스핀 오비트로닉스: 스핀을 제어하는 새로운 루트

DOI: 10.3938/PhiT.27.038

김 상 훈

Spin Orbitronics: A New Route for Spin Manipulation

Sanghoon KIM

During the last three decades, three innovations have taken place in the field of spintronics from the viewpoint of magnetization control. As the first innovation, spintronics 1.0 can be regarded as an application of giant magnetoresistance (GMR) in industry. During this period, the magnetization of a device was controlled by using an external magnetic field. Opening the spintronics 2.0 era was the discovery and study of the spin transfer torque (STT) effect. When an electric current flows in a spin-valve-type nanopillar, a spin-polarized current can be generated and transfer spin angular momentum to the local magnetization of a free layer in the spin valve. During this period, the nano-fabrication and measurement techniques, especially current-induced spin dynamics, were greatly improved so as to be able to observe the STT effect. After that, current-induced magnetization switching not in a spin-valve structure that had two ferromagnet layers, but in a single ferromagnet/heavy-metal bilayer was first observed by I. M. Miron in 2011. This was the starting point of spintronics 3.0, which is a new way to control the magnetization. A key mechanism for this phenomenon is spin current generation in a ferromagnet/heavy metal system via spin-orbit coupling, namely, charge-to-spin conversion. In this manuscript, the three innovations are sequentially introduced. Especially, ways of quantifying the charge-to-spin conversion and applications of the spin orbit torque are explained using important cases.

저자약력

김상훈 교수는 자성 나노 패터닝 관련 연구로 2014년 연세대학교에서 신소재공학 학위를 받았다. 이후 2017년까지 일본 교토대학교의 화학연구소에서 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용의 미시적인 원리에 대해서 연구하였다. 현재는 울산대 물리학과에 재직 중이며 스핀과 오비탈의 수송현상에 관한 연구를 진행하고 있다. (sanghoon.kim@ulsan.ac.kr)

들어가는 글

필자가 박사과정 학생일 때 자성체를 다루는 실험물리를 하면서 동료들과 자주 하던 말이 있다. “뭐 이상한 것 있으면 스핀-오빗 상호작용으로 통치면 되는 것 같다.”라는 말이 바로 그것이다. 모든 현상이 일어나는 원인이 무엇이라는 질문에 “에너지가 안정화 되어서”라고 얼버무리는 것과 같다고 할 수 있지만, 그만큼 스핀-오빗 상호작용은 물질의 자성, 전기적 특성, 다강체 특성 등에서 가장 중요한 개념이기도 하다.

이번 호의 ‘물리학과 첨단기술의 세계’ 코너를 위해 필자는 스핀-오빗 상호작용이 전자의 흐름에 어떻게 작용할 수 있으며 어떤 물리적 발견들이 있어왔는지 소개하는 글을 쓰고자 한다. 필자는 신소재공학을 전공했지만 전자의 스핀과 관련된 연구를 진행하면서 물리학과 신소재공학에 양다리를 걸쳐왔다. 심지어 올해 물리학과에 임용이 되는 기적을 경험했다. 물리학과 첨단기술은 필자가 아주 즐겨보고 있는 잡지인데, 물리학 분야에서는 다소 돌연변이(?) 같은 필자에게 물리학과 첨단기술의 세계 원고 의뢰가 왔을 때의 그 당혹감과 얼떨떨한 기분은 이루 말할 수가 없었다. 내가 “물리학과 첨단기술”에 기고를 하다니!

스핀을 다루는 일은 재료와 관련된 공학적인 연구와 물리학이 융합되어있는 분야라고 할 수 있다. 필자는 양쪽 분야에서 약 12년간 많은 분들과 협력을 해 왔기 때문에 양쪽 모두를 아우르는 글을 쓸 수 있을 것이라 생각하였고, 혼쾌히(?) 집필을 약속하였다. 시간이 흐른 후에 감내하기 힘들 정도로 민망한 글이 될 여지가 충분하지만, 지금 이 집필 기회 자체가 필자에게는 큰 영광이라 생각하여 용기 내어 자판을 두드리기로 한 것이다. 물리학과 첨단기술의 세계는 한 연구 분야를 소개하는 글이기 때문에, 본 소개문에서는 이론적 설명을 최대한 자제하고, 잡자리 들기 전에 재미있게 읽을 수 있는 정도로 이야기를 풀어가고자 한다.

