



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

L1<sub>0</sub>-FePt 기반 다양한 접합 구조의  
SOT 스위칭 특성 연구

Spin-Orbit Torque Switching  
in L1<sub>0</sub>-FePt based heterostructures

울산대학교 일반대학원

물리학과

임은지

L1<sub>0</sub>-FePt 기반 다양한 접합 구조의  
SOT 스위칭 특성 연구

Spin-Orbit Torque Switching  
in L1<sub>0</sub>-FePt based heterostructures

지도교수 김상훈

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함  
2023 년 8 월

울산대학교 일반대학원

물리학과

임은지

임은지의 이학석사 학위논문을 인준함

심사위원 조 성 래 (인)

심사위원 신 영 한 (인)

심사위원 김 상 훈 (인)

울산대학교 일반대학원 물리학과

2023 년 8 월

## 차례

- 국문 초록
- 영문 초록

1. 연구 배경 및 동기	10
1) MRAM(Magnetic Random Access Memory)	10
(1) MRAM의 핵심 구동 원리	12
① 읽기: 터널자기저항 (스핀 의존 터널링)	13
② 쓰기: 전류구동 자화반전 (스핀-궤도 토크)	14
(2) MRAM의 에너지 효율을 높이는 연구	16
① 스핀 전류원 관점에서의 연구 소개	16
② 무자장 SOT 스위칭 관점에서의 연구 소개	17
③ 다양한 접합 구조를 이용한 스위칭 효율 향상 연구 소개	19
2) Neuromorphic device: synaptic device using MRAM	22
3) FePt 기반 SOT 소자의 필요성	25
(1) L1 <sub>0</sub> -FePt 결정 구조 및 자기적 특성	26
(2) L1 <sub>0</sub> -FePt의 일축자기이방성의 생성원리	28
2. 샘플 제작 및 실험 조건	29
1) FePt 기반 이종접합구조 성장	29

(1) FePt 기반의 이중접합 박막 .....	29
(2) FePt 기반의 입상자성박막 .....	30
2) 스위칭 소자 공정 .....	32
3) 스위칭 측정 방법 .....	32
3. 실험 결과 및 분석 .....	34
1) FePt/Ru/CoFeB 필름 보자력의 Ru 두께 의존성 .....	34
2) FePt/Ru/CoFeB 필름의 SOT 스위칭 실험 .....	37
(1) Ru 두께에 따른 FePt/Ru/CoFeB 소자의 스위칭 특성.....	37
(2) FePt/Ru/CoFeB 소자의 스위칭 기구 분석 .....	40
3) FePt-TaO <sub>x</sub> granular film 의 다중상태 스위칭 특성 .....	45
(1) L1 <sub>0</sub> -FePt 층과 계면을 이루는 스핀 전류원의 성장기구 .....	45
(2) FePt-TaO <sub>x</sub> granular film 의 다중상태 스위칭 특성 .....	49
4. 결론 .....	52

## 초록

### L1<sub>0</sub>-FePt 기반 다양한 접합 구조의 SOT 스위칭 특성 연구

스핀-궤도 토크(SOT) 유도 자화 반전은 빠른 스위칭 시간과 전력 소비가 효율적이며 내구성이 높다는 장점으로 많은 관심을 받고 있다. 보자력이 크고 수직자기 이방성이 큰 물질은 장기간에 걸쳐 안정적인 자화 상태를 유지하고 소형화에 용이하기 때문에 자기 데이터 저장 매체로 응용이 되어왔다. L1<sub>0</sub>-FePt 물질은 높은 수직자기 이방성( $6.6\sim 10\cdot 10^7$  erg/cm<sup>3</sup>)에 기인한 열적 안정성을 갖기 때문에 자기기록소자에 적합한 물질이다. 일반적으로 스핀-궤도 토크 유도 자화 반전은 구조적 반전 비대칭성과 강한 스핀-궤도 결합이 필수적이다.

본 연구에서는 제작된 FePt 기반 이중 접합구조 형성이 스핀-궤도 토크 자화 반전에 끼친 영향에 대해 분석하고 논의한다. 연구된 이중접합 구조에서 스핀 전류는 L1<sub>0</sub>-FePt 층에 형성된 결정 반전비대칭을 통해 발생시켰다. 그러나, 스핀 전류가 충분하지 않아 L1<sub>0</sub>-FePt 단일층에서는 스위칭 거동 특성을 관찰할 수 없었다. 반면, L1<sub>0</sub>-FePt/Ru/CoFeB 이중 접합 구조의 시편의 경우 Ru/CoFeB 층의 스핀 흡수에 의해 SOT 효율이 향상되어 스위칭 거동 특성을 확인할 수 있었다. 이 결과는 L1<sub>0</sub>-FePt 기반 자성소자의 층간 구조적 제어를 통하여 스핀-궤도 토크 자화 반전 효율을 향상시킬 수 있다는 의미이며, 이는 스핀트로닉스 소자의 에너지 효율을 높일 수 있는 새로운 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

## Abstract

### Spin-Orbit Torque Switching in L1<sub>0</sub>-FePt based heterostructures

Spin-orbit torque (SOT)-induced magnetic switching has attracted much interest due to its potentially high efficiency in terms of switching time and power consumption, energy efficiency and high endurance. Materials with high coercivity and high perpendicular magnetic anisotropy have been applied as magnetic data storage media because they maintain a stable magnetization state over a long period of time and amenability to miniaturization. The L1<sub>0</sub>-FePt is suitable for magnetic recording devices because its high thermal stability due to high perpendicular magnetic anisotropy ( $6.6\sim 10*10^7$  erg/cm<sup>3</sup>). In general, SOT-induced magnetic switching requires structural inversion asymmetry and strong spin-orbit coupling.

In this study, the effect of the fabricated FePt-based heterojunction structure formation on the spin-orbit torque magnetization reversal is analyzed and discussed. In the studied heterojunction structure, the spin current was generated through the crystal inversion asymmetry formed in the L1<sub>0</sub>-FePt layer. However, the switching behavior could not be observed in the L1<sub>0</sub>-FePt single layer due to insufficient spin current. On the other hand, in the case of the L1<sub>0</sub>-FePt/Ru/CoFeB heterojunction structure specimen, the SOT efficiency was improved by the spin absorption of the Ru/CoFeB layer, confirming the switching behavior characteristics. This result means that the spin-orbit torque magnetization reversal efficiency can be improved through the interlayer structural control of the L1<sub>0</sub>-FePt-based magnetic device, which can be used as a new method to increase the energy efficiency of spintronic devices.

## 그림 차례

1.1 메모리 계층 구조 .....	10
1.2 (위) In memory computing 기술 소개 (아래) 삼성전자에서 제안한 In memory computing .....	11
1.3 자기터널접합의 기본 구조 .....	12
1.4 스핀 의존 터널링 모식도 .....	13
1.5 (a) 스핀홀효과 모식도 (b) NM/FM 에서 발생하는 SOT .....	15
1.6 비휘발성 메모리들의 장단점 비교 .....	16
1.7 다양한 금속 접합구조에서의 $\theta_{SH}$ .....	17
1.8 외부자기장 유무에 따른 SOT 스위칭 모식도 .....	18
1.9 무자장 자화제어를 위한 다양한 현상들 .....	18
1.10 삼중층 구조에 존재하는 chiral coupling 효과에 의한 보자력 변화 관찰 결과 .....	19
1.11 삼중층 구조의 계면에서 발생하는 스핀 세차운동에 의한 z spin 발생 모식도 .....	20
1.12 알파고 VS 이세돌 : 알파고와 이세돌의 바둑대국 이후, 인공지능 컴퓨팅의 중요성이 본격적으로 주목받기 시작하였다.....	22
1.13 시냅스 모식도 .....	23
1.14 비휘발성 메모리별 아날로그 소자 성능지표 .....	24
1.15 FePt 의 L1 <sub>0</sub> 구조와 결정방향에 따른 자기이방성 모식도 .....	25
1.16 상에 따른 FePt 합금의 세 가지 배열 구조 .....	27
1.17 온도와 Fe 의 조성에 따른 FePt 상 다이어그램 .....	27

1.18 Fe 와 Pt 가 벌크 상태에서 독립적으로 존재할 때와 L1 <sub>0</sub> 합금 상을 가질 때 형성되는 밴드 구조 비교	28
2.1 T-type 자화 구성을 이루는 각 층별 물질	30
2.2 초고진공 마그네트론 스퍼터링 시스템	30
2.3 제작된 FePt 기반 SOT 소자	32
2.4 (위) SOT 스위칭 측정 과정 모식도 (아래) 전자석을 이용한 전기적 측정 시스템	33
2.5 Ru 층의 두께에 따른 보자력 변화 곡선	35
2.6 (좌) FePt 단일층의 AHE 측정 결과 (우) Ru 두께에 따른 유효자기장 변화 곡선	35
2.7 Ru 층의 두께에 따른 XRD 측정 결과	36
2.8 Ru 층의 두께에 따른 S parameter	36
2.9 Ru 층의 두께에 따른 SOT 스위칭 결과	38
2.10 스위칭 시점에서의 소자 온도 확인 실험	39
3.1 FePt/Ru/CoFeB 구조에서 chiral coupling 이 되어있을 경우, 선호하는 방향에 따라 요구되는 에너지 다이어그램	41
3.2 NM/NM 과 FM/NM 계면에서의 스핀전류 생성 묘사	41
3.3 FePt/Ru/CoFeB 구조에서 z spin 성분 에 의한 자화 제어 모식도	42
3.4 Pt 층에서 생성된 스핀전류가 (a) 스핀역흐름에 의한 총 스핀전류량의 감소를 묘사한 그림 (b) Ru 층에서 발생하는 스핀 흡수에 의해 강자성체로의 스핀주입 효율이 향상되는 것을 묘사한 그림	43
3.5 Ru 두께별 스위칭 효율	44
3.6 L1 <sub>0</sub> -FePt 물질의 기본적인 자성 특성	46

3.7 L1 <sub>0</sub> -FePt/Pt 시편의 결정성 및 자성 특성 .....	46
3.8 L1 <sub>0</sub> -FePt/Ta 시편의 결정성 및 자성 특성 .....	46
3.9 L1 <sub>0</sub> -FePt-Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /Pt 시편의 결정성 및 자성 특성 .....	47
3.10 관찰된 결정 성장을 이해하기 위한 표면 자유에너지 분석 모식도 ...	48
3.11 FePt 기반 입상자성박막의 다중상태 동작 특성 시뮬레이션 결과 .....	49
3.12 저항의 다중상태 스위칭 측정 과정 모식도 .....	50
3.13 FePt-Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 시편의 다중상태 특성 측정 결과 .....	51

# 1. 연구 배경 및 동기

## 1) MRAM(Magnetic Random Access Memory, 이하 MRAM)

기존 메모리에 가장 많이 사용되고 있는 폰노이만 컴퓨팅 방식은 연산과 저장을 따로 처리 해야 하는 방식으로 메모리 단(ms)과 컴퓨팅 유닛 단(ns)의 처리속도 차이로 병목현상이 생긴다는 단점이 있다. 병목 현상이 생기면 속도가 느려지고 이는 더 많은 에너지를 요구한다. 최근 삼성 전자에서 병목현상의 단점을 극복할 수 있는 MRAM 을 이용한 In memory computing 방식을 제안한 바 있다[1]. Process In-memory(PIM) method 는 폰노이만 방식의 bottleneck 을 해결해줄 수 있는 방식으로 메모리단에서 연산까지 수행할 수 있는 회로의 형태이다.

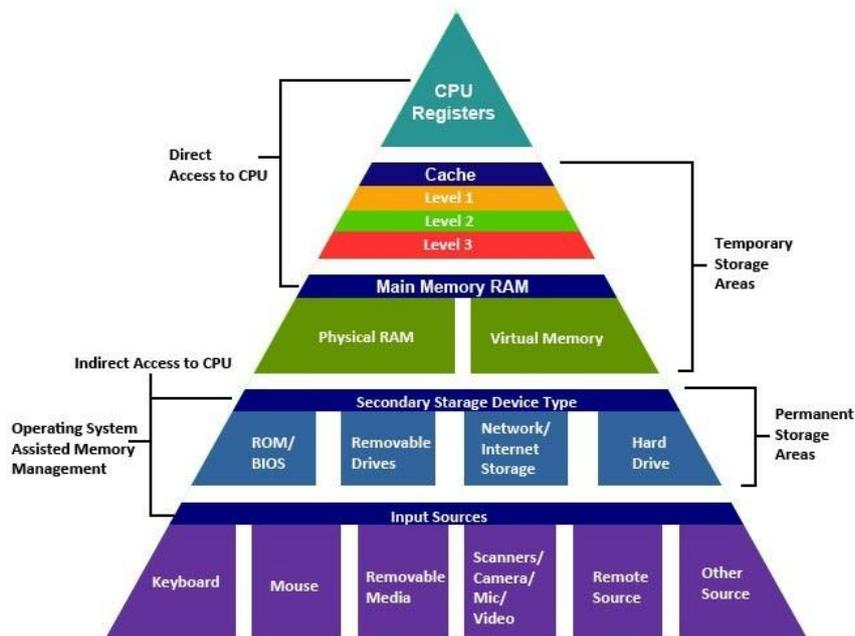


그림 1.1 메모리 계층 구조

MRAM 뿐만 아니라 여러 비휘발성 메모리를 활용한 인메모리 컴퓨팅 구현은 수년간 전 세계적으로 높은 관심을 받고 있다. 여러 비휘발성 메모리들이 MRAM 보다 먼저 제안되었으나, MRAM 의 빠른 구동속도, 지속성(10 년), 데이터 안정성이 높다는 장점으로 embedded 형태로 Static Random Access Memory(이하 SRAM)의 캐쉬 메모리에 먼저 상용화 되었다. 본 연구에서는 비휘발성 메모리 중 MRAM 자성소자에 대해 자세히 다룬다.

