

Soft X-ray Synchrotron-Radiation Spectroscopy Study of [Co/Pd] Multilayers as a Function of the Pd Sublayer Thickness

D. H. Kim, Eunsook Lee, Hyun Woo Kim, Seung-ho Seong, and J.-S. Kang*

Department of Physics, The Catholic University of Korea, Bucheon 14662, Korea

Seung-Mo Yang, Hae-Soo Park, and JinPyo Hong

Department of Physics and the Research Institute for Natural Science, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 6 July 2016, Received in final form 23 August 2016, Accepted 23 August 2016)

We have investigated the electronic structures of intermetallic multilayer (ML) films of [Co(2Å)/Pd(xÅ)] (x: the thickness of the Pd sublayer; x = 1 Å, 3 Å, 5 Å, 7 Å, 9 Å) by employing soft X-ray absorption spectroscopy (XAS) and soft X-ray magnetic circular dichroism (XMCD). Both Co 2p XAS and XMCD spectra are found to be similar to one another, as well as to those of Co metal, providing evidence for the metallic bonding of Co ions in [Co/Pd] ML films. By analyzing the measured Co 2p XMCD spectra, we have determined the orbital magnetic moments and the spin magnetic moments of Co ions in [Co(2Å)/Pd(xÅ)] ML films. Based on this analysis, we have found that the orbital magnetic moments are enhanced greatly when x increases from 1 Å to 3 Å, and then do not change much for $x \geq 3$ Å. This finding suggests that the interface spin-orbit coupling plays an important role in determining the perpendicular magnetic anisotropy in [Co/Pd] ML films.

Keywords : [Co/Pd] multilayers, XMCD, XAS, electronic structure, perpendicular magnetic anisotropy

Pd층의 두께 변화에 따른 [Co/Pd] 다층박막의 연엑스선 방사광 분광 연구

김대현 · 이은숙 · 김현우 · 성승호 · 강정수*

가톨릭대학교 물리학과, 경기 부천시 원미구 지봉로 43, 14662

양승모 · 박해수 · 홍진표

한양대학교 물리학과, 서울시 성동구 왕십리로 222, 04763

(2016년 7월 6일 받음, 2016년 8월 23일 최종수정본 받음, 2016년 8월 23일 게재확정)

이 연구에서는 연 X선 광흡수 분광법(soft X-ray absorption spectroscopy: XAS)과 연 X선 자기 원편광 이색성(soft X-ray magnetic circular dichroism: XMCD)을 이용하여 수직자기이방성을 보이는 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 형의 다층박막의 전자구조를 연구하였다(x = 1 Å, 3 Å, 5 Å, 7 Å, 9 Å). Co 2p XAS와 XMCD 스펙트럼은 Pd 층의 두께 변화에 상관없이 서로 매우 유사하였으며, 또한 Co 금속의 Co 2p XAS와 XMCD 스펙트럼과도 매우 유사함이 관찰되었는데, 이러한 결과는 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막에서 Co 이온들이 금속 결합을 하고 있다는 사실을 보여 준다. Co 2p XMCD 스펙트럼을 분석하여 두께에 따른 궤도 자기모멘트(orbital magnetic moment)와 스핀 자기모멘트(spin magnetic moment)의 크기를 결정하였다. 이 결과에 의하면 Pd 층의 두께(x)가 1 Å에서 3 Å으로 증가할 때, 궤도 자기모멘트가 가장 크게 증가하였으며, $x \geq 3$ Å 이상의 영역에서는 별 다른 변화가 없었다. 이러한 결과는 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막의 계면에서의 스핀-궤도 상호작용이 수직자기 이방성에 매우 중요한 역할을 한다는 사실을 나타낸다.

