

이 학 석 사 학 위 논 문

표면 광자기 커 효과를 이용한
Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 박막의
자기 이방성에 대한 연구



2011년 12월

부 경 대 학 교

물 리 학과

오 용 록

이 학 석 사 학 위 논 문

표면 광자기 커 효과를 이용한
Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 박막의
자기 이방성에 대한 연구



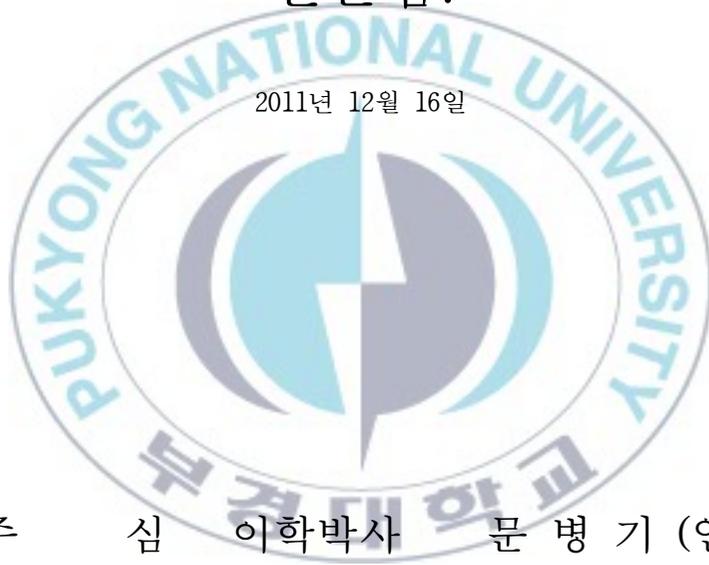
부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

오 용 록

오용록의 이학석사 학위논문을
인준함.

2011년 12월 16일



주 심 이학박사 문 병 기 (인)

위 원 이학박사 최 병 춘 (인)

위 원 이학박사 홍 지 상 (인)

목 차

요약	vii
1. 서론	1
2. 이론	4
2.1 자기 이방성	4
2.1.1 결정 자기 이방성	6
2.1.2 형상 자기 이방성	8
2.1.3 표면, 계면 자기 이방성	9
3. 실험	11
3.1 박막 제작	11
3.2 표면 광자기 커 효과	15
4. 결과 및 고찰	21
4.1 Fe/Cu(001) 계의 자기 이방성	21
4.2 Fe ₅₀ Co ₅₀ /Cu(001) 계의 자기 이방성	27
4.3 Fe/Fe ₅₀ Co ₅₀ /Cu(001) 계의 자기 이방성	32
5. 결론	42
참고 문헌	43

그림 목차

1. Fe(3 ML)/Cu(001)의 자기 이력 곡선.....	5
2. 결정 자기 이방성의 설명을 위한 참고 그림.....	7
3. 표면 광자기 커 효과 실험을 위한 초고진공 챔버.....	14
4. 표면 광자기 커 효과.....	18
5. 표면 광자기 커 효과 실험 장치의 구성.....	19
6. 표면 광자기 커 효과의 정렬 방향.....	20
7. 상온에서 수직 방향 Fe/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	23
8. 상온에서 수평 방향 Fe/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	24
9. 85 K에서 수직 방향 Fe/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	25
10. 85 K에서 수평 방향 Fe/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	26
11. 상온에서 수직 방향 Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	28
12. 상온에서 수평 방향 Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	29
13. 85 K에서 수직 방향 Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	30
14. 85 K에서 수평 방향 Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	31
15. 상온에서 수직 방향 Fe/Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	33
16. 상온에서 수평 방향 Fe/Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	34
17. 85 K에서 수직 방향 Fe/Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	35
18. 85 K에서 수평 방향 Fe/Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선.....	36

19. 85 K, 수직 방향에서 Fe(1.02-2.20 ML)/Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001)의 자기 이력 곡선.....	37
20. 85 K에서 Fe/Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001) 샘플의 잔류 자기.....	39
21. Fe(1.5 ML)/Fe _{0.5} Co _{0.5} /Cu(001)에서의 온도에 따른 각형비.....	41



Surface magneto-optic Kerr effect study of ultrathin Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) system

Yongrok Oh

Department of physics
Pukyong National University

Abstract

The magnetic properties of Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) system were investigated in this research. Fe/Cu(001) system is well studied as a complicated spin structure and magnetic properties for few mono-layer of Fe films. Also, it is well known that the Fe films, epitaxially grown on Cu(001) substrate show the perpendicular magnetic anisotropy below 11 ML region. According to recent theoretical research, however, there was an interesting result that the Fe/Co(<1 ML)/Cu(001) system have an sliteration of magnetic anisotropy depend on the thickness of Fe film. So, with this concern, this study was carried out.

This experiments performed the surface magneto-optic Kerr effect(SMOKE) experiment to find out the magnetic anisotropy of Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) system. After several cycles of sputtering and annealing to prepare the Cu(001) single crystal, Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5} films were deposited by molecular beam epitaxy(MBE) and the magnetic properties were measured by SMOKE measurement. The whole experiments were performed in ultra high vaccum(UHV) chamber as in-situ growth and measurement..

1. 서론

20세기의 마지막 50년간 전자 공학의 디지털 논리 회로에 기반을 둔 혁명적인 과학 기술의 발전이 있었다. 전하의 흐름으로 만들어진 '1'과 '0'의 이진수를 사용하는 디지털 논리 회로는 전자 공학 소자들에 사용되어 지며, 이러한 전자 공학 소자들은 최초의 트랜지스터에서부터 컴퓨터의 마이크로 프로세서까지 매우 급속히 발전, 전파되었고, 현재에는 현대 문명을 유지하는데 필수적인 요소로 자리 잡고 있다.

이러한 발전 과정을 거쳐 현재 사용되고 있는 전자 공학 소자들은 굉장한 집적도를 가지고 있다. 집적도는 프로세서의 연산 능력과 관련이 있는데, 최근에 만들어진 인텔의 i7 프로세서 같은 경우 약 10억 개의 트랜지스터가 집적되어 있다. 마이크로 프로세서의 경우 지난 40년간 집적도가 백만배 가까이 증가하였는데, 이러한 전자 공학 소자들의 집적도가 증가하는 경향을 보여주는 것이 Moore의 법칙이다.[1-3] Moore의 법칙에 따르면, 반도체의 집적도는 18 개월을 주기로 두배씩 증가한다는 것이다. 실제로 지금까지 전자 공학 소자들은 Moore의 법칙에 따라서 집적도가 증가해 왔으며, 현재는 소자 내에 사용되는 회로의 선폭이 수십 nm의 제품까지 개발이 된 상태이다.

하지만 이러한 전자 공학의 발전에도 한계가 있다. 프로세서의 성능을 높이기 위해서는 집적도를 높여야 하고, 집적도를 높이기 위해서는 공정을 미세화 해야 하지만, 미세한 회로를 만드는데에는 한계가 있다. 선폭과 트랜지스터 게이트의 두께가 일정한 크기 이하로 작아지게 되면 양자 투과 효과(quantum tunneling)에 의해 소자로서 작동하지 못하기 때문이다. 전자 공학에서는 집적 회로 내에서 선폭의 두께가 16 nm, 게이트의 두께가 5 nm를 한계로 예측하고 있다.[4,5]

이러한 전자 공학의 한계를 돌파할 방법으로 대두되고 있는 것이 스핀트로닉스(spintronics)이다. 스핀트로닉스란 전자가 가지고 있는 전하를 이용해서 신호를 만들어 사용하였던 전자 공학과 달리, 전자의 고유한 성질인 스핀의 상태를 이용하여 '1'과 '0'의 신호를 만들어 사용하는 기술이다.[6-10]

스핀은 완전히 양자 역학적인 전자의 고유한 성질로, 일반적인 자기 쌍극자와 같이 외부의 자기장에 의해 쉽게 조작되며 정렬된 상태를 오랜 시간동안 유지하는 성질을 가지고 있다. 실제 스핀트로닉스 소자를 만들어 사용할 경우에 비휘발성, 초고속, 초저전력 및 초고주파 등의 특성을 가질 것으로 예상된다. 이러한 성질은 이미 하드 디스크 드라이브와 같은 데이터 저장 장치에 사용되고 있다.

현재 상용화되어 있는 스핀트로닉스의 소자로는 하드 디스크 드라이브의 플래터(flatter)와 헤드(head) 등이 있으며, 자기 터널 접합(magnetic tunnel junction)을 이용한 MRAM(magnetic random access memory)도 개발 중이다.[11,12]

이러한 스핀트로닉스의 소자들은 자성 박막 적층 구조의 표면과 계면에서 나타나는 거대 자기 저항(giant magnetoresistance)[13,14]과 터널 자기 저항(tunnel magnetoresistance)[15-17], 일축 자기 이방성(uniaxial magnet anisotropy) 등의 현상을 이용하여 만들어 진다.

따라서 스핀트로닉스 소자의 개발을 위해서는 스핀의 수명, 나노 구조에서의 스핀의 특성, 스핀 분극 된 전자의 이동도, 결합 및 계면 물성 등에 대한 자성 박막에서의 기초적인 연구가 선행 되어야 하며 많은 연구자들이 이 부분에 대해 활발히 연구를 진행하고 있다.

특히 Fe, Co, Ni과 같은 상온에서 강자성을 가지는 전이 금속에 대

한 연구가 많이 진행되어 왔으며,[18-23] 이 논문에서는 이러한 스핀트로닉스 소자에 적용 가능한 자성박막의 기본적인 특성을 연구하는 목적을 가지고 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 계의 자기 이방성에 대한 연구를 수행하였다.

Fe/Cu(001) 계의 경우, Fe 박막의 두께가 11 monolayer(ML) 이하일 때 수직 자기 이방성(perpendicular magnetic anisotropy)을 가지며, 11 ML를 경계로 면심 입방에서 체심 입방으로의 구조적인 변화와 함께 수직 자기 이방성에서 수평 자기 이방성(longitudinal magnetic anisotropy)으로의 스핀 방향 전이(spin reorientation transition)가 나타난다고 보고 되어있다.[24-34]

그런데, 한 이론적인 계산 결과[35,36]에 의하면 Fe/Cu(001) 계에서 중간층(interlayer)으로 Fe_{0.5}Co_{0.5} 합금 박막이 1 ML가 삽입된 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}(1 ML)/Cu(001) 계의 경우, Fe 최상층의 두께에 따라서 1.5 ML의 두께에서는 수직 자기 이방성을 보이다가 2.5 ML에서는 수평 자기 이방성으로 상태가 바뀌고 다시 3.5~4.5 ML에서 아주 작은 자기 이방성 에너지를 가지며 수직 자기 이방성과 수평 자기 이방성이 순차적으로 나타난다는 흥미로운 연구 결과가 있어, 이에 대한 실험을 수행하였다.