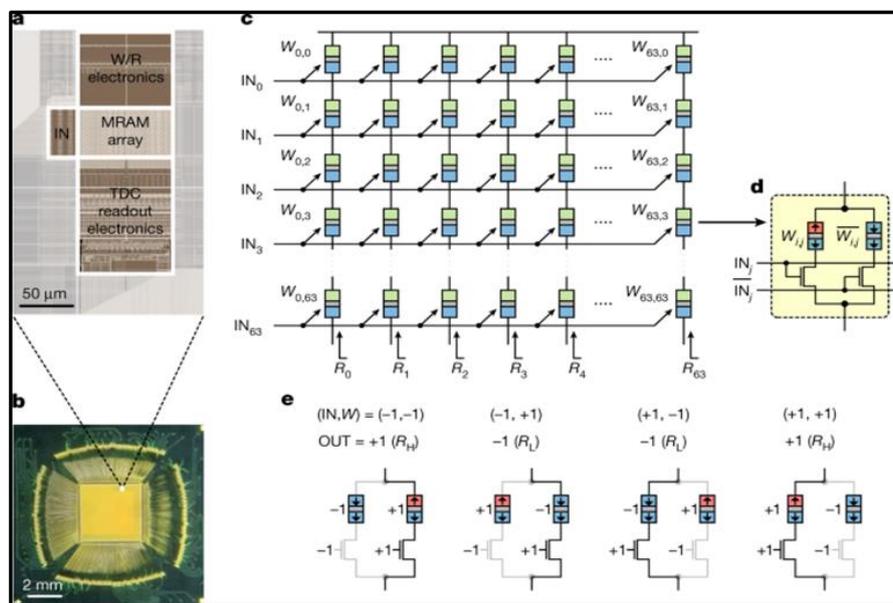
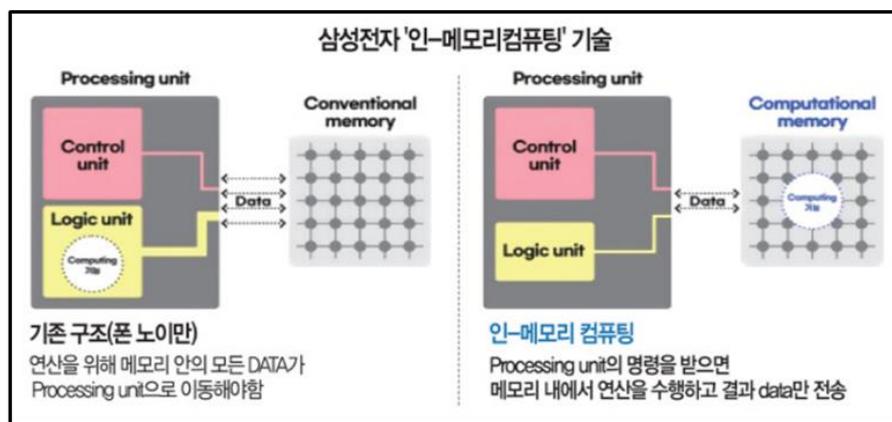


그림 1.2 (위) In memory computing 기술 소개 (아래) 삼성전자에서 제안한 In memory computing [1]

### (1) MRAM 의 핵심 구동 원리

MRAM 은 강자성체(Ferromagnet, 이하 FM), 반강자성체(Antiferromagnet, 이하 AFM), 준강자성체(Ferimagnet) 등 자성 소재를 포함하는 소자로 자화방향을 이용하여 정보를 저장하거나 처리하는 소자이다. 자화정보 재생은 자화방향에 따라 저항이 달라지는 자기저항을 이용하며, 자기터널접합(Magnetic Tunnel junction, 이하 MTJ)에서 발생하는 터널자기저항(Tunnel Magnetoresistance, 이하 TMR)이 가장 중요한 기술이다. 자성 소자의 기본 unit cell 인 MTJ 의 기본 구조는 고정층/절연층/자유층의 삼중층으로 구성되어 있으며, 고정층과 자유층은 자성체로 이루어져 있다. MgO 는 스핀 의존 터널링을 극대화 시키는 절연체로 TMR 을 높일수 있는 MRAM 의 핵심 물질로 잘 알려져 있으며, CoFeB 와 MgO 시스템에서 600%의 높은 TMR 값을 가진다는 보고가 있다[2].



그림 1.3 자기터널접합의 기본 구조

① 읽기: 터널자기저항 (스핀 의존 터널링)

읽기 동작은 두 강자성층의 상대적인 저항 차이를 측정하는 것으로 정해지고, 저항차는 spin dependent tunneling 에 의존한다.

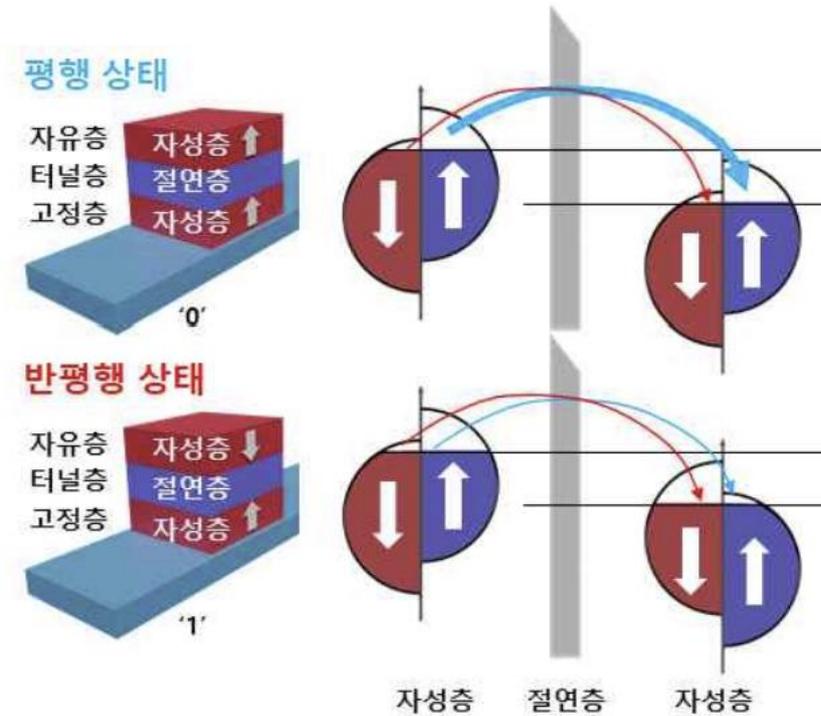


그림 1.4 스핀 의존 터널링 모식도

MTJ 의 두 자성층의 자화가 평행한 경우와 반평행한 경우의 전자의 터널링 확률이 달라지게 되는데, 평행한 자화 방향에서 다수 스핀의 터널링 확률이 큰 반면, 반평행한 자화방향에서 터널링 확률이 상대적으로 작은 값을 가진다. 이러한 터널링 확률의 차이가 클수록 TMR 값이 커지게 되고 자유층의 분극을  $P_{FL}$ , 고정층의 분극을  $P_{PL}$  이라고 하면, TMR 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TMR = \frac{2P_{FL}P_{PL}}{1-P_{FL}P_{PL}} \quad (1.1)$$

② 쓰기: 전류구동 자화반전 (스핀-궤도 토크)

두 자성층의 저항차를 읽는 것으로 읽기 동작을 한다면, 쓰기 동작에서 가장 중요한 기술은 자화의 방향을 바꾸어 주는 것이다. Pt, W 과 같은 원자번호가 높은 비금속(Non Metal, 이하 NM) 즉, 중금속(Heavy Metal, 이하 HM)에 자성 금속을 쌓은 HM/FM 이중층 구조에 전류가 흐를 때 전류의 방향에 수직인 방향으로 스핀 전류가 흐르는데, 이것을 스핀 홀 효과라고 한다. 스핀 홀 효과가 일어나게 되면, 아래 그림 1.5 (a)과 같이 FM 층으로 한쪽 방향의 스핀이 주입될 수 있게 된다. 이렇게 주입된 특정 방향의 스핀들은 인접한 강자성층의 local 자화에 토크를 전달하게 되고 이를 Spin Orbit Torque(이하 SOT)라고 한다. 따라서 SOT 현상을 이용하면 쓰기 동작의 중요 기술인 자화를 제어할 수 있다. 또한 시간에 따라 변화하는 자화의 동역학적 특성은 아래, Landau-Lifshitz-Gilbert(이하, LLG) 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -|\gamma|\vec{M} \times d\vec{H} + \frac{\alpha}{M_S}\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} + \tau_{DL}\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{\sigma}) + \tau_{FL}\vec{M} \times \vec{\sigma} \quad (1.2)$$

$\vec{\sigma}$ : 분극화된 스핀의 방향

여기서 SOT 와 관련된 각운동량에 대해 아래 식 1.2 으로 나타낼 수 있고, 일반적으로 Damping like torque(이하  $\tau_{DL}$ )이 Field like torque(이하  $\tau_{FL}$ ) 보다 10 배 높다고 알려져 있어  $\tau_{DL}$ 가 SOT 스위칭에 지배적인 역할을 한다고 말할수 있다.

$$\tau_{SOT} = \tau_{DL}\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{\sigma}) + \tau_{FL}\vec{M} \times \vec{\sigma} \quad (1.3)$$

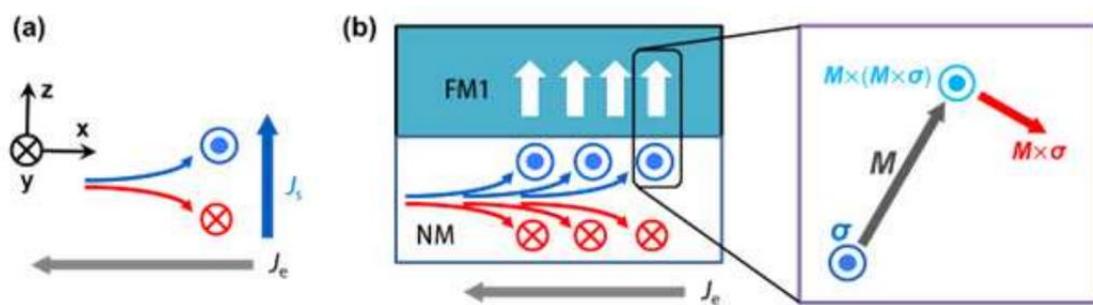


그림 1.5 (a) 스핀홀효과 모식도 (b) NM/FM 에서 발생하는 SOT [3]

(2) MRAM의 에너지 효율을 높이는 연구

RRAM	PCM	FeRAM	ECRAM	MRAM	
Binary oxide (HfO <sub>2</sub> )	Metal/Ternary oxide (Al/PrCaMnO <sub>3</sub> )	Chalcogenides (Ge <sub>2</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>5</sub> )	Doped HfO <sub>2</sub> (HfZrO <sub>2</sub> )	Li-ternary oxide (LiCoO <sub>2</sub> )	CoFeB/MgO/reference layer
Filamentary	Interfacial barrier	Phase transition	Polarization	Electro-chemical reaction	Relative magnetic configuration
+ Scalability + Fast speed	+ Analogue	+ Maturity	+ Symmetry	+ Symmetry + Linearity	++ Maturity ++ Stochasticity
- Stochasticity	- Slow speed	- Asymmetry	- Domain wall controllability	- Slow speed - Scalability	- Small range

그림 1.6 비휘발성 메모리들의 장단점 비교

MRAM은 다른 메모리 소자들에 비해 빠른 응답속도, 비 확률적 거동, 안정성, 높은 산업적 성숙도를 가진다는 장점이 있다. 이와 같은 장점들에 고효율 저전력 특성을 동시에 갖는 소자를 구현 해내기 위해, 연구가 활발히 이루어 지고 있고, 다양한 방법이 제시된 바 있다. 본 연구는 에너지 효율을 높이는 방법에 대해 크게 두 가지에 주목하여 다룬다.

① 스핀 전류원 관점에서의 연구 소개

첫번째로 주목한 방법은 스핀 전류를 많이 발생시킬수 있는 시스템을 만드는 것이다. 스핀 전류를 많이 발생시킬수 있는 가장 쉬운 방법은 스핀홀앵글(Spin Hall angle, 이하  $\theta_{SH}$ )이 큰 물질을 사용하는 것이다.  $\theta_{SH}$ 은 전하전류가 스핀전류로 전환되는 비율을 정량적으로 나타낸 파라미터이다. (식 1.4)

$$\theta_{SH} = \frac{J_S}{J_C} \quad (1.4)$$

따라서  $\theta_{SH}$ 이 큰 물질을 자성소자에 사용하면 많은 스핀전류를 발생시킬수 있어 에너지 효율을 높일 수 있다. 그러나 물질 하나로 발생시킬수 있는 스핀전류량은 정해져 있으므로 다양한 접합구조를 만들어  $\theta_{SH}$ 을 키우는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 Dirac 또는 Weyl semimetal 과 위상절연체 물질은  $\theta_{SH}$ 이 1 이상이라는 점으로 주목받고있다.

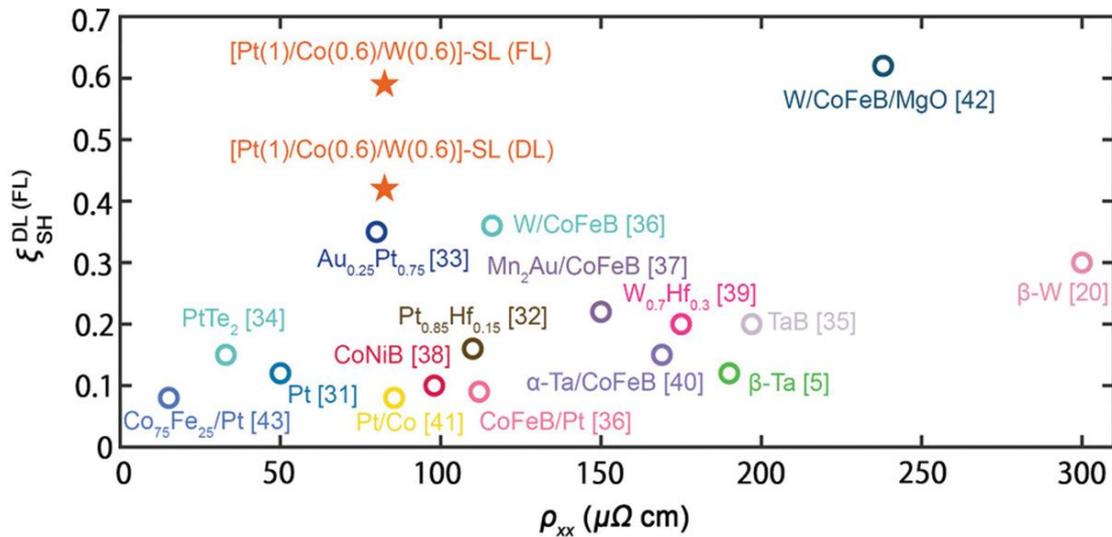


그림 1.7 다양한 금속 접합구조에서의  $\theta_{SH}$  [4]

② 무자장(Field-free) SOT 스위칭 관점에서의 연구 소개

또 다른 방법으로는 외부 자기장 없이 자화를 제어하는 방법이다. 수직자기이방성(Perpendicular Magnetic Anisotropy, 이하 PMA)이 있는 물질에 스핀전류가 주입되는 경우, 원하는 방향으로 자화를 제어할 수 없기 때문에 외부자기장으로 방향을 정해주는 과정이 필수적이고, 이 외부자기장 없이 자화 제어가 가능하다면 에너지 효율을 높일 수 있는 방법이 될 수 있다.

