원소가 존재하기 어렵기 때문이다.

4. 결 론

Fe/Cr/MgO(100) 자성 다층박막에서 계면 확산은 x-선 반사법, EXAFS법, 그리고 비정상 x-선 산란법과 같은 방사광 x-선 기법으로 연구되어졌다. X-선 반사법은 Fe/Cr 다층박막의 계면 거칠기가 Cr층의 두께가 4 Å에서 40 Å로 증가함에 따라 거칠어지는 결과를 나타내었다. EXAFS법은 Fe/Cr 다층박막의 계면에서 Cr층은 안정하고 Fe

원소가 주로 Cr층 속으로 확산되는 결과를 나타내었다. Fe/Cr 다층박막의 Cr층 속으로 확산된 Fe 원소의 존재는 비정상 x-선 산란법으로 확인되었다. 본 연구에서는 Fe/Cr 다층박막의 거친 계면은 Cr층 속으로 Fe 원소의 확산에 의하여 야기된다는 사실을 규명하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2002-000-01186-0)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 실험에 협조해준 포항방사광가속기 (2002-2056-08)에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] M. N. Baibich *et al.*, "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices", Phys. Rev. Lett., Vol. 61, No. 21, p. 2472, 1988.

[2] E. E. Fullerton, D. M. Kelly *et al.*, Phys. Rev. Lett., Vol. 68, p. 859, 1992.

[3] G. M. Chow *et al.*, "Structure determination of nanostructured Ni-Co films by anomalous x-ray scattering", Appl. Phys. Lett., Vol. 75, No. 16, p. 2503, 1999.

[4] H. H. Lee *et al.*, "Determination of absolute indium content in InGaN/GaN multiple quantum wells using anomalous x-ray scattering", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 27, p. 5120, 2002.