2. 이론

2.1 자기 이방성

자기 이방성(magnetic anisotropy)이란 자성체에서 자화가 정렬할 때 방향에 대해 의존하는 성질을 말한다. 즉, 어떤 특정한 방향으로 자화가 정렬된 상태가 그 이외의 방향으로 정렬된 상태보다 더 안정한 상태를 가지는 현상이다. 이때 이 특정한 방향을 자화 용이축(easy axis)이라고 하며, 자화의 정렬이 가장 불안정한 상태의 방향을 자화 곤란축(hard axis)이라고 한다.[37,38]

그림 1은 Fe (3 ML)/Cu(001) 박막 샘플표면의 수평 방향과 수직 방향에서 얻은 자기 이력 곡선이다. 수직 방향에서는 강자성체의 전형적인 사각형 형태의 자기 이력 곡선을 보이는 반면, 수평 방향에서 얻은 데이터를 보면 잔류 자기와 보자력이 아예 없는 것을 볼 수 있다. 이 경우에 수직 방향이 이 샘플의 자화 용이축이고, 수평 방향이 자화 곤란축이 된다.

이와 같은 자기 이방성이 나타나는 원인은 샘플의 격자 구조와 형태, 물질의 종류, 외부에 의한 변형 등에 있다.

각각의 원인들에 따른 자기 이방성의 종류로 결정 자기 이방성(crystalline magnetic anisotropy), 형상 자기 이방성(shape magnetic anisotropy), 표면과 계면 자기 이방성(surface and interface magnetic anisotropy) 등이 있다.

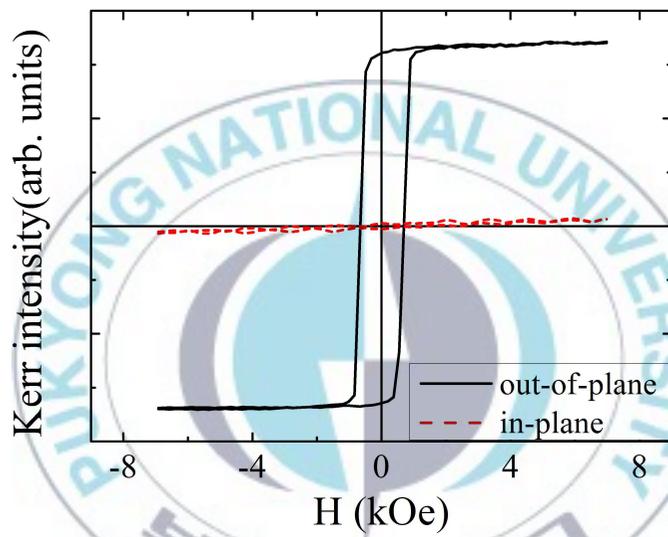


그림 1. Fe (3 ML)/Cu(001)의 자기 이력 곡선

2.1.1 결정 자기 이방성(crystalline magnetic anisotropy)

결정 자기 이방성은 자화가 결정축에서 어떠한 특정한 방향으로 정렬하려는 성질을 말하며, 결정 자기 이방성 에너지는 자화가 자화 용이축 방향으로 정렬할 때와 자화 곤란축 방향으로 정렬할 때의 에너지의 차이이다.

외부에서 자기장을 임의의 방향으로 인가하였을 때, 이 자기장은 스핀(spin)과 궤도(orbit) 자기 모멘트를 임의의 방향으로 정렬시키려고 한다. 그런데 궤도 자기 모멘트는 일반적으로 원자 격자(lattice)와 강하게 결합하고 있어서, 외부의 자기장에 의해 자화가 정렬되는 과정에서 궤도 모멘트, 스핀 모멘트, 격자 사이의 결합이 마치 저항처럼 작용한다. 여기서 궤도 모멘트, 스핀 모멘트가 격자와 원래 결합하고 있던 방향이 자화 용이축이 된다.

대부분의 물질에서는 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)이 약하기 때문에 결정 자기 이방성이 특별히 강한 편은 아니지만, 희토류 물질의 경우 강한 스핀-궤도 결합을 가지기 때문에 결정 자기 이방성이 강하고, 영구자석의 재료로도 사용된다.

결정 자기 이방성 에너지 E_{crys} 는 그림 2 및 식 (1), 식 (2)와 같은 계에서 멱급수를 사용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

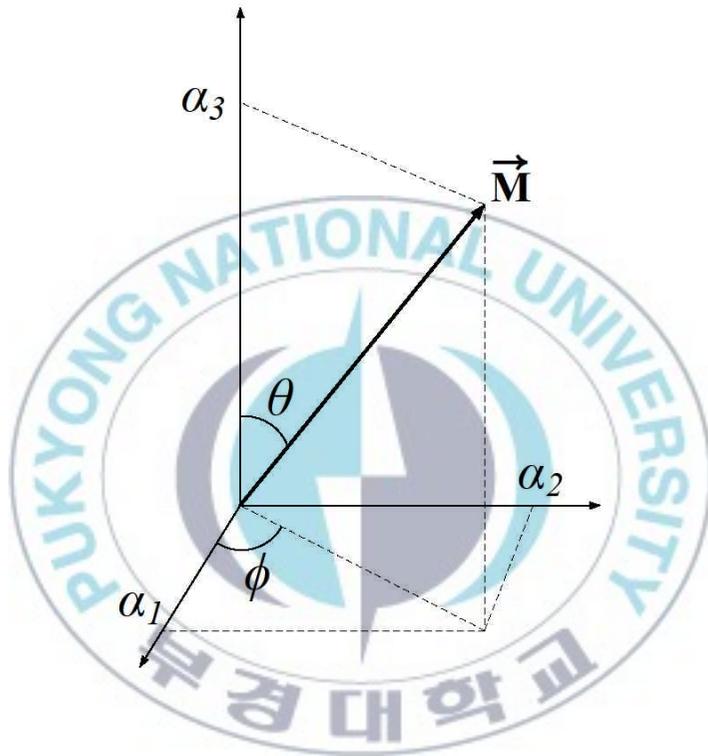


그림 2. 결정 자기 이방성의 설명을 위한 참고 그림

$$\begin{aligned}
&= \sin\theta\cos\phi \\
\alpha_2 &= \sin\theta\sin\phi \\
\alpha_3 &= \cos\theta
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1 \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
E_{crys} &= E_0 + \sum_i b_i \alpha_i + \sum_{ij} b_{ij} \alpha_i \alpha_j + \sum_{ijk} b_{ijk} \alpha_i \alpha_j \alpha_k \\
&\quad + \sum_{ijkl} b_{ijkl} \alpha_i \alpha_j \alpha_k \alpha_l + O(\alpha^5)
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서 b_{ijk} 는 비례상수 이고 a_{ijk} 는 자화의 여현 성분이다.

식 (3)에서 다섯 번째 이하의 항들(α)은 아주 작은 값을 가지므로 일반적으로 무시할 수 있고, 식 (4)와 같은 대칭성을 가지므로 홀수 번째 항들이 소거되고 다시 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$E(M) = E(-M) \tag{4}$$

$$E_{crys} = E_0 + \sum_{ij} b_{ij} \alpha_i \alpha_j + \sum_{ijkl} b_{ijkl} \alpha_i \alpha_j \alpha_k \alpha_l \tag{5}$$

2.1.2 형상 자기 이방성(shape anisotropy)

다결정질과 같이 결정 자기 이방성을 가지지 않는 물질에서도 샘플의 모양이 구형이 아닌 경우, 자화 용이축이 존재하며, 이러한 현상을 형상 자기 이방성, 또는 쌍극자 자기 이방성이라고 한다.

형상 자기 이방성은 쌍극자 상호작용에 의한 결과이고, 쌍극자 상호작용은 샘플의 모양에 의해 영향을 받으며, 박막에서 형상 자기 이방성 에너지는 다음 식 (6)과 같이 주어진다.

$$E_{hap} = \frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 \cos^2 \theta \quad (6)$$

식 (6)은 다시 식 (7)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$E_{shap} = K_o + K_{shap} \sin^2 \theta \quad (7)$$

위의 식에서 M_s 는 포화 자기의 크기, θ 는 박막에 수직인 방향으로 부터의 각도이고, K_{shap} 는 형상 자기 이방 상수로 음의 부호를 가진다. 따라서 형상 자기 이방성 에너지는 θ 가 90 °일 때 최소가 된다.

2.1.3 표면 및 계면 자기 이방성

(surface and interface magnetic anisotropy)

박막과 같은 저차원계에서는 덩어리와 달리 대칭성이 깨어지므로, 이에 의한 비등방성에 의해 유효 자기 이방 상수 K^{eff} 가 다음 식 (8)과 같이 표현 된다.

$$K^{ff} + \frac{2K^S}{d} = K^V \left(1 - \frac{d_c}{d}\right) \quad (8)$$

는 부피에 의존하는 결정 자기 이방성이고 K^S 는 표면에 의존하는 결정 자기 이방성, d 는 샘플의 두께이다. 위 식에서 두 번째 항을 보면 표면에 의존하는 이방성 에너지는 두께에 반비례하고, 두께에 의해 K^{ff} 의 부호가 특정한 두께 $d_c = -2K^S/K^V$ 를 경계로 바뀌는 것을 알 수 있다.

따라서 $d < d_c$ 일 때는 K^{eff} 가 (-) 값을 가지고 수직 자기 이방성을 가지며, $d > d_c$ 일 때는 K^{eff} 가 (+) 값을 가지고 수평 자기 이방성을 가진다.