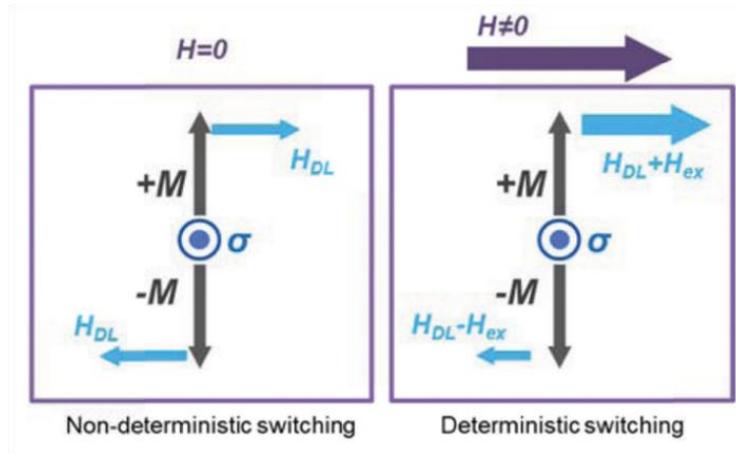


그림 1.8 외부자기장 유무에 따른 SOT 스위칭 모드도

무자장 스위칭을 가능하게 하는 여러가지 현상이 그림 1.9 와 같이 보고 된 바 있다. 반강자성체/강자성체 계면에서 발생하는 교환 바이어스 또는 자기 다층구조의 층간 결합에 의해 발생하는 유효 자기장에 대한 연구가 주를 이룬다. 또한 자기 이방성의 면방향 결정대칭성 파괴로 인해 발생하는 수직방향의 유효 자기장에 의해 무자장 스위칭에 성공하였다는 보고가 있다. 최근에는 FM/NM/FM 삼중층의 계면 스핀 세차운동 현상에 의해 발생하는 z-편광 스핀 전류 또한 무자장 SOT 스위칭을 위해 활용되었다.

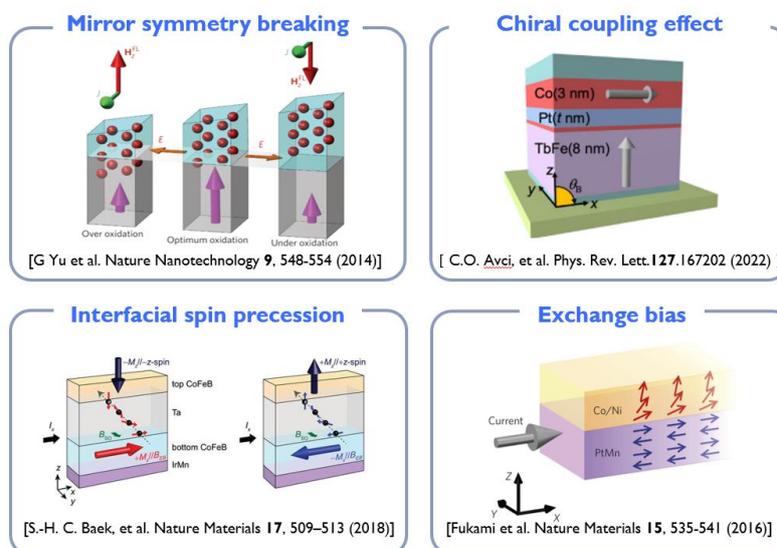


그림 1.9 무자장 자화제어를 위한 다양한 현상들 [5]-[8]

③ 다양한 접합 구조를 이용한 스위칭 효율 향상 연구 소개

두 강자성층 사이에 비자성층이 끼어있는 구조에서 자성층의 자화 방향이 T자 구성을 이룰 때, 발생하는 현상으로 에너지의 효율을 높일 수 있는 두 가지 현상이 있다.

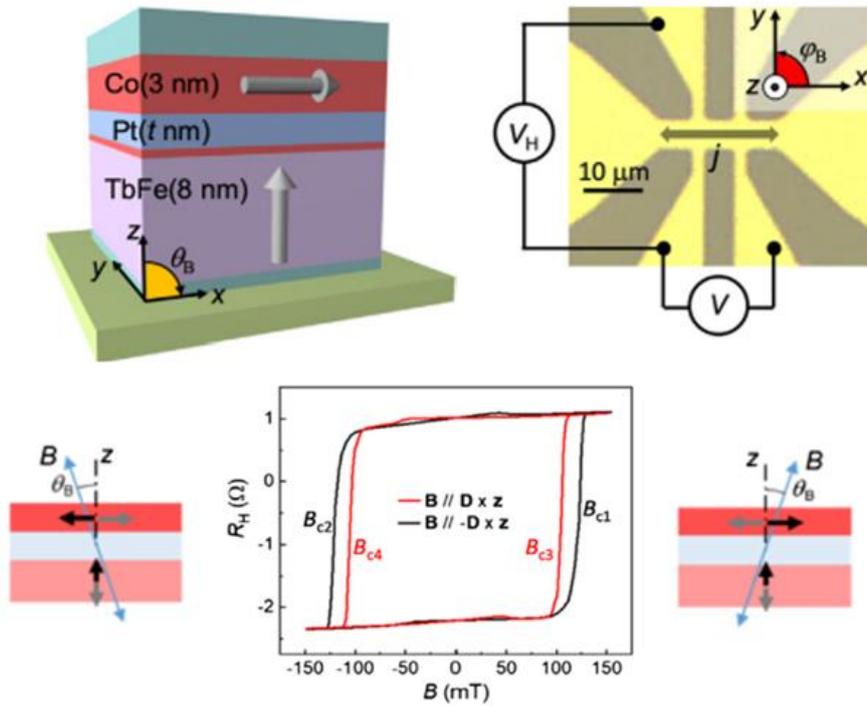


그림 1.10 삼중층 구조에 존재하는 chiral coupling 효과에 의한 보자력 변화 관찰 결과[6]

첫번째로 이중 접합 구조에서의 자성층 간의 chiral coupling 효과이다. Can Onur Avcı 논문에서는 그림 1.10 과 같이 하부 자성 층인 TbFe 은 수직자화를, 상부 자성 층인 Co 는 수평자화를 선호하시스텨에서 두 강자성층 사이에 강한 층간 DMI(Dzyaloshinskii-Moriya Interaction, 이하 DMI)가 발생하고 DMI 는 한 손 직교 자화 구성을 선호하는 chiral 결합을 유발시킨다는 것을 보고했다. 중간

층인 Pt 에 의해 발생하는 DMI 상호작용은 각 층에서 최대 10-15 mT 의 유효 자기장을 생성시킨다. 이는 각 층 자화의 선호방향에 따라 샘플의 보자력(Coercivity)을 변화시켜 자화 반전을 더 쉽게 유도할 수 있는 시스템을 설계할 수 있게 한다. 선호하는 자화 방향의 시스템 일 경우, 에너지적으로 안정한 상태에 머물러 있기 때문에 자화 반전에 그 에너지 장벽을 뛰어 넘는 자기장의 크기가 요구될 것이다. 반대로 선호하지 않는 자화 방향의 시스템일 경우, 에너지적으로 불안정한 상태에 있기 때문에 상대적으로 더 작은 자기장으로도 자화 반전이 일어날 수 있게 된다. 이중 접합 구조에서 두 자성 층의 자화구성이 T-type 을 이루고, 자성층 사이에 chiral 결합이 일어나는 시스템을 만들어주면 소자의 에너지 효율을 높일 수 있는 실험 설계가 가능하다고 말할 수 있다.

다른 하나는 언급한 삼중층 구조에서의 z-spin 분극화 현상을 이용하여 외부 자기장없이 자화를 반전시키는 것이다.

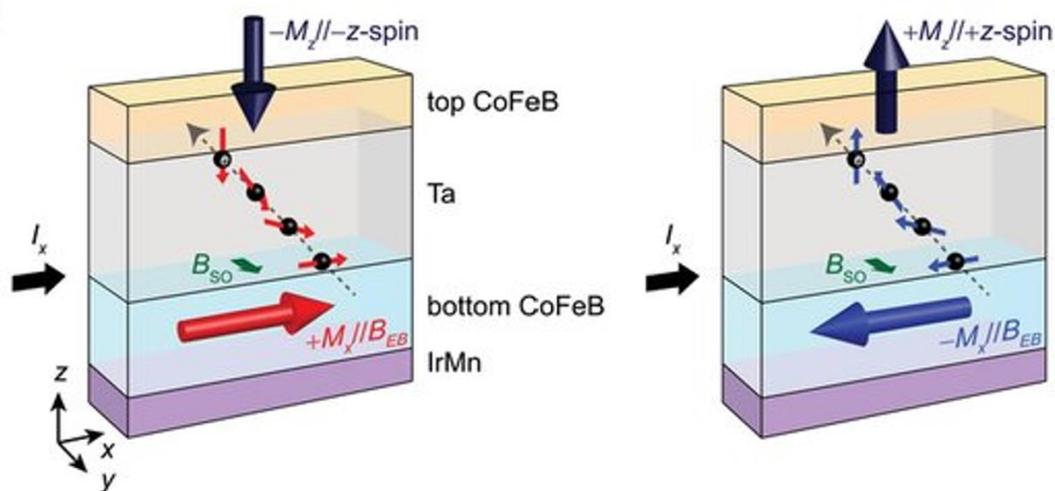


그림 1.11 삼중층 구조의 계면에서 발생하는 스핀 세차운동에 의한 z spin

발생 모식도[7]

그림 1.11 과 같은 구조에서 하부 자성층 또는 그 계면에서 생성된 스핀 전류가 중간 층을 통과하며 상부 자성층의 수직자화에 토크를 가해주는 방식으로, 하부 자성층을 조절하여 상부 자성층에 가해지는 토크를 제어한다. 하부 자성층의 수평 자화(y-방향)와 전하 전류의 수직 방향(x-방향)으로 생성된 스핀전류가 만나 중간 층에서 z-방향의 스핀이 생성되어 상부 자화에 토크를 가해주는 것이다. 이는 tri-layer 에서 z spin 을 생성시켜 외부자기장 없이 결정적인 자화반전을 가능하게 하는 현상을 첫번째로 보고한 논문이다.

## 2) Neuromorphic device: synaptic device using MRAM

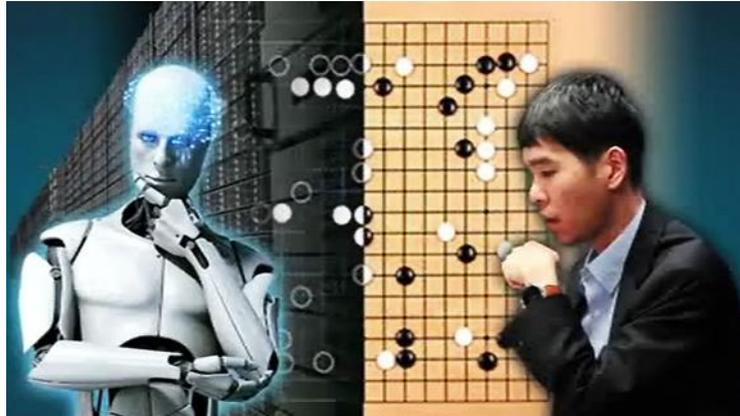


그림 1.12 알파고 VS 이세돌 : 알파고와 이세돌의 바둑대국 이후, 인공지능 컴퓨팅의 중요성이 본격적으로 주목받기 시작하였다.

본 학위논문에서 다루는 또 다른 연구 주제는 인공지능에 사용되는 뉴로모픽 소자이다. 지난 2016년, 이세돌과 알파고의 바둑 대국에서 알파고가 승리하여 인간을 뛰어넘는 인공지능의 판단 능력이 화제 되었다. 하지만 우리는 단순히 알파고가 승리했다는 사실보다 1,202 개의 CPU 와 176 개의 GPU 를 사용하여, 인간보다 약 1 만배의 전력을 사용하였다는 점에 주목하려한다. 인간의 두뇌는 컴퓨터에 비해 매우 효율적으로 정보처리, 연산, 논리, 학습, 기억 등의 다양한 기능을 수행한다. 예를 들어, 1 장 2 절에서 언급한 폰노이만 컴퓨팅 시스템을 이용하여 인간의 두뇌를 모사하는 인공지능 기능을 구현하려면 수 MW 의 막대한 전력을 동작 시켜야하는 반면, 인간의 두뇌는 약 15W 정도의 낮은 전력을 소비하면서 동작한다고 알려져 있다. 두뇌에는 약  $10^{11}$  개의 뉴런이 있고 각각의 뉴런과 뉴런 사이에는 약 104 개의 시냅스가 고밀도로 존재하여, 외부 입력 신호를 병렬처리 방식으로 매우 효율적으로 처리하는 구조를 갖기 때문이다.

이러한 인간의 두뇌를 구성하는 신경 시스템을 모사하는 시스템이 뉴로모픽 시스템이다.

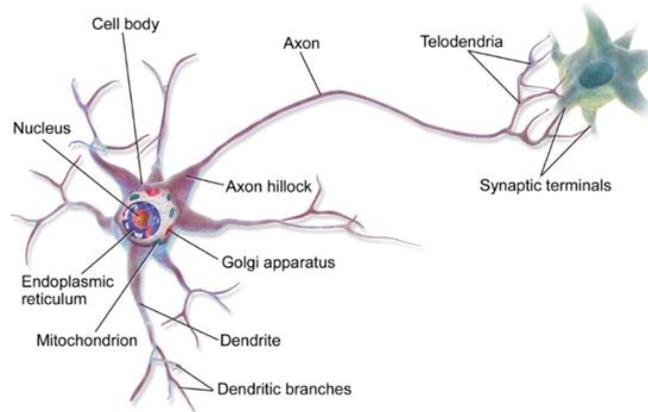


그림 1.13 시냅스 모식도

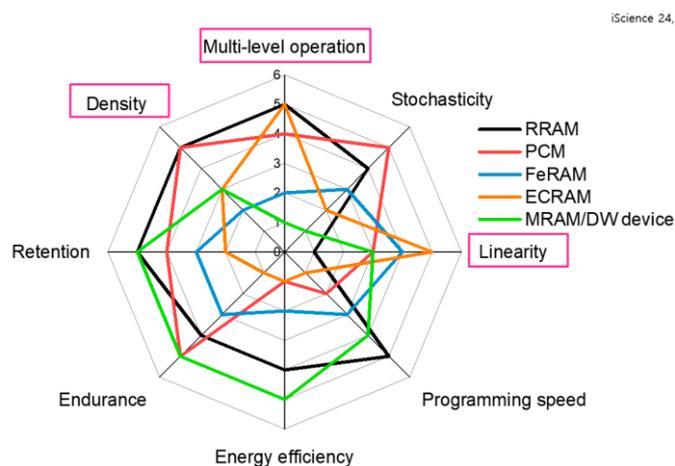


그림 1.14 비휘발성 메모리 별 아날로그 소자 성능지표

뉴로모픽 시스템을 구성하기 위한 기본 연산 단위는 뉴런과 시냅스이며 뉴런은 계산, 시냅스는 저장하는 부분을 담당한다. 이러한 생체 시냅스를 모사하기 위하여 기억 기능을 갖는 비휘발성 메모리 소자를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 아날로그 시냅스 가중치 변화의 균일성, 재현성, 멀티레벨 특성의 안정적 구현, 낮은 소모 에너지 등 모두 만족하는 시냅스 단위

소자 구현이 아직 이루어지지 않은 상황이다. 본 연구는 위 배경을 토대로 멀티레벨 특성의 안정적 구현에 초점을 맞추어 신경망 하드웨어에 적용할 수 있는 저전력, 고효율의 스핀트로닉스 기반 시냅스 소자를 개발하고자 한다. 스핀트로닉스를 적용한 뉴로모픽 소자는 빠른 응답속도, 비 확률적 거동, 높은 에너지 효율, 안정성 등의 우수성과 MRAM 공정과의 호환성으로 높은 산업적 성숙도의 강점을 가지고 있다. 본 연구에서는 FePt 소재를 활용하여 스핀트로닉스 기반 시냅스 소자의 강점은 유지하고, 신호의 비선형성과 고집점의 멀티레벨 구현의 어려움이라는 한계를 개선하려 한다.

