



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

**Low-Current High-Speed Domain-Wall
Motions of Pt/Co/TiO₂ PMA Films**

Pt/Co/TiO₂ 수직자기이방성 박막의
저전류 고속 자구벽 운동 관측

2018년 2월

서울대학교 대학원

물리천문학부

박 민 호

Low-Current High-Speed Domain-Wall

Motions of Pt/Co/TiO₂ PMA Films

Pt/Co/TiO₂ 수직자기이방성 박막의

저전류 고속 자구벽 운동 관측

지도교수 최석봉

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함

2017년 12월

서울대학교 대학원

물리천문학부

박 민 호

박민호의 이학석사 학위논문을 인준함

2017년 12월

위원장 박 윤 (인)

부위원장 최 석 봉 (인)

위원 김 도 현 (인)

Low-Current High-Speed Domain-Wall Motions of Pt/Co/TiO₂ PMA Films

Min-Ho Park

Supervised by
Professor Sug-Bong Choe

A Dissertation in Physics

Submitted to the Faculties of
Seoul National University
in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Philosophy

February 2018

*Department of Physics and Astronomy
The Graduate College of Natural Sciences
Seoul National University*

Abstract

Controlling domain-walls (DWs) by low electric current with high speed is the key for excellent performance of spintronic memory and logic devices. Accordingly, many researchers have devoted their efforts to faster DW speed

In this paper, we report that, with appropriate choice of oxidation condition, the DW moves $\sim 100\text{m/s}$ with current density $\sim 10^{11}\text{A/m}^2$ on Pt/Co/TiO₂ perpendicularly magnetized anisotropic (PMA) micro-wire structure. Additionally, through this work, Pt/Co/TiO₂ PMA structure and its properties were introduced for the first time.

For this study, firstly, we fabricated naturally oxidized Pt/Co/TiO_x films and confirmed $x=2$ through XPS data. The detailed film structure is 5-nm Ta/3-nm Pt/0.45-nm, 0.5-nm Co/1.5-nm TiO_x, which is deposited on Si/SiO₂ wafers by use of dc magnetron sputtering. Secondly, we deposited Pt/Co/TiO₂ films with various oxidation condition. Finally, after patterning micro-wire, we observed DW moves $\sim 100\text{m/s}$ with current density $\sim 10^{11}\text{A/m}^2$. To investigate current induced domain wall motion, we used MOKE microscope with 780 nm wavelength laser

The present observation provides a good starting point to achieve higher performance of DW-mediated spintronic devices with a faster DW speed.

Keywords: Magnetic domain, domain wall, domain wall speed, high speed, low current, perpendicular magnetic anisotropy, next generation magnetic memory, current driven domain wall motion

Student number: 2012-20358

목차

초록.....	iv
그림 목록	vi
1 서론.....	7
2 직류 마그네트론 스퍼터링 장비.....	9
2.1 챔버 구성.....	10
2.2 증착률 측정 방법.....	12
2.3 박막의 제작과 산화 과정.....	14
3 TiO_x 자연산화 박막의 자성 특성 및 XPS 성분 분석	15
3.1 서론.....	16
3.2 이론적 배경	18
3.3 자구벽 이미지와 룩, Kt-t Plot, 자기장유도자구벽이동.....	22
3.4 XPS 성분 분석 및 결과.....	25
3.5 결론.....	27
4 TiO₂ 박막 제작과 전류유도자구벽이동 측정	28
4.1 서론.....	29
4.2 산화 조건	30
4.3 레이저 광원을 사용한 MOKE	31
4.4 결과.....	32
5 결론 및 전망.....	33
참고 문헌	34

그림 목록

그림 1 차세대 자구벽 기반 소자의 모식도.....	7
그림 2 직류 마그네트론 스퍼터링 장비.....	9
그림 3 왼쪽부터 메인 챔버, 로드락 챔버, 옥사이드 챔버.....	10
그림 4 bare Si/SiO ₂ , 시간에 따른 Co 증착 정도.....	12
그림 5 Si/SiO ₂ /Pt, 시간에 따른 Co 증착 정도.....	13
그림 6 MOKE 현미경 모식도.....	17
그림 7 Co/Pd 멀티레이어의 Kt-t Plot.....	20
그림 8 외부 자기장에 따른 기어가기, 디피닝, 그리고 흘러가기 영역.....	21
그림 9 3-nm Pt/ t-nm Co/ 1.5-nm TiO _x 의 자구벽 이미지와 룩, 순서대로 t= 0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9.....	22
그림 10 stripe으로 갈라지는 자구벽, 왼쪽은 확장시킬 때, 오른쪽은 수축시킬 때의 이미지.....	23
그림 11 . Kt-t Plot, (좌) 3-nm Pt/t-nm Co/1.5-nm Pt, t= 0.2, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, (우) 3-nm Pt/t-nm Co/1.5-nm TiO _x , t=0.45, 0.6, 0.7, 0.8.....	23
그림 12 수직방향 자기장에 따른 자구벽 속도, Pt/Co/X 박막, X=Ti, Pt, Au, Pd.....	24
그림 13 Al Ka 광원을 사용했을 때 Ti 층의 결합 에너지.....	25
그림 14 Ti 층의 메인 픽.....	26
그림 15 Ti에 TiO ₂ 가 섞여 있을 때 메인 픽.....	26
그림 16 데이터를 각 레퍼런스 픽에 비교, 좌 Ti, 우 TiO ₂	26
그림 17 레이저 광원을 사용한 MOKE 모식도.....	32
그림 18 Pt/Co/TiO ₂ 마이크로선 소자에서 측정된 전류밀도 J에 따른 자구벽 속도 v.....	33

1장

서론

자기학은 지난 20년 사이 인류 기술 발전에 가장 지대한 공헌을 한 학문 중 하나이다. 예컨대 1987년 거대자기저항(Giant Magneto Resistance)현상은 A. Fert에 의해 발견된 이후 불과 10년 만에 하드 디스크 드라이브(IBM, 3.4GB)의 재생 헤드에 이용하여 데이터 생산과 소비를 촉진하였다. 또 다른 예로, 터널자기저항(Tunnel Magneto Resistance)현상은 1991년 처음 상온에서 관측되었고, 이는 2004년부터 하드 디스크 드라이브(Seagate, 100GB)의 재생 헤드에 이용되기 시작했다. 뿐만 아니라, TMR현상은 MRAM과 같은 새로운 비휘발성 메모리의 기초가 되었다. MRAM은 미래 반도체시장에 신성장동력으로 인정받아 상용화를 앞두고 있다.[1, 2]

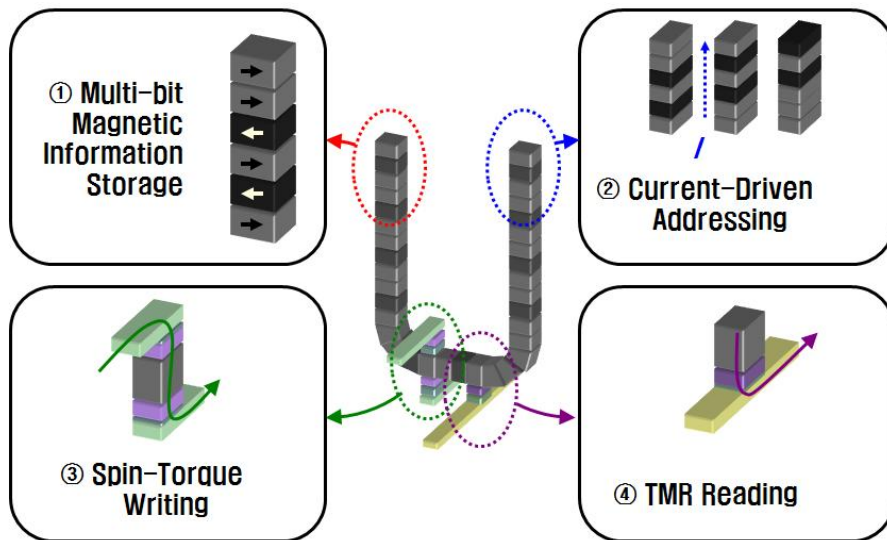


그림 1.1 차세대 자구벽 기반 소자의 모식도

이러한 MRAM과 같은 소자에서 0과 1을 나타내는 비트로서 자구(Magnetic Domain)를 사용한다.[그림1.1] 이때 서로 다른 방향으로 자화된 자구 사이의 경계를 자구벽이라고 부른다. 따라서 소자의 성능은 자구벽의 속도에 크게 의존한다. 자구벽이 빠르게 동

하는 구조나 물질에 많은 연구자들의 이목이 집중된 이유는 이런 까닭이다.[3-4] 이와 더불어, 스핀주입토크(Spin Transfer Torque) MRAM과 같이 전류를 이용하여 자구벽을 움직이는 소자에서 가장 중요한 평가 요소 중 하나는 열적 안정성이다. 전류가 주입됨에 따라 줄열이 발생하고 이로 인해 자성체의 큐리 온도를 넘어 소자가 망가질 위험이 있기 때문이다. 따라서 연구자들은 열적 안정성을 확보하면서 자구벽을 빠르게 이동시키려는 연구 주제에 큰 관심을 보여 왔다. [5] 본 논문에서는 TiO₂층을 활용하여 통상적인 전류 밀도 한계 ($\sim 10^{12}$ J/m²)보다 1/10 작은 전류 밀도 영역에서 100m/s로 움직이는 자구벽을 관측하였다.