스핀의 제어와 스핀트로닉스의 진화

스핀의 실험적 관찰은 물리학도들에게는 아주 유명한 Stern-Gerlach 실험을 통해 이루어졌다. 자기장에 의해 전자의 운동방향이 갈라지는 것을 본 것이다! 그러한 스핀의 실험적 발견에도 불구하고 스핀은 고체 내에서 흐름 경우 보통 금속에서 수백 나

Fig. 1. Evolution of spintronics.

노미터의 확산길이를 가지고 있어 그 상태를 보존하기 어려웠기 때문에 측정할 수 없었다. 1980년대 이후 박막 기술의 발달로 물리적 기화 증착법(Physical Vapor Deposition)을 통해 수 나노미터의 얇은 자성 금속 박막을 만들 수 있었고, 마침내 1988년 A. Fert와 P. Grünberg의 주도로 강자성층/비자성층으로 구성된 인공 초격자에서 각 자성층의 자화 배열이 평행한가, 반평행한가에 따라 큰 저항 차이가 나타나는 현상, 즉 거대자기저항(giant magnetoresistance, GMR) 현상을 발견하면서 기존 전자 전도 현상에 스핀을 실험적으로 고려하기 시작하였다.^[1] 그림 1의 노란 상자에 묘사되었듯이 GMR을 이용하면 높은 저항과 낮은 저항이라는 두 개의 저항 상태를 구현할 수 있다. 이는 곧 GMR을 0과 1로 이루어진 디지털 신호로 활용할 수 있다는 것이며, 이로 인해 스핀과 일렉트로닉스가 합쳐진 스핀트로닉스는 이제는 다소 식상해진(?) 분야가 탄생한 것이다. 스핀트로닉스는 그동안 물리학과 첨단기술에서 여러 번에 걸쳐 소개가 되었기 때문에 본 글에서는 조금은 다른 이야기를 해보고자 한다. 필자는 GMR 현상이 발견된 80년대 후반부터 현재까지 스핀트로닉스 분야에는 그림 1과 같이 세 단계의 발전단계가 있었다고 구분하고자 한다. 1) 첫 번째 단계인 스핀트로닉스 1.0은 산업화와 관련되어 있다. GMR이라는 스핀 전도 현상의 관찰은 메모리 기술에 이용되기 시작하였고, 우리가 잘 아는 하드디스크 드라이브의 read 헤드에 활용되면서 그것의 데이터 저장능력은 폭발적으로 증가하게 된다. 이는 나노과학이 범용적으로 응용되는 대표적인 사례가 되었으며, 이에 대한 공로를 인정받아 A. Fert와 P. Grünberg는 2007년 노벨상을 받게 된다. 여담으로 A. Fert는 필자가 석사과정에 있을 때 처음 직접 대면할 수 있는 기회가 있었는데, 용기가 없어서 함께 사진을 찍거나 사인을 받지 못하였다. 당시 꽤 피곤해 보이셨는데, 학회장에서 졸고 계시던 모습을 보고 “노벨상 수상자도 사람”임을 느끼게 해주신 분이기도 하다. 아무튼 지금까지도 왕성한 연구를 하고 계시는, 정말 존경 받아 마땅한 분이라 생각한다. 2) 두 번째 단계인 스핀트로닉스 2.0은 전류에 의한 자화(magnetization) 반전이 보