주제어 : 광흡수분광법, 자기원편광이색성, 수직자기이방성, [Co/Pd] 다층박막, 전자구조

I. 서 론

최근 인위적으로 제조된 원자층 단위의 적층 구조를 가진 다층박막(multilayer film)계에서는 기존의 덩치(bulk) 합금재료에서는 볼 수 없었던 새로운 물리적 특성들이 관찰됨에 따라 첨단 신소재 개발을 목표로 한 다층박막의 구조와 물성에 관한 연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다[1-3]. 일반적으로 다층박막에서 관찰된 새로운 물리적 특성들은 다층박막내의 여러 계면들에서 이루어지는 원자들 간의 각종 상호작용에 기인한다고 여겨지고 있다[4, 5]. 인위적 다층박막 중에서 수직자기이방성(perpendicular magnetic anisotropy: PMA) 및 거대 자기저항(giant magneto-resistance) 현상을 보이는 자성 전이금속/비자성 전이금속계 금속간 다층박막은 고밀도 광자기 기록매체(magneto-optical recording medium) 나 자기기록 헤드의 자기저항 센서로의 응용 가능성을 가지고 있으므로 자성 분야 첨단 소재로 연구의 대상이 되고 있다[6-9]. Co/Pd, Co/Pt, Fe/Cr, Co/Cu 등의 자성 전이금속/비자성 전이금속계 금속간 다층박막은 대표적인 수직자기 이방성 물질계로 잘 알려져 있는데, 이 들에서 관찰된 수직자기 이방성의 이해는 자성 다층 박막의 연구 분야에서 매우 중요한 주제이다. 그러나 이러한 다층박막에서의 수직자기 이방성의 원인과 자성 금속 하부층(sublayer) 간의 반강자성 결합(antiferromagnetic coupling) 현상의 원인 등은 아직 완전히 규명이 되지 않은 실정이다[10-14]. 이론적으로는 자성 전이금속/비자성 전이금속 다층박막에서 관찰된 수직자기 이방성의 원인에 관하여 계면에서의 스핀-궤도 상호작용(spin-orbit interaction)이 수직자기 이방성의 원인이라고 제시된 바 있으나[15], 이에 대한 체계적인 실험적 검증은 아직 미흡하다.

자성 전이금속/비자성 전이금속계 금속간 다층박막들에서 관찰된 수직자기 이방성의 원인을 규명하기 위해서는 이러한 다층박막을 구성하고 있는 전이금속 이온들의 스핀 자기 모멘트와 궤도 자기 모멘트를 실험적으로 결정하는 것이 매우 중요하겠다[16, 17]. 왜냐하면 스핀-궤도 상호작용이 클수록 궤도 자기모멘트의 크기가 커지게 되기 때문이다. 나아가 다층박막을 구성하고 있는 전이금속 이온들의 원자가 및 스핀 배열 상태 등 미시적 전자 구조를 체계적으로 연구하는 것이 매우 중요하다. 금속간 다층박막의 전자구조와 스핀 구조의 연구를 위하여 방사광을 이용한 분광학적 연구가 매우 중요하다. 특히 연 X선 자기 원편광 이색성(soft x-ray magnetic circular dichroism: XMCD)[16, 17]과 연 X선 광흡수 분광법(soft x-ray absorption spectroscopy: XAS)[18, 19]은 원소 특유의(element-specific) 국소적 전자 구조 및 스핀 구조를 직접 관찰할 수 있으며, 원소별 스핀 자기 모멘트와 궤도 자기 모멘트를 실험적으로 결정할 수 있는 매우 좋은 실험

방법이다. 그런데 자기이력곡선(hysteresis loop)과 Kerr 회전 측정에 의하면 Co 층의 두께가 약 2 Å~3 Å 정도로 작을 때 수직자기이방성이 크게 관찰된 바 있다[20-23]. 따라서 본 연구에서는 Co 층의 두께를 2 Å로 고정시킨 후 Pd 층의 두께를 1 Å~9 Å까지 변화시키면서 제조한 [Co/Pd] 다층박막시료들을 대상으로 XAS와 XMCD를 이용하여 [Co/Pd] 다층박막의 스핀 자기 모멘트와 궤도 자기 모멘트를 실험적으로 결정하고 미시적인 전자구조를 연구하였다.