### 3) FePt 기반 SOT 소자의 필요성

본 연구에서 핵심 물질인  $L1_0$ -FePt 는 FCT[100] 방향으로 높은 수직 자기 이방성( $K_u$ :  $6.6\sim 10\times 10^7$  erg/cm<sup>3</sup>)을 가지고 열적 안정성이 우수한 물질로 잘 알려져 있다[9]. 자기 저장 장치에서 가장 혁신적인 추세 중 하나는 작은 자석 크기로 안정적인 정보 보존과 높은 저장 밀도를 가능하게 하는 수직자기이방성이 높은 재료의 사용이다.  $L1_0$ -FePt 합금은 전이 금속 화합물 중에서 가장 높은 수직자기이방성을 가지며, 이는 하드디스크 드라이브, 자성소자 및 스핀 논리 회로와 같은 방대한 정보 응용 분야에 사용하기 적합한 물질이다.

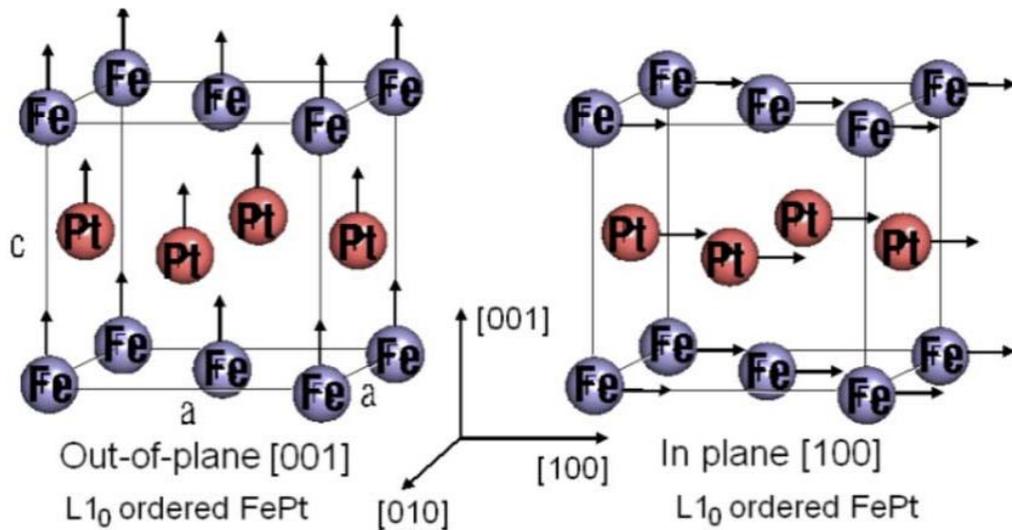


그림 15 FePt 의  $L1_0$  구조와 결정방향에 따른 자기 이방성 모식도

(1)  $L_{10}$ -FePt 결정 구조 및 자기적 특성

FePt 합금은 Fe의 비율과 온도에 따라 A1,  $L_{10}$ ,  $L_{12}$  세 가지의 상으로 존재할 수 있다.  $Fe_3Pt$ 와  $FePt_3$  화합물의 경우  $L_{12}$  구조를, FePt의 경우  $L_{10}$  구조로 주기적인 배열을 가지는 ordered 상이며, 그 외 FePt 화합물은 무작위한 질서를 가지는 disordered 상이다. 세 가지의 상 중에서  $L_{10}$  상에서만 높은 수직자기이방성을 가지고, 그림 1.17과 같이  $L_{10}$ -FePt 구조는  $1300^{\circ}C$  미만에서 열적으로 안정하지만  $400^{\circ}C$  미만에서는 Kinetic constraint으로 인해 A1 구조를 갖게 된다. 이는 A1 구조가 부피 팽창(volume diffusion)을 통한  $L_{10}$  구조로의 상변이를 위해서  $600^{\circ}C$  이상의 온도의 열처리 또는 공정 중 높은 온도가 요구됨을 의미한다.

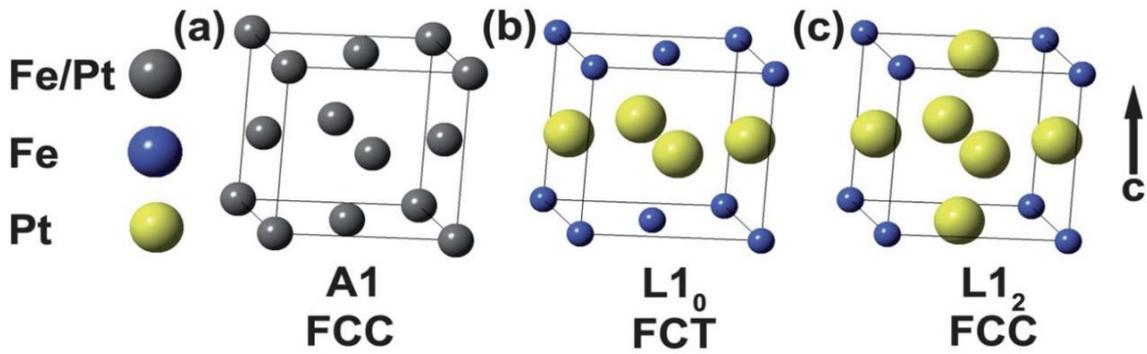


그림 1.16 상에 따른 FePt 합금의 세 가지 배열 구조[10]

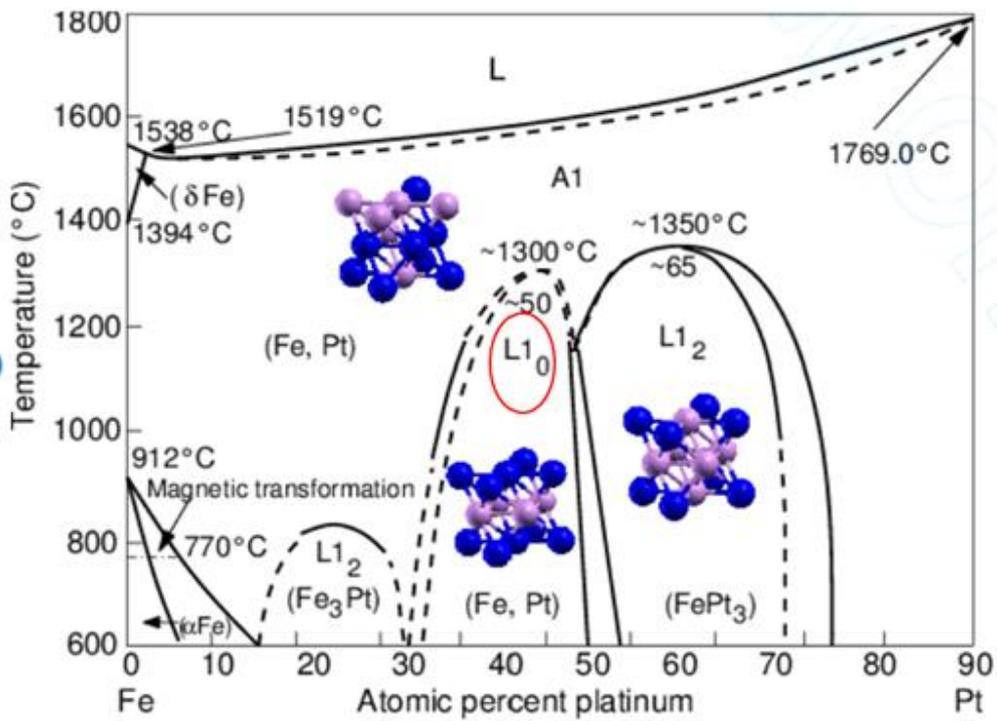


그림 1.17 온도와 Fe의 조성에 따른 FePt 상 다이어그램[11]

(2) L1<sub>0</sub>-FePt 의 일축자기이방성의 생성원리

L1<sub>0</sub>-FePt 상의 높은 PMA 기원은 스핀과 오비탈 각 운동량 사이의 강한 결합과 Pt 의 5d 오비탈과 Fe 의 3d 전자 사이의 혼성화에 있다. Spin Orbit Coupling(이하 SOC)이 강한 Pt 이 Fe 에 의해 스핀 분극된 전자구조를 형성하면서 0.1  $\mu_B$  수준의 오비탈 모멘트를 형성하게 된다 [11]. 그림 1.18 과 같이, FePt 의 Fe 과 Pt 는 혼성화에 의해 minority 밴드에서 un-occupied state 가 많아지게 되어, FCT[001] 방향으로 오비탈 모멘트가 형성이 된다. 특히, Pt 이 근접 효과(proximity effect)에 의해 스핀 분극이 되고 (그림 1.18 의 검정 화살표) 오비탈 모멘트 형성에 기여한다. 이러한 원리로 인하여 FePt 은  $10^7$  J/m<sup>3</sup> 수준의 높은 PMA 를 갖게 된다.

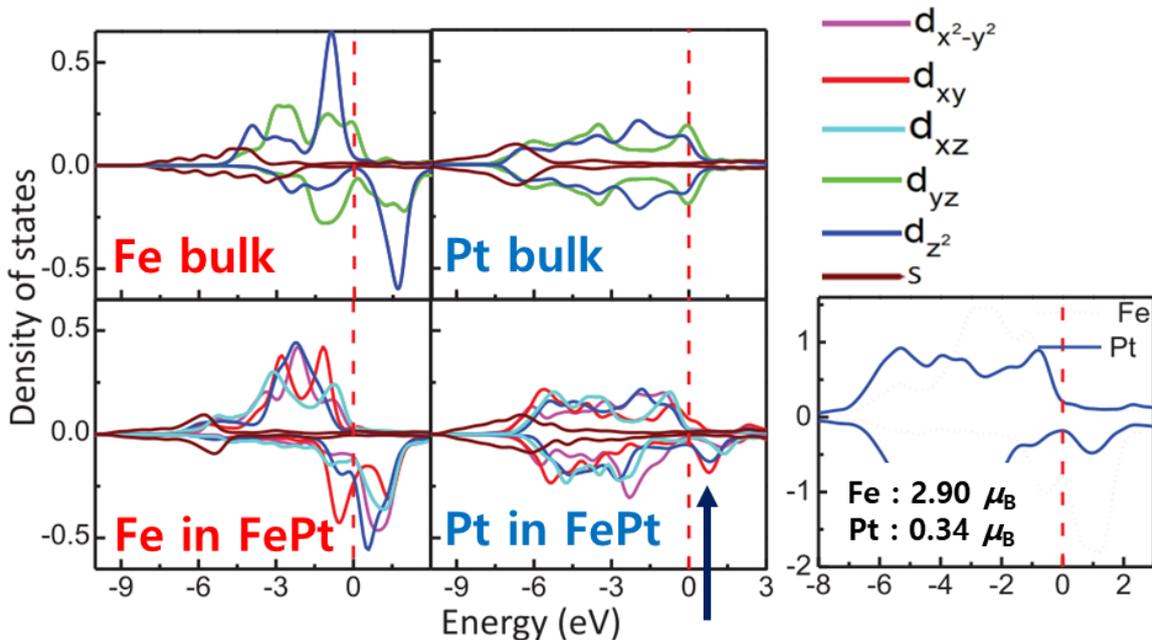


그림 1.18 Fe 와 Pt 가 벌크 상태에서 독립적으로 존재할 때와 L1<sub>0</sub> 합금 상을 가질 때 형성되는 밴드 구조 비교[12]

## 2. 샘플 제작 및 실험 조건

### 1) FePt 기반 이중접합구조 성장

#### (1) FePt 기반의 이중접합 박막

1 장 1)-(2)-③에서 언급한 배경을 토대로, T 자형 자화 구성을 만들어 구조적인 제어를 통해 소자의 에너지 효율의 높이는 연구에 초점을 맞추어 실험을 설계하였다. 수평자화 층으로 선택한 CoFeB 물질은 MTJ(Magnetic Tunneling Junction)에서 많이 사용되는 물질로 MgO와의 계면에서 자성 소자의 핵심 요소인 높은 TMR을 만들어낸다고 알려져 있다. 수직자화 층으로는 L1<sub>0</sub>-FePt를 중간 층으로 선택한 Ru은 두 자성 층 사이의 거리에 따라 자화 배열이 바뀌는 Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida(이하 RKKY) 결합이 잘 일어나는 물질이다. 수직 자화를 선호하는 L1<sub>0</sub>-FePt 층은 Fe의 gradient를 조절하여 구조적 반전 비대칭을 이루어 스핀류 생성의 효율을 높일 수 있도록 설계하였다. 이 세 가지의 물질을 사용하여 이중 접합 구조에서 자성층의 자화 방향이 T자 구성을 이루도록 샘플을 제작하였고, 완성된 시편에서 기대되는 특성은 interlayer coupling, z-spin 성분 그리고 높은 열적 안정성이다. 제작된 시편의 자세한 구조는 다음과 같다.

- MgO(100)/ FePt-gradient (10 nm)/ capping
- MgO(100)/ FePt-gradient (10 nm)/ Ru (t)/ CoFeB (1 nm)/ capping (t=4, 6, 8, 10 Å)

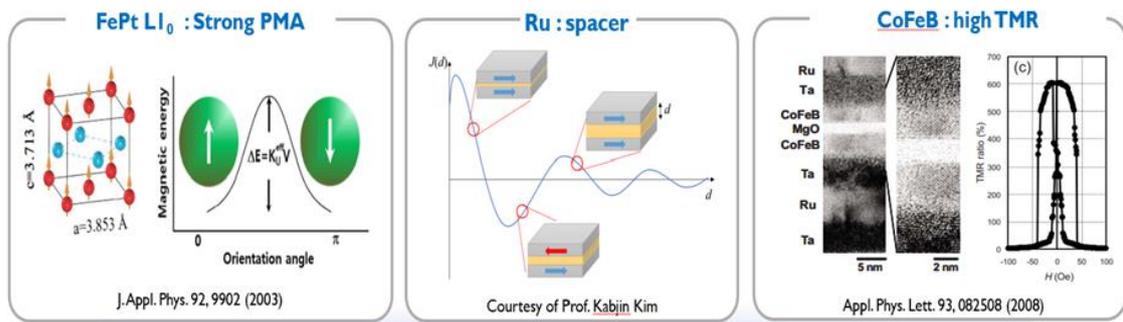


그림 2.1 T-type 자화 구성을 이루는 각 층별 물질

(2) FePt 기반의 입상박막 - MgO(100)/ FePt-TaOx (10 nm)/ capping

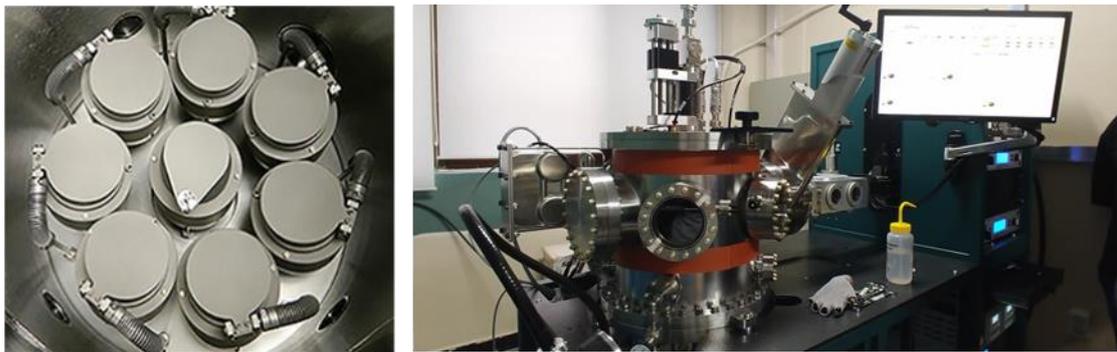


그림 2.2 초고진공 마그네트론 스퍼터링 시스템

실험에서 증착한 박막은 AJA의 UHV(Ultra High Vacuum) Magnetron Sputtering System을 이용하여 제작하였다. 챔버 내의 기본 진공도는  $2 \times 10^{-8}$  Torr 이하이며, 8개의 타겟이 증착 가능하도록 설계되어 있다. 타겟의 증착 속도는 XRR(X-Ray Reflection) 측정을 통하여 증착 시간을 계산하여 박막의 두께를 제어하였다. 플라즈마 생성을 위해 가해주는 전원은 금속 타겟의 경우 DC power, 산화물 타겟의 경우 RF power 선으로 가해주었다. 모든 샘플은 MgO 기판을 사용하였고 증착 시 기판을 회전시킴으로써 박막의 균일성을 증가시켰다.