고되면서 시작되었다. 1996년 J. C. Slonczewski의 스핀 전달 토크(spin transfer torque, STT) 이론이 발표되고,^[2] 곧 이어 코넬 대학의 D. Ralph 그룹의 E. B. Myers가 STT 현상에 의해 자화 반전이 일어남을 실험적으로 관측하게 된다. 외부 자기장의 인가 없이 스핀 밸브 구조인 강자성층(고정층)/비자성층 혹은 산화물/강자성층(자유층)의 자유층에 해당하는 강자성층의 자화를 제어할 수 있음을 확인한 것이다.^[3] 이는 다시 말해서 그림 1의 붉은색 박스에 나와 있는 것처럼 계면의 수직방향으로 전류를 흘릴 경우 고정층에서 분극된 스핀 전류가 자유층의 자화에 토크를 주게 되어 자유층의 자화 반전이 일어나게 되는 것을 의미한다. 이를 바탕으로 magnetic random access memory(MRAM)라는 solid state drive(SSD) 타입의 메모리 소자가 제안되게 된다. 즉, 하드디스크 드라이브가 가지고 있는 충격에 약하고, 느린 기록 및 읽기 속도라는 단점들을 극복한 새로운 형태의 비휘발성 메모리 소자가 가능하다는 것을 의미했다. 지금도 삼성, 하이닉스, 그리고 도시바와 같은 회사에서 실리콘 기반 플래시 메모리 및 dynamic random access memory(DRAM) 소자 이후의 차세대 소자 양산을 위해 MRAM 연구에 박차를 가하고 있다. 스핀 전달 토크의 활용을 위해서는 자화 동역학의 이해가 필수적이고, 또한 충분한 전류량이 필요하기 때문에 될 수 있는 한 작게, 수백 나노미터 이하의 크기를 갖는 소자를 제작해야 했다. 따라서 이 시기에는 연구자들의 나노 제작 기술과 나노소자 측정 기술이 큰 발전을 이루게 된다. 이러한 발전에 힘입어 스핀 전달 토크에 의한 GHz 신호 발생기, 전류를 이용한 자구벽 이동, 전류를 이용한 준입자인 마그논을 전달하는 소자 등의 여러 가지 응용이 제안되었고 연구되어왔다. 그리고 마침내 스페인의 ICN-CIN2에서 연구를 진행하던 I. M. Miron과 미국 코넬대학의 L. Liu와 C. F. Pai는 스핀트로닉스 3.0의 문을 열게 된다.

새로운 루트의 발견:

스핀트로닉스 3.0-스핀 오비트로닉스

스핀은 기본적으로 전자의 오비탈과 상호작용을 한다고 알려져 있다. 그래서 스핀-오비트 상호작용이 강하게 일어나는 주기율표 아랫단에 위치한 무거운 원소로 이루어진 물질에 전류를 흘

REFERENCES

- [1] M. N. Baibich, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
- [2] J. C. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater. **159**, L1 (1996); L. Berger, Phys. Rev. B **54**, 9353 (1996).
- [3] E. B. Meyer, *et al.*, Science **285**, 867 (1999).

Fig. 2. a. Direct observation of spin current.^[4] b. Illustration of SOT. Spin Hall effect and Rashba-Edelstein effect are described with the left and right figures, respectively.^[7] c. and d. SOT-induced magnetization switching with Hall detection^[5] and tunneling magnetoresistance (TMR) detection.^[6]

리면, 스핀-오빗 상호작용으로 인해 전자의 움직임은 방향이 휘게 된다. 이때 휘는 방향은 전자의 스핀 방향에 따라 나뉘게 된다. 2004년 Y. K. Kato는 GaAs 전극에 전류를 흘려 스핀 업과 스핀 다운이 양 갈래로 갈라진 현상을 직접 관측하여 보고하였다.^[4] 즉, 자기장의 인가가 없이 스핀-오비탈이 강하게 결합되어 있다면 그림 2a와 같이 전류방향에 수직한 방향으로 순수한 스핀 전류를 생성할 수 있다는 것을 증명한 결과였다. 바로 스핀 홀 효과의 직접적 관측이었다(그림 2b 왼쪽). 순수한 스핀 전류를 생성하는 원리에는 Rashba-Edelstein 효과라는 것이 있다(그림 2b 오른쪽). 이는 다음 절에서 다시 설명하도록 하겠다. 두 효과 모두 전하의 흐름으로부터 스핀 전류를 생성하기 때문에 전하-스핀 전환(charge-to-spin conversion)이라고 불린다.