II. 실험 방법

이 연구에 사용된 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막 시료들은 직류 마그네트론 스퍼터(DC/RF-magneton sputtering) 시스템을 이용하여 상온에서 제작되었다. Si 기질 상부에 Ta/Ru/Pd로 이루어진 씨앗층을 사용하였으며 다층박막 층의 증착은 UHV (ultra high vacuum)상에서 이루어졌으며 기본 진공(base pressure)은 5×10^{-8} Torr을 유지하였다. 각 층의 증착 속도는 0.1 Å/s 이하로 유지를 하였다. 시료제작에 대한 자세한 조건은 참고문헌[13]에 기술된 바와 같다. 이 연구에 사용된 시료들의 각 하부층(sublayer)의 두께는 t(Co)=2 Å로 고정시켰으며, Pd 층의 두께 t(Pd)=xÅ(x=1, 3, 5, 7, 9)으로 변화시켰다. Fig. 1(a)는 이 연구에 사용된 다층박막의 구조를 도식적으로 보여 주는데, 그 구조는 다음과 같다: Si/SiO₂(산화된 Si 기판)/Ta(30Å)/Ru(50Å)/Pd(30Å)/[Co(2Å)/Pd(xÅ)]₇/Pd(30Å). 여기서 맨 위의 Pd(30Å) 층은 다층박막의 산화층

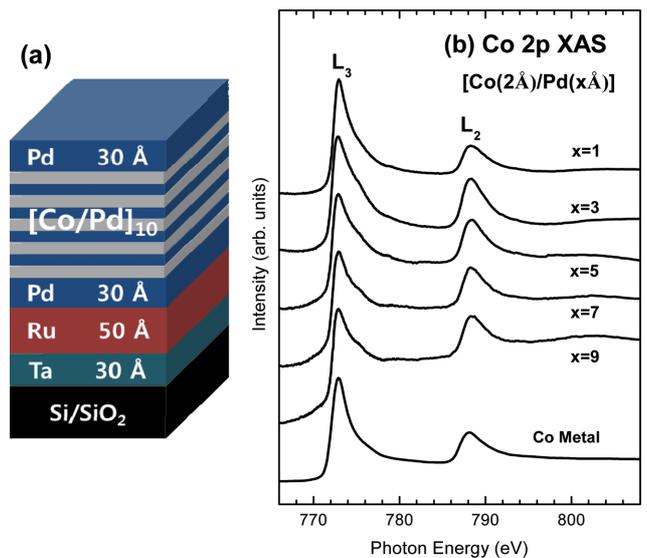


Fig. 1. (Color online) (a) The schematic configuration of the [Co(2Å)/Pd(xÅ)]₁₀ multilayer (ML). (b) Co 2p XAS spectra of [Co/Pd] MLs for x = 1 Å, 3 Å, 5 Å, 7 Å, 9 Å. They are compared to that of Co metal as a reference material.

방지하기 위한 보호층(capping layer)이다.

연 X선 광흡수 분광(XAS) 실험과 연 X선 자기 원편광 이색성(XMCD) 실험은 포항 가속기 연구소(PLS)의 2A 언들레이터 빔라인에서 이루어졌다. 측정 시 분석 챔버의 진공은 약 1×10^{-10} Torr의 초고진공 상태였으며, 시료들의 온도는 모두 300 K에서 측정되었다. XAS/XMCD 측정에는 원형 편광된(circularly polarized) 빛을 사용하였으며, XMCD 측정을 위하여 걸러준 외부 자기장(H)의 크기는 약 0.6 T였다. XAS 및 XMCD 데이터는 총 전자 산출법(total electron yield: TEY)에 의하여 얻었다. 이 논문에 사용한 데이터들의 에너지 분해능은 입사된 빛 에너지(hv)가 약 600 eV 일 때 약 100 meV이었으며, 모든 데이터들은 입사된 빛의 세기(flux)를 기준으로 규격화하였다(normalized).