게다가, Pt/Co/TiO₂ 구조, 특히 TiO₂층으로 수직자기이방성 (Perpendicular Magnetic Anisotropy) 박막을 제작 했다거나, 원형의 자구벽을 관측했다는 사실은 이전에 보고된 바 없다. 기존에 많이 쓰던 산화물물질들은 SiO₂, AlO_x, MgO 로, TMR 효율을 증대하기 위해 많이 쓰이기 시작한 물질들이다. 따라서 앞으로 TiO₂ 활용하여 증착 조건, 산화 조건에 따른 자성특성을 파악하고, 이에 따른 자구벽의 속도나 TMR을 측정하는 등 다방면에서 후속 연구를 진행한다면 유의미한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

증착과 산화를 위해서 직류 마그네트론 스퍼터링 장비를, 자구벽 이동을 관측하기 위해서 Magneto-Optical Kerr effect (MOKE) 현미경을 사용하였다. **2장**에선 해당 장비에 대한 일반적인 설명과 실험 과정에 대한 세부 사안을 기술했다. **3장**은 초기에 연구한 자연산화 티타늄 박막에 대한 부분이며, **4장**에서는 정교한 산화 방식을 사용하여 박막을 제작하고 전류유도자구벽이동(Current Induced Domain Wall Motion) 측정에 대하여 기술하였다.

2장

직류 마그네트론 스퍼터링 장비

이번 장에서는 직류 마그네트론 스퍼터링 장비에 대해 기술하려 한다. 2.1에서는 우리 실험실에서 사용하는 직류 마그네트론 스퍼터링 장비에 대해 간략히 소개한다. 이산화티타늄 박막을 정교한 조건에서 산화시키고 단기간에 많이 만들어 낼 수 있었던 것은 구성된 챔버의 구조 덕택이었다. 2.2에서는 증착률을 구한 방식을 밝힌다. 증착률을 구한 방식은 깨끗한 Si/SiO₂ 기판에 30분 증착하여 측정하는 기존의 방식과 다르며, 합리적인 기준에서 새로운 대안을 제시하였다. 그리고, 마지막으로 2.3에서는 어떻게 증착과 산화를 진행했는지 기술한다.

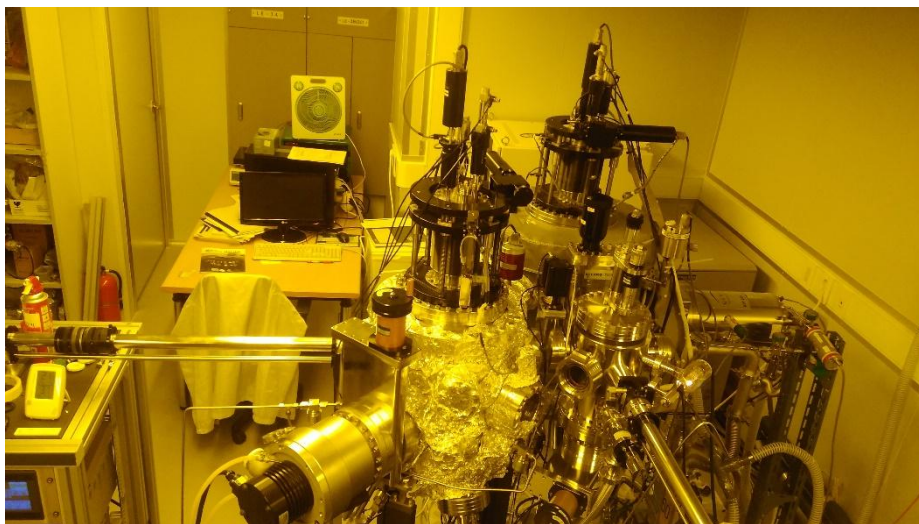


그림 2 직류 마그네트론 스퍼터링 장비

2.1 챔버 구성

해당 장비는 얇은 자성층, 예컨대 $Co=0.3nm$ 을 쌓았을 때 깔끔한 원형 자구벽이 나타나는 고품질 시료를 만들 수 있는 장비로, 랩뷰를 이용하여 정확한 서터 컨트롤이 가능하다. 이 장비는 세 챔버로 나뉘는데, 첫째가 메인 챔버, 둘째가 로드락 챔버, 셋째가 옥사이드 챔버이다. 이들은 모두 연결되어있고 게이트 밸브가 있어 여닫을 수 있다. 각각 터보 펌프, 크라이오 펌프, 터보 펌프가 장착되어 있어 low 8승의 진공도를 유지하고 있다.[그림3]

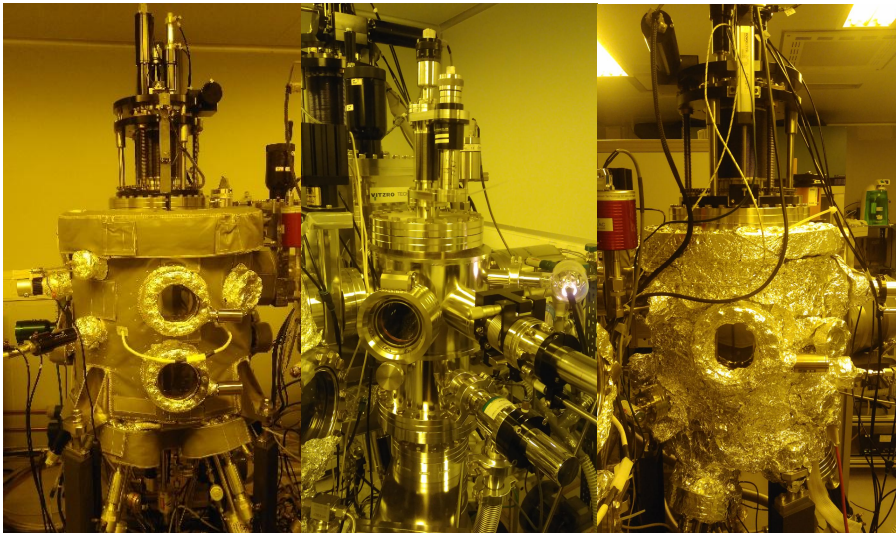


그림 3 왼쪽부터 메인 챔버, 로드락 챔버, 옥사이드 챔버

메인 챔버와 옥사이드 챔버 모두 공통적으로 스테이지는 위에, 건은 아래에 위치하며, 메인 챔버의 건은 7 개, 옥사이드 챔버의 건은 3 개이다. 메인 챔버는 수직으로 연결된 건 하나 외에는 모두 기울어져 있는데, 이 때문에 샘플 스테이지를 일정 속도로 회전할 수 있게 제작되었다. 또한, 타겟 물질은 모두 지름이 2 인치이며, 타겟부터 스테이지까지의 거리는 약 15cm 이다. 기관의 한 변은 11mm 로, 최대 4 개까지 테이핑하였으며, 이 영역까지는 분사되는 물질의 균일성이 유지되는 것을 확인했다. 특징적으로, 로드락 챔버에는 4 개씩 2 단으로 된 들이가 존재하여, 한번 시료를 로드할 때마다 최대 8 개씩 장전할 수 있다. 또한 이들의 기본 압력(base pressure)는 모두 low 8 승으로, 산화되지 않은 Ti 층을 메인

챔버에서 만들고 로드락을 통해 옥사이드 챔버로 옮겨도 로드락에서 오염되거나 추가적으로 산화되지 않았다.