3. 실험

3.1 박막 제작

이 실험은 그림 3과 같은 기본 진공이 1×10^{-10} torr인 초고진공 챔버 내에서 in-situ로 진행 되었다. 실험을 위해 챔버 내의 기본 진공도를 1×10^{-10} torr의 초고진공을 유지하였다. 초고진공이란 10^{-9} - 10^{-11} torr 사이의 진공도를 말한다. 10^{-10} torr에서는 상온에서 질소 분자에 대해, 1 cm^3 의 공간에 3.3×10^6 개의 원자가 존재하며, 입자들의 평균 자유 거리는 $5.0 \times 10^7 \text{ cm}$, 단분자층 형성시간은 $2.4 \times 10^4 \text{ sec}$ 정도이다. 이러한 초고진공 챔버 내에서의 in-situ 초고진공 실험은 초박막 실험을 위해 구성 되었으며, 실험 도중 샘플의 표면과 계면이 오염되는 것을 피해 수 ML에서부터 수 Å 두께의 박막을 성장시키고 실험하기에 적합하다. [39]

초고진공 챔버 내의 샘플 홀더는 가스 방출량과 용해점을 고려하여 무산소동(OFHC, oxygen free high conductivity copper)과 몰리브덴(Molybdenum)으로 제작하여 사용하였다.

먼저 실험에 앞서 진공을 만드는 과정이 수반되는데, 초고진공을 얻기 위해서 드라이 펌프와 터보 펌프를 사용하여 10^{-7} torr까지 진공도를 낮춘 다음, $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도에서 24 시간동안의 bake-out 과정을 거친 후 이온 펌프를 사용하여 10^{-10} torr의 진공을 만들 수 있었다.

기판은 $7 \times 7 \text{ mm}$ 크기의 Cu(001) 단결정을 사용하였고, Ar^+ 이온 스퍼터링과 열처리(annealing)를 여러 차례 반복하여 준비하였다. Ar^+ 이온 스퍼터링은 4×10^{-6} torr의 진공에서 1 keV의 이온 에너지와 $4 \mu\text{A}$ 의 샘플 전류의 조건으로 30분 동안 진행하였고, 열처리는 전자빔 히팅 방법으로 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도에서 50분 동안 지속하였다.

박막은 MBE 방법으로 제조하였다. MBE는 물리 증착 방법(physical vapor deposition)의 한가지로 진공 내에서 재료를 증기 상태로 만들어, 분자선 형태로 방출시켜 켈러(epitaxy)에 의해 기판에 박막을 성장시키는 방법이다. MBE는 10^{-3} - 10^{-11} torr 사이의 진공도에서 실행이 가능하며 증착 속도를 수 Å/min 이하로 충분히 느리게 조절할 수 있고, 증착하는 동안 기판에서 분자들이 표면 이동을 하며 박막을 형성하기 때문에 초고진공과 같은 조건에서 사용할 경우 단원자층 두께의 박막을 만들 수 있고, 층상구조(layer-by-layer)의 균일한 박막의 성장이 가능하다.

본 연구에서는 전자선(e-beam)을 사용하여 재료를 가열하는 방법의 증착장비를 사용하였다. 전자선은 토륨-텅스텐 필라멘트(thoriated tungsten filament)를 사용하여 만들었고, 재료는 지름 2 mm 막대형태의 Fe와 Co 재료(순도 99.995 %)를 사용하였다. 증착 시에 전자선을 사용하여 재료를 가열할 때 장비의 과열을 방지하고 가열하는 효율을 높이기 위해서 재료에 고전압을 걸어 준다. 증착시 재료에 인가해 주는 고전압과 필라멘트에서 나오는 분자선의 세기를 조절하여 재료의 온도와 증착율을 조절할 수 있다. 재료의 온도가 일정 온도 이상으로 높아지게 되면 재료가 증발하면서 방사되기 하는데, 이때 재료에 인가해준 고전압에 의해 분자선이 기판방향으로 가속을 받아 기판 쪽으로 분자선속이 형성되고 기판 위에 증착되게 된다.

박막의 두께는 Inficon사의 XTC/2 deposition monitor를 사용하여 조절하였다. deposition monitor는 금(Au)으로 코팅된 크리스탈 센서를 사용하여, 크리스탈 진동수의 변화로 증착되는 두께를 측정하는 장비이다. 먼저 증착하기에 앞서 시간에 따른 재료의 증착율을 측정 한 후, 박막을 증착시키는 시간을 조절함으로써 증착되는 박막의 두께를 조절하였다.

$Fe_{0.5}Co_{0.5}$ 합금층은 Fe와 Co는 동시 증착 방법(co-evaporation)으로

증착하였으며, 모든 증착 과정은 5×10^{-10} torr 이하의 진공에서 수행하였다.



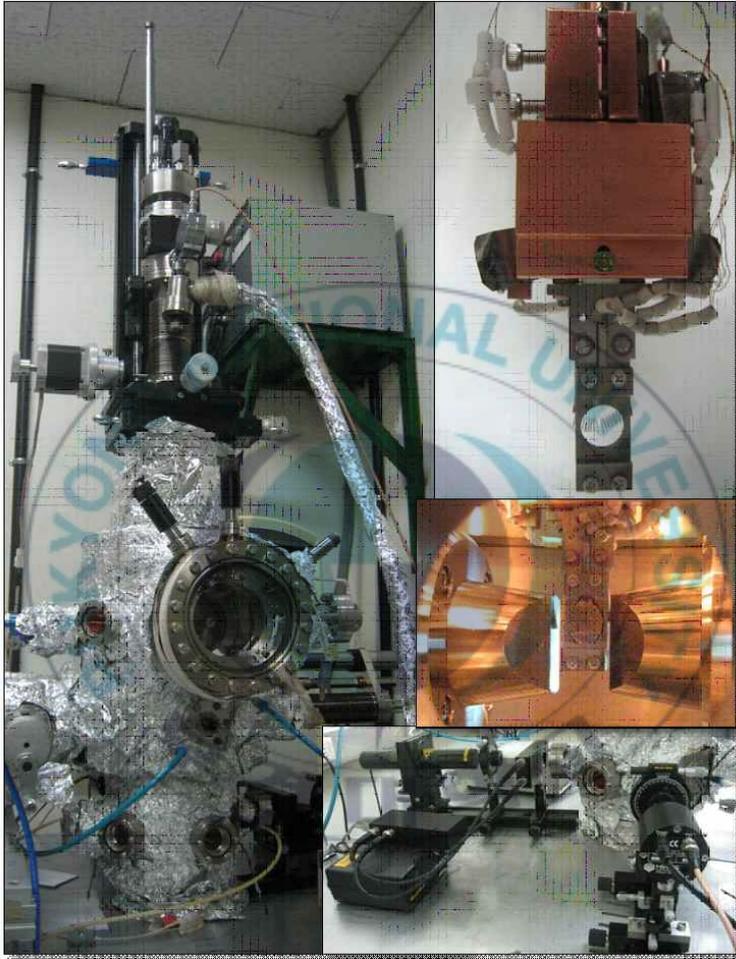


그림 3. 표면 광자기 커 효과 실험을 위한 초고진공 챔버

3.2 표면 광자기 커 효과(surface magneto-optic Kerr effect)

표면 광자기 커 효과(surface magneto optic Kerr effect)는 1877년에 John Kerr에 의해 발견된 광자기 효과의 한가지로, 그림 4와 같이 선편광된 빛이 자화를 가지는 물질의 표면에서부터 반사될 때, 자화의 크기에 비례해서 편광축이 기울어지면서 편광의 상태가 선편광에서 타원편광으로 바뀌는 현상이다. [40]

한쪽 방향으로 정렬된 자화를 가지는 매질 내의 유전 텐서는 다음 식 (9)와 같이 표현된다.

$$= \begin{pmatrix} \epsilon_x & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (9)$$

이 비대칭성분을 가지는 유전 텐서를 사용하여 식 (10)의 맥스웰 방정식을 풀면, 식 (11)과 같은 조건식을 얻을 수 있고,

$$\nabla^2 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) = \frac{\tilde{\epsilon}}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{N}^2 - \epsilon_{xx} & -\epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \hat{N}^2 - \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \quad (11)$$

다음 식 (12)와 같이 편광방향에 따라 서로 다른 굴절율의 값을 가지게 된다.

$$^2 \quad \varepsilon_{xx} \pm i\varepsilon_{xy} \quad (12)$$

편광방향에 따른 굴절율의 차이는 식 (13)과 같이 표시되며, 이 굴절율의 차이에 의해서 반사되는 빛의 편광에 따른 흡수율과 매질 내에서의 진행 속도가 달라져서 타원 축이 기울어진 타원편광이 만들어지게 된다.

$$\Delta\hat{N} = N_+ - N_- = \varepsilon_{xx} + i\varepsilon_{xy} - \sqrt{\varepsilon_{xx} - i\varepsilon_{xy}} \approx i \frac{\varepsilon_{xy}}{\sqrt{\varepsilon_{xx}}} \quad (13)$$

실제 표면 광자기 커 효과 실험은 빛을 사용하여 측정을 하기 때문에 빛이 투과할 수 있는 ~20 nm 정도의 두께까지 밖에 정보를 얻지 못한다는 단점도 있지만, 대신 표면 자성에 대한 감도가 ML단위로 굉장히 좋다는 장점을 가지고 있어서 자성 박막의 연구에 많이 활용되고 있다.[41-44]

실험은 그림 5와 같이 구성된 셋업으로 표면 광자기 커 효과 실험을 하였다. 먼저 레이저 앞의 편광자를 통과시켜 샘플에 선편광된 빛을 입사한 후, 샘플에서 반사하는 빛을 편광축이 편광자와 90 °의 각도를 이루는 분석자를 통과시켜 실리콘 다이오드 검출기를 이용해 빛의 세기를 측정한다. 이때 측정된 빛의 세기는 샘플이 자화된 크기에 비례하므로, 외부의 자기장의 크기에 따라 반사되는 빛

의 세기를 측정하면 자기 이력 곡선을 얻을 수 있고, 자기 이력 곡선으로부터 보자력, 포화 자기장, 잔류 자기, 포화 자기 등의 정보를 얻을 수 있다.

그림 6은 각각 수직(polar), 수평(longitudinal), 횡(transverse) 방향의 자기장 셋업을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 수직과 수평 방향에서의 표면 광자기 커 효과 실험을 통해 샘플의 수직 자기 이방성과 수평 자기 이방성을 비교하였다.