III. 실험 결과 및 토의

[Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막 시료들의 Pd 층의 두께 (x) 변화에 따른 Co 2p XAS 스펙트럼들을 Fig. 1(b)에서 비교하였다. XAS 스펙트럼에서 관찰되는 흡수 피크는 내각 준위에 있던 전자가 빛에너지를 흡수하여 페르미 준위 위의 비어 있는 전자 상태로의 전이를 반영하는데, Co 2p XAS 스펙트럼에서는 주로 Co 2p → Co 3d 상태로의 전이에 의한 것이다. 그러므로 Co 이온의 3d 준위에 몇 개의 전자가 차 있는지에 따라 Co 2p XAS 스펙트럼의 선모양이 달라지므로, Co 2p XAS는 Co 이온의 원자거나 화학적 상태를 알 수 있는 좋은 실험 방법이다. Fig. 1(b)에서 $L_3(2p_{3/2})$ 와 $L_2(2p_{1/2})$ 로 표시된 피크들은 Co 2p 내각 준위가 스핀-궤도 상호 작용으로 인하여 $2p_{3/2}$ 와 $2p_{1/2}$ 상태로 분리되어 있음을(spin-orbit splitting) 나타낸다. [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막에서 Co 이온들이 어떤 원자가 상태에 있는지 알기 위하여, 참고물질로 Co 금속의[17] Co 2p XAS 스펙트럼과 비교하였다. 이 비교에 의하면 우선 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막의 Co 2p XAS 스펙트럼은 Pd 층의 두께 변화에 상관없이 거의 변화가 없으며, 또한 이들은 Co 금속의 Co 2p XAS 스펙트럼과 매우 유사함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막에서 Pd 층의 두께 변화에 상관없이 Co 이온들이 금속 결합을 하고 있으며, 따라서 Co가 금속 상태에 있다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 2는 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막 시료들의 Pd 층의 두께 변화에 따른 Co 2p XMCD 스펙트럼들을 보여 준다. Fig. 2(a)에서는 [Co(2Å)/Pd(3Å)]을 대표로 선택하여 Co 2p XMCD 스펙트럼을 결정하는 과정을 보여 준다. 여기서 빨간 실선의 스펙트럼과 파란 점선의 스펙트럼은 각각 오른 편광된(right-circularly polarized) 빛에 의한 흡수 스펙트럼과

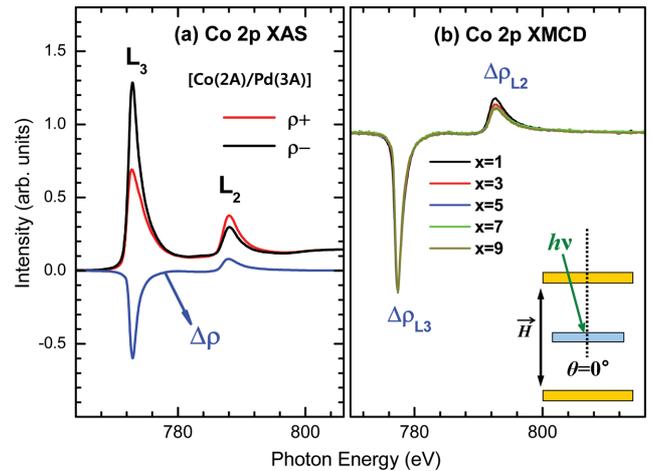


Fig. 2. (Color online) (a) Co 2p XAS spectra of the [Co(2Å)/Pd(3Å)] ML, obtained with two different photon helicities ($\rho+$, $\rho-$) and the difference ($\Delta\rho$). The difference $\Delta\rho$ corresponds to the Co 2p XMCD spectrum. (b) Comparison of the Co 2p XMCD spectra of [Co/Pd] MLs for $x = 1 \text{ \AA}, 3 \text{ \AA}, 5 \text{ \AA}, 7 \text{ \AA}, 9 \text{ \AA}$. The inset shows the experimental geometry of the XMCD measurement.