필름과 기판의 계면 제어는 새로운 재료 성장에 필수적이며 특히, MgO 기판은 수분에 취약하기 때문에 증착 전 기판 클리닝 과정이 요구된다. 기판의 표면 세정 방법에는 습식과 건식 두 가지로 분류된다. 습식 세정법은 아세톤, 에탄올과 같이 많이 사용되는 용매에 담구어 초음파 처리 후 순수한 산화물 표면을 생성시킨다. 건식 세정법은 고온(>500 도)에서 열처리하는 것으로 열처리 공정은 유기 오염 물질을 제거하고 대부분의 수산화물(Hydroxide) 또는 탄산염을 제거하는 데에 효과적이다.[12] 본 연구에서는 두 가지 세정법을 모두 사용하여 기판의 계면 퀄리티를 높였다. 먼저, 부탄온에 기판을 담구어 15 분 동안 초음파 파쇄기(Sonicator)에 돌려 표면에 붙은 물질들을 떨어뜨리고 수분 및 불순물을 완전히 날려주기 챔버 안에서 650°C에서 30 분 열처리를 해주었다. 열처리 과정이 끝난 후에 본 증착 시 타겟의 플라즈마가 뜨지 않는 것을 대비하기 위해 pre sputtering 과정도 진행하였다. 본 증착은 Fe 타겟과 Pt 타겟의 셔터를 동시에 여는 Co-sputtering 방법을 사용하였고 L1<sub>0</sub>-FePt 구조 성장을 위해 요구되는 높은 온도인 600°C에서 증착 하였다. 본 물질인 FePt 의 증착 과정이 끝나면 산화를 막아주는 보호층으로 Mg/MgO/Ta 을 상온(22°C)에서 증착 하였다.

표 2.1 L1<sub>0</sub>-FePt 증착 조건

Ar flow (sccm)	Power (W)	P <sub>base</sub> (Torr)	D.R (Å/s)	T <sub>s</sub> (°C)	Method
35	Fe: 61	~2 × 10 <sup>-8</sup>	Fe: 0.217	600	Co- sputtering
	Pt: 20		Pt: 0.370		

## 2) 스위칭 소자 공정

자화 스위칭 측정을 위해, 제작된 박막들은 포토리소그래피(Photolithography) 공정을 통하여 이중 홀바(Double hall bar) 형태로 패터닝되었다. 본 연구에서 사용된 이중 홀 바의 채널 너비는 10  $\mu\text{m}$ , path 간의 간격은 35  $\mu\text{m}$ , 홀 프로브 너비는 5  $\mu\text{m}$  이다.

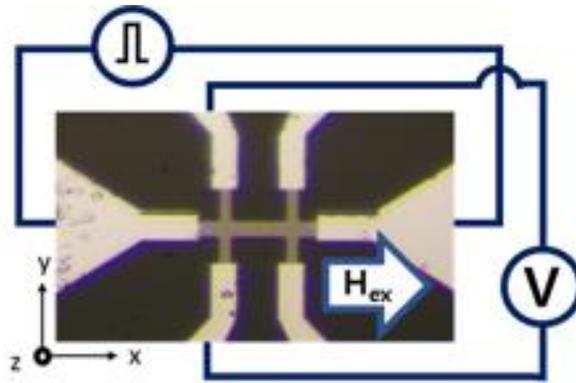


그림 2.3 제작된 FePt 기반 SOT 소자

## 3) 스위칭 측정 방법

샘플을  $xy$  축 평면으로 놓고 샘플의 수직방향을  $z$  축으로 하였을 때,  $x$  축 방향으로 전류를 인가하고  $y$  축 방향으로 Hall 전압을 측정하는 4 point probe 방식으로 측정하였고 전자석으로 자기장을 인가하며 변화하는 저항을 통하여  $R_{\text{AHE}}$ 의 값을 구하였다. 먼저 자화를 포화 시킨 후, 전류와 같은 축인  $x$  축으로 보조 자기장을 인가하며 홀 저항을 측정한다. 펄스 주입은 Keythley 6221를 이용하였고, 펄스 길이는 30  $\mu\text{sec}$  를, 펄스 진폭은 1 mA 에서 50 mA 까지 2mA 간격으로 증가시켰다.

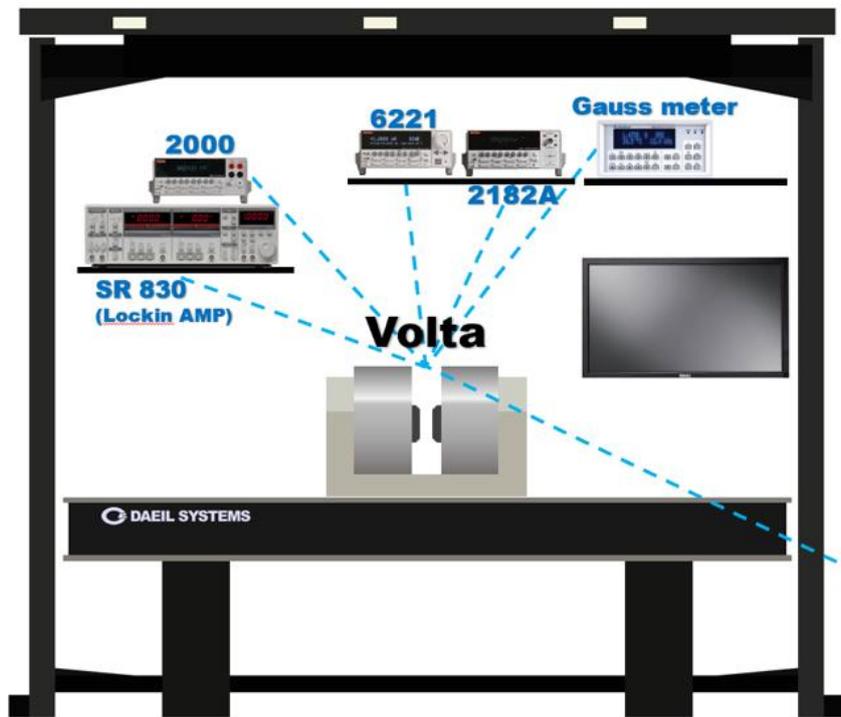
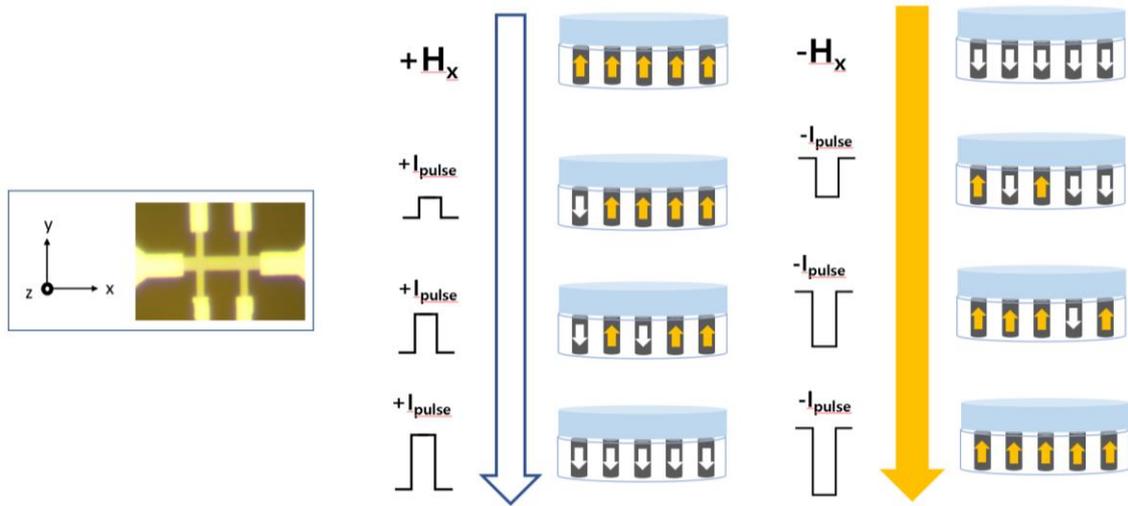


그림 2.4 (위) SOT 스위칭 측정 과정 모식도 (아래) 전자석을 이용한 전기적 측정 시스템 그림

표 2.2 SOT 스위칭 실험 조건

Saturation Field (T)	Pulse amplitude (mA)	Pulse width (us)
2.7	50 ~ -50 ~ 50	30

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 1) FePt/Ru/CoFeB 필름 보자력의 Ru 두께 의존성

그림 2.5는 FePt/Ru/CoFeB 삼중층 구조의 Ru 두께에 따른 AHE 측정 결과이다. 자세한 측정 방법은 2장 실험 방법에 소개되었다. 측정 결과, 중간 층인 Ru의 두께가 두꺼워질수록 샘플의 보자력이 줄어드는 경향을 보였다. Ru 두께를 제외한 다른 층 구조가 동일함을 고려해보면, Ru 층 두께에 의존적인 층간 상호작용의 효과로 볼 수 있다. 두 강자성층 사이에 비자성체가 들어간 구조에서 고려할 수 있는 층간 상호작용의 효과로는 RKKY 상호작용이 있다. 다음 식을 통하여 층간 상호작용에 의한 유효 자기장의 크기를 계산할 수 있었다.

$$H_c = H_{c, \text{FePt}} \pm H_{\text{Inter}} \quad (3.1)$$

계산된 유효 자기장은 그림 x와 같이 Ru 이 6Å~7Å 이 될 때 부호가 바뀌는 경향을 보였는데, 이는 층간 상호작용에 의한 결합력의 부호가 바뀌는 Ru 공간층의 임계 두께와 비슷하다. 따라서, Ru 공간층의 두께 변화가 보자력의 변화에 영향을 준 것으로 해석할 수 있다. FePt/Ru/CoFeB 접합구조 형성시 Ru 두께에 의한 결정구조 변화 역시 고려해야할 요소이다. 이를 위해 제작된 박막들의 XRD 측정을 진행하였고, 그 결과는 그림 X와 같다. XRD 측정을 통해 명확한 L1<sub>0</sub>-FePt 상에 의한 회절 peak 을 관측하였고, 결정성의 정량 분석을 위해 S 파라미터를 아래 식을 통해 추출하였다.

$$S = \frac{\sum I_{\text{ordered FePt}(100)} + I_{\text{ordered FePt}(300)}}{\sum I_{\text{disordered FePt}(200)}} \quad (3.2)$$

Ru 이  $10\text{\AA}$  일때 S 파라미터가 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있는데, AHE 측정에서 관찰되었던 보자력의 급격한 감소는 RKKY 에 의한 유효자기장 뿐만 아니라 결정구조의 변화도 중요한 역할을 했음을 알 수 있다.

