



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

인공적으로 형성된 거울 비대칭성에  
기인한 z-성분 스핀 전류와 그에 따른  
페리자성체의 field-free 스위칭 연구

Study on the z-component spin current due to artificially  
formed mirror symmetry breaking and field-free  
switching of ferrimagnets

울 산 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

김 지 수

Study on the z-component spin current due to  
artificially formed mirror symmetry breaking  
and field-free switching of ferrimagnets

지도교수 김 상 훈

이 논문을 이학석사학위 논문으로 제출함




2022 년 02 월

울 산 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

김 지 수

김지수의 이학석사학위 논문을 인준함

심사위원 김 상 훈  인  
심사위원 조 성 래  인  
심사위원 임 성 현  인

울 산 대 학 교 대 학 원

2022 년 02 월

# 목 차

## <제목 차례>

감사의 글

국문 초록

영문 초록

## I. 도입부

1.1 스핀트로닉스

## II. 이론적 배경

2.1 자화 반전

2.1.1 SOT 자화 반전

2.1.2 Field-free SOT 자화 반전

2.2 페리자성 (Ferrimagnetism)

2.2.1 페리자성의 개념 및 특성

2.2.2 온도 자화 보상점 ( $T_M$ )

2.3 헬륨 이온 조사법

2.4 연구 목표

### III. 실험 방법

#### 3.1 측정 시편 구조

### IV. 실험 결과

#### 4.1 페리자성 소자에 적용한 헬륨 이온 조사 기술

##### 4.1.1 다양한 단일 조건에서의 이온 조사

##### 4.1.2 Dose gradient 형태의 이온 조사

#### 4.2 헬륨 이온 조사 이후 변성된 페리자성 소자 특성 평가

#### 4.3 MOKE 현미경을 이용한 스위칭 실험

##### 4.3.1 깨진 측면 대칭 특성을 통해 관측된 Field-free SOT 스위칭

##### 4.3.2 깨진 측면 대칭을 통해 생성된 z-성분 스핀 전류

##### 4.3.3 전류와 평행한 방향으로 깨진 측면 대칭 특성

#### 4.4 헬륨 이온 조사의 영향

##### 4.4.1 시편의 구조 및 특성 분석

##### 4.4.2 SRIM 시뮬레이션

### V. 결론

### VI. 참고자료

## <표 차례>

표 1. 다양한 메모리 디바이스에 대한 표 . . . . .	15
표 2. 단일 헬륨 이온 조사 조건에 대한 표 . . . . .	28
표 3. Dose gradient 헬륨 이온 조사 조건에 대한 표 . . . . .	31

## <그림 차례>

그림 1. MRAM의 이미지 .....	15
그림 2. 페리자성체의 자기 모멘트 배열 .....	19
그림 3. 헬륨 이온 현미경 시스템 (Helium ion microscope, HIM).....	21
그림 4. 헬륨 이온 현미경 시스템과 개략적인 모식도 .....	22
그림 5. 헬륨 이온 조사 실험에 사용되는 시편 구조.....	25
그림 6. MOKE 현미경을 통해 관측한 헬륨 이온 조사 실험에 사용된 소자의 더블 홀 바 영역 .....	25
그림 7. 헬륨 이온 조사 유무에 따른 자기적 특성의 변화.....	27
그림 8. 조사하는 헬륨 이온 도즈량에 따라 다르게 변한 소자의 자기적 특성.....	29
그림 9. 헬륨 이온 조사로 인가한 dose gradient 패턴 .....	30
그림 10. Dose gradient 패턴 생성 이후 패턴 내 영역별로 변화한 페리자성소자의 PMA 특성 .....	32
그림 11. pristine소자에 대한 다양한 온도에서의 anomalous Hall effect 측정 결과 ....	33
그림 12. 헬륨 이온 조사를 이용한 온도 자화 보상점, $T_M$ 의 제어 .....	34
그림 13. 편광 방향에 따른 MOKE 측정 기법 .....	35
그림 14. MOKE 현미경을 이용한 측정 이미지 .....	36
그림 15. Dose gradient 형태의 이온 조사를 통해 y축으로 깨진 페리자성 소자의 측면 대칭 특성.....	37
그림 16. 외부 자기장을 인가하지 않은 field-free SOT 스위칭 MOKE 이미지.....	38
그림 17. 외부 자기장 인가 및 인가하지 않은 SOT 스위칭 그래프.....	39
그림 18. .y축으로 깨진 측면 대칭 특성을 나타낸 모식도 .....	39
그림 19. 자기이력 곡선 중심의 이동 및 $S_z$ 성분의 재현성 확인 .....	41



그림 20. 전류와 평행한 방향으로 대칭이 깨진 소자 개략도..... 42

그림 21. y축으로 깨진 측면 대칭 특성을 나타낸 모식도..... 42

그림 22. HRTEM 측정을 통해 관측한 시편의 미세구조 ..... 43

그림 23. EDS분석을 통해 관찰한 원소 분포의 선량 의존성..... 44

그림 24. 고해상도 투과 전자 현미경 (High resolution transmission electron microscopy, HRTEM)..... 44

그림 25. MTJ 소자에 적용가능한 oblique-헬륨 이온 조사 기술..... 45

그림 26. SRIM 시뮬레이션을 통한 이온 궤적 분포도 (좌): 측면 뷰, (우): 탑 뷰... 46

그림 27. SRIM 시뮬레이션을 통한 atomic displacement 결과 ..... 46



## 감사의 글

2 년간의 학위과정을 마치며...

시간이 참 빨리 지나간 것 같습니다. 먼저 낳아주시고 지금까지 키워주신 부모님께 가장 먼저 감사의 말씀 올립니다. 2018 년 봄, 책상 하나 없던 312 호에 첫 발걸음을 내딛던 때가 엇그저께 같은데 벌써 2022 년이 되어 석사 졸업을 앞두고 있는 것이 아직 실감이 나지 않습니다. 김상훈 교수님을 만나 연구실 생활을 시작하게 된 것은 제 인생에 있어 크나큰 행운이었습니다. 항상 긍정적이고 열정적인 모습으로 이끌어 주신 교수님의 가르침은 연구 뿐 아니라 저의 인생 에도 큰 영향을 주었습니다. 세상을 더욱더 폭넓게 바라볼 수 있도록 깊은 가르침을 주신 교수님, 진심으로 감사드립니다! 우리 Lab.S0.D. 연구실 동료들에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 2018 년 복학 이후 함께 학생회 뿐만 아니라 연구실의 창립멤버로 들어오며 둘도 없는 친구가 된 동현아, 오랜 시간 고민 뿐 아니라 사소한 이야기 하나하나 다 들어주는 너가 있어 참 큰 힘이 됐어. 알고 있제?! 다음은 나와 MBTI 앞자리만 다른 수빈아, 우린 성격이 참 많이 닮은 것 같아. 지터리, 임터리 방전 속도만 조금 다를 뿐...그렇지? 나 없다고 너무 슬퍼하지 말고(조금은 슬퍼해줘) 앞으로 남은 학위생활도 지금까지 해왔듯이 잘 해나가길 바래! 연구실 생활을 채 1 년도 함께 하지 못해 아쉬운 하은지수빈의 필수 합체요소 하은, 은지야! 더 많은 추억을 만들지 못해 아쉽지만 일단 KCS 가서 하나 더 신나게 만들어보자! 든든한 말형 광수오빠, 오빠랑 했던 테트리스와 떡방은 잊지 못할 거예요. 졸업한 은강, 희찬이오빠에게도 듬직한 선배가 되어 주셔서 감사하다는 말 전하고 싶습니다. 내 마니또였던 Huong! 함께해서 즐거웠고 항상 연구를 즐기는 모습 멋있었습니다! Good Luck~ 연구실 생활 처음부터 지금까지 쪽 크고 작은 모든 일에 신경써주시고 걱정해주시던 이 박사님, 긴 시간동안 감사했습니다. 늦게 알게 되어 아쉬운 박박사님께도! 진심 어린 조언 해주심에 감사드립니다. 마지막으로 학위과정을 하며 만나게 된 나의 소중한 인연인 근희야, 언제나 어디서나 나의 든든한 버팀목이 돼 주어 고마워!

# 초록

## 국문 초록

스핀-오빗 토크를 이용한 전류 유도 자화 스위칭 (Field-free SOT 스위칭)은 스핀트로닉스 메모리 및 논리 소자를 개발함에 있어 에너지를 효율적으로 제어할 수 있으므로 큰 주목을 받아왔다. 하지만 수직 자화를 선택적으로 스위칭하기 위해 외부 자기장 인가는 불가피하며 아직까지 이를 보편적으로 제어할 수 있는 방법은 없다. 이와 관련하여 층간 교환 결합, 스핀 밸브 구조 혹은 측면 대칭 파괴 특성을 가지는 재료 등을 이용하여 외부 자기장 인가 없이 전류 유도 자화 스위칭을 구현하고자 하는 다양한 시도가 있었다. 그러나 이러한 방식의 대부분은 재료 선택 혹은 구조의 한계로 인해 여전히 실제 기술에 적용하기에 어려움이 있다.

본 연구에서는 헬륨 이온 조사에 의해 깨진 측면 대칭 특성으로 인해 성공적으로 관측된 GdCo 페리자성 소자의 field-free SOT 스위칭 결과 및 메커니즘을 구체적으로 보여준다. 헬륨 이온 조사 조건을 다르게 설정하여 소자의 자기적 특성을 국부적으로 제어하였고 이는 페리자성 소자에 흘려준 전류 방향에 수직인 방향으로 자기 구배를 형성하였다. 이후 외부 자기장 인가 없이 전류만으로 수직 자화의 반전 현상을 관측하였고 이러한 Field-free SOT 스위칭의 필수 요소인  $z$ -성분 스핀 전류의 생성 또한 확인하였다. 본 연구에서 적용한 헬륨 이온 조사 기술은 CMOS와 호환가능할 뿐만 아니라 페리자성 재료에 국한되지 않으며 다른 강자성 시스템에도 적용할 수 있으므로 본 연구는 스핀-오빗 토크를 기반으로 한 자기 저항 랜덤 액세스 메모리 (Magnetic Random Access Memory, MRAM) 장치 개발을 위한 돌파구를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## **Abstract**

Current-induced magnetization switching by spin-orbit torque (SOT) is of great importance to spintronics that allows the energy efficient operation of magnetic memory and logic devices. However, use of external in-plane magnetic field is unavoidable to deterministically switch the perpendicular magnetization that is a bottleneck for the device application. There have been many efforts to realize field-free SOT switching using interlayer/exchange coupling, spin valve structure, or materials with lateral symmetry breaking. However, practical application is still difficult with those ways due to limitations of material selection or layer structure modification. Here, we demonstrate field-free SOT switching of a GdCo ferrimagnet with lateral symmetry breaking by He ion irradiation. Local control of the magnetic property with different He ion irradiation conditions induces lateral magnetic gradient orthogonal to the current flow direction in the ferrimagnet. We also observe the z-polarized spin current generation due to lateral symmetry breaking which is essential for the field-free switching. Since the He ion irradiation technique is utilized for the complementary—metal—oxide—semiconductor fabrication and its resolution can reach to nanometer size, our findings pave the way for wafer scale application of the energy efficient spintronic memory and logic devices.

# I. 도입부

## 1.1 스핀트로닉스

스핀트로닉스 (Spintronics)란 스핀 (spin)과 전자공학 (electronics)의 합성어로 전자의 물리적 이동뿐 아니라 전자의 자성 방향인 스핀의 방향까지 고려하여 차세대 전자소자 기술을 발전시키고자 하는 학문이다. 기존의 반도체 기반 전자소자 기술은 전자의 두 가지 특성인 전하, 스핀 중에서 양자역학적인 스핀을 고려하지 않고 전하만을 전기장으로 제어한다. 이에 반해 스핀트로닉스 기술은 전자의 전하와 스핀 두 가지 특성을 동시에 제어하는 기술로 이를 이용하여 스핀전자 소자를 개발한다면 기존 반도체 기반 전자소자의 물리적 현상 및 나노 공정에 있는 근본적인 기술적 한계를 극복할 수 있을 것으로 전망되어 꾸준히 연구가 진행되어 왔다.