2.2 증착률 측정 방법

기존 증착률을 구하는 방식은 첫째, Si/SiO₂ 기판을 각각 아세톤과 메탄올로 울트라소닉으로 표면을 깨끗이 한다. 둘째, 유성펜이나 포토리소그래피를 이용하여 단차를 만들 무늬를 제작한다. 셋째, 건의 타겟 물질에 산화물이나 이물질을 걷어내기 위해 프리스퍼터를 5분 이상 진행하고, 아르곤 2mTorr 분압에서 30분을 증착하여 Atomic Force Microscope으로 측정하며, AFM 대신 X-Ray Diffraction를 활용하는 경우 두번째 단계를 건너 띄고 시료를 제작하는 게 일반적이다. 우리는 증착률을 좀 더 정교히 하기 위해 시간에 따라 물질을 증착하고 선형성을 확인하려 했다. 이때 XRD는 결정성을 측정하는 장비이기 때문에 얼기설기 쌓인 초기 물질 구조를 측정하지 못하는 단점이 있으며, 따라서 수 나노미터 영역에서는 큰 오차를 보이고, 대개 20~30 나노미터 두께로 증착하여 측정한다. 따라서 수 나노부터 수십나노까지 측정가능한 AFM으로 시간에 따른 물질 증착 정도를 측정하였다.

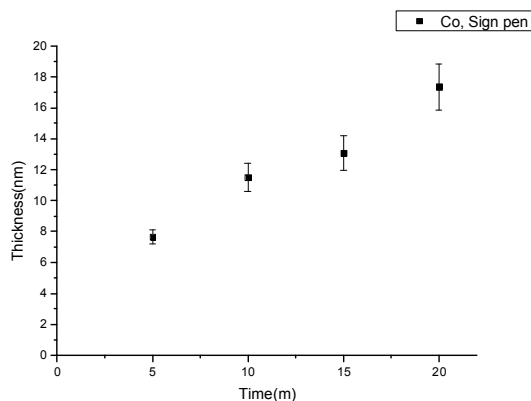


그림 4. bare Si/SiO₂ 기판, 시간에 따른 Co 증착 정도.

시간에 따른 Co 증착 정도는 데이터는 위와 같다.[그림 4] 위 그래프에서, 데이터는 기울기 0.617nm/m의 선형성을 보이거나 y절편은 4.6nm로 원점을 지나지 않는다. 이런 경향은 Co 뿐만 아니라, Pt, Pd, Au 등 우리 실험실에서 주로 사용했던 물질들에 대해서 모두 그러했다. 이 그래프가 의미하는 것은 기존의 방식대로 30분만 증착하면 물질별로 증착률에 따라 오차가 나타날 수 있다는 것이다. 예컨대 Pd처럼 증착률이 큰 타겟들은 상대적으로 이런

오차의 비율이 줄어들지만, Co처럼 증착률이 낮은 물질들은 상대적으로 이 같은 오차의 비율이 커진다. 예컨대 Co를 30분만 증착하여 얻은 기울기는 1.08nm/m로 큰 차이를 보인다.

이런 오차의 비율을 줄이기 위해 우리는 버퍼 물질을 증착하여 측정했는데, 그 결과는 다음과 같다.[그림 5]

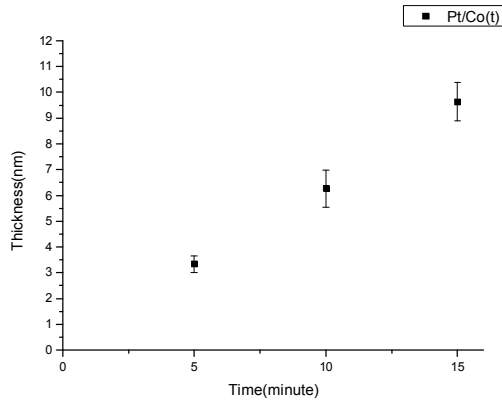


그림 5. Si/SiO₂/Pt, 시간에 따른 Co 증착 정도.

Pt를 5분 증착하고, 5분 증착한 박막의 단차를 원점으로 하려 그린 그래프이다. 이때 기울기는 0.612nm/m으로 옛 방식과 비슷하나, y절편은 0.27nm로 오차범위 내에서 원점을 지난다고 할 수 있다. 이런 방식의 장점은, 어느 물질이든 버퍼를 두고 30분만 증착하면 물질에 따른 오차 거의 없이 증착률을 구할 수 있다.

우리는 기존의 방식으로 측정된 두께를 **nominal thickness**라고 부르고, 새로운 방식으로 측정된 두께를 **actual thickness**라고 부르기로 했다. 본 연구에서 진행된 박막의 두께는 모두 **actual thickness**로 표기되어 있다.

2.3 박막의 제작과 산화 과정

증착은 메인 챔버에서 이루어졌으며, 기본 압력 3×10^{-8} Torr, 작업 압력 Ar 2mTorr에서 진행했다. 기판은 Si 450um, TEST 등급, SiO₂ 드라이 옥시데이션 100nm 처리된 기판을 사용했다. 프리 스퍼터를 7분간 진행하고, 증착을 시작했으며, 5-nm Ta/3-nm Pt/x-nm Co/1.5-nm Ti를 증착하였다. 박막 증착이 끝나면 자연산화 박막은 그대로 꺼내졌고, 산화조건을 조절하는 박막은 로드락을 통해 옥시데이션 챔버로 옮겨져서 산소를 주입하여 산화시켰다. 산화가 완료된 후에는 다시금 메인 챔버로 옮겨 산화방지를 위한 Pt 캐핑을 진행하였다. 통상적으로는 산화챔버에서 TiO₂ 세라믹 타겟을 증착하면서 산소를 주입하는 방식을 사용하는데, 그 방식은 증착 조건을 새로이 잡아야 하기에, 쉽고 빠르게 만들기 위해 이러한 방식을 채택하였다. 이 방식이 TiO₂ 막을 만드는데 얼마나 유효한지는 4장에서 다시 논의될 것이다.

3장

TiO_x 자연산화 박막의 자성 특성 및 XPS 성분 분석

이번 장에서는 자연산화 Pt/Co/TiO_x 박막의 자성 특성에 대해 말하고자 한다. MOKE 현미경을 통하여 자구벽 이미지와 히스테리시스 룩을 측정하였고, 자기장유도자구벽이동을 관측하여 Pt/Co/X, X=Pt, Au, Pd에 비해 같은 자기장에서 약 천 배 빠른 움직임을 관측하였다. 자기적 성질을 더 알아보기 위해 이방성자기장 이방성 자기장(anisotropy field, H_k)를 자기저항(Magnetoresistance, MR) 장비로 측정하였고, 포화자화(saturation magnetization, M_s)를 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)로 측정하였다. 이를 통해 유효 자기이방성을 알아낼 수 있었고, Pt/Co/Pt와의 Kt-t plot 비교를 해볼 수 있었다. 더 나아가, 이렇게 자연산화된 시료가 정말 TiO₂인지 확인하기 위해 XPS를 찍어 확인했다.

3.1에서는 연구 동기와 MOKE 현미경 셋업에 대해 기술한다. 3.2에서는 자기이방성과 크립 운동의 이론적 배경에 대해 알아보며, 3.3에서는 박막의 제작과 MOKE 현미경을 통한 이미지, 히스테리시스 룩, Creep 운동, 그리고 Kt-t 플랏 등 실험 결과와 해석, 3.4에서는 XPS 데이터와 그 해석, 3.5에선 결과를 종합하여 결론지었다.

3.1 서론

자구벽의 움직임이 차세대 메모리와 스핀트로닉스 소자에 응용될 수 있다는 여러 연구들[6-9]로 인해 자구벽을 만드는 구조와 속도에 대한 자성 연구는 활발히 촉진되었다.[10] 따라서, 이런 물질들의 구조적인 특성에 대한 연구도 활발히 이뤄졌다.[11] 초기에 본 연구는 이런 흐름에서, Pt/Co/X, X=NM, 박막의 자성층 두께를 바꾸가며 기본적 자기적 특성을 확인하는 연구로 시작했으며, X=Ti인 박막에서 X=Pt, Pd, Au 박막에 비하여 같은 자기장에서 약 1000배 빠른 자구벽 이동을 관측하여, 이 박막의 상태와 성질을 규명하는데 힘쓰게 됐다. Ti를 3nm 이상 쌓으면 Ti=2nm 이하에서 보이던 자구벽 표면의 성질이 사라지는 것을 통해 간접적으로 Ti 층의 산화가 속도변화의 원인이라는 걸 확인하였으며, 직접적으로 XPS를 통하여 TiO₂ 픽을 확인하였다. 이는 산화조건을 정교히 통제하여 박막을 만들게 되는 동기가 되었다.