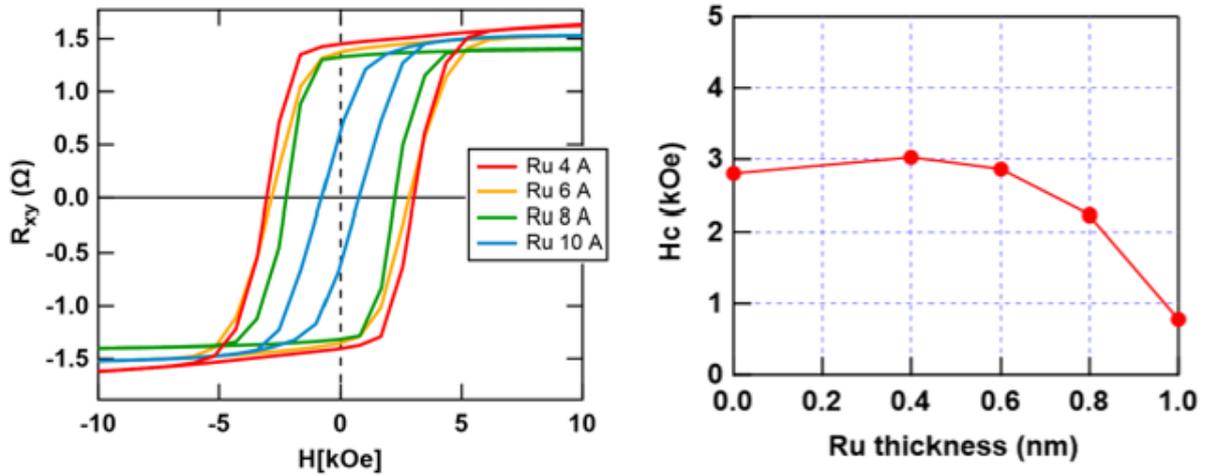


그림 2.5. 중간 층 Ru 층의 두께에 따른 보자력 변화 곡선

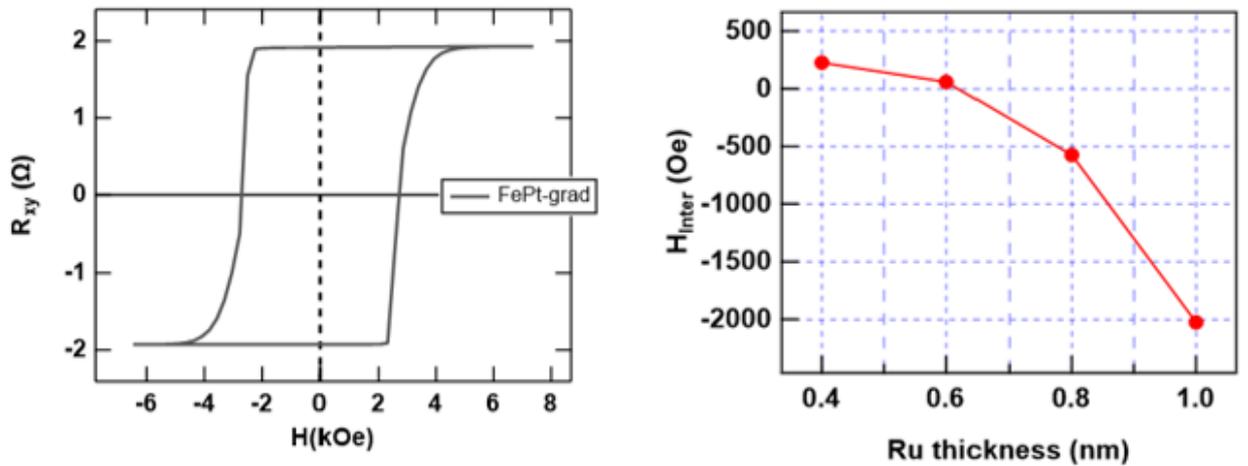


그림 2.6. (좌) FePt 단일층의 AHE 측정 결과 (우) Ru 두께에 따른 유효자기장 변화 곡선

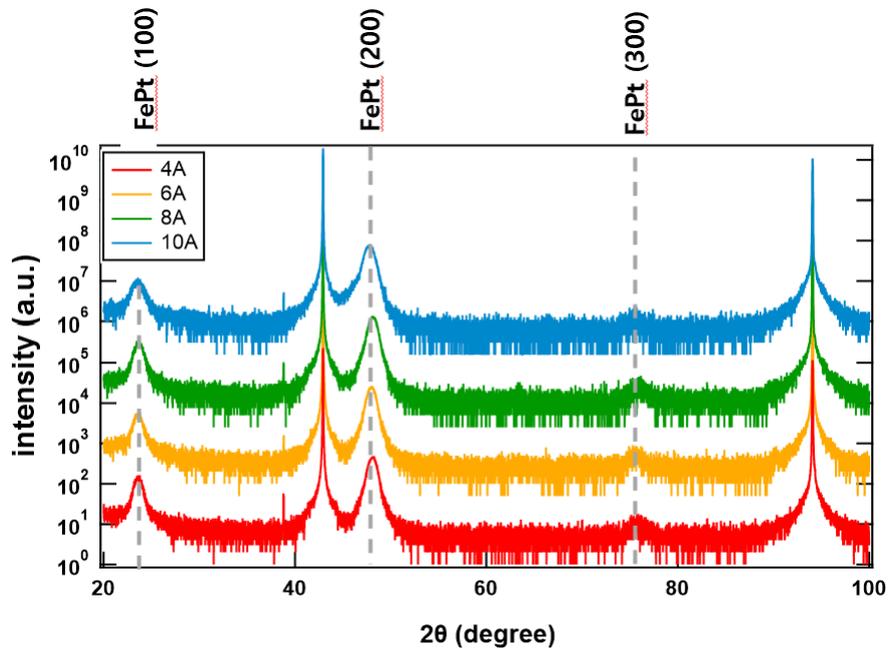


그림 2.7 Ru 층의 두께에 따른 XRD 측정 결과

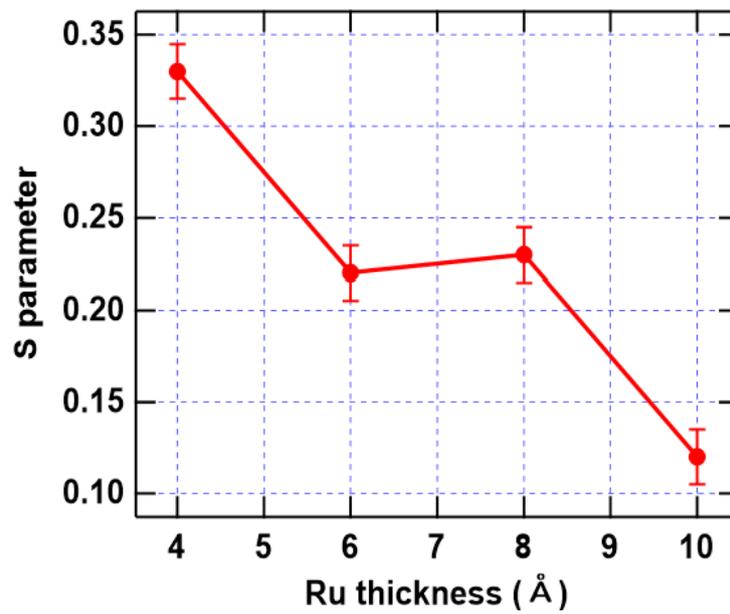


그림 2.8 중간 층 Ru 층의 두께에 따른 S parameter

## 2) SOT 기반 스위칭 특성 분석

### (1) Ru 두께에 따른 FePt/Ru/CoFeB 소자의 스위칭 특성

샘플들의 sot 스위칭 실험 결과이다. 그림 2.3 과 같이 모든 샘플들은 width 10 um 와 전류 path 30 um 의 Double hall bar 패턴으로 소자를 만들어 측정하였다. 먼저, 기준 시료인 FePt 단일 층 구조의 스위칭 측정 실험에서는 스위칭 특성이 관찰되지 않았다. 이는 Xuepeng Qiu 그룹에서 보고된 결과와 상충된다[9]. SOT 스위칭의 필수 요소인 구조적 반전 비대칭에 의한 스핀 전류가 FePt 층에서 충분히 생성되지 못한것으로 판단된다. 반면에 FePt 기반의 모든 이중 접합 구조에서는 스위칭 거동 특성이 관찰되었다. 보조 자기장의 방향에 따라 극성이 반전되는 것을 보아 이는 명확한 SOT 스위칭임을 증명한다. 또한 열화에 의한 스위칭이 아님을 증명하기 위해, 스위칭 시점에서 Joule 발열이 어느정도 수준인지 확인하기 위해 오실로스코프를 이용한 펄스 실험을 진행하였다. 1 mA 의 펄스와 25 mA 의 펄스를 인가할 때 저항 값과 FePt 의 열상수(0.4%/K)를 고려하여 스위칭 시점에서 소자의 온도를 계산하였다. 계산 결과, 스위칭 시점에서 소자의 온도는 400 K 으로 FePt 의  $T_c$  인 760 K 보다 낮은 온도임을 확인하였다. 이는 열화에 의한 스위칭이 아니라는 증거가 되는 결과이다.

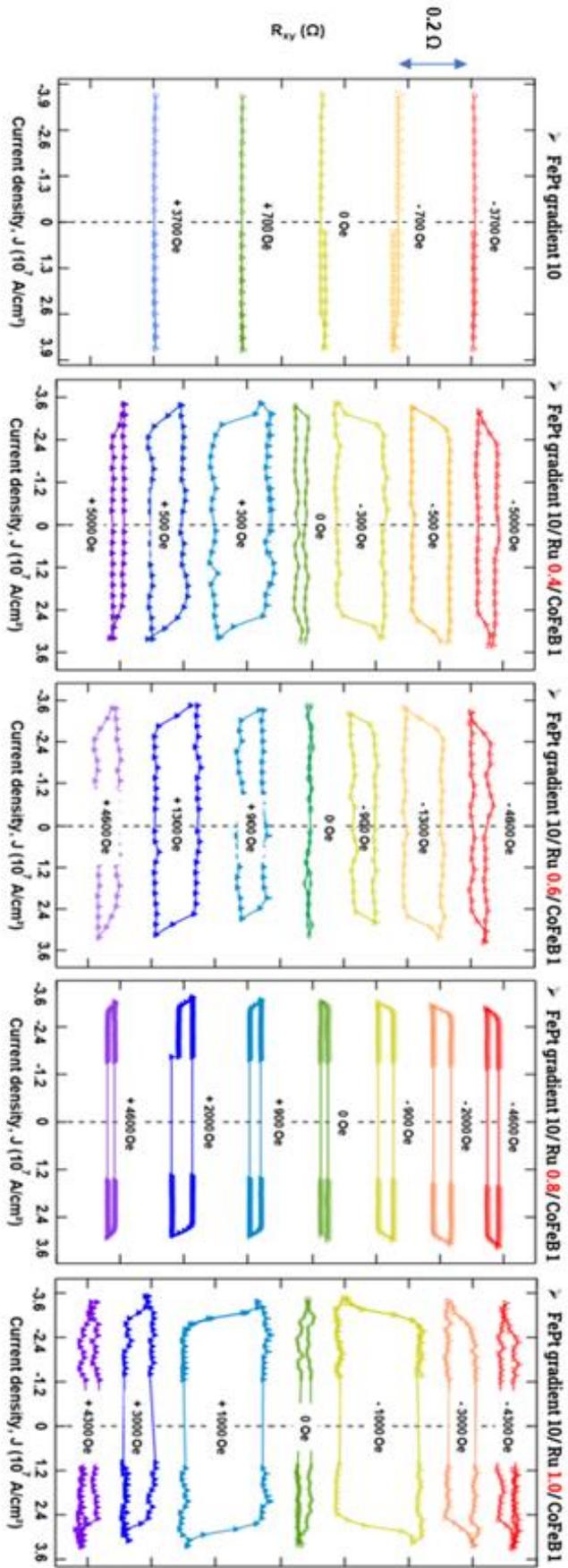
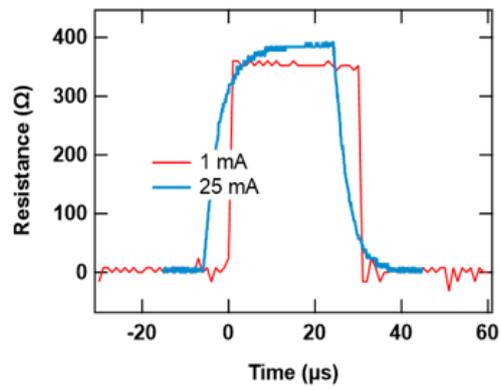
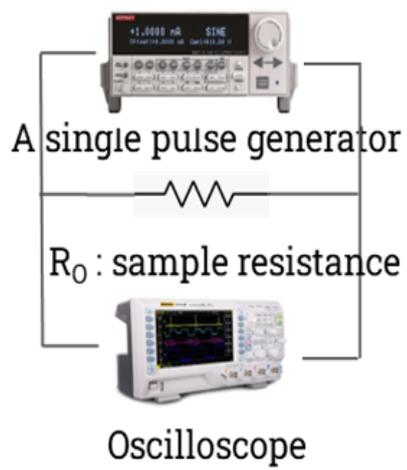


그림 2.9 Ru 층의 두께에 따른 SOT 스위칭 결과



- ❖ Device resistance : 350  $\Omega$
- ❖ Switching current: 55 mA

그림 2.10 스위칭 시점에서의 소자 온도 확인 실험

## (2) FePt/Ru/CoFeB 소자의 스위칭 기구 분석

L1<sub>0</sub>-FePt 단일층에서 관찰하진 못한 자화반전 거동 특성이, 삼중층 구조에서는 어떤 현상이 지배적으로 작용하여 자화반전이 되었는지에 초점을 맞추어 분석한다. 고려할 수 있는 원인으로는 아래 세 가지 현상들이 있다.

첫번째, L1<sub>0</sub>-FePt 수직자화층과 CoFeB 수평자화층이 서로 chiral coupling 되어있을 경우이다. 위아래의 강자성체 층들이 chiral coupling 이 걸려있는 시스템에서는, 자성 층별 자화가 선호하는 방향이 생기고 에너지 상태에 따라 보자력이 달라지게 된다. 또한 SOT 스위칭 실험에서 보조자기장의 크기는 같지만 방향이 다를 때, 스위칭되는 비율이 달라지게 되고 보자력이 작은 시편의 경우, 상대적으로 더 적은 전류로 자화 반전이 이루어져야 한다. 그러나 본 연구의 SOT 스위칭 결과에서는 보조자기장의 크기는 같고 방향이 다를 때, 스위칭 극성만 바뀌고 스위칭 비율이 달라지지 않음을 확인하였다. 또한, 보자력이 2000 Oe 이상 차이 나는 시편들이 비슷한 전류밀도( $2.88 \times 10^7 \pm A/cm^2$ )의 값에서 자화반전이 이루어지며, 적은 편차( $0.4 \times 10^7 A/cm^2$ )를 갖는 것을 확인하였다. 이는 FePt/Ru/CoFeB 시스템에서 자화반전 거동 특성에 chiral coupling 이 영향을 끼치지 않았다고 볼 수 있는 증거가 된다.

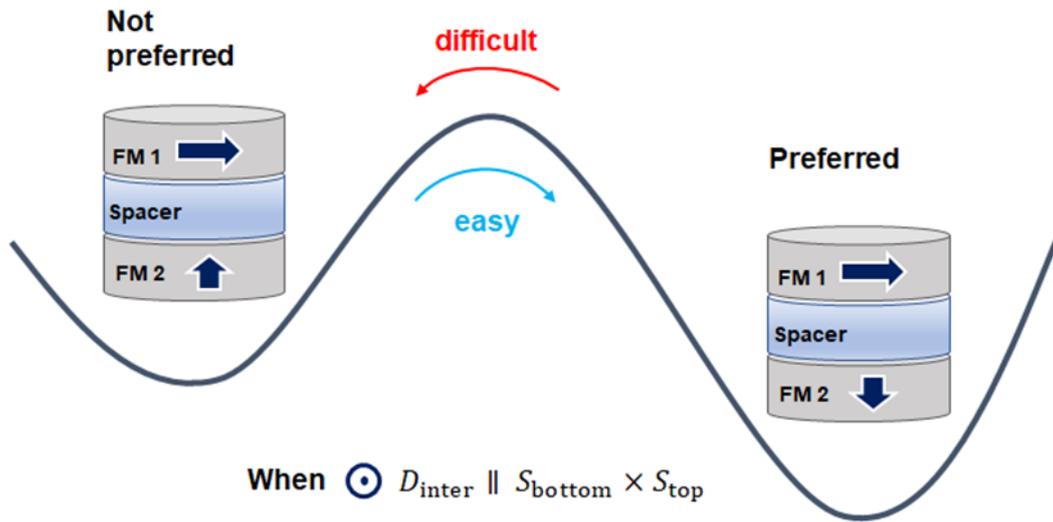


그림 3.1 FePt/Ru/CoFeB 구조에서 chiral coupling 이 되어있을 경우, 선호하는 방향에 따라 요구되는 에너지 다이어그램

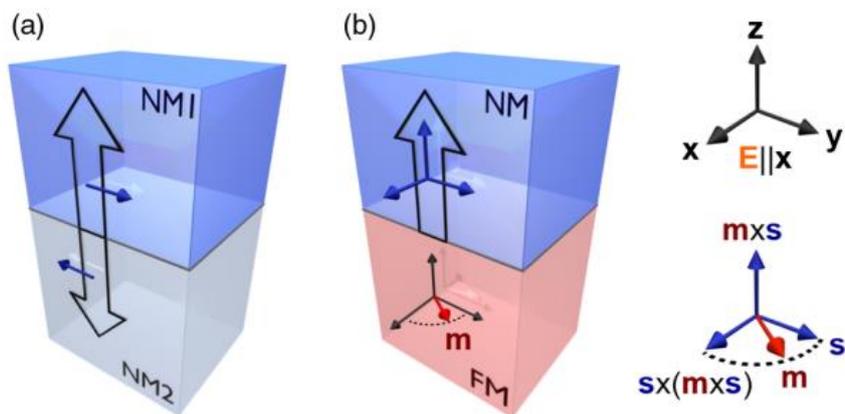


그림 3.2 전기장으로 NM/NM 과 FM/NM 계면에서의 스핀전류 생성 묘사[13]

두번째, SOC 이 있는 NM 층과 FM 층 구조에서 면방향으로 인가되는 전기장에 의해 NM/FM 계면에서 스핀전류가 발생할 수 있다. 생성된 스핀 전류는 인접해 있는 강자성층의 자화에 각운동량을 가하여 자화반전에 도움을 줄 수 있다. FePt/Ru/CoFeB 구조는 두 개의 계면에서 스핀전류가 생성될 수 있고 강자성체 층에 각운동량을 전달하여 스위칭을 도울 수 있다. 여기서 주목한 점은 CoFeB 의 비저항은  $178 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $L1_0$ -FePt 의 비저항은  $13.5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  이며, CoFeB 의 두께가  $L1_0$ -FePt 의 1/10 이라는 것이다. 비저항 값과 층의 두께를 감안할 때, 도체에 흐르는 전류량은 비저항과 반비례, 두께와 비례관계가 있으므로 두 층의 전류 밀도는 약 100 배 차이가 나게 된다. 따라서 CoFeB 층에서 발생한 스핀전류량은 미미하다고 판단할 수 있다.