스핀트로닉스 분야에서도 특히 스핀소자 기술에 대한 연구는 지금까지도 매우 활발히 진행되고 있으며 전류구동형 자화 스위칭 (Current Induced Magnetization Switching, CIMS) 기술의 경우 자기셀의 크기가 작아질수록 정보기록이 용이해짐으로 고밀도의 MRAM 구현이 가능하다. 자성을 이용하여 정보를 기록하는 방식의 메모리 소자인 MRAM 은 차세대 메모리로써 많은 주목을 받아왔는데 이는 바로 비휘발성, 내구성, 정보기록과 정보를 저장하는 밀도 등 여러 특성에서 우수한 성능을 갖추고 있기 때문이다. (표 1.) MRAM 은 두 개의 자성박막과 그 사이에 한 개의 절연막을 끼워 넣은 구조의 자기터널접합 (Magnetic Tunnel Junction, MTJ) 소자를 기존의 CMOS 구조 안에 넣어 만든다. MTJ 소자의 자성층 사이에 전압을 인가할 시 배열되는 자성층에서의 스핀 방향의 평행 유무에 따라 달라지는 저항의 높낮이를 이용해 ‘0’과 ‘1’, 두 가지 디지털 신호를 기록하게 되고 이를 통해 정보를 저장할 수 있게 된다. (그림 1.) 이렇듯 전자가 특정 방향으로 갖는 고유한 운동량인 ‘스핀’을 정보 저장과 처리의 기본 단위로 사용하는 스핀 소자에 이용하게 된다면 초고속, 초저전력 소자 및 대용량 메모리 소자를 구현에 국한되지 않고 더 나아가 인공지능 반도체와 양자컴퓨터와 같은 미래 기술에도 널리 적용할 수 있다.



표 1. 다양한 메모리 디바이스에 대한 표

	HDD	SSD	PCRAM	ReRAM	MRAM	DRAM	SRAM
knowledge level	product	product	prototype	development	prototype	product	product
smallest cell [=capacity]	2/3F <sup>2</sup>	1-4F <sup>2</sup>	8-16F <sup>2</sup>	6-12F <sup>2</sup>	6-20F <sup>2</sup>	6-8F <sup>2</sup>	50-120F <sup>2</sup>
readout (ns) [=speed]	500,000-800,000	25,000-100,000	100	5-10	2-20	2-30	0.1-5
writing (ns) [=speed]	500,000-800,000	200,000	5-500	10-30	2-20	2-10	0.1-5
switching power (pJ)	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>1</sup> -10 <sup>4</sup>	2-100	5-100	20	2-8	0.5-5
endurance	1.0×10 <sup>15</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup>	1.0×10 <sup>8</sup>	1.0×10 <sup>12</sup>	1.0×10 <sup>15</sup>	n/a	1.0×10 <sup>16</sup>
non-volatility	yes	yes	yes	yes	yes	no	no

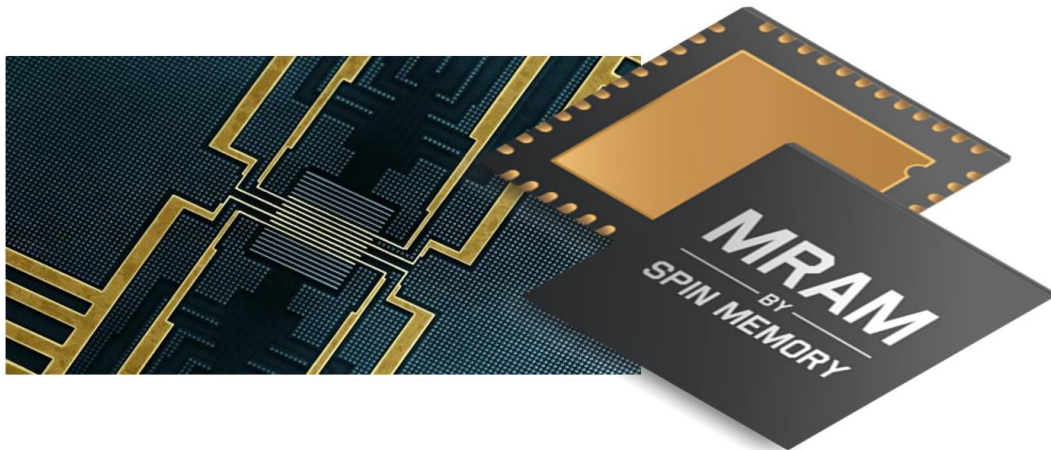


그림 1. MRAM 의 이미지

## II. 이론적 배경

## 2.1 자화 반전

### 2.1.1 SOT 자화 반전

스핀-오빗 토크 (Spin-orbit torque, SOT)를 이용한 SOT 자화 반전 구동 방식[1-5] 은 메커니즘적으로 자화 반전 시 걸리는 시간이 짧기 때문에 에너지 효율성과 속도가 우수하여 MRAM 을 포함한 다양한 메모리 소자 개발 분야에 적용되어 왔다.[6-11]

비자성체/자성체 층 접합 구조에서 스핀-오빗 상호작용이 큰 물질인 Pt, Ta, W 과 같은 비자성체 층에 면 방향으로 전류를 흘려주면 스핀의 up, down 상태에 따라 전자의 궤도가 휘게 되면서 스핀 분극 현상이 발생한다. 이 때 흘려준 전류의 방향에 대해 수직인 방향으로 스핀 전류가 생성되는 현상을 스핀 홀 효과 (Spin Hall effect, SHE)라고 한다. (그림 2.) 스핀 홀 효과 발생에 의해 -x 방향 스핀을 가진 전자는 +z 방향으로 이동하고, +x 방향의 스핀을 가진 전자는 -z 방향으로 이동하여 자성체에는 -x 방향 스핀 전자만 쌓이게 된다. 즉 비자성체 층과 자성체 층이 접합 구조를 이루고 있을 때 계면 단위면적만큼 생성된 스핀전류가 자성체 층으로 주입되며 스핀 각운동량을 전달하게 되고 이를 통해 자성체 층의 자화를 제어할 수 있다. 하지만 이 경우 전하 전류와 스핀 전류, 스핀 분극의 방향이 서로 직교하기 때문에[9] 수직 자화를 반전시키기 위해서는 자기 대칭성을 깨뜨려 주어야 한다. 통상적으로 자기 대칭성을 깨기 위해서는 면내 외부 자기장을 인가해주어야 한다. 하지만 외부 자기장을 인가하여 자화를 반전시키는 방식은 에너지 효율성이 떨어질 뿐만 아니라 소자의 고밀도화, 고집적화에 있어 큰 어려움이 있다.

## 2.1.2 Field-free SOT 자화 반전

Field-free SOT 자화 반전은 외부 자기장을 사용하지 않는 SOT 자화 반전을 의미한다. 통상 외부 자기장을 사용하여 자화 반전을 하게 될 경우 이를 메모리 소자 관점에서 바라보았을 때 소자 구조에서 기록 라인이 하나 추가되는 것이므로 scalability 감소, 에너지 효율성 저하 등의 치명적인 문제가 발생한다. 또한 소자의 크기가 더욱 더 작아질수록 인접 셀에 미치는 영향력 또한 커질 수 있으므로 메모리 소자에서 강조되는 고집적화 또한 한계에 맞닥뜨릴 수밖에 없다. 이러한 기술의 장벽을 넘고자 외부 자기장을 사용하지 않고 자화 반전을 하고자 하는 다양한 연구 결과가 있다. [12,13,22-31,14-21]

먼저 스핀-오빗 토크를 이용하여 field-free SOT 자화 반전을 실현한 연구는 2014년 처음 발표되었다. 박막 증착 과정에서 Ta 캡핑층의 산화 정도를 췌기 형태로 두께를 조절하여 위치 별로 수직 자화의 크기를 다르게 변화시켰다. 소자 내 자기 특성이 위치별로 변화함에 따라 구조적으로 자기 대칭성이 깨지게 되었으며 이를 통해 면내 전류를 흘려주었을 때 유효 자기장이 생성되었다. 외부 자기장 인가 없이 자기 대칭성 파괴를 통해 생성된 유효 자기장을 이용해 처음으로 field-free 수직 자화 반전을 구현한 연구 결과이다. 이 외에도 자기 다층 구조에서의 반강자성체 또는 다층간 결합을 통한 교환 바이어스에 의해 생성된 유효 자기장을 이용해 전류 유도 자화 반전에 성공한 연구 결과가 보고된 바 있다. [14,15,16,17] 앞서 언급한 연구 사례 외에도 계면에서의 스핀 세차 메커니즘을 이용한 강자성/비자성/강자성 삼중층 구조에서의 field-free 수직 자화 반전 성공 결과 [18,19,22,24], 레이저를 이용한 국부적인 가열로 변화시킨 측면 구조 특성을 통한 수직 자화 전환 [27] 등 다양한 연구 결과가 발표되었다.

하지만 이렇게 다양한 방법을 이용해 구현한 field-free 자화 반전 결과 보고에도 불구하고 유효 자기장과 z-성분 스핀 전류를 생성하기 위해 추가한 여러 스택들[27]은 소자의 구조를 더욱 더 복잡하게 만들 뿐 아니라 레이저의 파장이 수십 나노 미터 크기인 스핀트로닉스 소자 내 근본적인 장애물로 작용할 수 있다. 또한 이러한 방법들 중 대부분은 비관습적인 소자 형태를 이용한 것이며 소자 내에 인위적으로 비대칭을 구현하는 것은 아직 산업적으로 적용하기에는 걸림돌로 작용하는 기술적 부분이 많다. 이처럼 아직까지 산업과 접목시키기에 제조 비용이 높을 뿐만 아니라 공정 과정에서의 까다로움이 존재하기 때문에 효율성을 높이기 위한 최적화 과정이 필요한 상황이다.

## 2.2 페리자성 (Ferrimagnetism)

### 2.2.1 페리자성의 개념 및 특성

페리자성체는 인접한 자화가 반강자성체처럼 반 평행하게 정렬되어 있으나, 두 자화의 크기가 다르기 때문에 전체적으로 자화의 총합이 존재하는 물질이다. 이는 원자의 두 가지 하부 격자는 반강자성체와 유사하게 역평행하게 정렬되지만 순 자기 모멘트가 0이 아닌 물질의 특성으로 인해 반대 모멘트가 서로 상쇄되지 않아 자발 자화가 발생한다는 의미이다. 자발 자화가 발생함에 따라 페리자성체는 퀴리 온도 (Curie temperature) 이하의 온도에서 강자성체와 유사하게 자발적인 자기성을 나타내게 되며 퀴리 온도 이상의 온도에서는 무질서한 정렬 상태의 상자성 특성을 보인다. (그림 5.)

페리자성체는 자기 모멘트의 배열과 이를 구성하는 금속 재료의 유형, 결정 구조 및 미세 구조 처리에 따라 달라지는 온도에 따른 자기특성의 의존성에 따라 강자성체 및 반강자성체와 구별된다. 이는 다시 말해 페리자성체를 구성하고 있는 희토류 금속과 전이 금속의 비율을 조절하거나 측정 온도를 조절함으로써 각각의 자기 모멘트의 크기를 조절할 수 있다는 장점이 있어 반강자성체가 갖고 있는 장점과 강자성체가 갖고 있는 장점을 둘 다 이용할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 특성으로 인해 페리자성 물질은 전자의 스핀을 쉽게 전환하고 자화하는 능력을 활용하는 하드 드라이브와 같은 비휘발성 메모리 장치에 다양하게 적용되며 전기적으로 절연 되어있는 특성으로 인해 고주파 장치에도 널리 사용된다.

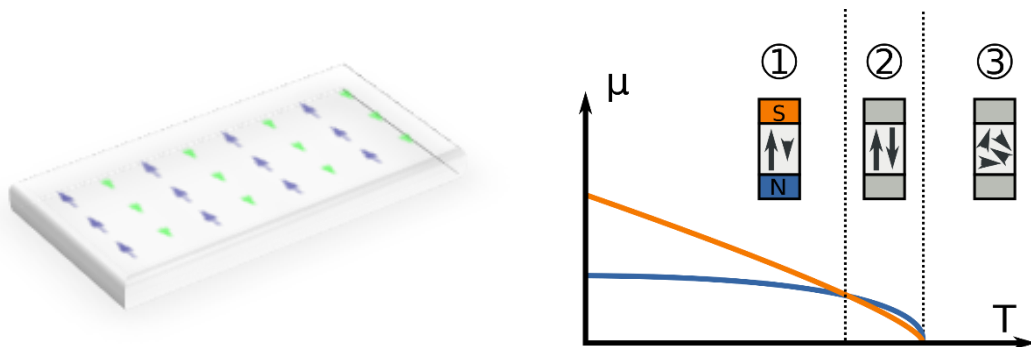


그림 2. 페리자성체의 자기 모멘트 배열

### 2.2.2 온도 자화 보상점 ( $T_M$ )

페리자성체에는 퀴리 온도 (Curie temperature,  $T_C$ ) 이하에서 두 가지 하부격자의 자기 모멘트 크기가 같아져 인접 자화가 0 이 되고 이에 따라 순 자기 모멘트가 0 이 되는 온도 지점이 존재한다. 이를 온도 자화 보상점 (Magnetization compensation temperature,  $T_M$ ) 이라 정의하며 이러한 보상점의 개념은 자기 메모리 소자내 고속 자계 반전을 달성하기 위한 임계점으로 작용하기도 한다. 온도 자화 보상점은 두 하부격자 자화의 서로 다른 온도 의존성 특성의 결과이며 반 평행하게 정렬하고 있는 두 자화의 크기가 동일해져 서로 상쇄되는 지점을 의미한다. 온도 자화 보상점 아래에서 페리자성체는 하나의 하위 격자가 다른 하위 격자보다 우세한 자기 모멘트를 가지게 되므로 강자성 특성을 나타내게 된다. 이러한 온도 자화 보상점은 같은 물질일지라도 합금의 구성 비율 조절 및 증착 조건에 따라서도 달리 변할 수 있다.