그림 6은 CCD 카메라를 장착한 MOKE 현미경의 모식도이다. 현미경(Carl Zeiss, AxioTech vario)은 광원으로 수은 램프를 사용했다. 램프는 약 100와트의 세기와 365nm와 436nm에서 최대 출력 픽을 보인다. 대물렌즈는 100배에서 2.5배까지 사용하였다. 빛은 편광판을 지나 선형편광된다. 그 뒤 자성 물질에 닿은 빛은 MOKE로 인해 편광이 회전하며, 이는 표면의 자화상태에 의존한다. 따라서 애널라이저를 지나가는 빛은 표면의 자화상태에 의존하여 명암을 달리하게 되고, 이는 CCD(Charge Coupled Device) 카메라(삼성, SHC-745)로 전송되어 자구벽 이미지를 저장할 수 있다. 자기장을 인가하기 위하여 쌍극 파워 서플라이(Kepeco, BOP 50-4)를 사용했고, 철 코어를 사용하여 최대 약 2300 Oe의 자기장을 인가할 수 있다.

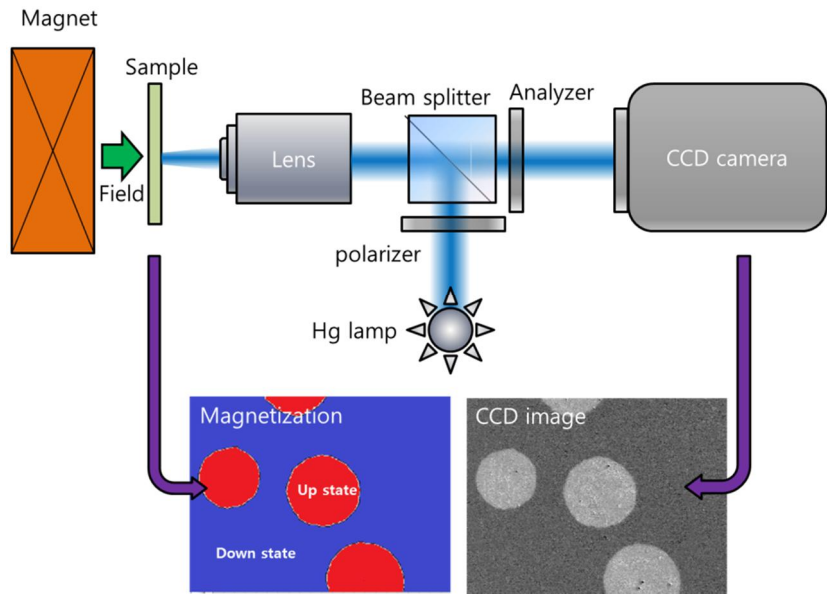


그림 6 MOKE 현미경 모식도

3.2 이론적 배경

3.2.1 자기이방성

Zeeman 에너지

포화자화 (M_s)를 갖는 단자구(Single Domain) 형태의 자성재료에 자기장을 인가한 경우를 가정하자. 이때 자기장(\vec{H})과 포화자화(\vec{M}_s)와의 상호작용에 의한 자기 에너지는 다음과 같이 Zeeman로 표현된다.

$$E_z = -\vec{H} \cdot \vec{M}_s = -HM_s \cos(\theta_H - \phi_M)$$

여기서 θ_H 는 자기장 방향이고, ϕ_M 은 포화자화를 갖는 단자구의 자화 방향이다. 따라서 $\theta_H - \phi_M$ 은 자기장 방향과 자화 방향의 사이각이며, 이것이 0인 경우 Zeeman 에너지가 최소가 된다. 따라서 포화자화(M_s)를 갖는 단자구 형태의 자성 재료에 자기장을 인가한 경우 자화 방향은 자기장 방향과 동일한 방향으로 향하게 된다. 이러한 현상은 마찰력이 거의 없는 뽀족한 침 위에 놓인 나침반 바늘에서 볼 수 있다. 이러한 단자구의 경우에는 단자구가 선호하는 특정 방향 없이, 즉 등방성(等方性, isotropy)을 갖고 있다고 말할 수 있다.

자기 이방성(magnetic anisotropy)

위에서 가정한 단자구 형태의 자성재료는 이상적인 상태로, 실제로는 자성물질을 만들어내는 재료의 결정구조, 제조 방법, 자성체의 모양 등에 의존하여 에너지가 변화한다. 따라서 등방성이 아니라 선호하는 방향이 특정되는데, 이를 자기이방성(磁氣異方性, magnetic anisotropy)라고 한다. 이방성은 등방성의 부정 형태로, 한자에선 잘 드러나지 않지만 영어로는 등방성(isotropy)에 부정을 의미하는 접두사 An-이 붙어 만들어진다.

자기 이방성을 갖게 만드는 에너지를 이방성 에너지(anisotropy energy)라고 하며, 그 크기는 이방성 상수(anisotropy constant)로 정의한다. 예를 들면, 재료의 결정구조에 의해 나타나는 이방성을 결정 이방성(crystalline anisotropy)이라고 한다. 예컨대 Fe는

정육면체 모양을 하는 체심입방구조(body centered cubic, BCC), Co는 육방밀집구조(hexagonal closed packed, HCP), Ni은 정육면체의 면심입방구조(face centered cubic, FCC)를 갖는다. 우리 연구실에서 자주 쓰이는 Pt, Pd, Au는 FCC, Co, Ta은 BCC이다. 그러나 모든 물질이 증착 이후에 결정구조를 갖는 것은 아니며, 어떤 물질들은 적절한 열처리를 해야만 결정구조가 나타나기도 한다. 다른 예로, 자성체의 성형된 모양에 따른 이방성으로, 형상 이방성(shape anisotropy)가 있고, 재료의 제조 조건(열처리, 냉각, 성형 조건 등)에 의해 생성되는 유도 이방성(induced anisotropy), 자기장의 세기에 따른 물체의 변형으로 인한 자기탄성(magnetoelastic) 이방성 등이 존재한다.

일축 이방성(uniaxial anisotropy)

입자의 일축 이방성 에너지는 푸리에 급수에 의해 $\sin\phi_M$ 의 제곱 항으로 전개할 수 있다. 상수 항을 제외하고, $\sin\phi_M$ 의 4제곱항의 변화가 작다고 가정하면, 일축 이방성 에너지(E_k)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_k = K_u \sin^2 \phi_M$$

K_u 는 일축 이방성 상수이며, 일축 이방성 에너지(E_k)는 자화 방향의 각도 ϕ_M 만의 함수이다. 따라서 자기장이 없을 때, 에너지는 낮은 값을 선호하므로, ϕ_M 이 0도와 180도에 위치하게 된다. 이는 즉, 자화 방향과 평행한 각도를 선호하는 이방성이다. 이처럼 자화가 쉽게 위치하는 축을 자화 용이축(easy axis)라 하며, 이방성 에너지가 최대가 되는 ϕ_M 의 각도, -90도와 90도가 있는 축을 곤란축(hard axis)라 한다. 박막의 경우에, 자화 용이축이 박막과 수직인 경우 수직자기이방성(perpendicular magnetic anisotropy, PMA) 박막이라고 부르며, 자화 용이축이 박막과 평행한 경우 수평자기이방성(in-plane magnetic anisotropy, IMA) 박막이라고 한다.

Zeeman 에너지와 일축 자기 이방성 에너지의 합을 E_t 라고 표기하면,

$$E_t = -HM_s \cos(\theta_H - \phi_M) + K_u \sin^2 \phi_M$$

이다. 이를 ϕ_M 에 대해 미분하여 0이 되도록 만드는 ϕ_M 을 구하면, 외부 자기장 H 가 인가되었을 때 평형이 되는 ϕ_M 을 구할 수 있다. 앞서 우리는 일축자기이방성만을 가질 때의 평형상태를 구한 적 있다. (ϕ_M 이 0도와 180도일때) 이때 한 평형상태에서 다른

평형상태로 바꾸려 한다면, 자기장이 필요한데 이렇게 회전할 수 있게 만드는 외부 인가 자기장의 최소값을 일축 이방성 자기장(anisotropy field, H_K)라 부른다. 계산의 편의를 위해 $\theta_H=0$, 즉 자기장을 걸어주는 방향을 x축으로 두면, ϕ_M 가 180도일때, E_t 를 ϕ_M 에 대해 두번 미분하여 이를 0으로 만드는 H 값을 구하면 다음과 같다.

$$H_K = 2 \frac{K_u}{M_s}$$

[12]

이는 K_u 대신 현상학적으로 정해진 K_{eff} 를 자주 쓰이는 관계식이다. 우리는 H_K 를 MR이나 VSM으로 측정할 수 있고, M_s 역시 VSM으로 측정할 수 있으므로, K_{eff} 를 구해낼 수 있다.