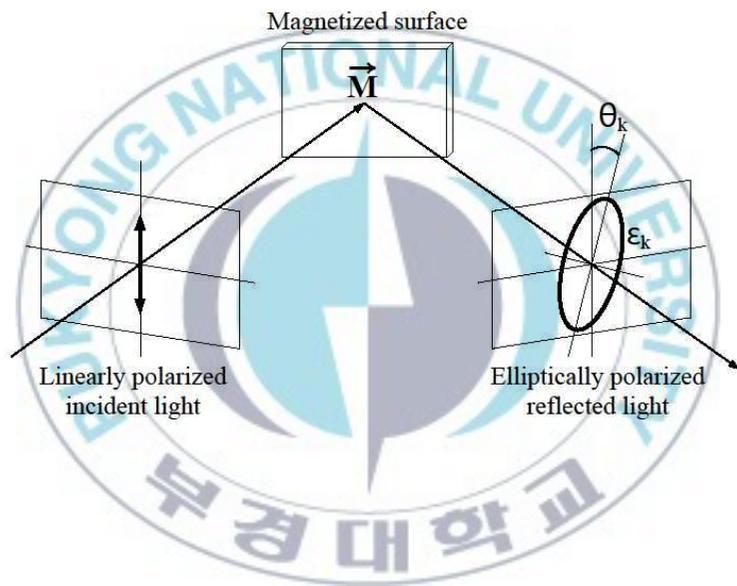


그림 4. 표면 광자기 커 효과

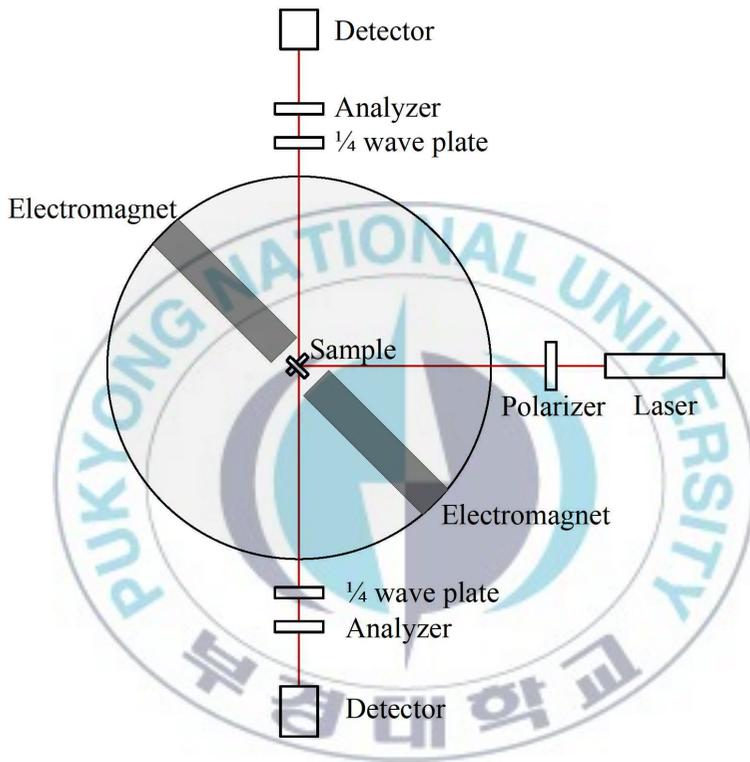


그림 5. 표면 광자기 커 효과 실험 장치의 구성

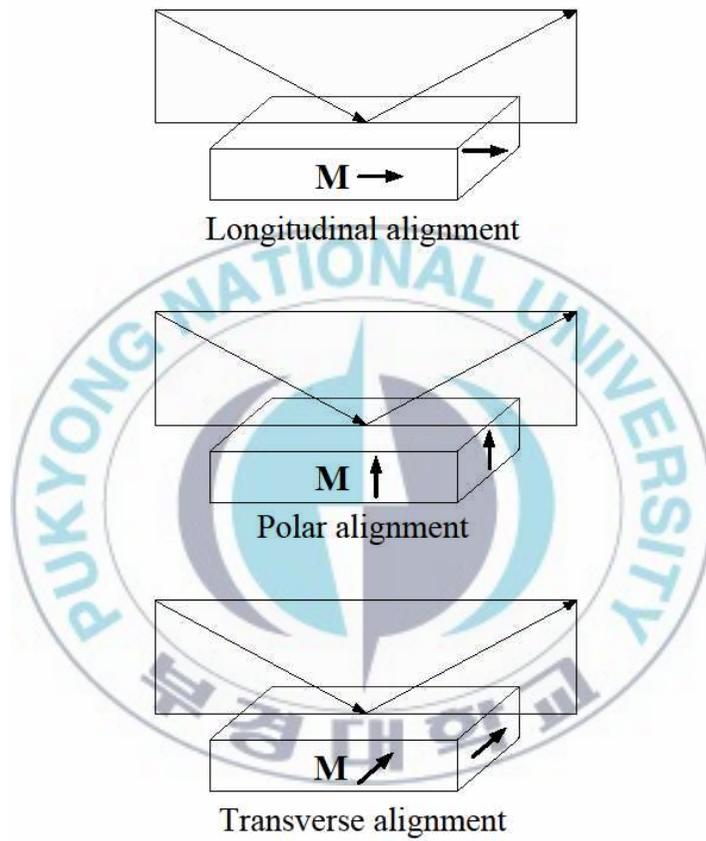


그림 6. 표면 광자기 커 효과의 정렬 방향

4. 결과 및 고찰

본 연구는 Cu 기판 위에 성장시킨 Fe 박막의 수직 자기 이방성이 Co 합금 중간층의 영향에 의해 어떻게 달라지는지를 확인하기 위해서, Fe 박막과 Cu 기판 사이에 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ 합금층 1 ML를 삽입한, $\text{Fe}/\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(1 \text{ ML})/\text{Cu}(001)$ 계의 자기이방성을 표면 광자기 커 효과 실험으로 확인하였다.

4.1 Fe/Cu(001) 계의 자기 이방성

Fe를 Cu(001) 기판 위에 상온에서 켄썬기(epitaxy) 성장 시킨 경우, 이전에 보고된 연구들에 의하면 Fe 층의 두께가 4-11 ML이면 Cu 기판의 구조를 따라 균일하게 면심 입방 구조(face centered cubic)를 가지게 되며, 1-4 ML의 두께 영역에서는 결정 상수의 불일치와 계면에 의한 영향으로 면심 입방 구조가 변형된 면심 정방(face centered tetragonal) 구조를 가지게 되고, 11 ML 이상에서는 Fe의 벌크 상태인 체심 입방(body centered cubic) 구조로 성장을 한다.

이러한 구조적인 변화와 함께 자기적 특성 또한 달라지게 되는데, 11 ML이하에서는 수직 자기 이방성을 나타내다가 11 ML이상의 영역에서는 수평 자기 이방성을 가지는 스핀 방향 전이를 보이고, Fe 박막이 11 ML이하인 영역에서는 잔류 자화와 보자력이 온도와 Fe 박막의 두께에 따라 변화하는 특성을 보인다고 보고되어 있다. [24-32]

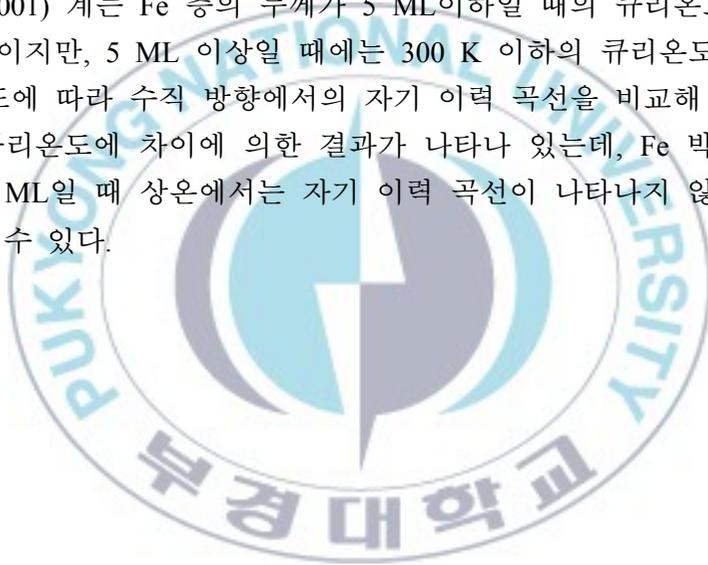
본 연구에서는 1-5 ML 두께의 Fe 박막을 상온에서 Cu(001) 기판 위에 증착시켜, 광자기 커 효과를 이용해 자기 이력 곡선을 얻어 자기 이방성을 확인하였다.

그림 7과 8은 상온에서 각각 수직과 수평 방향의 자기장을 걸어주

면서 표면 광자기 커 효과 실험을 통해 얻은 Fe 박막의 두께에 따른 자기 이력 곡선이고, 그림 9 및 10은 85 K의 온도에서 각각 수직과 수평 방향에서 표면 광자기 커효과를 통해 얻은 자기 이력 곡선이다.

상온과 85 K의 저온에서, 1-5 ML 전 영역에서 수직 방향의 자기 이방성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 수직 방향의 자기 이력 곡선을 보면, 온도에 상관없이 1-4 ML의 영역에서는 잔류 자화가 증가하다가 4-5 ML 사이에서 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fe/Cu(001) 계는 Fe 층의 두께가 5 ML이하일 때의 큐리온도는 300 K 이상이지만, 5 ML 이상일 때에는 300 K 이하의 큐리온도를 가진다. 온도에 따라 수직 방향에서의 자기 이력 곡선을 비교해 보면 이러한 큐리온도에 차이에 의한 결과가 나타나 있는데, Fe 박막의 두께가 5 ML일 때 상온에서는 자기 이력 곡선이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.