또한, FM/NM/FM 구조의 계면에서 spin precession 으로 인해 생성되는 z spin 전류가 한쪽 자성층에 주입되어 자화 반전에 도움을 줄 수 있다. FM 층에 인가된 전하전류로 인해 스핀전류가 발생하고, 중간 층에서 xy spin 이 spin precession 으로 인해 z spin 으로 dephasing 되면 무자장 자화제어가 가능하다. 그러나 FePt/Ru/CoFeB 시스템에서 외부자기장 없이 스위칭 거동 특성을 확인 할 수 없었으므로 z spin 성분이 SOT 스위칭에 지배적이지 않았다고 판단할 수 있다.

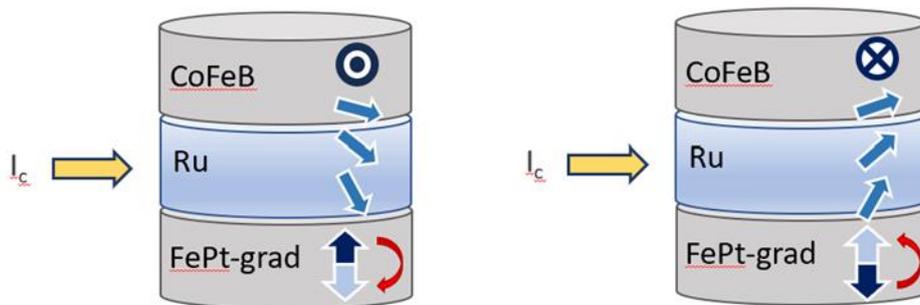


그림 3.3 FePt/Ru/CoFeB 구조에서 z spin 성분에 의한 자화 제어 모식도

세번째, Ru 층에서 일어난 spin absorption 현상이 스핀전류 발생량을 증가시켜 스위칭을 돕는 것이다. Ru 층이 강자성층과의 계면에서 스핀 전류를 잘 흡수한다는 보고가 있다. 그림 x.를 보면 FM/MgO 계면에서는 반사되는 스핀으로 인해 발생된 총 스핀전류량이 적은 반면, FM/Ru 에서는 상대적으로 흡수되는 스핀이 많아 총 스핀전류량 많음을 확인할 수 있다. 본 연구에 적용하게 되면, FePt 층에서 생성된 스핀전류가 FePt/Ru 계면에서 일차적으로 흡수되고 CoFeB 층에서 한번 더 흡수하여 반사되는 스핀으로 인해 상쇄되는 스핀전류량을 줄이는 것이다. Ru 층은 FePt 층과 CoFeB 층의 direct exchange 를 막아주는 동시에 스핀흡수율을 높이는 역할을 하는 것으로 해석된다.

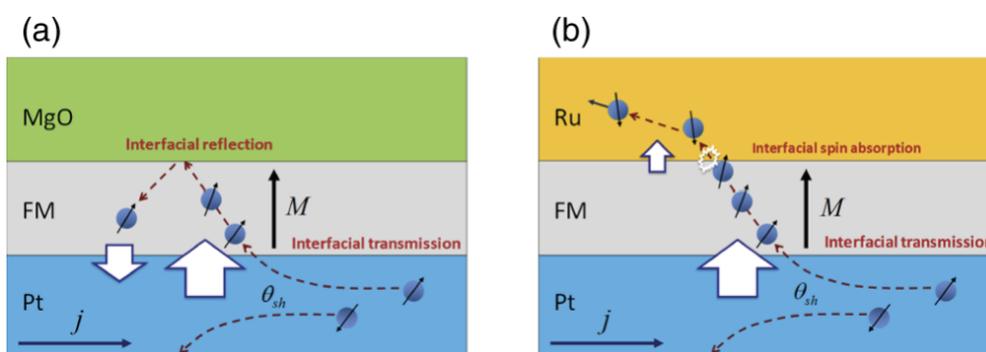


그림 3.4 Pt 층에서 생성된 스핀전류가 (a) 스핀역흐름에 의한 총 스핀전류량의 감소를 묘사한 그림 (b) Ru 층에서 발생하는 스핀 흡수에 의해 강자성체로의 스핀주입 효율이 향상되는 것을 묘사한 그림[14]

결과적으로 hetero 구조에서 스위칭이 된 것은 spin backflow 에 의한 스핀전류의 손실이 Ru/CoFeB 에서 absorption 되면서 가능했던 것으로 판단되며, 그림 x.와 같이  $(J_c/H_c)^{-1}$  (=SOT 스위칭 효율)값이 Ru 두께가 두꺼워질수록 낮아지는 것은 CoFeB 층에서의 흡수가 더 중요하다는 것을 의미한다. 이 해석은 아직 보고된 바 없는 Bi-layer 를 이용한 spin absorption 효과 engineering 으로 다층박막 형태의 spin absorption 을 잘 응용하면 SOT 스위칭 효율을 높일 수 있는 또 하나의 방법으로 주목 받을수 있음을 기대할 수 있다.

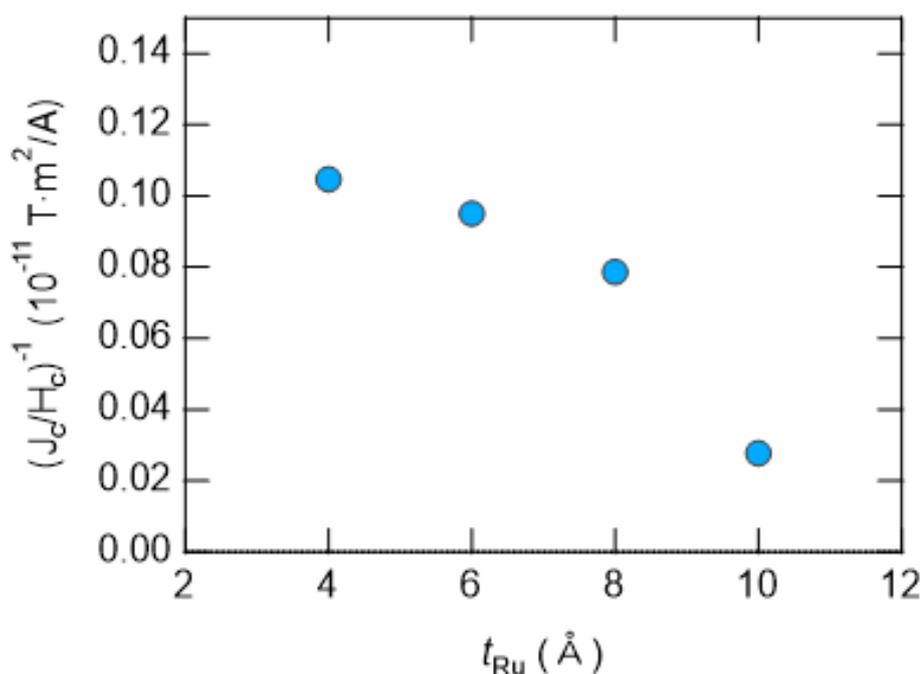


그림 3.5 Ru 두께별 스위칭 효율

### 3) FePt-TaO<sub>x</sub> granular film 의 다중상태 스위칭 특성

#### (1) L1<sub>0</sub>-FePt 층과 계면을 이루는 스핀 전류원의 성장 기구

자성소자 응용에 필수적인 SOT 스위칭 특성을 확인하기 위해, SOC 이 큰 물질인 Pt 과 Ta 을 스핀전류 생성원으로 선택하여 L1<sub>0</sub>-FePt 층 위에 Pt 와 Ta 을 성장시켰다. 보호층으로 사용된 비자성체 물질들이 시편의 자성 특성을 크게 변화시킴을 비이상적 홀효과(Anomalous Hall Effect, 이하 AHE) 측정을 통하여 확인하였다. FePt/Pt 의 경우 PMA 특성을 확인할 수 있었으나, FePt/Ta 의 경우 수평자기이방성(Inplane Magnetic Anisotropy, 이하 IMA) 특성을 갖는 것을 특성을 보였다. 시편 제작에 자성 층의 실험조건은 모두 동일하기 때문에 비자성 층이 자성 특성을 변화시킨 원인으로 판단하고, 결정성과의 상관관계를 확인하기 위해 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, 이하 TEM) 측정을 진행하였다. 측정 결과로는 두 시편 모두 L1<sub>0</sub>-FePt 상이 존재함을 확인하였으나, 표면 거칠기에 큰 차이를 보였다. FePt/Pt 의 경우 섬-성장하여 표면거칠기가 눈에 띄게 고르지 못함을 확인하였고, FePt/Ta 의 경우 박막이 전체적으로 continuous 하게 길러져 평평한 표면을 갖는 것을 확인하였다. 자성소자로 응용하기 위해서는 FePt/Pt 의 PMA 특성과 FePt/Ta 의 고른 표면 두가지 모두 요구된다. 반면, FePt 에 산화물을 첨가하여 기른 시편은 보호층으로 Pt 을 성장시켰음에도 불구하고 평평한 표면과 우수한 PMA 특성을 가지는 것을 확인하였다.

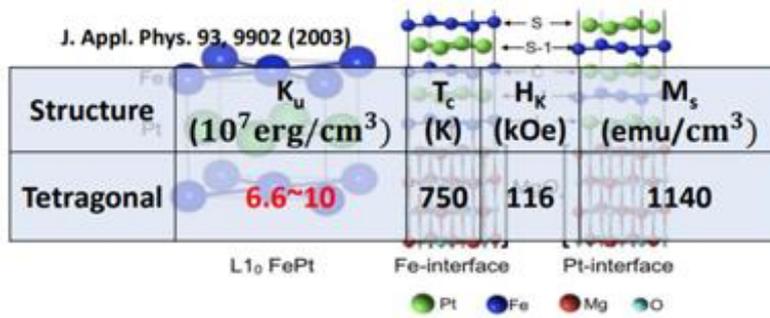


그림 3.6 L<sub>10</sub>-FePt 물질의 기본적인 자성 특성[9]

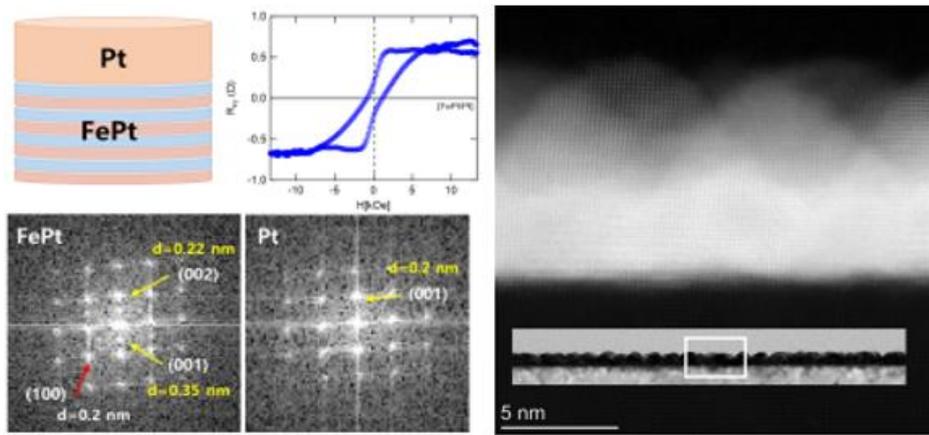


그림 3.7 L<sub>10</sub>-FePt/Pt 시편의 결정성 및 자성 특성

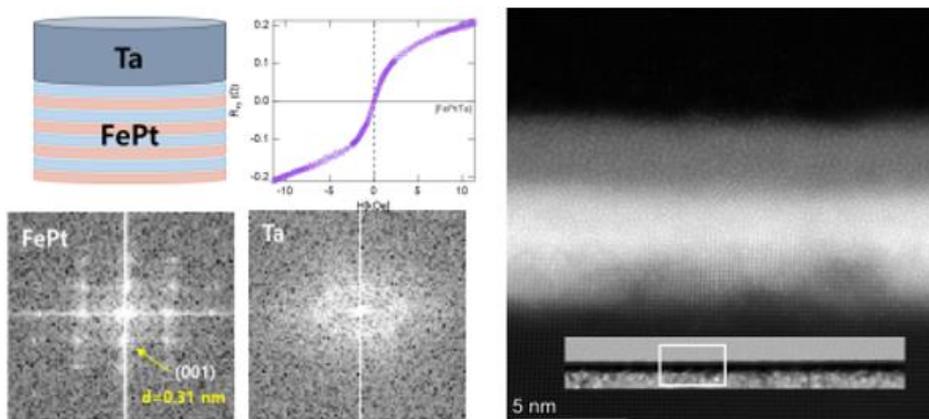


그림 3.8 L<sub>10</sub>-FePt/Ta 시편의 결정성 및 자성 특성

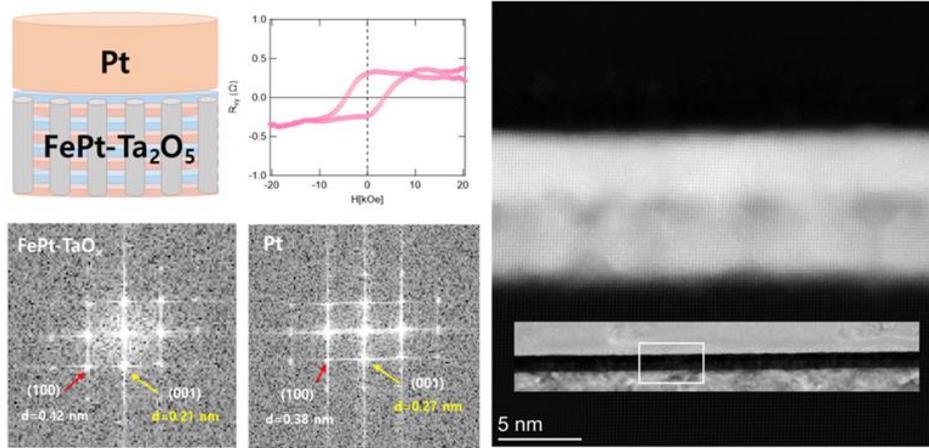


그림 3.9 L1<sub>0</sub>-FePt-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Pt 시편의 결정성 및 자성 특성

이러한 결과에 대해 물질별 성장 기구를 MgO 기판의 표면에너지, FePt 층의 부피에너지 그리고 계면에너지 차이의 free energy 관점으로 분석하였다. 섬-성장으로 자란 시편의 FePt/ Pt 계면에너지는 다음과 같은 식을 통해 구하였다.

$$\gamma_{\text{FePt}} = \gamma_{\text{FePt/Pt}} + \gamma_{\text{Pt}} \cos\beta \quad (3.3)$$

위 식에 물질별 고유값( $\gamma_{\text{FePt}} = 1.25 \text{ J/m}^2$ ,  $\gamma_{\text{Pt}} = 2.30 \text{ J/m}^2$ ,  $\beta = 60^\circ$ )을 대입하여, 구한 FePt/ Pt 의 계면에너지는  $1.25 \text{ J/m}^2$  이다. 섬-성장 하지 않은 시편의 FePt/Ta 계면에너지는  $\cos\beta$ 가 1 을 넘을 수 없으므로  $\gamma_{\text{FePt}} - \gamma_{\text{FePt/Ta}} \geq \gamma_{\text{Ta}}$  인 관계가 성립하고, 따라서  $0.0038 \text{ J/m}^2$  보다 작아야함을 알 수 있다.