1984년 Neel이 제안한 계면에 의한 이방성 효과와 부피에 의한 이방성 효과를 현상학적으로 구분하면, 박막 자성층의 유효 자기 이방성 상수 K 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{eff} = K_V + \frac{2K_S}{t}$$

이는 단순 대칭 자성박막, 예컨대 Pt/Co/Pt 같은 구조에 대한 것으로, 비대칭적 구조일 때는 수정해야만 한다.

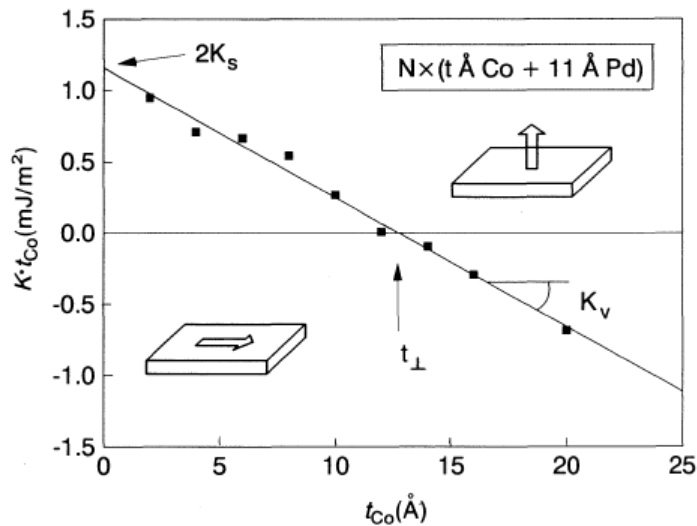


그림 7 Co/Pd 멀티레이어의 Kt - t plot

3.2.2 Creep 운동

PMA 박막이 아래 방향으로 자화되어있다고 가정하자. 박막은 균일하게 쌓으려고 노력하지만 대개 불균일한 자성체의 한 부분이 존재하기 마련이고, 이런 곳들이 퍼텐셜 우물이 더 낮은 역할을 하여 쉽게 자화가 바뀌는 곳이 된다. 이런 곳들을 뉴클리에이션 사이트(nucleation site)라고 부른다. 한번 자구벽이 뒤집히면, 위쪽으로 정렬하는 것이 박막 전체로 보았을 때 에너지가 더 낮아지는 방향이므로, 점차 자구벽은 확장하게 된다. 뉴클리에이션 사이트와 반대로 더 퍼텐셜 우물을 높이는 역할을 하는 곳은 피닝 사이트(pinning site)라고 부르며, 이런 곳들은 핀처럼 확장되는 자구벽 사이에서 아래 방향을 유지한다. 이런 피닝 사이트를 뒤집을 수 있는 최소한의 자기장을 피닝 자기장이라고 한다. 인가된 자기장이 피닝 자기장보다 작은 경우에는 기어가기 이동을 하며, 이보다 큰 경우에는 디피닝 이동을 한다.

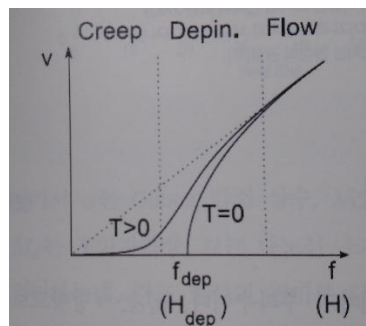


그림 8 외부 자기장에 따른 기어가기, 디피닝, 그리고 흘러가기 영역

기어가기 영역에서는 열적 활성화 과정을 통해 자구벽이 이동하며, 이때 자구벽의 속도 v 는 외부자기장 H 에 대하여 기어가기 축적 법칙(creep scaling law)을 따른다. 기어가기 축적 법칙은

$$v = v_0 \exp(-\alpha H^{-\frac{1}{4}})$$

로 주어진다. 여기서 v_0 와 α 는 각각 속도와 에너지에 대한 축적 상수이다.[13]

3.3 자구벽 이미지와 룩, Kt-t Plot, 자기장유도자구벽이동

앞 절에서 다룬 방식대로, 3-nm -Pt/t-nm Co/1.5-nm TiO_x, t=0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9 에 대한 박막을 제작한 뒤, MOKE 현미경으로 자구벽 이미지와 룩을 측정했고, VSM 과 MR 장비를 통하여 K 값을 얻었으며, 물질에 따른 자기장유도자구벽이동을 관측했다.

3.3.1 자구벽 이미지와 룩

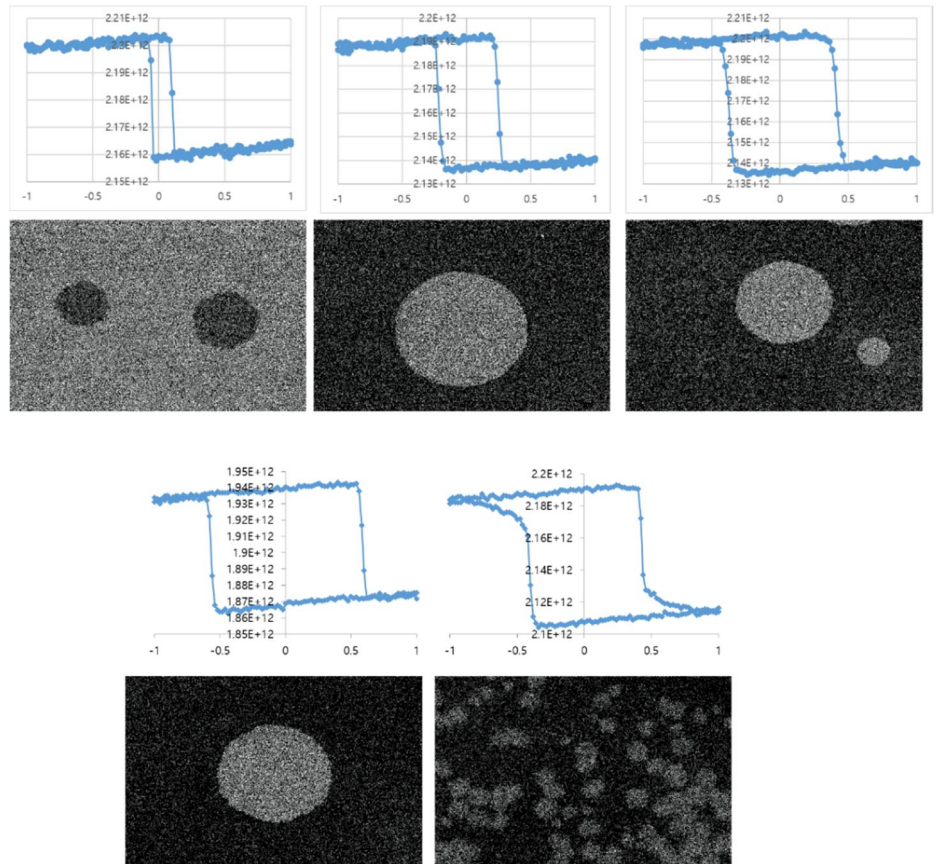


그림 9. 3-nm Pt/ t-nm Co/ 1.5-nm TiO_x의 자구벽 이미지와 룩, 순서대로 t=0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9

코발트 두께가 0.4인 경우에는 룩은 나왔지만 PMA 이미지가 나오지 않았으며, 0.45인 경우에는 빠르게 움직였지만 수

Oe의 reminance field에도 움직였다. 이들은 모두 그림10과 같은 현상을 보였다. 원형으로 확장하는 듯 보여도 그 사이에는 um사이즈의 틈이 있는 채로 갈라지며, 수축시킬 때 이것이 도드라져 보이게 된다. 이는 Pt/Co/Pd 박막에서도 관측된 바 있다.[14] 이들의 보자력은 각각, 약 20Oe, 50Oe, 82Oe, 118Oe, 86Oe 순이다.