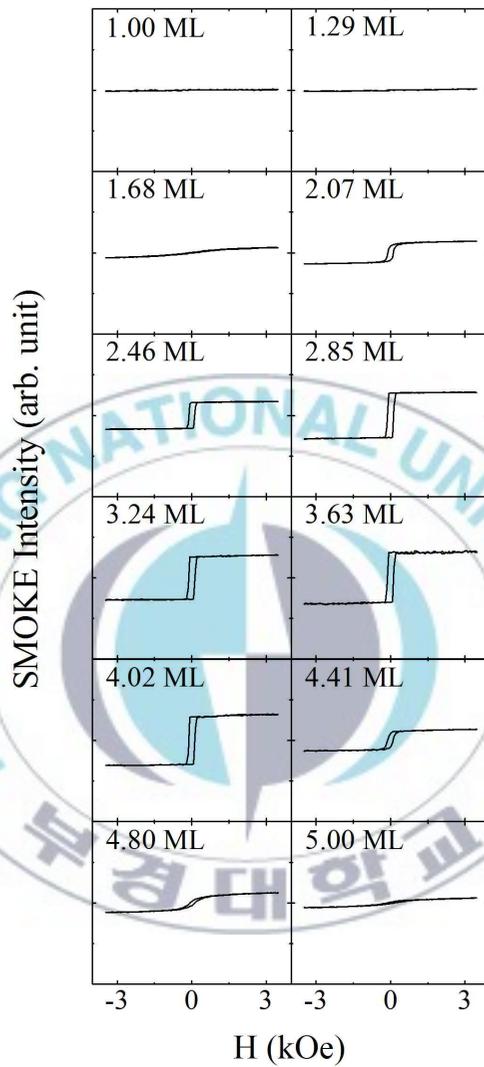


그림 7. 상온에서 수직 Fe/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선

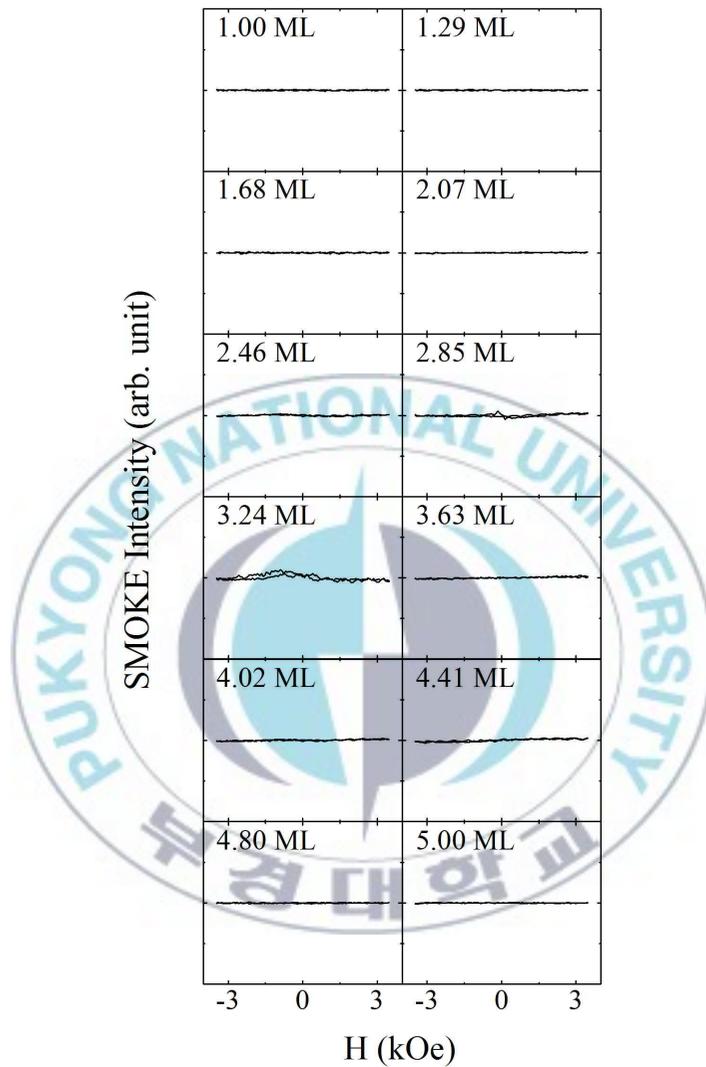


그림 8. 상온에서 수평 방향 Fe/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선

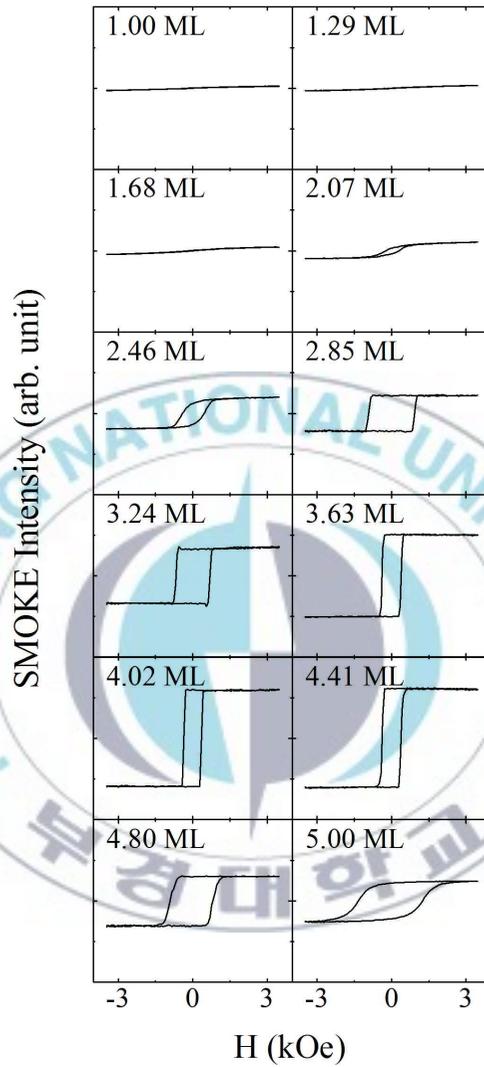


그림 9. 85 K에서 수직 방향 Fe/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선

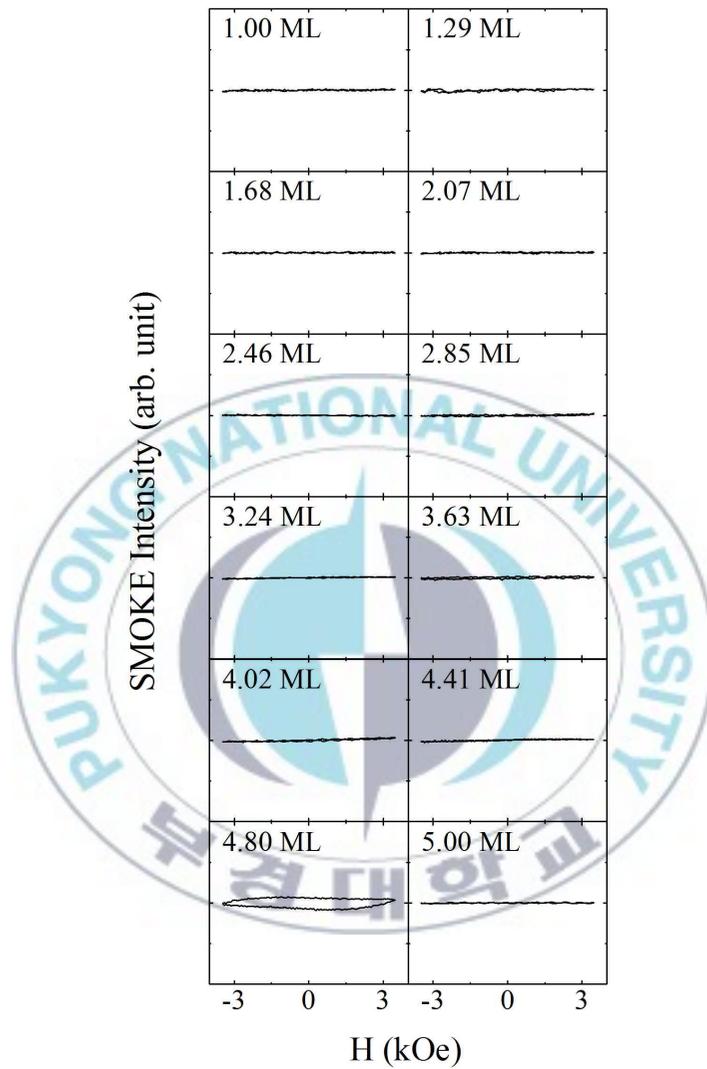


그림 10. 85 K에서 수평 방향 Fe/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선

4.2 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}/\text{Cu}(001)$ 계의 자기 이방성

$\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}/\text{Cu}(001)$ 계는 Fe, Co의 조성과 합금층의 두께에 따라서 변형된 면심 입방 구조를 가지고 스핀방향 전이를 보이는 계로 많은 연구가 되어왔다.[45-47]

이 연구에서는 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}/\text{Cu}(001)$ 계의 자기 이방성을 확인하기 위해 1-5 ML 두께의 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ 합금 층을 상온에서 Cu(001) 기판위에 동시 증착법(co-evaporation)으로, Fe와 Co를 증착하여 합금 박막을 만들었고, 표면 광자기 커 효과 실험을 통해 자기 이력 곡선을 얻어 자기 이방성을 확인하였다.

그림 11-14는 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}/\text{Cu}(001)$ 샘플의 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ 합금 박막의 두께를 달리하여 수직 및 수평 방향과 상온 및 85 K에서 표면 광자기 커 효과 실험을 통해 얻은 자기 이력 곡선이다. 데이터들을 보면 두께와 온도에 상관없이, 1-5 ML의 두께를 가지는 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ 합금 박막은 항상 수평 자기 이방성을 띄는 것을 확인할 수 있다.