($\rho+$) 왼쪽 편광된(left-circularly polarized) 빛에 의한 흡수 스펙트럼을 ($\rho-$) 나타내며, 파란 실선은 $\rho+$ 와 $\rho-$ 의 차이를 나타내는데($\Delta\rho = \rho+ - \rho-$), 이 결과가 XMCD 스펙트럼에 해당한다. 이렇게 구한 [Co(2Å)/Pd(3Å)] 다층박막의 Co 2p XMCD 스펙트럼은 Co 금속의 Co 2p XMCD 스펙트럼과도 매우 유사하다[17]. 참고로 $\rho+$ 와 $\rho-$ 의 합은 외부 자기장이 걸린 상태에서 측정한 XAS에 해당하는데, Fig. 1(b)에서 보여준 외부 자기장=0에서 측정한 일반적인 XAS 스펙트럼과 선모양이 거의 같음을 알 수 있다. 이는 [Co(2Å)/Pd(3Å)] 다층박막에서 Co 이온들의 결합 (bonding) 상태가 외부 자기장의 유무에 따라 변화하지 않는다는 것을 나타낸다.

Fig. 2(b)에서는 Pd층의 두께 변화에 따라 ($x = 1 \text{ \AA}, 3 \text{ \AA}, 5 \text{ \AA}, 7 \text{ \AA}, 9 \text{ \AA}$) Fig. 2(a)의 방법으로 구한 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막 시료들의 Co 2p XMCD 스펙트럼들을 비교하였다. Fig. 2(b)의 오른쪽 하단의 삽입(inset) 그림은 본 실험의 XMCD 측정에서 사용된 시료의 배치를 도식적으로 그린 그림으로, 입사된 빛의 방향, 외부자기장의 방향, 시료 사이의 상대적인 배치와 방향을 보여 준다. 이 실험에서는 입사된 빛과 외부 자기장(= 자석의 방향) 간의 상대적 방향은 고정되어 있으며(22.5°), 시료를 회전시켜 시료 표면에 대한 외부 자기장의 방향(θ)을 변화시키면서 XMCD 측정을 할 수 있다. 여기서 시료의 표면수직(surface normal) 방향과 외부 자기장 사이의 각도를 θ 로 정의하였다. 이 실험에서는 삽입 그림에서 보여 주는 바와 같이 외부 자기장을 시료 표면에 수직하게 걸고(즉 $\theta = 0^\circ$), XMCD 측정을 수행하였다. 이렇게 $\theta = 0^\circ$ 로 두고 데이터를 얻은 이유는 Co 층의 두께가 약 3 Å

이하로 작은 [Co/Pd] 다층박막은 수직자기이방성이 큰 물질 이므로[20-23], [Co/Pd] 의 면에 수직한 방향의 자기모멘트가 가장 클 것으로 예상되었기 때문이다.

Fig. 2(b)에 보여준 Pd 층의 두께 변화에 따른 Co 2p XMCD 스펙트럼의 비교에 의하면, Co 2p XMCD 스펙트럼 들의 선모양은 Pd 층의 두께에 상관없이 매우 유사함을 알 수 있으며, 또 이들의 선모양의 Co 금속의 Co 2p XMCD 스펙트럼과도 매우 유사하다. 그러나 자세히 보면 Pd 층의 두께(x)에 따라 L₂ 피크의 세기가 약간 다른 것을 알 수 있다. 이러한 차이를 확인하기 위하여, Pd 층의 두께(x)에 따른 L₃ 피크에 대한 L₂ 피크의 상대적인 세기 I(Δρ_{L2})/I(Δρ_{L3})를 측정하였다(Fig. 3(a)의 결과 참조). I(Δρ_{L2})/I(Δρ_{L3})의 변화가 중요한 이유는 L₃ 피크에 대한 L₂ 피크의 상대적인 세기의 감소가 궤도 자기모멘트(orbital magnetic moment)가 증가함을 나타내기 때문이다. 그 이유는 Fig. 3, 식(1), 식(2)에서 설명하였다.