2011년 ICN-CIN2의 I. M. Miron은 Pt 전극에 면 방향 전류를 흘려 그 위에 얹혀진 Co 나노 디스크의 자화 방향을 제어할 수 있음을 증명하였다.^[5] 곧이어 2012년에는 코넬 대학의 L. Liu와 C. F. Pai가 Ta 전극을 이용한 구조에서 같은 현상을 관측하여 발표하였다^[6](그림 2c, d 참조). 바야흐로 스핀트로닉스 3.0의 시대가 열린 것이다. 지난 20년간의 스핀트로닉스라는 용어에 대한 식상함 때문일까, 아니면 새로운 길을 찾았고 이는 기존의 물리와 구분되어야 한다는 것을 강조하고 싶어서였을까. 과학자들은 그 이후 스핀트로닉스라는 말 대신, 스핀-오빗 상호작용을 이용하는 것에 착안해 스핀 오비트로닉스(spin orbitronics)라는 신

조어를 만들어 사용하기 시작했다. 기존 스핀트로닉스 2.0에서 활용되던 STT의 경우 스핀분극된 전류는 대략 60%로 한정되어 있기 때문에 그 한계가 명확했던 반면, 스핀 홀 효과나 다음 절에서 설명될 Rashba-Edelstein 효과를 이용하는 경우 순수한 스핀 전류를 생성하여 자성체로 주입시키는 것이 가능했다. 주입된 스핀 전류는 자성층의 자화에 토크를 가해주고 이를 스핀-오빗 토크(spin-orbit torque, SOT) 현상이라고 한다. 스핀-오빗 상호작용에 의한 스핀 전류의 생성은 물리적인 의미와 더불어 자성체의 자화 제어의 효율성 제고 측면에서도 아주 흥미로운 주제가 되었다. 스핀-오비탈 결합에 의한 스핀 전류의 형성과 그의 활용은 앞선 스핀트로닉스 1.0과 2.0을 뛰어넘어 스핀의 활용을 응용물리

전반에 걸쳐 광범위하게 활용할 수 있는 기회를 제공하였다고 할 수 있다. 여기서는 SOT 현상을 정량적으로 측정하기 위한 그간의 노력들과 응용 사례를 소개해 보고자 한다.

SOT의 정량적 측정

1. SOT의 두 가지 요소

SOT를 사용한 자화 제어는 단순히 설명하면 다음과 같다. 기본 물질 구조는 강자성체/비자성체 박막구조이고, 비자성체의 경우 많은 스핀 전류를 형성하기 위해 스핀-오비탈 결합이 강한 Pt이나 W 같은 중(重)금속을 사용한다. 스핀-오비탈 결합의 세기는 원자번호의 네제곱에 비례한다! 전류 밀도가 대략 10^{11} A/m² 수준이 될 수 있게 강자성체/중금속 박막을 충분히 얇은 도전형태로 만든 후에 면에 평행한 방향으로 전류를 흘려주면, 스핀 홀 효과에 의해 비자성체 층에서 면에 수직인 방향으로 스핀 전류가 흐르게 된다. 따라서 생성된 스핀 전류

REFERENCES

- [4] Y. K. Kato, *et al.*, Science **306**, 1910 (2004).
- [5] I. M. Miron, *et al.*, Nature **476**, 189 (2011).
- [6] L. Liu, *et al.*, Science **336**, 555 (2012).
- [7] Aurelien Manchon, Nat. Phys. **10**, 340 (2014).