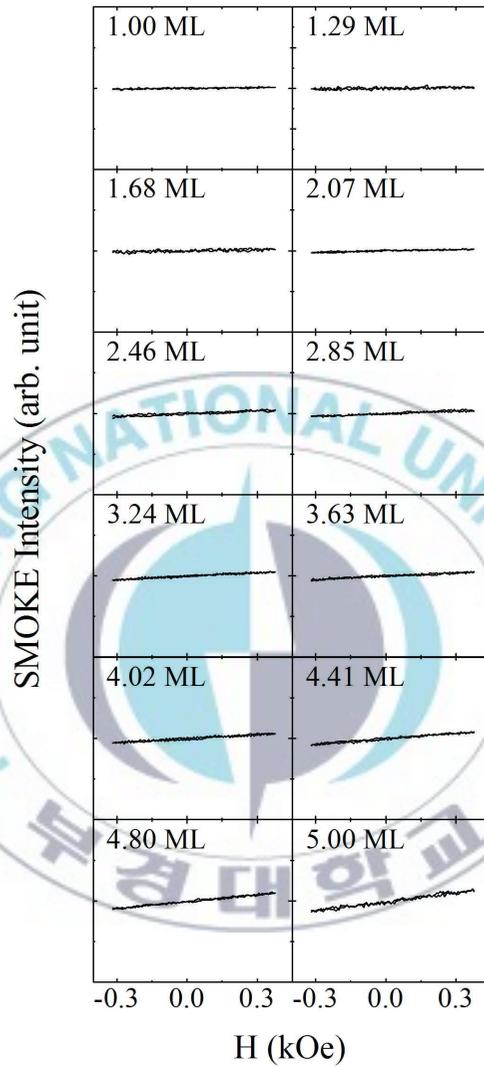


그림 11. 상온에서 수직 방향 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}/\text{Cu}(001)$ 샘플의 자기 이력 곡선

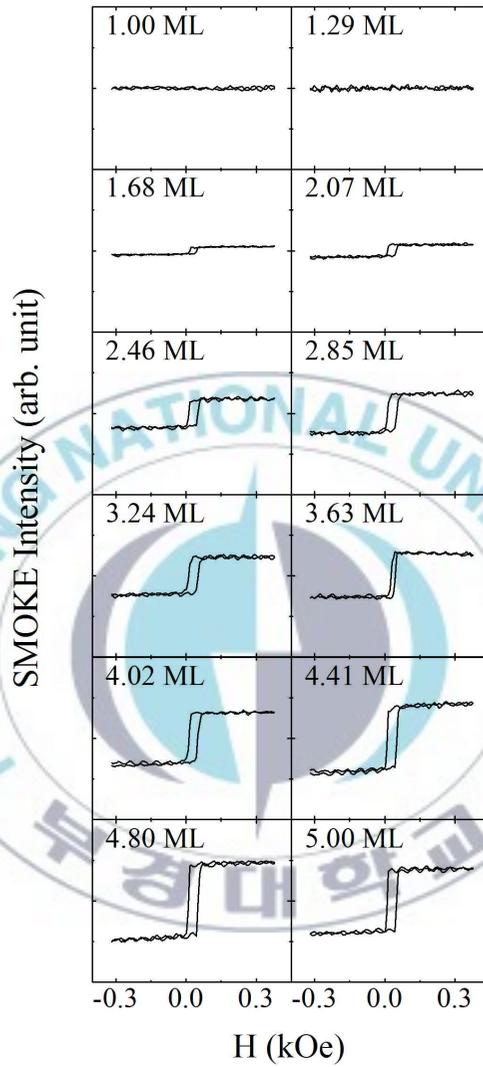


그림 12. 상온에서 수평 방향 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}/\text{Cu}(001)$ 샘플의 자기 이력 곡선

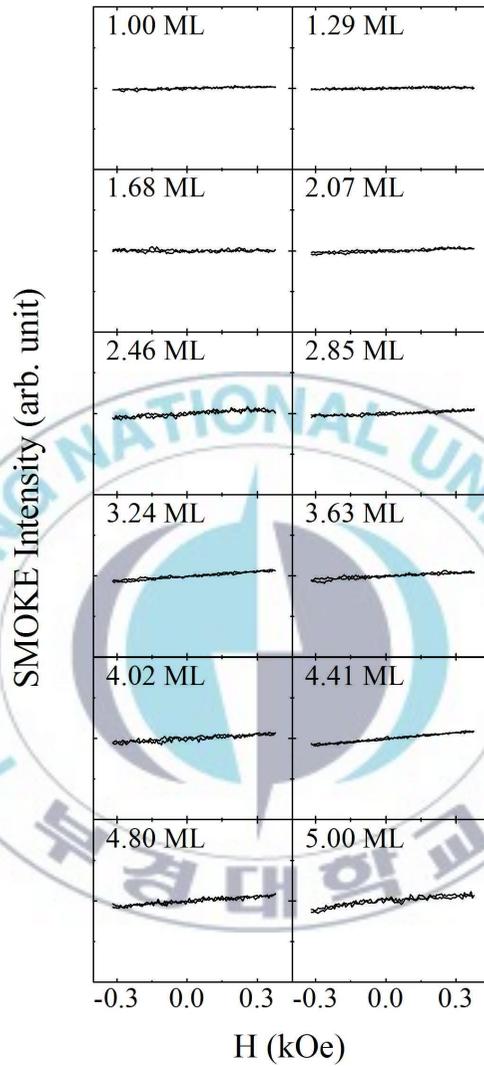


그림 13. 85 K에서 수직 방향 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}/\text{Cu}(001)$ 샘플의 자기 이력 곡선

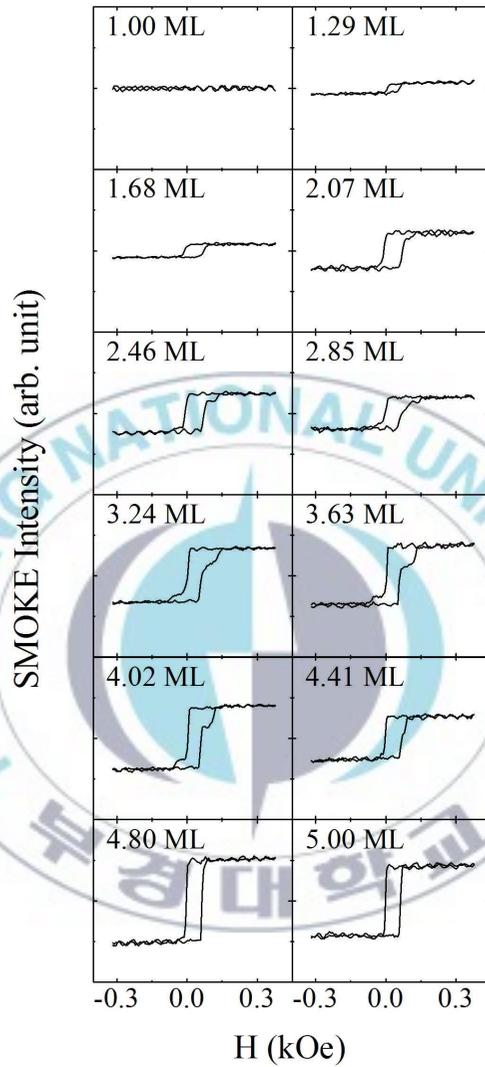


그림 14. 85 K에서 수평 방향 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}/\text{Cu}(001)$ 샘플의 자기 이력 곡선

4.3 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}(1 ML)/Cu(001) 계의 자기 이방성

그림 15-19는 상온에서 제작한 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}(1 ML)/Cu(001) 샘플의 Fe 최상층의 두께에 대한 자기 이력 곡선이다. 각각 상온과 85 K의 온도에서 수직 및 수평 방향의 표면 광자기 커 효과 실험을 통해 얻은 데이터이다.

상온에서 얻은 데이터를 보면 단순한 수평 자기 이방성을 띠는 것을 확인할 수 있다.

하지만 그림 17, 18의 85 K에서 측정된 데이터들은 Fe 층의 두께에 따라서 자기 이방성이 다르게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. Fe 층의 두께가 1.41, 1.81, 2.20 ML일 때를 비교해 보면, 1.41 ML일 때에는 뚜렷하게 수직 자기 이방성을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fe층의 두께가 2.20 ML 이상으로 두꺼운 경우, 수평자기 이방성을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 여기서 1.81 ML 부근에서 Fe층의 두께가 두꺼워 짐에 따라 수직에서 수평으로의 스핀 방향 전이 현상이 나타난다는 것을 알 수 있다.

그림 19는 85 K의 온도에서 수직 방향에서 얻은 데이터이다. Fe층의 두께를 좀 더 세분화해서 얻은 데이터인데, 1.41, 1.49 ML까지는 수직 자기 이방성을 유지하다가 1.81-2.20 ML 사이에서 수평 방향으로 자기 이방성이 바뀐다는 것을 알 수 있다.