Fig. 3(a)에서는 Co 2p XMCD 스펙트럼들로 부터 결정된 Pd 층의 두께 변화에 따른 I(Δρ_{L2})/I(Δρ_{L3})의 크기를 보여 준

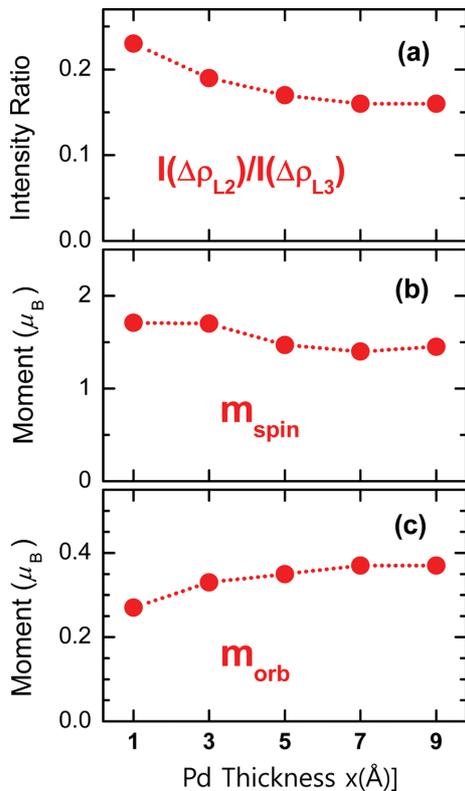


Fig. 3. (Color online) (a) Plots of the intensity ratio of the L₂ peak with respect to the L₃ peak in Co 2p XMCD spectra [I(Δρ_{L2})/I(Δρ_{L3})] for x = 1 Å, 3 Å, 5 Å, 7 Å, 9 Å. (b), (c) Plots of the spin magnetic moments and the orbital magnetic moments of [Co/Pd] MLs for x = 1 Å, 3 Å, 5 Å, 7 Å, 9 Å, obtained from the measured Co 2p XMCD spectra. See the text for the details.

다. 이 비교에 의하면, I(Δρ_{L2})/I(Δρ_{L3})는 x가 1 Å → 3 Å으로 증가할 때 크게 감소하며, x가 3 Å → 5 Å 구간에서는 매우 약하게 감소한 후, x가 5 Å 이상(x ≥ 5 Å)인 영역에서는 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. XMCD 데이터에 적용할 수 있는 합-법칙(sum rule)에 의하면[16, 17], L₃ 피크에 대한 L₂ 피크의 상대적인 세기는 Co 이온의 궤도 자기모멘트(orbital magnetic moment)의 크기와 밀접한 관련이 있다. 측정된 Co 2p XMCD 스펙트럼에 합-법칙(sum rule)을 적용하면 각 원소 별 스핀자기모멘트와 궤도 자기모멘트를 각각 실험적으로 결정할 수 있는데, XMCD sum rule은 다음과 같다[16, 17].

$$m_{orb} = -\frac{4q}{3r}(10 - n_{3d}), \quad (1)$$

$$m_{spin} = -\frac{6p - 4q}{r}(10 - n_{3d})\left(1 + \frac{7\langle T_z \rangle}{2\langle S_z \rangle}\right)^{-1}, \quad (2)$$

여기서 p, q, r은 다음과 같이 정의된다.

$$p = \int_{L_3} \Delta\rho dE,$$

$$q = \int_{L_3+L_2} \Delta\rho dE,$$

$$r = \int_{L_3+L_2} (\rho_+ + \rho_-)dE.$$

식(2)에서 <T_z>는 자기 쌍극자 연산자의 기대값에 해당하고, <S_z>는 스핀 자기모멘트의 반(1/2)에 해당하는데, 박막의 경우 <T_z>를 무시할 수 있다고 알려져 있다. 식(1)과 (2)에 있는 n_{3d}는 바닥상태에서 Co 3d 준위에 차 있는 Co 3d 전자의 개수에 해당한다. 위에서 기술한 XMCD sum rule을 [Co(2Å)/Pd(xÅ)] 다층박막 시료들에 대한 Co 2p XMCD 데이터에 적용하여 Co 이온의 궤도 자기모멘트(m_{orb})와 스핀 자기모멘트(m_{spin})를 계산하였다. 이 때 n_{3d} 값으로 Co 금속의 n_{3d} 값에 해당하는 알려져 있는 n_{3d} = 7.5를 사용하였다[16]. 이렇게 구한 m_{spin}과 m_{orb} 값들을 Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에 각각 비교하였다.