마지막으로 FePt-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Pt 의 경우, 앞서 계산한 FePt/ Pt 의 계면에너지 값을 근사하여 FePt-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Pt 계면에너지가  $3.55 \text{ J/m}^2$  라는 것을 구하였다. 이는 FePt/Pt 의 시스템에 산화물 첨가가 계면ener지를 증가시켜 평평한 표면거칠기를 가지게 하는 역할을 하였다고 이해할 수 있다. 이러한 성장 기구는 FePt-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 위 Pt 의 성장이 Frank-van-der-Merwe 유형이 될 수 있게 하는 원인이다.

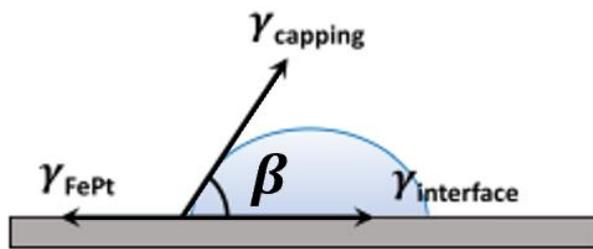


그림 3.10 관찰된 결정 성장을 이해하기 위한 표면 자유에너지 분석 모식도

(2) FePt-TaO<sub>x</sub> granular film 의 다중상태 스위칭 특성

뉴로모픽 소자에 요구되는 특성 중 하나인 멀티레벨 상태는 전류를 인가 하였을 때, 한번에 모든 자구들이 연속적으로 스위칭되지 않고 개별적인 스위칭이 일어나 여러 상태의 저항 레벨을 만들어 내야한다. 본 연구에서는 입상자성박막(granular film) 이라는 소재를 자성소자에 이용하여 멀티레벨 상태 구현 가능성을 확인하는 시뮬레이션을 선행연구로 진행한 바 있다. 입상자성박막은 강자성체로 이루어진 알갱이들이 절연체에 콧콧 박혀있는 형태의 박막이며, 알갱이들이 서로 분리되어 있어 앞서 언급한 자구들이 한번에 스위칭 되기에 어려운 형태를 이루고 있다. 이 시스템에 전류를 인가하게 되면, 각 자구들의 자화반전이 개별적으로 일어난다. 이를 이용하여 자성소자의 다중상태 저항을 만들어 낼 수 있다. 선행연구로 진행한 시뮬레이션에서 위 언급한 가설을 확인한 바 있다(그림 x). 확인된 동작 특성을 실험적으로 증명하기 위해, L1<sub>0</sub>-FePt 가 강자성체 알갱이를 이루고, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 는 산화물로 구성된 L1<sub>0</sub>-FePt 기반의 입상자성박막을 제작하였다. 이는 앞서 FePt 층에 산화물을 첨가시킨 시편의 특성을 확인한 이유이다.

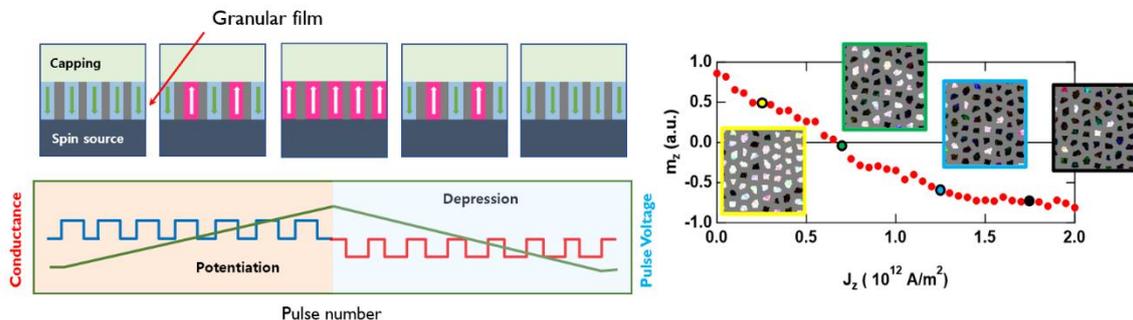


그림 3.11 FePt 기반 입상자성박막의 멀티레벨 동작 특성 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 조건과 동일하게 진행한 FePt-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 다중상태의 확인 실험결과는 그림 3.11 과 같다. 측정은 그림 3.12 와 같은 과정으로 진행한다. 본 측정의 경우 SOT 스위칭에 의한 저항의 다중상태를 확인하기 전, 선행연구로서 Joule 발열에 의한 자화 반전을 유도하였다. 먼저 자화를 포화 시킨 후, 포화시킨 반대 방향으로 보자력 보다 작은 보조 자기장을 인가한다. 이때 자기장은 모두 자화 용이축 선상에서 인가됐다. 보조 자기장을 인가한 상태에서 펄스를 주입하였고, 펄스 주입 한 후에는 소자에 1 mA의 d.c.(direct current)전류를 주입한 상태에서 홀 저항을 측정하였다. 펄스 주입은 Keythley 6221 를 이용하였고, 펄스 길이는 30  $\mu$ sec 를, 펄스 진폭은 10 mA 이었다. 펄스를 인가하는 동안 펄스의 진폭은 고정하였고, potentiation 과 depression 거동은 보조자기장의 방향으로 제어하였다.

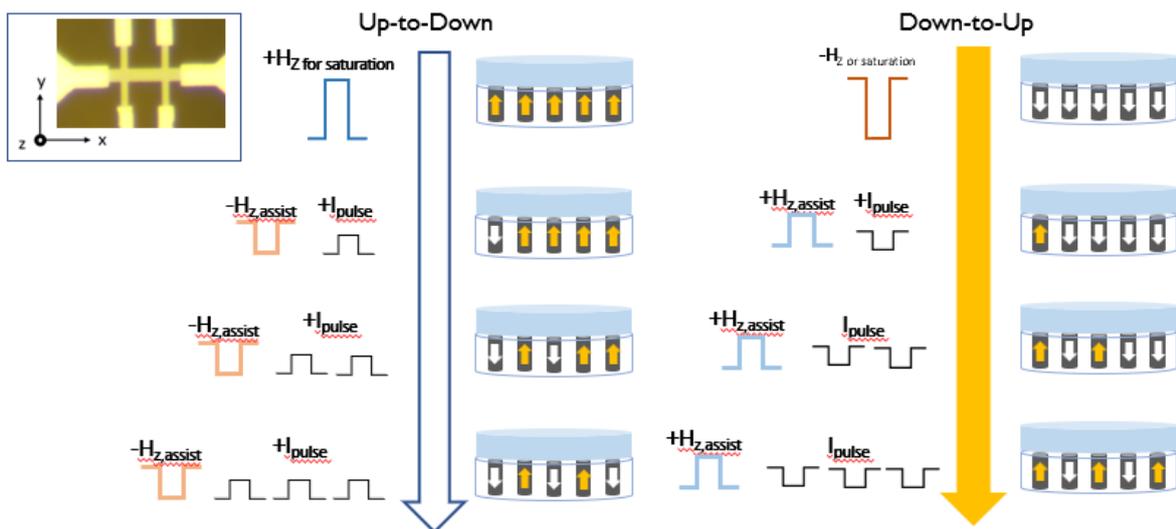


그림 3.12 저항의 다중상태 스위칭 측정 과정 모식도

실험 결과로, 에러율을 나타내는 값이  $G_{\max}/G_{\min} = 1.04$  으로 저항변화 기준 오차 범위 5% 안에서 대칭성을 갖는 것을 확인하였다. 그러나 선형성 지수인  $A_{P(\text{or } D)}$  값이 3으로, 0에 가까운 값을 가지기 위해서 개선이 요구된다. 수십  $\mu\text{s}$ 의 펄스 길이 변화에 큰 변화를 보이지 않았고, 펄스 길이 의존성 확인을 위해서는 스위칭 속도에 근접한 ns 영역에서의 조사가 필요하다고 판단된다. 해당 결과는 뉴로모픽 소자에 활용 가능한 우수한 특성이라 할 수 없지만, FePt 기반의 입상자성박막의 시냅스 소자 응용 가능성을 확인할 수 있는 실험이라 할 수 있다.

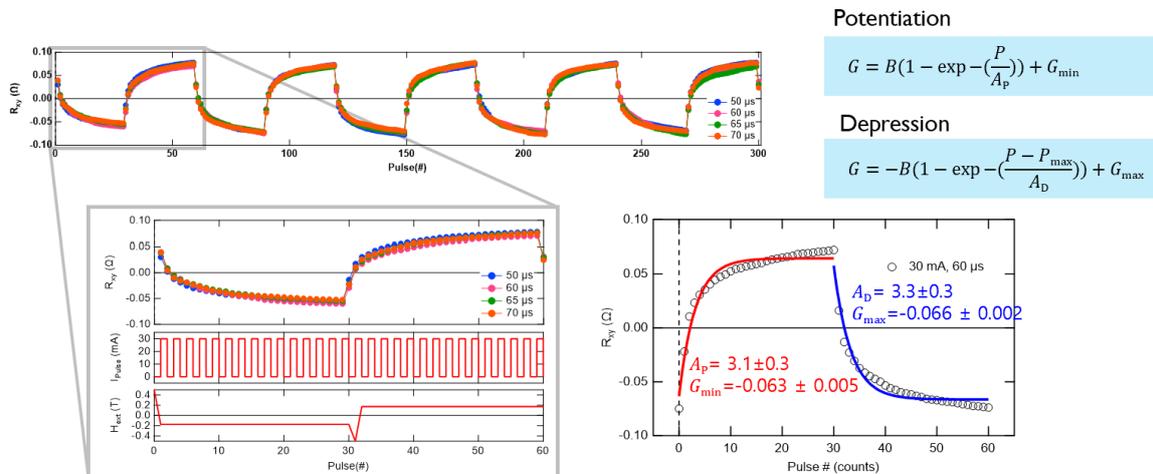


그림 3.13 FePt-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 시편의 다중상태 특성 측정 결과

#### 4. 결론

본 연구에서는 MRAM의 에너지 효율을 높이기 위해 제시된 다양한 방법들 중에서 구조적인 제어에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. FePt 단일층에서 관찰하지 못한 SOT 스위칭 거동 특성을 FePt 기반 이중접합 구조에서 관찰할 수 있었고, 이는 구조적인 제어를 통해 스위칭 효율을 높인 결과로 볼 수 있다. 스위칭에 지배적인 영향을 끼친 현상으로는, 스핀전류가 Ru/CoFeB에서 흡수되면서 스핀역흐름에 의한 스핀전류의 손실을 막아 스위칭에 도움을 준 것으로 해석하였다. 이 해석은 아직 보고된 바 없는 Bi-layer를 이용한 spin absorption 효과 engineering으로, 다층박막 형태의 spin absorption을 잘 응용하면 SOT 스위칭 효율을 높일 수 있는 또 하나의 방법으로 주목 받을 수 있을 것이다.

또한, 본 학위논문에서는  $L1_0$ -FePt 소재를 뉴로모픽 소자로 응용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 시냅스 소자에 요구되는 특성 중, 저항의 다중상태 선형성은 여전히 개선이 요구되나 potentiation과 depression 거동이 오차 범위 5% 안에서 대칭성을 갖는 것으로 확인되었다. 자화의 스위칭은 ns 영역에서 일어나는 초고속 동작임을 고려해보면, 선형성 개선 시 우수한 시냅스 소자를 구현할 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고 문헌

- [1] S. Jung, et al., A crossbar array of magnetoresistive memory devices for in-memory computing, *Nature* **601**, 211 (2022).
- [2] S. Ikeda, et al., Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature, *Applied Physics Letters* **93**, 082508 (2008).
- [3] S. Kim, et al., Basic Principles and Recent Progress of Magnetization Dynamics, *Journal of the Korean Magnetics Society* **28**, 75 (2018).
- [4] W. Ham, et al., Bulk Rashba-Type Spin Splitting in Non-Centrosymmetric Artificial Superlattices, *Advanced Science* 202206800 (2023).
- [5] G Yu, et al., Switching of perpendicular magnetization by spin-orbit torques in the absence of external magnetic fields, *Nature Nanotechnology* **9**, 548 (2014).
- [6] C.O. Avci, et al., Chiral Coupling between Magnetic Layers with Orthogonal Magnetization, *Phys. Rev. Lett.* **127**.167202 (2022).
- [7] S-H C Baek et al., Spin currents and spin-orbit torques in ferromagnetic trilayers, *Nature Materials* **17**, 509 (2018).
- [8] Fukami et al., Magnetization switching by spin-orbit torque in an antiferromagnet-ferromagnet bilayer system, *Nature Materials* **15**, 535 (2016).
- [9] M. Tang, et al., Bulk Spin Torque-Driven Perpendicular Magnetization Switching in L10 FePt Single Layer, *Advanced Materials* 2002607 (2020).
- [10] Aaron C, et al., Sinter-free phase conversion and scanning transmission electron microscopy of FePt nanoparticle monolayers, *Nanoscale* **3**, 4142 (2011)
- [11] Y-Q Gao, et al., Deformation behavior in L10-type FePt compound, *Materials Science and Engineering A* **192**, 53 (1995).
- [12] A. Kabir, et al., Effect of structure on the magnetic anisotropy of L10 FePt nanoparticles, *Physical Review B* **92**, 054424 (2015).
- [13] A.L.F et al., Wet-cleaning of MgO(001): Modification of surface chemistry and effects on thin film growth investigated by x-ray photoelectron spectroscopy and time-of-flight secondary ion mass spectroscopy, *Journal of Vacuum Science & Technology A* **35**, 021407 (2017)

- [14] V.P. Amin, et al. Interface-generated spin current, *Physical Review Letters* **121**, 136805 (2018).
- [15] X. Qui, et al. Enhanced Spin-Orbit Torque via Modulation of Spin Current Absorption, *Physical Review Letters* **117**, 217206 (2016).