는 자성체로 주입되고, 주입된 스핀 전류에 의해 강자성체의 자화는 토크를 받게 된다. 이를 묘사한 것이 바로 그림 2b의 왼쪽 그림이다. Rashba-Edelstein 효과 역시 같은 현상을 유발한다. 강자성체/중금속 도선에 전류가 흐를 경우, 계면에서 역대칭 구조가 깨져있고 계면을 중심으로 전자밀도의 분포가 다르기 때문에 계면의 수직방향으로 유효 전기장(E_{eff})이 발생하고 그림 2b의 오른쪽처럼 Rashba 장 $H_{\alpha} \sim E_{\text{eff}} \times \mathbf{k}$ 에 의해 전도전자의 스핀이 y축 방향으로 정렬된다(이때 부호는 전류 방향과 물질 고유의 Rashba 상수 α_R 에 의해 결정된다). 따라서 계면에서는 스핀 전류가 발생하게 되며 발생한 스핀 전류는 계면에서 축적이 되면서 강자성층으로 확산하게 되어 강자성

층에 토크를 가한다. Rashba-Edelstein 효과에 의한 스핀 전류 생성 메커니즘은 스핀 홀 효과에 의한 것과 다르지만 강자성체에 작용하는 현상은 같다는 것을 알 수 있다. 이로 인해, 초기 SOT를 연구하던 사람들 사이에선 스핀 전류가 계면 효과(Rashba-Edelstein)인 것인지, 벌크 효과(스핀 홀 효과)인 것인지 치열한 논쟁이 벌어지기도 하였다. 심지어 필자의 논문 리뷰 과정에서 한쪽으로 치우쳐 설명이 되었던 부분에서 리뷰어의 강한 질책이 있기도 했다! 하지만 시스템마다 두드러지는 현상이 제 각각이어서 그것을 명확히 구별해 내는 방법을 아직 찾지 못하고 있고, 현재는 두 가지 이론 모두 받아들여지는 상황이다. 여하튼, 이렇게 주입된 특정 방향의 스핀들이 가하는 토크는 $\mathbf{T}_{\text{SOT}} = \tau_{\text{DL}} \mathbf{M} \times (\hat{\mathbf{y}} \times \mathbf{M}) + \tau_{\text{FL}} \mathbf{M} \times \hat{\mathbf{y}}$ 가 되고, 식과 그림에서 볼 수 있듯이 감쇠를 유발하는(damping-like, DL) 토크 τ_{DL} 와 세차운동을 유발하는(field-like, FL) 토크 τ_{FL} , 두 가지 성분을 가지며 시편의 자화와 각 토크는 서로 수직방향이다. 그림 2b는 이것을 잘 묘사하고 있다.(이에 대한 좀 더 자세한 내용은 국문으로 된 참고문헌 [8], [9]를 참고하기 바란다.) SOT를 연구하기 위해서는 이 두 성분에 대한 정확한 측정이 요구된다. SOT 자체가 새로이 발견된 현상인 만큼 그것을 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 고안해 내는 노력이 계속 되어 왔다. 스핀 전류의 생성은 스핀 홀 각도(spin Hall angle, $\theta_{\text{SH}} = J_s/J_c$)로 정량화될 수 있는데, θ_{SH} 는 간단히 말

Fig. 3. SOT measurement methods. a. The 2nd harmonic measurement.^[11] b. ST-FMR measurement.^[12] c. SOT-assisted magnetization switching.^[13] d. Spin Hall magnetoresistance.^[14]

해서 인가된 전류 밀도 대비 생성되는 스핀 전류의 양이라고 정의할 수 있다. SOT 연구에 주로 사용되는 Pt는 θ_{SH} 가 약 0.2, W는 약 0.3 정도로 알려져 있다. 최근에는 위상 절연체나 자성 인공격자에서 θ_{SH} 이 1이 넘는다는 것이 보고되기도 하였다. 물질의 θ_{SH} 을 알아내기 위해서는 스핀 전류의 양을 측정해야 하기 때문에 스핀 전류에 의한 SOT를 측정하는 것은 스핀 오비트로닉스 연구에서 가장 중요한 주제가 되어왔다.

2. SOT의 정량적 측정

SOT 측정의 정량화 방법에는 아래와 같이 5가지 방법이 많이 이용되고 있다. 이외에도 다양한 방법들이 최근까지 보고가 되고 있는데 가장 많이 활용되고 있는 측정법 위주로 소개하고자 한다.