XMCD sum rule에 의한 분석 결과에 의하면, x가 1 Å → 9 Å으로 증가함에 따라 스핀 자기모멘트는 원래 크기의 약 85%로 약간 감소하였으며 궤도 자기모멘트는 원래 크기의 약 135%로 크게 증가하였다. 특히 x가 1 Å → 3 Å으로 증가한 구간에서는 스핀 자기모멘트는 거의 변화가 없으나, 궤도 자기모멘트는 약 25% 증가하였다. 그리고 Pd 층의 두께 x ≥ 3 Å 이상의 영역에서는 궤도 자기모멘트의 크기에 큰 변화가 없었다. 그런데 자기이력곡선의 측정 결과에 의하면 Pd 층의 두께가 약 3 Å 근처에서 수직자기이방성이 매우 크게 관찰되었으므로[13], 이러한 XMCD 분석 결과는 [Co/Pd] 다층박막에서 궤도 자기모멘트와 수직자기이방성 사이에 상관 관계가

있음을 보여 주는 실험 결과로 볼 수 있겠다. 서론에서 기술한 바와 같이 스핀-궤도 상호작용이 커지면 궤도자기 모멘트가 커지게 되므로[12, 15], Pd 층의 두께 x 가 $1 \text{ \AA} \rightarrow 3 \text{ \AA}$ 으로 증가한 구간에서 궤도 자기모멘트가 급격하게 증가하는 경향은 다층박막의 계면에서의 스핀-궤도 상호작용이 수직자기 이방성의 원인이라는 이론을 뒷받침하는 결과라고 볼 수 있겠다[15]. 그러나 이러한 결론을 좀 더 확실하게 뒷받침하기 위해서는, 향후 걸어준 자기장의 각도 변화에 따른 Co 2p XMCD 실험 연구가 매우 유용할 것으로 생각된다. 한편 Co와 Pd 계면에 존재하는 합금(alloying) 현상은 Co 3d 오비탈과 Pd 4d 오비탈 사이의 혼성상호 작용(hybridization)을 야기시키고 나아가 Co 3d 전자들의 스핀-궤도 상호작용을 증가시킬 수 있을 것이다. [Co/Pd] 다층박막에서 Pd 층의 두께가 얇아질수록 Co와 Pd 계면에서의 합금 효과가 커질 것이므로 수직자기이방성에 대한 합금 효과의 기여는 본 연구의 실험결과와 부합하는 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 XAS와 XMCD 분광법을 이용하여 Pd 층의 두께변화에 따른 $[\text{Co}(2\text{\AA})/\text{Pd}(x\text{\AA})]$ ($x = 1 \text{ \AA}, 3 \text{ \AA}, 5 \text{ \AA}, 7 \text{ \AA}, 9 \text{ \AA}$) 다층박막 시료들의 전자 구조를 연구하였다. [Co/Pd] 다층박막의 Co 2p XAS와 XMCD 스펙트럼은 Pd 층의 두께 변화에 상관없이 서로 매우 유사하였으며, 또한 Co 금속의 Co 2p XAS와 XMCD 스펙트럼과도 매우 유사함이 관찰되었는데, 이로 부터 $[\text{Co}(2\text{\AA})/\text{Pd}(x\text{\AA})]$ 다층박막에서 Co 이온들이 금속 결합을 하고 있다는 사실을 알 수 있었다. Co 2p XMCD 스펙트럼에서는 Pd 층의 두께(x)에 따라 L_2 피크의 상대적인 세기가 약간 변했는데, XMCD 합-규칙을 이용하여 Co 2p XMCD 스펙트럼들을 분석하여 두께에 따른 궤도 자기모멘트와 스핀 자기모멘트의 크기를 결정하였다. 이 결과에 의하면 Pd 층의 두께(x)가 1 \AA 에서 3 \AA 으로 증가할 때, 궤도 자기모멘트가 가장 크게 증가하였으며, $x \geq 3 \text{ \AA}$ 이상의 영역에서는 별 다른 변화가 없다는 것을 발견하였다. 이러한 경향은 $[\text{Co}(2\text{\AA})/\text{Pd}(x\text{\AA})]$ 다층박막의 계면에서의 스핀-궤도 상호작용이 수직자기 이방성의 원인이라는 이론을 뒷받침하는 결과이다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며(No. 2014R1A1A2056546), 일부 4세대 방사광가속기 구축사업(미