실제로 이러한 보상점에서 흥미로운 현상들이 많이 일어나는데 GdFeCo, FeCo 페리자성 소자에서 자화의 총합이 0 이 되는 온도 자화 보상점  $T_M$  과 각운동량의 총합이 0 이 되는 각운동량 보상점인  $T_A$  (Angular momentum compensation point)가 다른 특성을 이용하여 자구벽 (domain wall)의 속도를 측정 한 연구 보고가 있다. 본 연구에서는 헬륨 이온 조사 기술을 이용해 GdCo 페리자성 소자의 온도 자화 보상점을 포함한 다양한 페리자성 특성을 제어하고자 하였다.

## 2.3 헬륨 이온 조사법

정보 저장 기술에 있어 자성체의 나노 패터닝은 아주 중요한 기술이라고 할 수 있다. 그림 7. 은 본 연구의 핵심 기술인 헬륨 이온 조사법을 실시하기 위해 이용한 헬륨 이온 현미경 시스템 (Helium ion microscope, HIM)으로 DGIST 중앙기기센터에 있으며 정식 명칭은 ORION NanoFab 이다. 헬륨 이온 현미경 시스템은 헬륨 이온 빔 기술을 사용하는 시각화 기술 중 하나로 헬륨 이온의 높은 밝기와 짧은 De Broglie 파장 등과 같은 다양한 특성으로 인해 이미지 해상도는 나노 미터 수준에 이른다. [32-35] 헬륨 이온 빔 기술은 집속 이온빔 기술처럼 패터닝에도 활용할 수 있으며 이를 이용하면 자성체 시료에 수십 나노 미터 수준의 패턴 또한 가능하다.



그림 3. 헬륨 이온 현미경 시스템 (Helium ion microscope, HIM)

헬륨 이온을 이용하는 방법 외에도 다양한 이온을 이용한 이온 조사법[36-38]이 존재하나 (Ga, Ar, PH<sub>3</sub>, AsH<sub>3</sub> 등) 조사되는 이온의 상대적으로 큰 질량으로 인해 발생하는 강한 운동 에너지 때문에 얇은 박막의 경우 손상을 피하기 어렵다. 헬륨 이온 조사법은 다른 이온들에 비해 상대적으로 질량이 가벼운 헬륨 이온을 사용하므로 시료의 손상을 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

그림 8. 은 헬륨 이온 현미경 시스템 내부의 개략도를 나타낸 것이다. 먼저 현미경 내부의 Cryogenically cooled source tip 에 가속 전압을 인가하게 되면 헬륨 가스가 반응하며

팁 말단의 나노미터 영역에서 헬륨 이온들이 발생하게 된다. 이후 발생한 헬륨 이온들을 추출 후 수십~수백 keV 에너지로 가속하여 이온빔을 만들고 이를 집속시켜 시료에 주입하는 방식이 바로 헬륨 이온 빔 기술이다. 이러한 헬륨 이온 빔 기술을 이용한 헬륨 이온 패터닝은 비파괴적인 방법으로 리소그래피 공정 기술 없이 사용 가능하며 나노미터 이하 크기의 이온 프로브 덕분에 나노 구조의 이미징과 제작 공정이 가능하다는 장점이 있다.

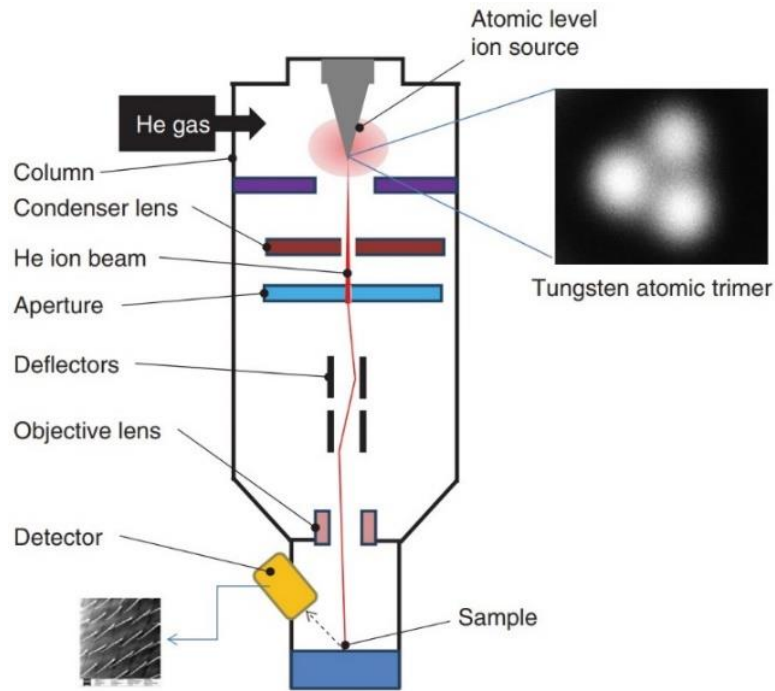


그림 4. 헬륨 이온 현미경 시스템과 개략적인 모식도

또한 헬륨 이온빔 기술을 이용하여 자성 박막에 헬륨 이온 조사를 하게 될 경우 이온이 주입된 박막 영역의 자기적 특성이 변화한다. [39-43] 이는 헬륨 이온 조사법을 통해 자성체에 비파괴적으로 패터닝을 할 수 있을 뿐만 아니라 동시에 자성체의 자기적 특성을 국부적으로 제어할 수 있음을 의미한다.



## 2.4 연구 목표

메모리 소자 개발에 있어 자화의 제어는 스핀을 이용하는 스핀트로닉스의 필수 요소이다. 비자성/강자성 이중구조에 전류를 인가하면 계면에서의 스핀-오빗 상호작용에 의해 토크가 발생하게된다. 이러한 스핀-오빗 토크는 MRAM 을 포함한 다양한 스핀트로닉스 소자의 높은 에너지 효율성 및 빠른 동작 속도 특성들과 관련이 깊다. 이러한 자기 메모리로서의 잠재적인 응용 가능성으로 인해 최근 수년간 스핀-오빗 토크를 이용하여 자화의 방향을 제어하려는 연구가 활발히 진행되어왔다.

본 연구의 목표는 헬륨 이온 조사 기술을 통해 외부 자기장 인가 없이도 전류만을 이용해 자성층의 수직 자화를 반전시키는 것이다. 연구에서 사용된 페리자성 합금물질의 경우 이를 구성하고 있는 희토류 금속과 전이 금속의 구성 비율을 조절하거나 측정 온도를 조절함으로써 각각의 자기 모멘트의 크기를 다르게 조절할 수 있다는 보상점과 관련된 페리자성 고유의 특성이 존재한다. 먼저 여러 조건을 바꿔가며 헬륨 이온 조사를 수행함으로써 다양한 자성 박막의 보자력, 자기 이방성 등과 같은 자기적 특성의 변화를 확인하고자 하였다. 이후 페리자성 소자 내부의 특정 영역에 여러 차례 헬륨 이온 조사를 실시하여 자성 박막의 특성을 국부적으로 제어할 수 있음을 확인하고자 하였다. 이후 지속적인 헬륨 이온 조사를 통해 최적화한 조사 조건을 동일 소자에 적용함으로써 소자의 자기 구조적 대칭성 파괴를 구현하고 최종 목표인 field-free SOT switching 현상을 관측하고자 하였다.

### III. 실험 방법

### 3.1 측정 시편 구조

연구에 사용된 시편은 Si/SiN<sub>x</sub> (200 nm)/Ta (1 nm)/Pt (5 nm)/Gd<sub>24</sub>Co<sub>76</sub> (5 nm)/Ta (3 nm) 구조로 수직 자기 이방성 특성을 갖는 페리자성 박막이다. d.c. 마그네트론 스퍼터링 기술을 이용하여 먼저 Si/SiN<sub>x</sub> 기판 위에 페리자성체의 수직 자기 이방성 특성을 얻기 위한 하부전극으로 Pt 층을 증착하였고, 이후 Gd<sub>24</sub>Co<sub>76</sub> 페리자성합금을 증착하기 위해 co-스퍼터링 기술을 이용하였다. (그림 9.) 증착 이후 박막은 마이크로-라이터 장비를 이용한 리소그래피 공정을 거쳐 더블 홀 바 형태의 소자로 제작하였다. 소자의 더블 홀 바 패턴은 μm 규모로 length 는 60, 80, 100, 120 μm 로 다양하며 width 은 20 μm 로 고정하였다. 그림 10. 은 MOKE 현미경을 이용하여 Gd<sub>24</sub>Co<sub>76</sub> 소자의 더블 홀 바 영역을 관측한 이미지이다. 전기적 측정을 위한 소자의 전극은 150 nm 두께의 Ru 을 증착하였으며 완성된 소자는 헬륨 이온 현미경 (ORION NanoFab) 시스템을 통해 다양한 조건으로 헬륨 이온 조사되었다.

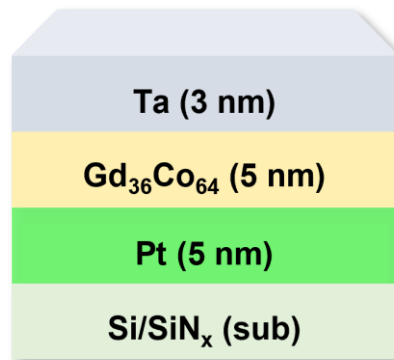


그림 5. 헬륨 이온 조사 실험에 사용되는 시편 구조

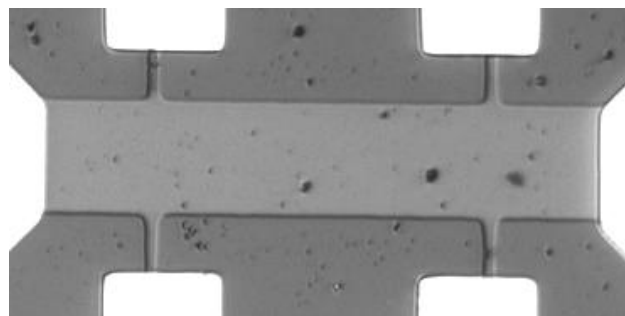


그림 6. MOKE 현미경을 통해 관측한 헬륨 이온 조사 실험에 사용된 소자의 더블 홀 바 영역

## IV. 실험 결과

## 4.1 페리자성 소자에 적용한 헬륨 이온 조사 기술

### 4.1.1 다양한 단일 조건에서의 헬륨 이온 조사

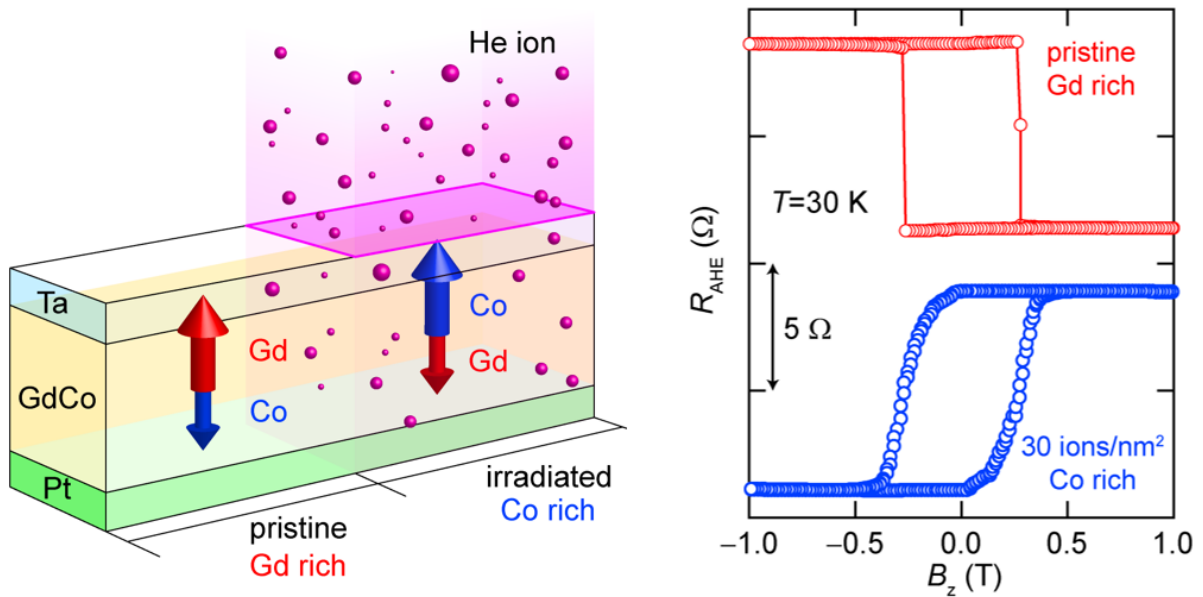


그림 2. 헬륨 이온 조사 유무에 따른 자기적 특성의 변화

본 연구에서 논의된 모든 자성 소자들은 헬륨 이온 조사 이후 소자의 자기적 특성이 조사 영역에 한해 국부적으로 변화할 수 있음을 보여준다. (그림 11.) 헬륨 이온 조사 기술에서 변수로 설정할 수 있는 조건은 가속 전압, 단위면적당 주입되는 헬륨 이온의 양인 이온 도즈량, 빔 전류, 패턴의 형태 및 크기 등 다양하다. 연구 초기 시료를 파괴하지 않는 적정선에서 자기적 성질을 변화시킬 수 있는 적합한 조사 조건을 찾고자 가속 전압을 바꾸거나 이온 도즈량을 바꾸는 등 다양한 조건에서의 이온 조사를 진행하였다. 여러 조건에서 이온 조사를 진행하고 이후 변화한 특성에 대한 결과를 분석하는 과정을 반복하여 헬륨 이온 조사 조건을 최적화할 수 있었다. 최적화한 조건을 기반으로 하여 연구 중 후반부부터 모든 이온 조사에서의 가속 전압 조건은 20 kV 로 고정하였다. 이는 가속 전압이 너무 높을 경우 시료의 가장자리인 edge 부분이 부풀어오르는 등의 이상 현상을 원자력 현미경(Atomic Force Microscopy, AFM)을 통해 관측하였기 때문이다.