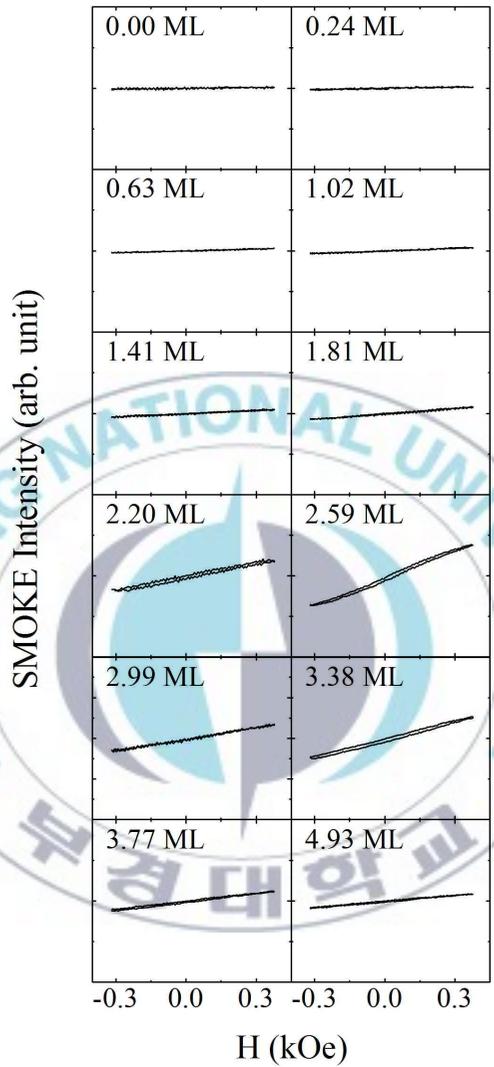


그림 15. 상온, 수직 방향에서 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선

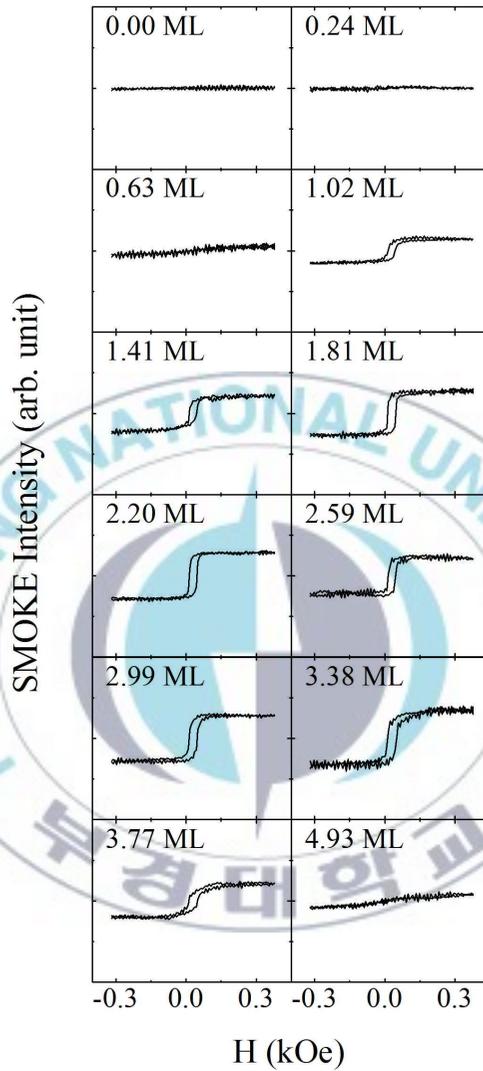


그림 16. 상온에서 수평 방향 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선

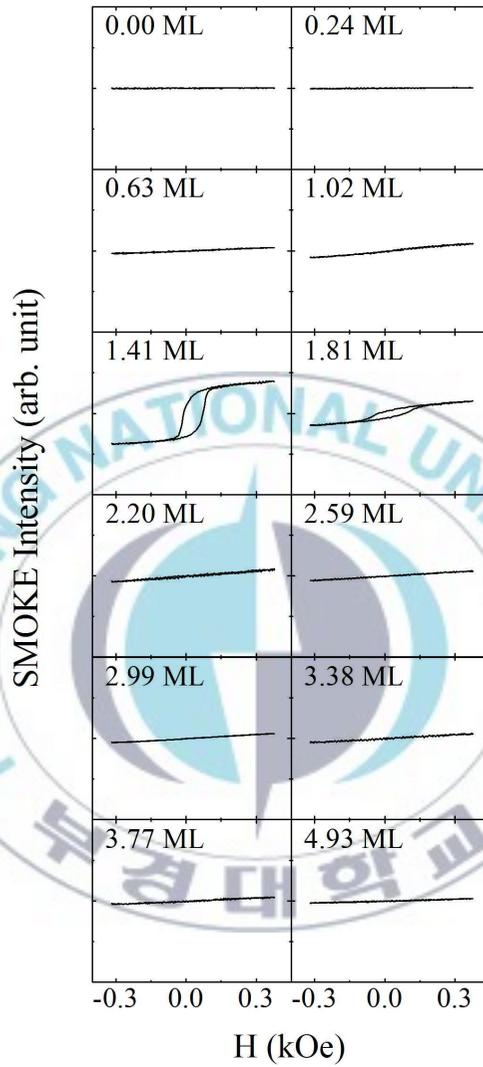


그림 17. 85 K에서 수직 방향 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선

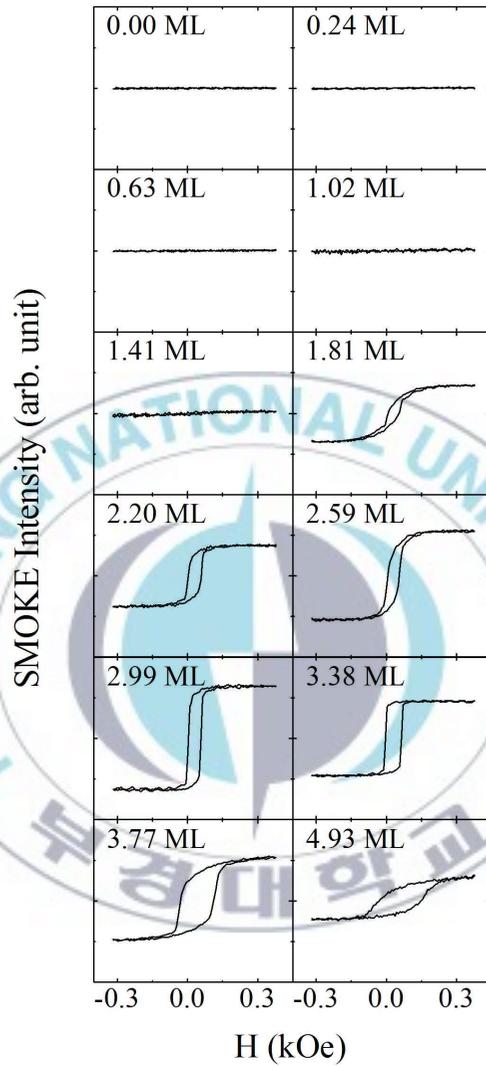


그림 18. 85 K에서 수평 방향 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 샘플의 자기 이력 곡선

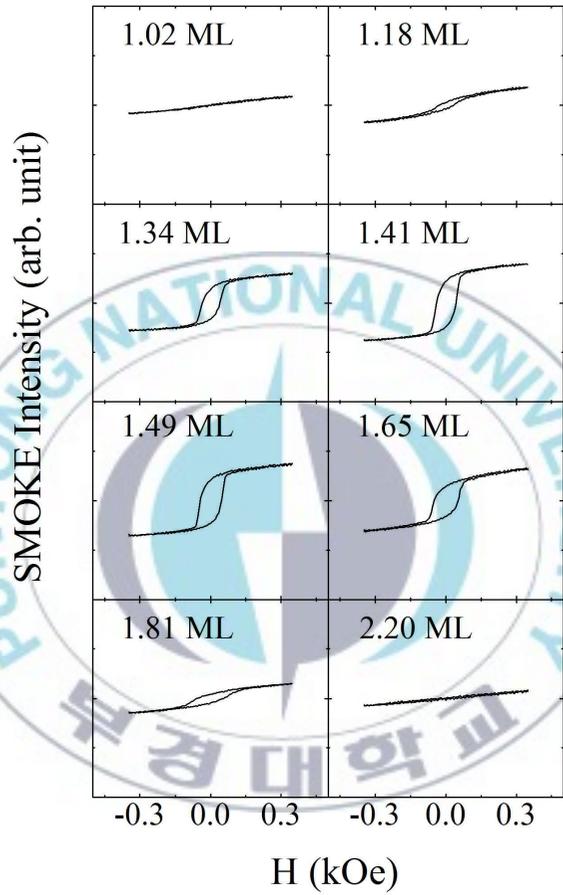
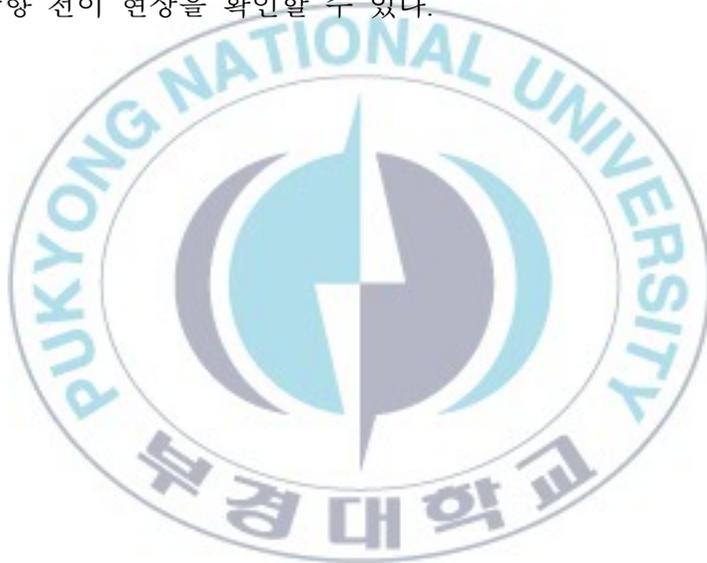


그림 19. 85 K에서 수직방향 Fe(1.02-2.20 ML) /Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001)의 자기 이력 곡선

그림 20은 85 K의 온도에서 측정된 데이터들의 상대적인 잔류자기 값을 Fe층의 두께에 따라 표시한 그래프이다. 검정색 원이 수직 방향에서 얻은 잔류자기의 값들이고, 속이 빈 원이 수평 방향에서 얻은 잔류자기의 값들이다.

이 연구의 동기가 된 계산 결과와 마찬가지로, Fe층의 두께가 1.5 ML일 때 수직 자기 이방성을 가지다가, 2.5 ML에서는 중간층에 삽입된 Co 합금층의 영향으로 수평 방향으로 자기 이방성이 바뀌는 스핀 방향 전이 현상을 확인할 수 있다.



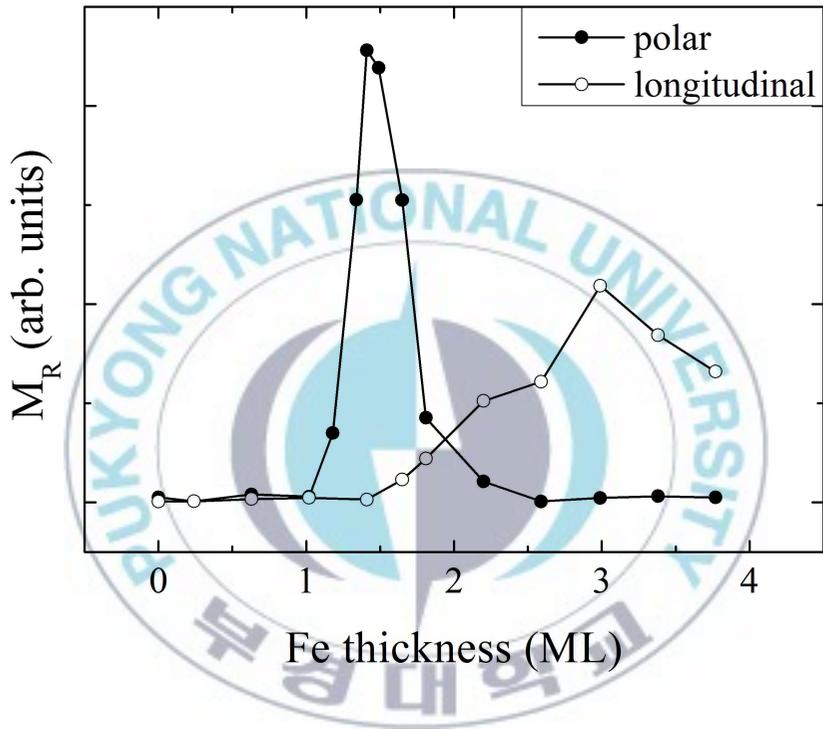


그림 20. 85 K에서 Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 샘플의 잔류자기

그림 21은 Fe층의 두께가 1.49 ML일때 수직 방향에서 얻은 자기 이력 곡선의 각형비(squareness)를 온도에 따라 측정한 그래프이다. 여기서 각형비란 잔류 자기를 포화 자기로 나눈 값(M_R/M_S)으로, 자기 이력 곡선의 모양이 사각형에 가까울수록 1에 가까운 값을 가지며, 자화 용이축의 방향을 결정하는 척도로 사용할 수 있다.