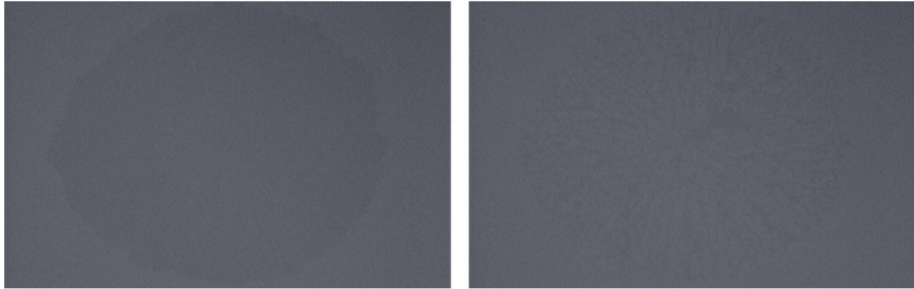


그림 10. stripe으로 갈라지는 자구벽, 왼쪽은 확장시킬 때, 오른쪽은 수축시킬 때의 이미지

특정적으로 Ti층을 3나노 이상으로 만들었을 때는 위와 같은 현상이 나타나지 않았으며, 보자력도 Co 0.5에서 100Oe 보다 크게 측정되었다.

3.3.2 Kt-t Plot

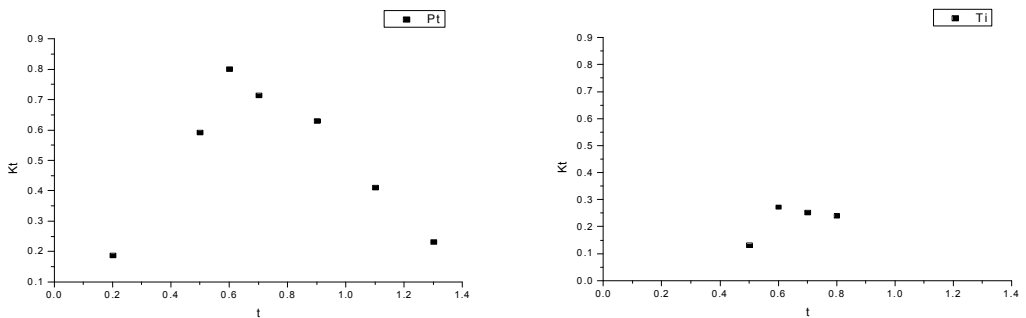


그림 11. Kt-t Plot, (좌) 3-nm Pt/t-nm Co/1.5-nm Pt, $t = 0.2, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3$, (우) 3-nm Pt/t-nm Co/1.5-nm TiO_x, $t = 0.45, 0.6, 0.7, 0.8$.

좌측 그래프 경우에 0.6 이상에서 나타나는 선형성을 기반으로 직선을 그려 K_v 와 K_s 를 추산할 수 있었고, 그 값은

$K_v = -0.80 \text{ erg/cm}^2$, $K_s = 0.65 \text{ erg/cm}^2$ 이다. 우측 그래프는 좌측처럼 선형성이 뚜렷이 나타나지 않아 이대로는 정확한 값을 알기 어려우나, Co 두께 0.6부터 0.8까지의 세 점만으로 추산해보면 $K_v = -0.16 \text{ erg/cm}^2$, $K_s = 0.18 \text{ erg/cm}^2$ 을 얻을 수 있었다. 앞서 본 이미지중에 Co 0.9 시료의 표면이 점점 거칠어지는 것으로 보아, Co 두께 0.6부터 0.8까지는 Kt-t plot의 직선 범주 안에 들어 올 것으로 추정된다.

3.3.3 자기장유도자구벽이동(Field Induced Domain Wall Motion)

그림 12는 수직방향 자기장에 따른 자구벽 속도를 나타낸 것으로, 같은 자기장에서 1000 배 이상 차이남을 볼 수 있다. 3-nm Pt/0.5-nm Co/1.5-nm X이다.

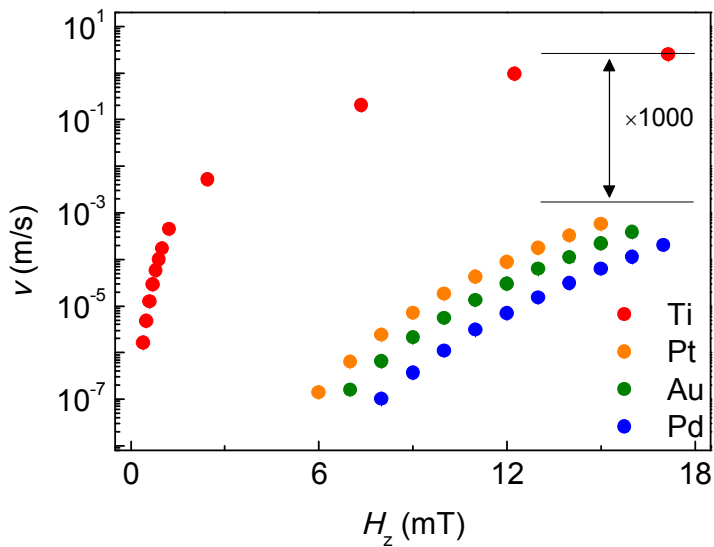


그림 12. 수직방향 자기장에 따른 자구벽 속도, Pt/Co/X 박막, X=Ti, Pt, Au, Pd.

3.4 XPS 성분 분석 및 결과

X-ray Photoelectron Spectroscopy 는 X-ray 를 이용하여 표면층의 성질을 조사하는 장비이다. 페르미 준위 아래로 K 껍질의 핵심부 전자를 여기시키면 이는 L1 이나 L2, L3 준위의 전자로 여기되고 해당 준위의 전자는 방출되며 다시금 아래 껍질을 메우게 된다. 빛의 진동수를 ν 라 할 때, 광전자의 운동에너지 E_k 는 다음과 같다.

$$E_k = h\nu - E_B - \phi$$

E_B 는 방출된 광전자의 결합에너지, ϕ 는 기기 고유의 일함수이다. 분광학을 연구했던 많은 연구자들은 방출된 광전자의 에너지 준위에 따른 결합에너지를 알아냈다. 예컨대 Al K α 광원을 사용했을 때 Ti 픽은 다음과 같다.[15]

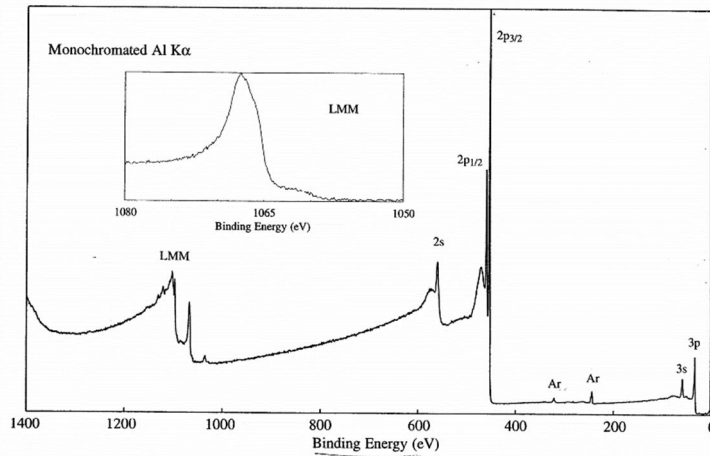


그림 13. Al K α 광원을 사용했을 때 Ti 층의 결합 에너지

2p3/2 픽이 메인 픽임을 확인할 수 있고, 이를 확대하면 그림 14 와 같다.

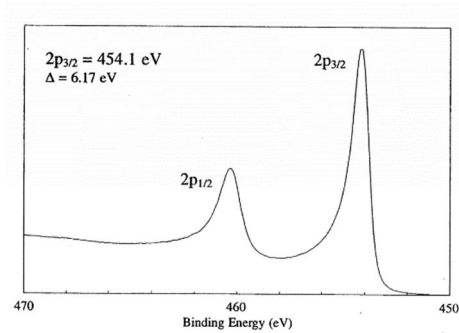


그림 14. Ti 층의 메인 픽

이때, TiO₂ 층이 Ti 층에 있으면 메인 픽이 쉬프트하는데, 이는 그림 15 와 같다.

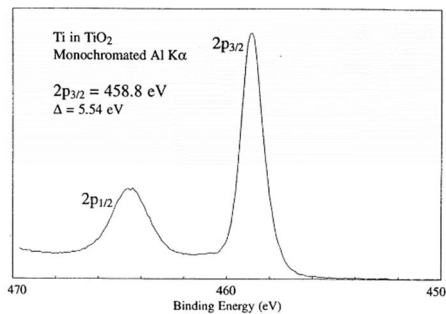


그림 15. Ti에 TiO₂가 섞여 있을 때 메인 픽

우리가 얻은 데이터를 그림 14, 15 와 겹쳐 그리면 그림 16 과 같다.