소자의 단위면적당 주입되는 헬륨 이온의 양인 이온 도즈량을 조사 조건에서 변수로 설정하였을 때 자기적 특성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보하고자 10, 20, 30, 40, 50

ions/nm<sup>2</sup> 로 다양한 이온 도즈 조건을 설정하였다. 표 2. 는 단일 헬륨 이온 조사 조건에 대한 표를 나타낸 것으로 anomalous Hall effect (AHE) 측정을 하기위해 모두 Gd<sub>24</sub>Co<sub>76</sub> 페리자성 소자의 더블 홀 바 영역에 조사하였다. 20 kV의 가속전압 조건에서 가속된 헬륨 이온은 GdCo 페리자성 소자 스택을 통과하며 패턴으로 설정된 영역의 자기적 특성을 국부적으로 변화시킨다. 이온 조사 이후 진행한 AHE 측정을 통해 GdCo 페리자성 소자의 보자력, 수직 자기 이방성 등의 자기적 특성이 조사한 이온 도즈량에 따라 각기 다르게 변화하는 것을 확인하였다. 그림 12. 는 이온 조사 이후 같은 소자임에도 불구하고 조사한 이온 도즈량의 차이에 따라 소자의 자기적 특성이 각각 다르게 변화한 것을 보여준다. 이온 조사를 하지 않은 pristine 소자는 약 ~50 Oe 정도의 보자력 특성을 보이며 측정된 자기 이력 곡선의 개형을 보았을 때 수직 자기 이방성 (perpendicular magnetic anisotropy, PMA) 특성이 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 조사한 이온 도즈량이 증가할수록 소자의 보자력은 점차적으로 감소하는 경향성을 보이며 수직 자기 이방성 특성 또한 감소하는 개형을 보인다.

표 2. 단일 헬륨 이온 조사 조건에 대한 표

<b>Simple pattern</b>	
<b>He ion dose (ions/nm<sup>2</sup>)</b>	<b>Acc V</b>
10 ions/nm <sup>2</sup>	20.0 kV
20 ions/nm <sup>2</sup>	20.0 kV
30 ions/nm <sup>2</sup>	20.0 kV
40 ions/nm <sup>2</sup>	20.0 kV
50 ions/nm <sup>2</sup>	20.0 kV

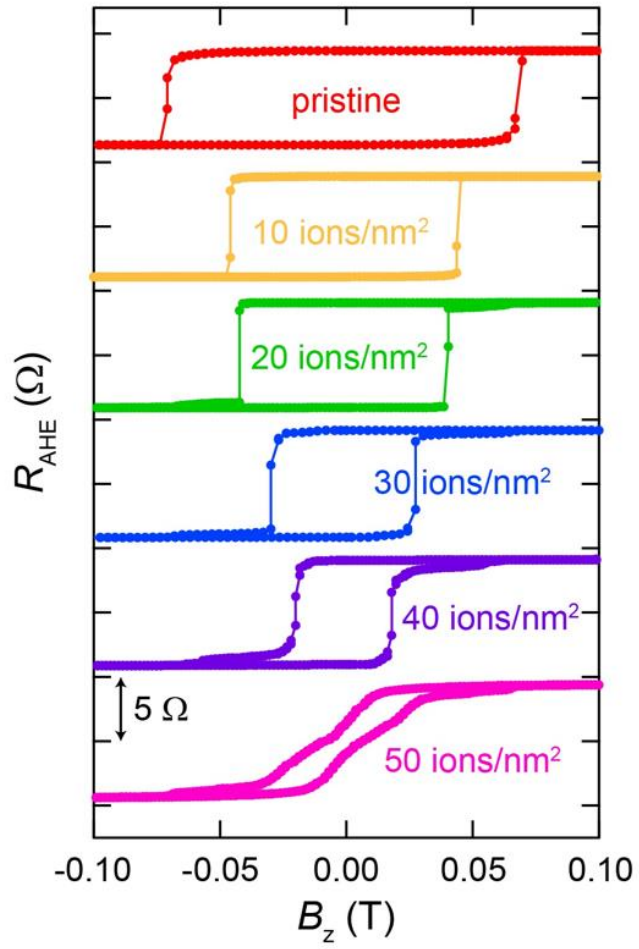


그림 3. 조사하는 헬륨 이온 도즈량에 따라 다르게 변한 소자의 자기적 특성

### 4.1.2 Dose gradient 형태의 이온 조사

먼저 다양한 단일 조사 조건에서의 선행 연구를 통해 조사하는 이온 도즈량에 따라 다르게 변화하는 소자의 자기적 특성을 확인한 바 있다. 이후 동일한 소자의 더블 홀 바 전체 영역에  $\mu\text{m}$  규모의 dose gradient 패턴을 생성하였다. Dose gradient 패턴을 생성하기 위해 직사각형 모양의 더블 홀 바 중앙 영역을 5 등분하여 각각 다른 이온 도즈량의 조건으로 조사하였다. 그림 13. 은 헬륨 이온 조사로 인가한 dose gradient 패턴의 영역을 보여주며 영역을 개별적으로 설정하여 다르게 이온 조사가 이루어졌음을 나타낸다. 이온 도즈량의 세밀한 조절을 통해 생성한 dose gradient 패턴들은  $10 \text{ ions/nm}^2$  부터  $50 \text{ ions/nm}^2$  까지  $10 \text{ ions/nm}^2$  씩 차이를 둔 조건과  $5 \text{ ions/nm}^2$  부터  $25 \text{ ions/nm}^2$  까지  $5 \text{ ions/nm}^2$  씩 차이를 둔 두 가지 조건을 기반으로 한다. 표 3. 에서 확인 가능하듯이 모든 dose gradient 패턴의 이온 조사는  $20 \text{ kV}$  가속전압에서 수행하였다.

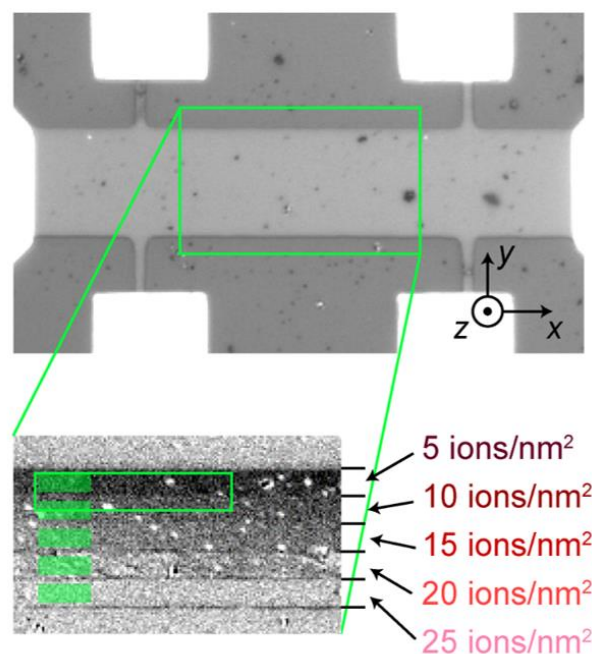


그림 9. 헬륨 이온 조사로 인가한 dose gradient 패턴



표 3. Dose gradient 헬륨 이온 조사 조건에 대한 표

### Dose gradient pattern

He ion dose (ions/nm <sup>2</sup> )	Acc V
<b>10 / 20 / 30 / 40 / 50 ions/nm<sup>2</sup></b>	20.0 kV
<b>5 / 10 / 15 / 20 / 25 ions/nm<sup>2</sup></b>	20.0 kV

Dose gradient 패턴을 생성한 이후 변화한 소자의 영역별 특성을 관측하기 위해 MOKE 현미경을 이용해 수직 자기장 ( $B_z$ )을 sweep 하며 자기이력곡선 측정을 수행하였다. 동일한 소자 내의 홀 바 영역을 나누어 다른 조건으로 이온 조사한 것이기 때문에 MOKE 현미경을 이용한 광학적 detecting 방법을 통해 영역별 특성을 확인할 수 있다. 앞서 확인한 단일 조사 조건에서의 경향성과 동일하게 낮은 도즈량 조건에서 보다 비교적 높은 도즈량으로 조사한 영역은 PMA 특성이 감소한 것을 관측하였다. (그림 14. ) 이는 헬륨 이온 조사 기술의 국부적인 자성 특성 제어 특성이 위와 같이 소자 내 굉장히 작은 규모로도 적용될 수 있음을 의미한다.

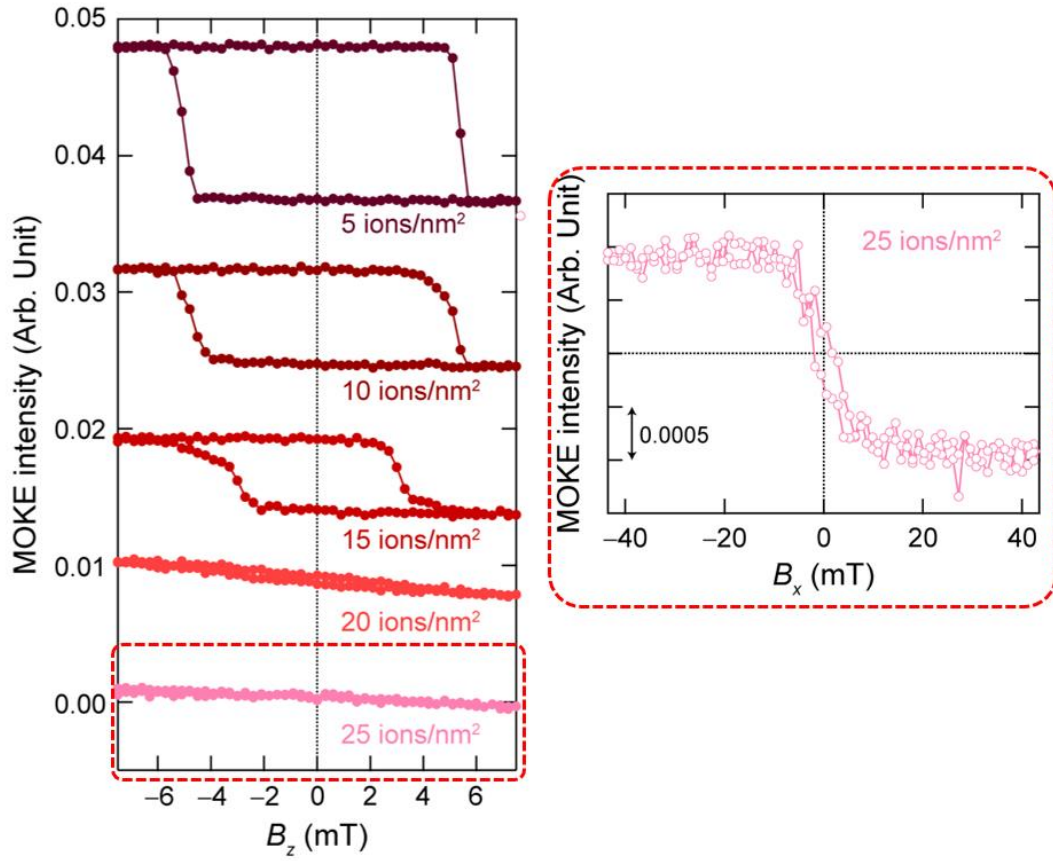


그림 10. Dose gradient 패턴 생성 이후 패턴 내 영역별로 변화한 페리자성소자의 PMA 특성

## 4.2 헬륨 이온 조사 이후 변성된 페리자성 소자 특성 평가

본 연구의 헬륨 이온 조사 과정에서 가속된 헬륨 이온은 소자 스택을 빠르게 통과하며 GdCo 페리자성층의 자기적 특성을 국부적으로 변화시킨다. 이온 조사 이후 변화한 자기적 특성을 실험적으로 확인하기 위해 먼저 모든 소자에 대해 다양한 온도에서 anomalous Hall effect (AHE) 측정을 수행하였다. AHE 저항  $R_{\text{AHE}}$  은 상온인 300 K 에서부터 극저온인 2 K 까지 측정 온도를 변화시키며 외부 수직 자기장 ( $B_z$ )을 sweep 하여 측정하였다. GdCo 페리자성층의 보자력 ( $B_c$ )이 온도 자화 보상점 ( $T_M$ ) 부근까지 지속적으로 증가하다가  $T_M$  지점에서 발산하고 이후 관측되는  $R_{\text{AHE}}$  저항 부호 반전 현상을 통해 GdCo 페리자성 소자의  $T_M$  을 추측할 수 있다. [45] 그림 15. 에서 pristine 소자는 80~40 K 부근에서  $R_{\text{AHE}}$  저항 부호 반전 현상이 일어나고 40 K 이후 측정 온도가  $T_M$  보다 낮아지면서부터 보자력은 지속적으로 감소하는 경향성을 보인다.