그림 21을 보면 85 K의 저온에서는 1에 가까운 값의 각형비를 가지다가 온도가 올라감에 따라 각형비가 아주 조금씩 작아지다가 160 K에서부터 급속히 작아져 200 K 이상의 온도에서는 0에 가까운 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 여기서 190 K 근처의 온도에서 각형비의 변화폭이 가장 크므로, 190 K을 전이온도로 정할 수 있다.

이미 앞의 그림15, 16의 데이터로부터 이 두께에서는 상온에서 수평 자기 이방성을 가진다는 결과를 얻었고, 수직 방향에서 각형비가 온도에 따라 그림 21과 같이 바뀐다는 결과로부터 190 K에서 온도에 의한 스핀 방향 전이 현상이 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

이 계에서는 온도가 올라감에 따라 수직에서 수평 방향으로의 스핀 방향 전이가 나타나는데, 이는 온도가 올라감에 따라 포논에 의한 열교란이 커지는 것이 원인이 되어 결정 자기 이방성이 약해지는 전형적인 온도에 의한 스핀 방향 전이 현상임을 알 수 있다.

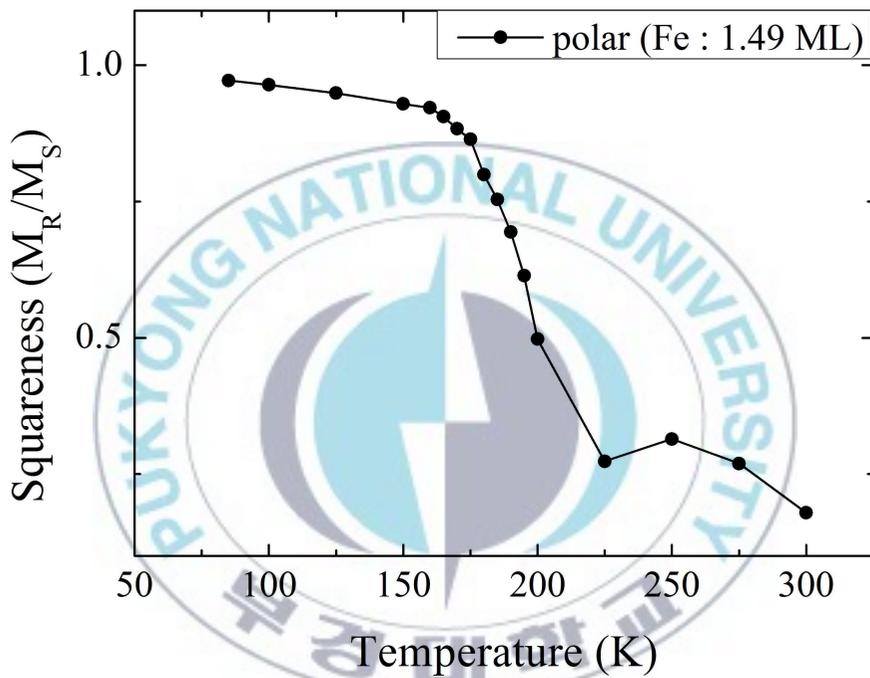


그림 21. $\text{Fe}(1.5 \text{ ML})/\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}/\text{Cu}(001)$ 에서의 온도에 따른 각형비

5. 결 론

본 연구는 Fe 최상층의 두께에 따른 Fe/Fe₅₀CO₅₀/Cu(001) 계의 자기 이방성을 확인하기 위한 연구로, 초고진공 챔버 내에서 MBE 방법으로 샘플을 만들었고, 표면 광자기 커 효과 실험을 통해 자기 이력 곡선을 얻어 자기 이방성과 박막의 두께에 따른 자기적 특성을 확인해 보았다.

Fe/Cu(001), Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001), Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 총 세가지 샘플을 제작하여 상온과 85 K의 온도에서 자기 이방성을 확인해 보았다. 실험 결과 Fe/Cu(001) 계의 경우 Fe 층의 두께가 1-5 ML일 때, 상온과 85 K의 저온에서 두께와 온도에 상관없이 수직 자기 이방성을 보이는 것을 확인하였다.

Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 계의 경우, 1-5 ML의 합금층에 대해서 상온과 85 K의 온도에서 항상 수평 자기 이방성을 보이는 것을 확인하였다.

Fe/Fe_{0.5}Co_{0.5}/Cu(001) 계의 경우에는 상온에서는 Fe층의 두께에 상관없이 수평 자기 이방성을 보였으나, 85 K의 온도에서는 Fe 층의 두께 2 ML를 경계로 두께가 증가함에 따라서 1.5 ML에서는 수직 자기 이방성을 가지다가 2 ML 이상의 두께 영역에서는 수평 자기 이방성으로 자기이방성이 변하는 스핀 방향 전이를 확인하였다.

또, 여기서 Fe 층의 두께가 1.5 ML인 영역에 대해서는 온도가 낮아짐에 따라, 190 K의 온도에서 수평 자기 이방성에서 수직 자기 이방성으로의 온도에 의한 스핀 방향 전이를 확인하였다.

실험 결과, Fe 최상층의 두께가 1.5 ML에서 2.5 ML로 증가 할 때, 이론적 예측과 같이 수직 자기 이방성에서 수평 자기 이방성으로 자화의 정렬 방향이 바뀌는 스핀 방향 전이 현상을 관찰하였다. 하지만, 2.5 ML보다 두꺼운 영역에 대해서는 예측되었던 결과와는 다르게 수평 자기 이방성을 유지하는 결과를 얻었으며 이에 대한 연구는 좀 더 진행해야 될 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] Gordon E. Moore. Fairchild Semiconductor internal publication. (1964)
- [2] Gordon E. Moore. Electronics Magazine. 38. 8 (1965)
- [3] David E. Liddle. Solid State Circuits. (2006)
- [4] Seth Lloyd. Nature. 406. 1047 (2000)
- [5] Michael Kanellos. CNET (2003-12-01)
- [6] S. A. Wolf et al. Science. 294. 1488 (2001)
- [7] Sankar Das Sarma. American Scientist. 89. 516 (2001)
- [8] Hideo Ohno. Science. 29. 854 (2001)
- [9] Igor Zutic et al. Rev. Mod. phys. 76. 323 (2004)
- [10] Alexandre R. Rocha et al. Nat. Mater. 4. 335 (2005)
- [11] Johan Akerman. Science. 308. 508 (2005)
- [12] Lizette Kodama et al. IBM. (2007-08-19)
- [13] M. N. Baibich et al. Phys. Rev. Lett. 61. 2472 (1988)
- [14] G. Binasch et al. Phys. Rev. B. 39. 4248. (1989)
- [15] M. Julliere. Phys. Lett. 54. 225. (1975)
- [16] W. H. Butler et al. Phys. Rev. B. 63. 054416 (2001)
- [17] Stuart. S. P. Parkin et al. Nat. Mater. 3. 862 (2004)
- [18] V. L. Moruzzi et al. Phys. Rev. B. 38. 1613(1988)
- [19] S. Blugel et al. Appl. Phys. A. 49. 547 (1989)
- [20] G. M. Pastor et al. Phys. Rev. Lett. 75. 326 (1995)
- [21] A. M. N. Niklasson et al. Phys. Rev. B. 59. 6373. (1999)
- [22] Valentin Iota et al. Appl. Phys. Lett. 90. 042505 (2007)
- [23] H. Sevincli et al. Phys. Rev. B. (2008)
- [24] C. Liu et al. Phys. Rev. Lett. 60. 2422 (1988)

- [25] J. Thomassen et al. Phys. Rev. Lett. 69. 3831 (1992)
- [26] Dongqi Li et al. Phys. Rev. Lett. 72. 3112 (1994)
- [27] Dongqi Li et al. J. Appl. Phys. 76. 6425 (1994)
- [28] S. Muller et al. Phys. Rev. Lett. 74. 765 (1995)
- [29] M. Zharnikov et al. J. Magn. Magn. Mater. 174. 40 (1997)
- [30] K. L. Man et al. Phys. Rev. B. 65. 024409 (2001)
- [31] D. Qian et al. Phys. Rev. Lett. 87. 227204 (2001)
- [32] B. Yu. Yaborsky et al. Phys Rev. B. 70. 014413 (2004)
- [33] H. L. Meyerheim et al. Phys. Rev. Lett. 103. 267202 (2009)
- [32] L. M. Sandratskii. Phys. Rev. B. 81. 064417 (2010)
- [35] Jisang Hong. Phys. Rev. B. 74. 172408 (2006)
- [36] Dongyoo Kim, Jeonghwa Yang and Jisang Hong. J. K. Physics. 56. 78 (2010)
- [37] M.T. Johnson et al. Rep. Prog. Phys. 59. 1409 (1996)
- [38] Mathias Getzlaff. Fundamentals of Magnetism. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008)
- [39] 정석민, 이진원, 박종윤. 진공과학입문. 청문각 (2001)
- [40] P. Weinberger. Phil. Mag. Lett. 88. 897 (2008)
- [41] Z. Q. Qiu et al. J. Magn. Magn. Mater. 200. 664 (1999)
- [42] Z. Q. Qiu et al. Rev. Sci. Instrum. 71. 1243 (2000)
- [43] J. -W. Lee et al. Rev. Sci. Instrum. 71. 3801 (2000)
- [44] S. Polisetty et al. Rev. Sci. Instrum. 79. 055107 (2008)
- [45] A. Dittschar et al. Phys. Rev. B. 57. R3209 (1998)
- [46] J. Zabloudil et al. Phys. Rev. B. 58. 6316 (1998)
- [47] A. Dittschar et al. J. Magn. Magn. Mater. 212. 307 (2000)