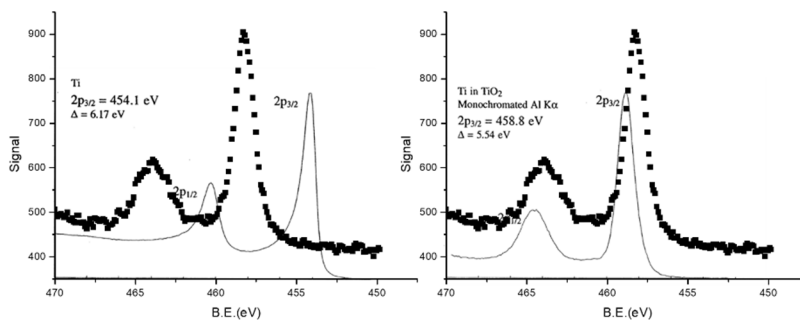


그림 16. 데이터를 각 레퍼런스 픽에 비교, 좌 Ti, 우 TiO₂

이를 통해 우리는 자연산화된 박막이 TiO₂ 픽에 가까움을 확인할 수 있다.

3.5 결론

자연산화 Pt/Co/TiO_x 박막은 대체로 낮은 보자력(Corecivity field)과, 같은 조건에서 다른 박막에 비해 약 1000배 빠른 자구벽 이동을 보였으며, 자구벽이 stripe으로 갈라지는 모양을 보였다. 이러한 특성은 Ti층을 3nm 이상으로 두껍게 쌓으면 사라졌으며, 이를 통해 간접적으로 산화가 자구벽을 빠르게 이동시키는데 주요한 역할을 한다고 해석할 수 있었다. 더 나아가 XPS를 이용한 표면분석에서 자연산화된 Ti층이 TiO₂에 가깝다는 것을 확인할 수 있었다.

이 실험의 의의는 해당 박막의 빠른 자구벽 움직임을 측정하고 그 대략적인 물성과 현상적인 이유를 밝혀냈다는 데 있다. 그러나 아직 가장 빠른 흘러가기 영역(flow regime)에서 측정되지 않았다는 점과, 산화조건이 통제되지 않았다는 점에서 한계가 뚜렷하다. 이것은 4장에서 다루게 되는 실험에서 보완된다.

4장

TiO₂ 박막 제작과 전류유도자구벽이동 측정

이번 장에서는 통제된 상태에서 TiO₂ 박막을 제작하였으며, 이 박막에 마이크로 와이어를 제작하여 전류유도자구벽이동 방식으로 흘러가기 영역(flow region)까지 측정했다.

4.1에서는 Ti 층을 쌓은 뒤 특정 조건에서 산화시키는 방법이 Ti가 수 나노미터일 때 왜 유효한지[16], 그리고 산화물을 사용한 구조에서 이러한 빠른 자구벽 이동을 설명할 가능성이 있는 이론을 소개한다.[17] **4.2**는 증착한 필름의 현황과 산화 조건에 대해 다룬다. Ti는 Mg나 Al에 비해 강한 산화조건을 필요로 하는 것으로 보인다. **4.3**에서는 CIDWM을 측정할 MOKE 셋업을 소개하며, **4.4**에서는 그 측정 결과를 기술한다. 결국 low 11승 대의 전류밀도에서 100m/s 속도로 움직이는 자구벽을 관측할 수 있었다. 이러한 결과를 4.1에서 소개할 이론으로 해석하려면 추가적인 실험들이 필요하며, 진행 중에 있다.

4.1 서론

4.1.1 산화 방법에 대한 유효성

통상적으로 산화막을 제작하는 방법은 산화 타겟을 RF 스퍼터링으로 Ar과 O₂를 적절히 흘려주며 분사한다. 혹은 산화되기 전의 물질의 타겟을 산소 분위기에서 증착한다. 우리는 메인 챔버에 Co와 같은 자성층이 있고, 또 Pd처럼 산화가 잘되는 타겟이 있기에 산화되기 전의 물질만 증착한 뒤, low 8승의 진공도를 갖는 옥사이드 챔버로 옮겨서, 산소를 주입하여 산화시켰다. 우리는 3장에서 TiO₂층이 많다는 것은 확인했지만, Ti층 두께에 따른 산화정도를 알아볼 필요가 있었다.

I. Vaquila가 1997년 발표한 Oxidation in Titanium Thin Films에 따르면, 1모노레이어보다 얇은 Ti는 모두 TiO₂로 산화됐으며, 약 2모노레이어 영역에서는 TiO_x가 나타났지만 산화가 진행됨에 따라 모두 TiO₂로 변화했다. 7모노레이어 두께는 덩어리 Ti를 산화시킨 것과 TiO₂층의 비율이 유사했으며, 산화 결과 Ti층을 TiO_x가 대신한다는 것이 다른 점이었다. Ti 1모노레이어는 약 0.29nm로, 1.5nm는 대략 5ML다. 3장에서 우리는 Ti가 3나노미터부터는 자연산화 티타늄의 성질을 갖지 않는다고 결론지었는데, 이는 약 10ML로 이 연구 결과에 비추어 타당한 해석이었다.

또한 우리는 상당히 강한 산화조건에 따른 변화를 보았는데, 이로 미루어 우리가 통제하는 것은 Ti층 자체의 산화조건이라기보단 Co층과 Ti층 사이의 산화 정도를 조절하는 것으로 생각된다.

4.1.2 Dzyaloshinskii 자구벽으로 설명한 Pt/Co/AlO_x 박막의 자구벽 운동

2012년 A. Thiaville은 기존의 인가 자기장이 정류적(statics)라는 가정과 반자화자기장이 0 혹은 유효 자기이방성에 병합된다는 가정을 제거하고, 좀 더 일반적인 경우에 대하여 계산하였다. 나아가, 기존에 자주 쓰이던 1D 모델의 경우에

Thiele force를 도입하여 SHE에서 비롯된 STT를 표기하여 이러한 일반적인 경우를 설명할 수 있다고 주장하였다. 주목할 점은 이렇게 얻어진 속도에 대한 식이다.

$$v = \frac{v_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{J_D}{J}\right)^2}}$$

$$v_D = \frac{\gamma_0 \pi D}{2\mu_0 M_s} \propto \frac{D}{M_s}, \quad J_D = \frac{2ateD}{\hbar\theta_H\Delta} = \frac{2ateD}{\hbar\theta_H} \sqrt{\frac{K_{eff}}{A}} = \frac{ateD}{\hbar\theta_H} \sqrt{\frac{2M_s H_k}{A}}$$

이 식은 전류밀도 J 가 무한대로 가면 속도 v 가 v_D 로 수렴하는 함수꼴이다. 결국 얼마나 높은 절대값으로 수렴하는지는 D/M_s 가 결정하고, 얼마나 낮은 전류에서 급상승하는지는 J_D 가 결정한다. J_D 가 작을수록 더 낮은 전류에서 빠르게 v_D 로 수렴하게 된다.

따라서, 여러 산화조건에 대하여 속도를 측정하고, M_s 와 H_k 를 측정하여 경향성을 파악하면 TiO₂ 박막이 저전류에서 고속으로 움직이는 이유를 해석할 수 있을지도 모른다.

물론 TiO₂ 박막이 저전류에서 빠르게 움직이는 이유는 계면에서 생기는 다른 물리적인 이유일 수도 있으나, 이는 가장 현상적으로 손쉽게 확인해볼 수 있는 이론이다.

4.2 산화 조건

자연산화 박막을 만들 때, 챔버에서 꺼낸 후로 약 5분 사이에 룩의 모양이 변화하는 것을 확인했다. 이는 대기압(760Torr)에서 산소의 비율(20%)을 생각하면, 760Torr × min의 산화 정도다. 효율적인 실험을 위해서는 산소분압 Torr 단위에서 수 시간 산화시켜야 하는데, 이는 엄청나게 강한 산화정도이다. 스퍼터 할 때의 분압과 다소 차이가 있을 수는 있지만, Mg나 Al의 경우에 작업 산소분압은 mTorr 단위이다. 반면 Ti 박막은 mTorr order에서 30분 산화시키고 Pt 캡핑한 박막을 제작했는데, 거의 산화되지 않아 Ti와 비슷한 물성을 보였다. 우리가 lower bound로 잡은 영역은 2Torr, 30m이며, upper bound로 잡은 영역은 15Torr, 1h이다. 이는 모두 PMA가 나오고, 자연산화시킨 PMA의 형태가 나온다.