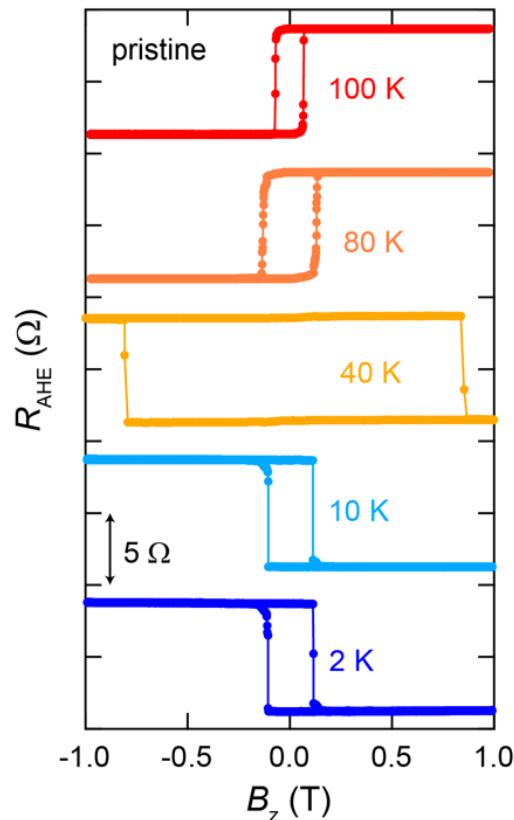


그림 4. pristine 소자에 대한 다양한 온도에서의 anomalous Hall effect 측정 결과

이는 페리자성 특성 중 하나인 온도 자화 보상점과 관련되어 나타나는 현상으로 이온 조사를 진행한 모든 소자에 대해 앞과 동일한  $R_{AHE}$  측정을 진행하였다. 그림 16. 의 좌측 그래프에서 확인할 수 있듯이 측정 온도  $T$  에 따라 변화하는  $B_C$  를 측정하여 유도선을 그려 소자마다 다른  $B_C$  의 발산 지점과 AHE 부호 반전이 관측되는 온도 구간을 확인할 수 있었다. 이후 정의된 온도 자화 보상점,  $T_M$  을 이온 조사 도즈량과 비교해 plot 한 결과 조사 도즈량에 따라  $T_M$  이 감소하는 경향성을 확인하였다. (그림 16. 우측) 이는 헬륨 이온 조사를 이용하면 페리자성 특성인 온도 자화 보상점 또한 제어 가능하다는 것을 의미하며 이는 또한 자화의 크기를 용이하게 조절할 수 있음을 나타낸다.

이온 조사 조건 중 10, 20, 30 ions/nm<sup>2</sup> 조건에서는 소자의 수직 자기 이방성 특성을 완전히 잃지는 않았으며  $T_M$  이 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었지만 높은 dose 량으로 조사한 40, 50 ions/nm<sup>2</sup> 조건의 소자에서는  $T_M$  을 확인할 수 없었다. 이를 통해 조사에 있어 이온 도즈량을 적절히 선택하여 수직 자기 이방성을 잃지 않아야 온도 자화 보상점 등의 자기적 특성의 제어가 효과적으로 가능하다는 것을 확인하였다.

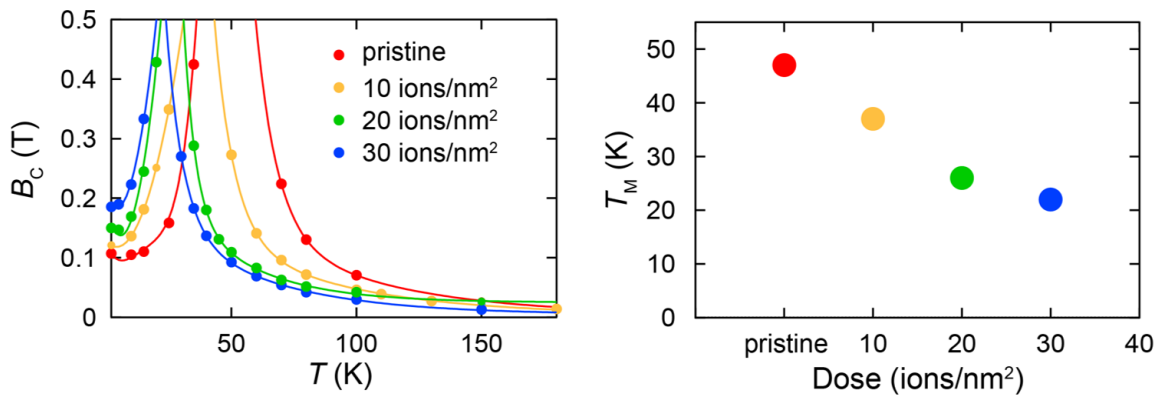


그림 5. 헬륨 이온 조사를 이용한 온도 자화 보상점,  $T_M$  의 제어

### 4.3 MOKE 현미경을 이용한 스위칭 실험

먼저 MOKE(Magnetic Optical Kerr effect) 현미경을 이용한 측정기술은 Kerr 효과를 이용한 광학적 측정 방법으로 시편에 편광된 빛을 입사시켰을 때 자화의 방향에 따라 다르게 반사되는 신호를 읽어 시편의 자화 상태를 판단하는 측정 방법이다.

Kerr 효과란 빛이 시료의 자화 상태에 의해 바뀌는 현상이다. 편광된 빛이 시료에 입사하였을 때 자화의 up, down 상태에 따라 다르게 반사하게 되는데 그 정도에 따라 다르게 읽히는 신호를 통해 자화의 자구 상태를 판단할 수 있다. 이러한 MOKE 현미경을 이용한 측정 기법은 다양하다. 본 연구에서 주로 사용한 측정 기법은 polar-MOKE 측정으로 줄여서 p-MOKE 측정 기법이라고도 부른다. 이는 Polar Kerr 효과를 이용한 측정 기법으로 자기장이 입사평면 안에 있고 시료의 평면에 수직인 방향으로 놓였을 때를 의미한다. p-편광 빛을 시료에 입사하였을 때 빛의 전기장에 따른 전자의 움직임이 자기장에 의한 로렌츠 힘을 어느 방향으로 받는지를 확인하여 진행되는 방식으로 수직 자기 이방성 특성을 갖는 시료를 측정할 때 주로 쓰이는 측정 기법이다. Longitudinal Kerr 효과를 이용한 l-MOKE 측정 기법은 자기장의 방향이 시료평면 및 빛의 입사평면에 위치하고 있을 때이며 주로 수평 자기 이방성 특성을 갖는 시료 측정에 쓰인다.(그림 17.)

Name	(a) Polar	(b) Longitudinal
Geometry		
Detection	Out-of-plane	in-plane
Polarization Variation	Rotation Ellipticity	
Measurement	Polarization Analysis	

그림 6. 편광 방향에 따른 MOKE 측정 기법

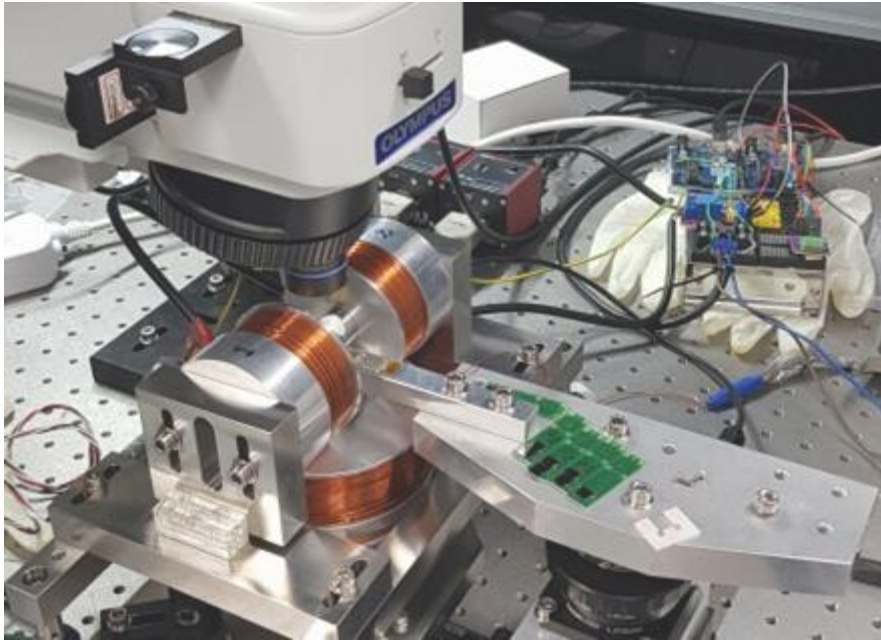


그림 7. MOKE 현미경을 이용한 측정 이미지

### 4.3.1 개선 측면 대칭 특성을 통해 관측된 Field-free SOT 스위칭

앞서 헬륨 이온 조사 기술을 통해 소자 내 자기적 특성을 국부적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 이를 응용하여  $Gd_{24}Co_{76}$  페리자성 소자의 더블 홀 바 중앙 영역에  $5\sim 25$  ions/nm<sup>2</sup> 까지 5 ions/nm<sup>2</sup> 씩 차이를 둔 다른 도즈량의 조건을 설정하여 이온 조사를 수행하였다. 그 결과 dose gradient 패턴이 생성되었고 페리 자성 특성의 변화가 y 축을 따라 일어남에 따라 측면 비대칭 특성이 구현되었다. 그림 19. 에서 보이듯 p-MOKE 측정을 통해 확인한 MOKE 이미지에서의 명암은 이온 조사 조건에 의해 페리자성 특성이 영역별로 다르게 제어됨을 나타낸다. 어두운 색일수록 PMA 특성이 강함을 나타내며 연회색 빛으로 연해질수록 PMA 특성이 약해진 것을 의미한다. 조건별로 다르게 조사된 영역을 설정하여 자기이력곡선을 측정한 결과 GdCo 페리자성 소자의 PMA 특성이 국부적으로 잘 제어된 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. PMA 특성은 5 ions/nm<sup>2</sup> 에서는 PMA 특성이 명확히 관측되는 반면, 25 ions/nm<sup>2</sup> 조건으로 조사된 영역에서는 PMA 특성은 대부분 사라지고 in-plane (IP) 특성으로 변화하였다. 이를 통해 조사하는 이온 도즈량을 조절하여 소자 내 자기적 특성을 국부적으로 제어할 수 있을 뿐 아니라 소자 내 측면 대칭을 깨뜨릴 수 있음을 알 수 있다.