래창조과학부 주최, 포항가속기연구소 주관)의 재정 지원을 받았다.

References

- [1] S. Mangin, D. Ravelosona, J. A. Katine, J. J. Carey, B. D. Terris, and E. E. Fullerton, *Nature Mater.* **5**, 210 (2006).
- [2] H. Meng and J.-P. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 172506 (2006).
- [3] S. Bandiera, R. C. Sousa, S. Auffret, B. Rodmacq, and B. Dieny, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 072410 (2012).
- [4] L. M. Falicov, *Physics Today* (October 1992) p. 46, and references therein.
- [5] T. Shinjo, *Surf. Sci. Rep.* **12**, 49 (1991).
- [6] W. B. Zeper, F. J. A. M. Greidanus, P. F. Carcia, and C. R. Fincher, *J. Appl. Phys.* **65**, 4971 (1989).
- [7] M. N. Baiblich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
- [8] S. S. Parkin, N. More, and K. P. Roche, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2304 (1990).
- [9] F. J. A. den Broeder, D. Kuiper, A. P. van de Moesselaer, and W. Hoving, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 2769 (1988).
- [10] T. Oguchi, *J. Magn. Magn. Mater.* **126**, 519 (1993).
- [11] E. E. Fullerton, D. M. Kelly, J. Guimpel, I. K. Schuller, and Y. Bruynseeraede, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 859 (1992).
- [12] M. Kotsugi, M. Mizuguchi, S. Sekiya, M. Mizumaki, T. Kojima, T. Nakamura, H. Osawa, K. Kodama, T. Ohtsuki, T. Ohkochi, K. Takanashi, and Y. Watanabe, *J. Magn. Magn. Mater.* **326**, 235 (2013).
- [13] J. B. Lee, G. G. An, S. M. Yang, W. S. Chung, and J. P. Hong, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 022204 (2014).
- [14] H. J. G. Draaisma, W. J. M. de Jonge, and F. J. A. den Broeder, *J. Magn. Magn. Mater.* **66**, 351 (1987).
- [15] P. Bruno, *Phys. Rev. B* **39**, 865 (1989).
- [16] B. T. Thole, P. Carra, F. Sette, and G. van der Laan, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1943 (1992).
- [17] C. T. Chen, Y. U. Idzerda, H.-J. Lin, N. V. Smith, G. Meigs, E. Chaban, G. H. Ho, E. Pellegrin, and F. Sette, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 152 (1995).
- [18] F. M. F. de Groot, J. C. Fuggle, B. T. Thole, and G. A. Sawatzky, *Phys. Rev. B* **42**, 5459 (1990).
- [19] G. van der Laan and I. W. Kirkman, *J. Phys. Condens. Matter* **4**, 4189 (1992).
- [20] P. F. Carcia, A. D. Meinhardt, and A. Suna, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 178 (1985).
- [21] S.-C. Shin and A. C. Palumbo, *J. Appl. Phys.* **67**, 317 (1990).
- [22] D. G. Stinson and S.-C. Shin, *J. Appl. Phys.* **67**, 4459 (1990).
- [23] S. K. Kim, V. A. Chernov, and Y. M. Koo, *J. Magn. Magn. Mater.* **170**, L7 (1997).