4.3 레이저 광원을 사용한 MOKE

이는 3.1에서 기술했던 MOKE 현미경과 원리적으로는 다르지 않다.[그림17] 광원은 780nm 레이저를 사용하고, 짧은 전류 펄스를 만들어내는 장치에서는 펄스폭 1ns~5ns, 최대 전압 100V 펄스까지 생성할 수 있다. 함수발생기의 펄스폭은 20ns 이상이며, 최대 전압은 20V이다. 스테이지는 z축으로 0.05 μ m씩 조절 가능하며, x, y 축으로는 0.1 μ m 조절 가능하다.

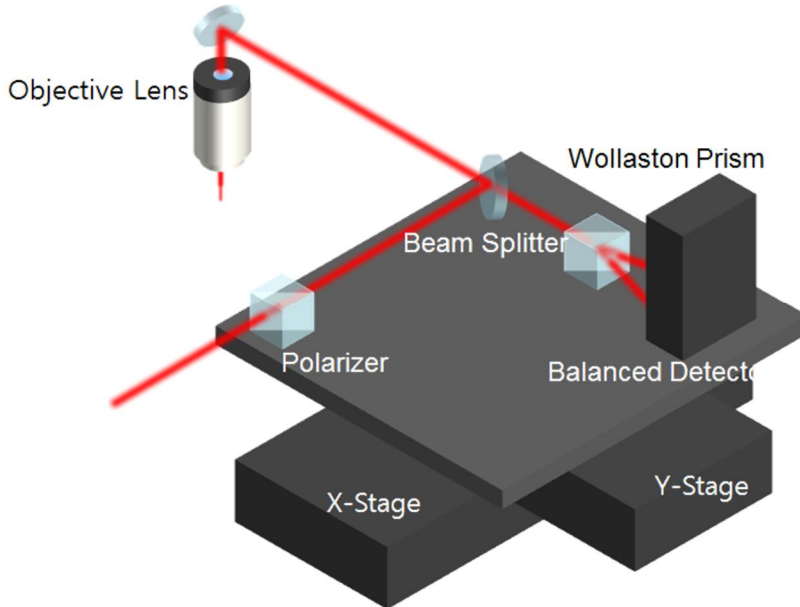


그림 17 레이저 광원을 사용한 MOKE 모식도

4.4 결과

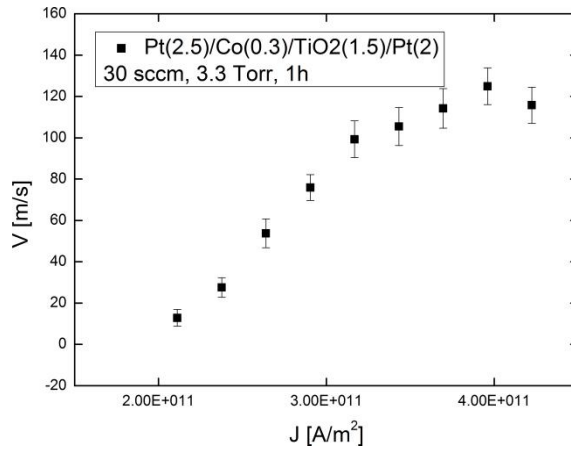


그림 18 Pt/Co/TiO₂ 마이크로선 소자에서 측정된 전류밀도 J에 따른 자구벽 속도 v

총 4가지 산화도에 대하여 측정을 진행했다. 2Torr 30m, 2Torr 1h, 3.3Torr 1h, 2Torr 4.5h. 나머지 박막들은 propagation field가 너무 작아 약한 전류나 자기장에 민감하게 움직였다. 다시 말하면 피닝 자기장이 너무 작아 측정하기 어려운 박막들이 많았다. 가장 깔끔하게 측정된 박막은 위의 3.3Torr 1h, 30sccm으로 산소를 주입한 Pt(3)/Co(0.45)/TiO₂(1.5)/Pt(2) 박막이다. 측정된 가장 빠른 자구벽은 2Torr 30m 박막에서 관측되었고, $3 \times 10^{11} \text{A/m}^2$ 단위에서 150m/s의 자구벽 속도를 보였다.

5장

결론 및 전망

이러한 저전류 고속 자구벽 움직임이 아직 연구 초기 단계에서 나왔다는 점은 앞으로 이 주제에 대한 지속적인 연구에 동기부여를 해준다. 아직 다양한 산화조건에서 더 측정해봐야 할 박막들이 많고, 또 자성층의 두께에 의존하여 어떻게 변화하는지 확인해야 할 지점들이 많다. 그러한 추가 실험에서 더 긍정적인 결과를 얻는다면 이런 박막들이 가진 자성 특성, 예컨대 DMI나 Hk, Ms 등을 조사해볼 수도 있고, 더 나아가 MTJ 셀을 만드는 데도 사용해볼 수 있을 것이다. 한편, 자성층을 CoFe로 바꿔보거나, Tb이나 Gd층을 삽입하여 TiO₂ 층을 활용한 PMA를 만들어보는 것도 더 해볼 수 있는 주제다. PMA 층에 쓰이는 용도로 TiO₂는 세계에서 처음 연구된 것이니, 범용성이 넓어 여러 주제에 활용될 수 있으리라 기대된다.

참고 문헌

- [1] C. Bajorek, "Magnetoresistive(MR) Heads and the Earliest MR Head-Based Disk Drives: Sawmill and Corsair." Computer History Museum, 2014.
- [2] J. Nowak, *et al.*, "Dependence of Voltage and Size on Write Error Rates in Spin-Transfer Torque Magnetic Random-Access Memory." *IEEE Magn. Lett.* **7**, 3102604 (2016)
- [3] M. Yamanouchi, *et al.*, "Velocity of Domain-Wall Motion Induced by Electrical Current in the Ferromagnetic Semiconductor (Ga,Mn)As" *Phys. Rev. Lett.* **96**, 096601 (2006).
- [4] T. Koyama, *et al.*, "Magnetic Field Insensitivity of Magnetic Domain Wall Velocity Induced by Electrical Current in Co/Ni Nanowire." *Appl. Phys. Lett.* **98**, 192509 (2011).
- [5] I. Miron, *et al.*, "Fast Current-induced Domain-Wall Motion Controlled by the Rashba effect." *Nature materials*, **10**, 419–423 (2011).
- [6] S. Parkin, *et al.*, "Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory." *Science*. **320**, 5873 190-194 (2008).
- [7] R. Lavrijsen, *et al.*, "Magnetic Ratchet for Three-Dimensional Spintronic Memory and Logic." *Nature*. **493**, 647-650 (2013).
- [8] K.-S. Ryu, "Chiral Spin Torque at Magnetic Domain Walls." *Nature Nanotechnology* **8**, 527-533 (2013).
- [9] S. Emori, *et al.*, "Current-Driven Dynamics of Chiral Ferromagnetic Domain Walls" *Nature Materials*. **12**, 611-616 (2013).
- [10] D.-H. Kim, *et al.*, "Maximizing Domain-Wall Speed via Magnetic Anisotropy Adjustment in Pt/Co/Pt Films." *Appl. Phys. Lett.* **104**, 142410 (2014).
- [11] S. Bandiera, *et al.*, "Asymmetric Interfacial Perpendicular Magnetic Anisotropy in Pt/Co/Pt Trilayers." *IEEE. Mag. Lett.* **2**, 3000504 (2011).
- [12] 김동영, "연자성 재료 및 응용" 자성재료와 스핀트로닉스. 한국자기학회. 19-23 (2014).
- [13] 최석봉, 김동현 "나노 자성체의 자구 및 자구벽 이동" 자성재료와 스핀트로닉스. 한국자기학회. 210 (2014).
- [14] M. Bauer, *et al.*, "Deroughening of Domain Wall Pairs by Dipolar Repulsion" *Phys. Rev. Lett.* **94**, 207211 (2005).
- [15] J. Moulder, *et al.*, "Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy"

Physical Electronics, Inc, USA. (1992).

- [16] I. Vaquila, *et al.*, “Oxidation Process in Titanium Thin Films” *Phys. Rev. B.* **55**, 13925 (1997)
- [17] A. Thiaville, *et al.*, “Dynamics of Dzyaloshinskii Domain Walls in Ultrathin Films” *Europhysics Letters.* **100**, 5 (2012).