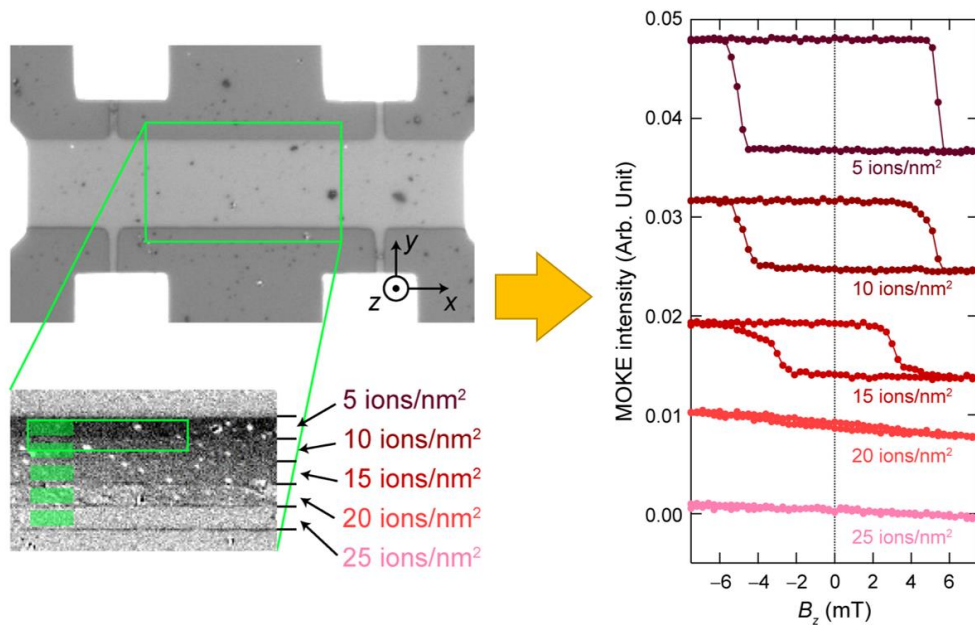


그림 8. Dose gradient 형태의 이온 조사를 통해 y 축으로 개선 페리자성 소자의 측면 대칭 특성

헬륨 이온조사를 통해 인위적으로 구현한 GdCo 페리자성 박막의 측면 대칭 파괴 특성을 통해 외부 자기장 없이 전류 유도 자화 스위칭을 관측하였다. x 축을 따라 면내 전류를 흘려주었을 때 양 방향 모두 외부 자기장 없이 수직 자화의 반전이 일어나는 것을 MOKE 현미경을 통해 관측하였다. 패턴의 하단 영역은 높은 도즈량으로 이온조사를 실시하였기 때문에 in-plane 특성으로 변화하였지만 수직 자화의 반전 현상은 이에 영향받지 않고 성공적으로 관측되었음을 볼 수 있다. [16,17] 그림 20. 에서 볼 수 있는 화살표는 20~25 ions/nm<sup>2</sup> 로 이온조사한 영역의 in-plane 특성을 나타낸다. p-MOKE 측정 기법을 통한 자기이력곡선 측정을 통해서도 전류 유도 자화 스위칭이 성공적으로 동작되었음을 확인하였다. 그림 21. 의 위 두 그래프에서 볼 수 있듯이 면내 외부 자기장  $B_x$  을 인가하며 전류 펄스를 인가한 결과 스위칭이 원활히 됨을 확인하였다. 자기장의 방향을 반대로 바꿈에 따라 그래프의 사인 또한 반대로 바뀌었으며 이를 통해 스위칭의 원천이 스핀-오빗 토크에 의한 것임을 알 수 있다. 이후 외부 자기장을 인가하지 않고 전류 펄스만을 이용한 스위칭에서도 동일한 개형의 그래프가 측정됨을 통해 field-free SOT 스위칭 구현에 성공했음을 알 수 있다. 그림 22. 는 y 축으로 깨진 측면 대칭 특성을 나타낸 모식도로 dose gradient 형태의 헬륨 이온 조사로 인해 GdCo 소자 내 대칭, 즉 symmetry 가 깨짐을 간략히 보여준다.

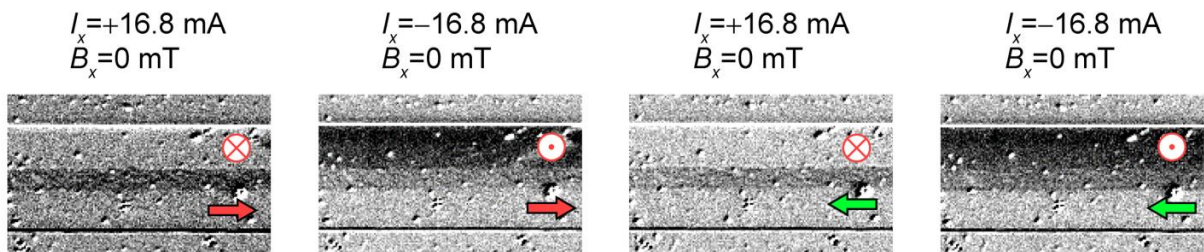


그림 16. 외부 자기장을 인가하지 않은 field-free SOT 스위칭 MOKE 이미지



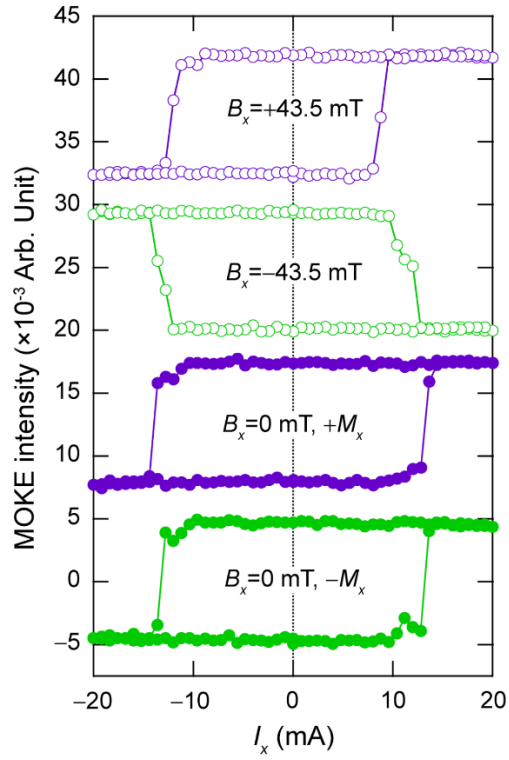


그림 17. 외부 자기장 인가 및 인가하지 않은 SOT 스위칭 그래프

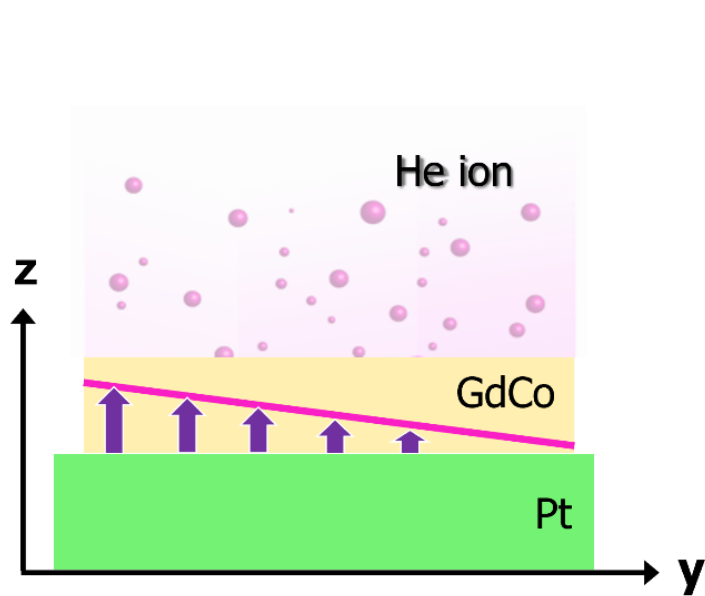


그림 18. y 축으로 깨진 측면 대칭 특성을 나타낸 모식도

### 4.3.2 깨진 측면 대칭을 통해 생성된 z-성분 스핀 전류

Field-free SOT 스위칭 현상은 자기 구조에서의 비대칭성이 형성됨에 따라 생성된 z-성분 스핀 전류인  $S_z$  성분에서 나타나는 것으로 보고된 바 있다. 아래 자기이력 곡선은 외부 자기장  $B_z$  를 인가하며  $\pm 5, 7, 9, 11, 13$  Ma 의 d.c. 전류를 흘려주며 측정한 것이다. 측정 결과 + 전류를 인가하였을 때 자기이력 곡선의 중심은  $+B_z$  로 이동하는 반면 - 전류를 인가하였을 때 자기이력 곡선의 중심은  $-B_z$  로 이동한다. [12,22,31] 이는 z-스핀 전류에서 발생하는 수직 전류 유도 유효 자기장 ( $B_z^{\text{eff}}$ )의 존재를 의미한다. 측정 결과를 분석한 결과 자기이력 곡선의 중심에 대해 다음과 같이 정의하였다.

$$B_S(I_{\text{d.c.}}) = [B_C^+(I_{\text{d.c.}}) - B_C^-(I_{\text{d.c.}})]/2$$

$$\Delta B_S(I_{\text{d.c.}}) = B_S(I_{\text{d.c.}}^+) - B_S(I_{\text{d.c.}}^-)$$

인가한 전류 크기가 증가할수록  $\Delta B_S$  또한 증가하는 경향성을 보였다. (그림 23.) 측정을 통해 Pt/GdCo/Ta 구조에서의 비대칭성 형성에 따라 z-성분 스핀 전류가 생성되었으며 이를 통해 수직 전류 유도 유효 자기장이 발생하여 수직 자화의 전환이 성공적으로 이루어진 것을 알 수 있다.

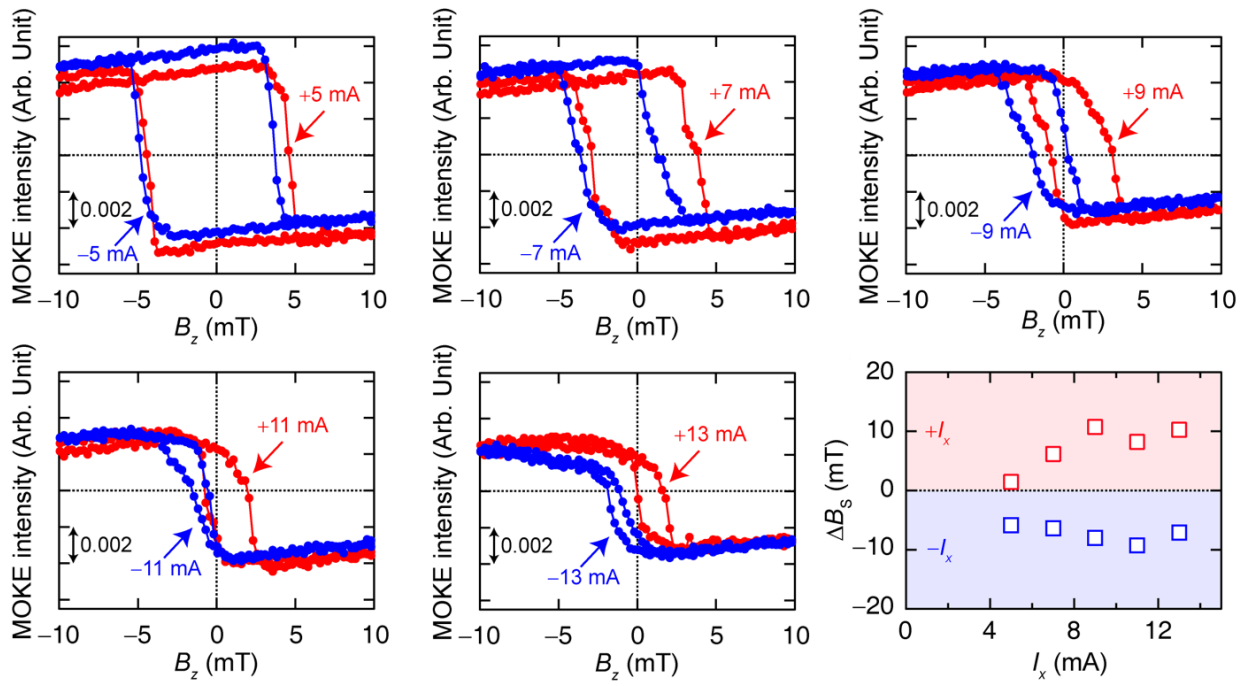


그림 19. 자기이력 곡선 중심의 이동 및  $S_z$  성분의 재현성 확인

### 4.3.3 전류와 평행한 방향으로 깨진 측면 대칭 특성

앞서 관측한 Field-free SOT 스위칭 결과를 뒷받침하기 위해 소자 내 측면 대칭 파괴 방향을 바꾸어 추가적인 실험을 진행하였다. 전류가 흐르는 방향과 평행한 x-방향으로 dose gradient 패턴을 생성하였다. 그림 24. 에서 보이는 것처럼 이전과 동일한 Pt/GdCo/Ta 소자의 더블 홀 바 중앙에 10~50 ions/nm<sup>2</sup> 의 도즈 조건을 설정하였고 이를 통해 x 축 방향으로 측면 대칭 특성이 깨지게 되었다. MOKE 현미경을 통해서도 이와 같이 깨진 대칭 특성을 명암 대비를 통해 확인할 수 있다. 이전 실험과 동일한 조건으로 외부 자기장  $B_x$  없이  $\pm 16.8$  mA 의 전류를 흘려주었을 때 field-free 스위칭은 관측되지 않는 것을 그림 25. 에서 확인할 수 있다. 이는 소자의 x 축 방향으로 전류 펄스를 인가하였을 때 이와 평행한 방향으로 좌우 대칭이 깨졌으므로 z-성분 스핀 전류가 생성되지 않음을 의미한다. 결과적으로 z-성분 스핀 전류를 생성하려면 측면 대칭 파괴 특성의 방향이 전류의 흐름과 수직한 방향이어야 함을 뒷받침하는 실험 결과이다.

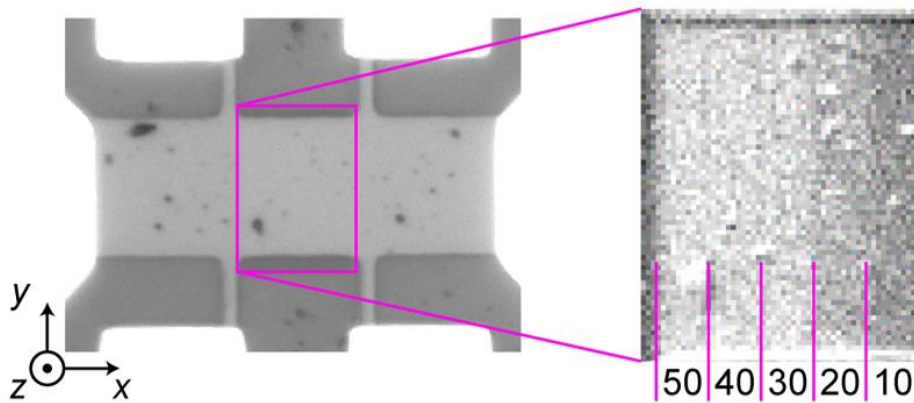


그림 9. 전류와 평행한 방향으로 대칭이 깨진 소자 개략도

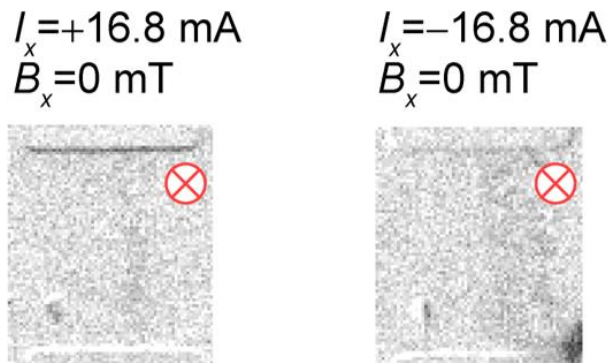


그림 21. 관측되지 않은 스위칭 MOKE 이미지

## 4.4 헬륨 이온 조사의 영향

### 4.4.1 시편의 구조 및 특성 분석

본 연구에서 GdCo 페리자성 소자의 구조에 미친 헬륨 이온 조사의 영향력을 확인하기 위해 먼저 고해상도 투과 전자 현미경 (HRTEM) 측정을 이용한 시편의 미세구조 분석을 진행하였다. 미세구조 분석 결과 이온 조사 전후 시편의 모든 구조 경계에서 별다른 변화를 확인할 수 없었다. (그림 26.) 이를 통해 헬륨 이온 조사 이후 관측된 페리자성 특성의 변화가 원자층의 확산과 같은 구조적 파괴에서 비롯된 것이 아님을 확인하였다.

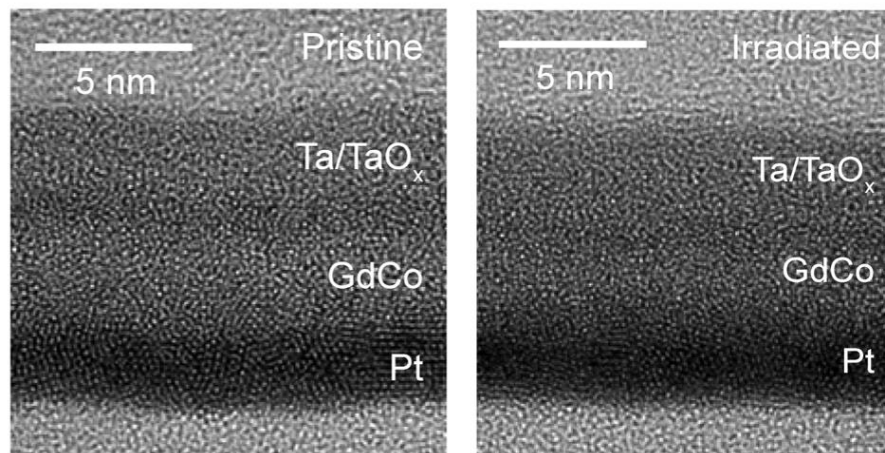


그림 22. HRTEM 측정을 통해 관측한 시편의 미세구조

이후 에너지 분산 x-선 분광법(EDS)을 이용하여 시편의 각 층별 원소 분포를 측정하고 분석하였다. 먼저 EDS 측정기법은 가속된 전자빔을 시료에 입사시켰을 때 시료 표면에서 발생하는 특성 x-선을 통해 이루어진다. 특성 x-선이란 가속된 입사 전자들에 의해 축출된 빈 자리를 외각에 있는 높은 에너지를 가진 전자가 채우게 되며 x-선으로 에너지를 방출하는 것이다. 고유 원소에 따라 x-선의 에너지 대역에 다르기 때문에 원소의 구별이 가능해진다. 이러한 측정기법을 이용한 원소별 맵핑 결과 이온 조사를 하지 않은 pristine 시편의 경우 GdCo 페리자성층의 Gd 원자(파란색)의 분포가 비교적 균일하게 나타나고 있다. 그러나 50 ions/nm<sup>2</sup> 로 이온 조사한 시편의 경우 Gd 원자의 분포에 변화가 생긴 것을 페리자성층 내 부분적으로 밀집된 구역이 형성된 것을 보고 알 수 있었다. (그림 27.) 이는 헬륨 이온 조사 당시 20 kV 의 가속전압으로 가속된 헬륨

이온의 운동 에너지 전달로 인해 GdCo 페리자성층을 구성하고 있던 Gd 과 Co 원자 분포에 변형이 일어났고 이를 통해 페리자성 특성이 변화하였음을 추측할 수 있다.

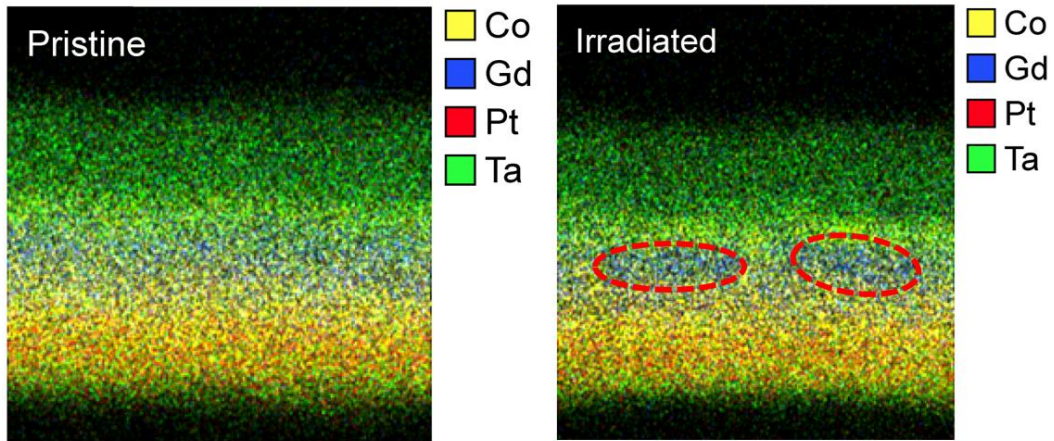


그림 10. EDS 분석을 통해 관찰한 원소 분포의 선량 의존성



그림 11. 고해상도 투과 전자 현미경 (High resolution transmission electron microscopy, HRTEM)

#### 4.4.2 SRIM 시뮬레이션

Stopping range of ions in matter (SRIM) 시뮬레이션[44]은 본 연구 결과를 실제로 나노미터 크기의 스핀트로닉스 소자, 예를 들면 MRAM 의 단위 소자인 자기터널접합 (MTJ)에 적용하고자 진행하였다. 실제로 소자 제작에 있어 이온 조사 시 다양한 도즈 조건을 사용하는 것은 공정과정이 까다롭고 복잡해지기 때문에 적합하지 않다. SRIM 시뮬레이션 결과는 단일 도즈 조건에서 조사 각도만을 조절하여 측면 대칭 파괴를 생성할 수 있을 보여준다. 아래 그림은 MTJ 소자로의 헬륨 이온 조사 기술을 적용하는 개략도로 전극을 쌓은 다음 포토레지스트 혹은 하드 마스크로 형성된 마스크로 패턴 될 수 있음을 나타낸다. 마스크의 높이를 약 50 nm 로 가정하였을 때 조사하는 헬륨 이온의 입사각이 80° 로 비스듬하면 그림에서처럼 좌우 대칭 파괴가 형성될 수 있다. 단일 도즈 조건이지만 각도를 기울여 조사함에 따라 이 경우 또한 좌우 대칭성이 파괴될 수 있는 것이다.

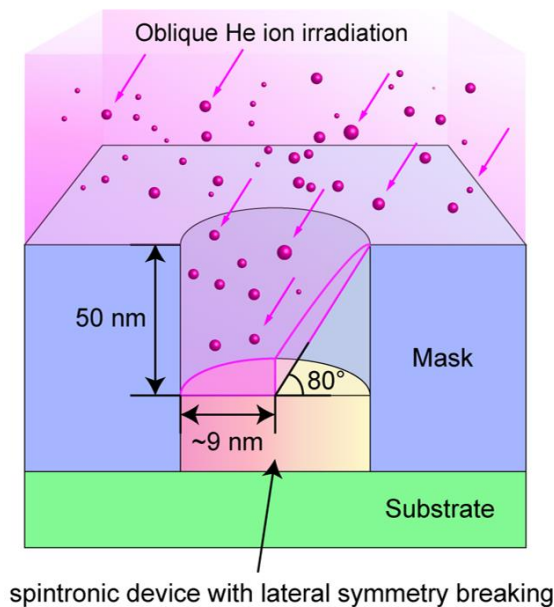


그림 12. MTJ 소자에 적용가능한 oblique-헬륨 이온 조사 기술

앞선 TEM 과 EDS 측정 및 분석 결과를 통해 헬륨 이온 조사로 인한 원자 분포의 변화를 확인할 수 있었다. 원자의 분포 변화는 측면 대칭 파괴 특성을 유도하는 핵심 요인이므로 마찬가지로 SRIM 시뮬레이션을 통해 헬륨 이온 조사로 인한 원자 분포의 변화를 확인해보았다. 시뮬레이션에서 이용한 구조는 본 연구에서 사용한 구조와 동일한

Ta (1 nm)/ Pt (5 nm)/GdCo (5 nm)/Ta (3 nm) 이다. 가속 전압 역시 실험에서와 동일한 조건인 20 kV 로 설정하였으며 아래 그림과 같이 이온의 궤적은 비스듬한 분포를 보였다.

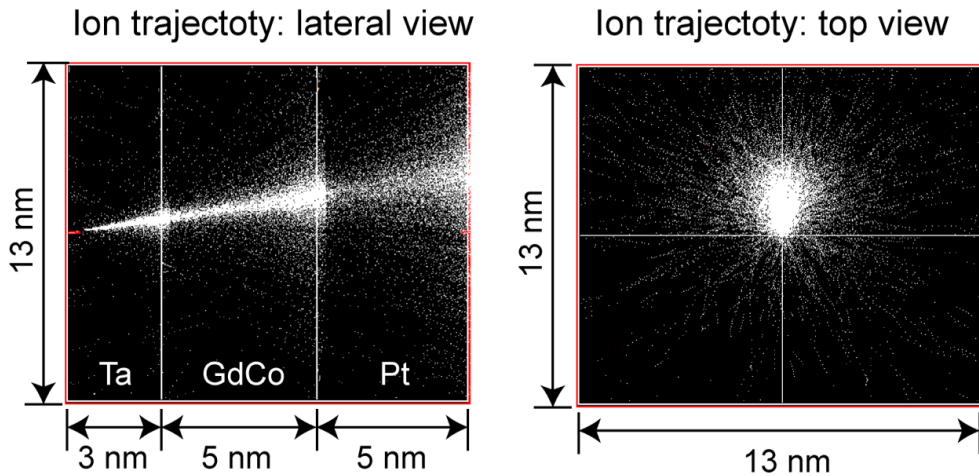


그림 26. SRIM 시뮬레이션을 통한 이온 궤적 분포도 (좌): 측면 뷰, (우): 탑 뷰

### Atomic displacement

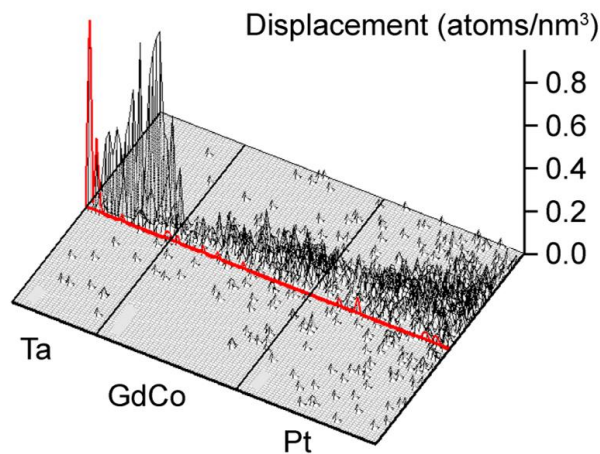


그림 27. SRIM 시뮬레이션을 통한 atomic displacement 결과

실제로 기술의 응용예를 고려해보았을 때 [마스크 높이 = 50 nm] / tan( 입사각 = 80° ) ~ 8.8 nm 이므로 자기적 특성의 gradient 변조는 9 nm 보다 약간 더 큰 범위 내에서도 이루어질 수 있음을 의미한다. 결과적으로 18 nm 길이의 SOT 기반 스핀트로닉스 소자는 소자의 절반을 조사함에 따라 측면 대칭 파괴 특성을 충분히 구현할 수 있고 이를 적용할 수 있다. 이러한 규모는 현재 반도체 공정에 적용되고 있는 CMOS 기술과 비슷하며 따라서 이러한 헬륨 이온 조사 기술을 응용하면 SOT-MRAM 을 위한 field-free 스위칭이 가능한 MTJ 소자를 제작할 수 있다.



## V. 결론

본 연구에서는 헬륨 이온 조사를 통해 측면 대칭이 깨진 GdCo 페리자성체에서의 field-free SOT 스위칭을 구현하였다. 페리자성 소자에 적용한 헬륨 이온 조사 기술은 보자력 및 온도 자화 보상점과 같은 자기적 특성을 효과적으로 제어하는 역할을 하였으며 이온 조사에 사용된 헬륨 이온은 소자의 국부적인 영역에 조사량의 조절을 통한 선택적인 조사가 가능하므로 자기적 특성을 국부적으로 변화시킬 수 있었다. 그리고 이러한 특성을 이용해 소자 내  $y$ 축으로 대칭성을 깬 측면 대칭 파괴 특성을 인위적으로 구현하였다. 소자에 대한  $x$ 축으로 전류를 흘려주었을 때  $y$ 축으로 깨진 측면 대칭 파괴 특성을 통해 생성된  $z$ -성분 스핀 전류는 외부 자기장 없이도 수직 자화의 반전을 가능하게 했다. 이러한  $z$ -성분 스핀 전류의 재현성은 인가한 전류 방향에 따른 자기이력곡선의 중심점 이동 현상을 통해 확인하였다. 이를 통해 헬륨 이온 조사로 인해 소자 내에 인위적인 측면 비대칭 특성이 구현되었고 이로 인해 생성된  $z$ -성분 스핀 전류를 통한 field-free SOT 스위칭이 구현됨을 알 수 있다. 본 연구는 이러한 측면 비대칭을 구현하는 것에 있어 이온 조사량 조건을 제어하는 것에 그치지 않으며 조사 각도를 달리하는 방법을 통해 단일 조사량 조건에서도 구현이 가능하다. SRIM 시뮬레이션 결과는 이러한 방법을 이용해 20 nm 이하 크기의 스핀트로닉스 소자에서도 측면 대칭 파괴 특성이 나타날 수 있음을 보여주었다. 이러한 연구 결과는 앞으로 스핀트로닉스 메모리 및 로직 소자를 개발하는 새로운 경로를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## VI. 참고자료

- [1] S. A. Wolf, D. D. Awschalom, R. A. Buhrman, J. M. Daughton, S. Von Molnár, M. L. Roukes, A. Y. Chtchelkanova, D. M. Treger, *Science* **2001**, 294, 1488.
- [2] I. Žutić, J. Fabian, S. Das Sarma, *Rev. Mod. Phys.* **2004**, 76, 323.
- [3] A. D. Kent, D. C. Worledge, *Nat. Nanotechnol.* **2015**, 10, 187.
- [4] S. Bhatti, R. Sbiaa, A. Hirohata, H. Ohno, S. Fukami, S. N. Piramanayagam, *Mater. Today* **2017**, 20, 530.
- [5] A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani, L. Prejbeanu, B. Diény, P. Pirro, B. Hillebrands, *J. Magn. Magn. Mater.* **2020**, 509, 166711.
- [6] I. M. Miron, K. Garello, G. Gaudin, P. J. Zermatten, M. V. Costache, S. Auffret, S. Bandiera, B. Rodmacq, A. Schuhl, P. Gambardella, *Nature* **2011**, 476, 189.
- [7] L. Liu, C. F. Pai, Y. Li, H. W. Tseng, D. C. Ralph, R. A. Buhrman, *Science* **2012**, 336, 555.
- [8] R. Ramaswamy, J. M. Lee, K. Cai, H. Yang, *Appl. Phys. Rev.* **2018**, 5, 031107.
- [9] A. Manchon, J. Železný, I. M. Miron, T. Jungwirth, J. Sinova, A. Thiaville, K. Garello, P. Gambardella, *Rev. Mod. Phys.* **2019**, 91, 035004.
- [10] J. Ryu, S. Lee, K.-J. Lee, B.-G. Park, *Adv. Mater.* **2020**, 32, 1907148.

- [11] C. Song, R. Zhang, L. Liao, Y. Zhou, X. Zhou, R. Chen, Y. You, X. Chen, F. Pan, *Prog. Mater. Sci.* **2021**, *118*, 100761.
- [12] G. Yu, P. Upadhyaya, Y. Fan, J. G. Alzate, W. Jiang, K. L. Wong, S. Takei, S. A. Bender, L. Te Chang, Y. Jiang, M. Lang, J. Tang, Y. Wang, Y. Tserkovnyak, P. K. Amiri, K. L. Wang, *Nat. Nanotechnol.* **2014**, *9*, 548.
- [13] L. You, O. J. Lee, D. Bhowmik, D. Labanowski, J. Hong, J. Bokor, S. Salahuddin, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **2015**, *112*, 10310.
- [14] S. Fukami, C. Zhang, S. Dutttagupta, A. Kurenkov, H. Ohno, *Nat. Mater.* **2016**, *15*, 535.
- [15] Y.-W. Oh, S.-h. C. Baek, Y. M. Kim, H. Y. Lee, K. D. Lee, C. G. Yang, E. S. Park, K. S. Lee, K.-W. Kim, G. Go, J.-R. Jeong, B. C. Min, H.-W. Lee, K.-J. Lee, B.-G. Park, *Nat. Nanotechnol.* **2016**, *11*, 878.
- [16] Y. C. Lau, D. Betto, K. Rode, J. M. D. Coey, P. Stamenov, *Nat. Nanotechnol.* **2016**, *11*, 758.
- [17] A. Van Den Brink, G. Vermeij, A. Solignac, J. Koo, J. T. Kohlhepp, H. J. M. Swagten, B. Koopmans, *Nat. Commun.* **2016**, *7*, 1038.
- [18] V. P. Amin, M. D. Stiles, *Phys. Rev. B* **2016**, *94*, 104419.
- [19] V. P. Amin, M. D. Stiles, *Phys. Rev. B* **2016**, *94*, 104420.
- [20] D. MacNeill, G. M. Stiehl, M. H. D. Guimaraes, R. A. Buhrman, J. Park, D. C. Ralph, *Nat. Phys.* **2017**, *13*, 300.

- [21] K. Cai, M. Yang, H. Ju, S. Wang, Y. Ji, B. Li, K. W. Edmonds, Y. Sheng, B. Zhang, N. Zhang, S. Liu, H. Zheng, K. Wang, *Nat. Mater.* **2017**, *16*, 712.
- [22] S.-h. C. Baek, V. P. Amin, Y.-W. Oh, G. Go, S.-J. Lee, G.-H. Lee, K.-J. Kim, M. D. Stiles, B.-G. Park, K.-J. Lee, *Nat. Mater.* **2018**, *17*, 509.
- [23] Q. Ma, Y. Li, D. B. Gopman, Y. P. Kabanov, R. D. Shull, C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.* **2018**, *120*, 117703.
- [24] Y.-W. Oh, J. Ryu, J. Kang, B.-G. Park, *Adv. Electron. Mater.* **2019**, *5*, 1900598.
- [25] W. J. Kong, C. H. Wan, X. Wang, B. S. Tao, L. Huang, C. Fang, C. Y. Guo, Y. Guang, M. Irfan, X. F. Han, *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 233.
- [26] P. Song, C. H. Hsu, G. Vignale, M. Zhao, J. Liu, Y. Deng, W. Fu, Y. Liu, Y. Zhang, H. Lin, V. M. Pereira, K. P. Loh, *Nat. Mater.* **2020**, *19*, 292.
- [27] Y. Cao, Y. Sheng, K. W. Edmonds, Y. Ji, H. Zheng, K. Wang, *Adv. Mater.* **2020**, *32*, 1907929.
- [28] M.-G. Kang, J.-G. Choi, J. Jeong, J. Y. Park, H.-J. Park, T. Kim, T. Lee, K.-J. Kim, K.-W. Kim, J. H. Oh, D. D. Viet, J.-R. Jeong, J. M. Yuk, J. Park, K.-J. Lee, B.-G. Park, *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 1038.
- [29] H. Wu, J. Nance, S. A. Razavi, D. Lujan, B. Dai, Y. Liu, H. He, B. Cui, D. Wu, K. Wong, K. Sobotkiewich, X. Li, G. P. Carman, K. L. Wang, *Nano Lett.* **2021**, *21*, 515.

- [30] Z. Zheng, Y. Zhang, V. Lopez-Dominguez, L. Sánchez-Tejerina, J. Shi, X. Feng, L. Chen, Z. Wang, Z. Zhang, K. Zhang, B. Hong, Y. Xu, Y. Zhang, M. Carpentieri, A. Fert, G. Finocchio, W. Zhao, P. Khalili Amiri, *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 4555.
- [31] L. Liu, C. Zhou, X. Shu, C. Li, T. Zhao, W. Lin, J. Deng, Q. Xie, S. Chen, J. Zhou, R. Guo, H. Wang, J. Yu, S. Shi, P. Yang, S. Pennycook, A. Manchon, J. Chen, *Nat. Nanotechnol.* **2021**, *16*, 277.
- [32] B. W. Ward, J. A. Notte, N. P. Economou, *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* **2006**, *24*, 2871.
- [33] R. Hill, F. H. M. Faridur Rahman, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* **2011**, *645*, 96.
- [34] M. S. Joens, C. Huynh, J. M. Kasuboski, D. Ferranti, Y. J. Sigal, F. Zeitvogel, M. Obst, C. J. Burkhardt, K. P. Curran, S. H. Chalasani, L. A. Stern, B. Goetze, J. A. J. Fitzpatrick, *Sci. Rep.* **2013**, *3*, 3514.
- [35] D. J. Maas, R. Van Gastel, *Springer Ser. Surf. Sci.* **2013**, *51*, 461.
- [36] N. Kalhor, S. A. Boden, H. Mizuta, *Microelectron. Eng.* **2014**, *114*, 70.
- [37] D. S. Fox, Y. Zhou, P. Maguire, A. O'Neill, C. Ócoileáin, R. Gatensby, A. M. Glushenkov, T. Tao, G. S. Duesberg, I. V. Shvets, M. Abid, M. Abid, H. C. Wu, Y. Chen, J. N. Coleman, J. F. Donegan, H. Zhang, *Nano Lett.* **2015**, *15*, 5307.

- [38] M. G. Stanford, P. R. Pudasaini, A. Belianinov, N. Cross, J. H. Noh, M. R. Koehler, D. G. Mandrus, G. Duscher, A. J. Rondinone, I. N. Ivanov, T. Z. Ward, P. D. Rack, *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 27276.
- [39] J. Fassbender, D. Ravelosona, Y. Samson, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **2004**, *37*, R179.
- [40] J. McCord, T. Gemming, L. Schultz, J. Fassbender, M. O. Liedke, M. Frommberger, E. Quandt, *Appl. Phys. Lett.* **2005**, *86*, 162502.
- [41] V. Parekh, D. Smith, C. E. Chunsheng, J. Rantschler, S. Khizroev, D. Litvinov, *J. Appl. Phys.* **2007**, *101*, 083904.
- [42] S. Kim, S. Lee, J. Ko, J. Son, M. Kim, S. Kang, J. Hong, *Nat. Nanotechnol.* **2012**, *7*, 567.
- [43] S. Kim, S. Lee, J. Hong, *ACS Nano* **2014**, *8*, 4698.
- [44] J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, J. P. Biersack, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* **2010**, *268*, 1818.
- [45] T. Okuno, K. J. Kim, T. Tono, S. Kim, T. Moriyama, H. Yoshikawa, A. Tsukamoto, T. Ono, *Appl. Phys. Express* **2016**, *9*, 073001.
- [46] L. Liu, O. J. Lee, T. J. Gudmundsen, D. C. Ralph, R. A. Buhrman, *Phys. Rev. Lett.* **2012**, *109*, 096602.