- 전류에 의한 자화 반전 측정(그림 2c, d)
- 비정상 홀 효과의 고조파(harmonic) 신호 측정(그림 3a)
- 스핀 토크 강자성 자기 공명(ST-FMR) 측정(그림 3b)
- 자기장에 의한 자화 반전에 나타나는 전류 효과 관측(그림 3c)

REFERENCES

- [8] Jisu Ryu, *et al.*, Phys. High Technol. **20**(10), 27 (2011).
- [9] Sanghoon Kim, *et al.*, J. Korean Magn. Soc. **28**, 75 (2018).

Table I. Brief summary of the SOT measurement methods.

	수직자화	수평자화	자기장 세기	특이사항	단점	장점
1. 자화 반전	😊	😊	~0.5 T	직류 전류 사용	소자의 형태에 의한 오류 발생	측정의 간편성
2. ST-FMR	😐	😊	~0.3 T	고주파 사용	저온과 같은 다양한 측정환경 구성이 어려움	자화 동역학 정보를 얻을 수 있음
3. Harmonic Hall	😊	😊	~0.3 T	교류 전류 사용	Joule 발열 효과 영향	측정의 간편성, 모델의 단순성
4. SOT assisted field switching	😊	😐	~0.5 T	DM 상호작용 응용, 직류 전류 사용	DM 상호작용이 약한 시료에서 측정 불가	모델의 단순성, DM 상호작용의 측정 가능
5. SMR	😊	😊	> 1 T	교류 전류 사용	스핀 산란 시간 같은 측정이 어려운 물리량의 사용, 수직 자화 시료의 경우 강한 자기장 필요	측정의 간편성

E. 스핀 홀 자기 저항 측정(그림 3d)

먼저 **A. 전류에 의한 자화 반전 관측법**은 코넬대 그룹과 ICN-CIN2 그룹이 보고했던 것과 같이 홀 소자 혹은 자기터널 접합 소자에 인가되는 전류의 크기를 증가시키면서 신호를 관측하는 방법이다. 자화 반전이 일어나는 임계전류(J_c)에서 비정상 홀 효과가 나타나거나 터널 자기 저항의 변화가 나타나면 $J_c \sim 1/\theta_{SH}$ 이라는 관계에 의해 얼마나 많은 스핀 전류가 강자성층에 주입되었는지 알 수 있게 된다(여기서 비정상 홀 효과나 터널 자기 저항에 관한 개념은 궁금하면 구글에 검색해보자). 두 번째 방법인 **B. 비정상 홀 효과에서의 고조파(harmonic) 신호 측정**은 명명된 이름에 비해 그 원리는 무척 간단하다. 홀 소자를 만들고 거기에 수 Hz의 주파수를 갖는 교류 전류를 흘린 후에 외부 자기장 세기에 대한 홀 신호를 측정하면 된다. 여기서 외부 자기장의 방향은 스핀 전류의 스핀 자기 모멘트 방향과 수직, 혹은 평행한 축 방향이 되어야 한다. 교류 전류를 흘리는 이유는 아주 간단하다. 흘려주는 교류 전류는 $I = I_0 \sin(\omega t)$ 가 될 것이고, 측정되는 전압은 옴의 법칙을 따라 $V = R \cdot I_0 \sin(\omega t)$ 가 될 것이다. 스핀 전류가 강자성층에 주입될 경우, 시편의 자화는 토크에 의해 흔들리게 된다. 이는 곧 비정상 홀 효과에 의한 홀 저항 신호가 흔들린다는 의미가 되며, 흔들리는 주기는 흘려준 교류전류와 같으므로 $R = R_0 \sin(\omega t)$ 가 될 것이다. 자, 그럼 다시 측정되는 전압을 살펴보자. $V = R \cdot I_0 \sin(\omega t) = R_0 \cdot I_0 \sin^2(\omega t)$ 가 될 것이다. $\sin^2(\omega t)$ 은 $\cos(2\omega t)$ 로 치환될 수 있으므로 주입되는 교류전류에 의해 반 주기 전압신호가 발생할 수 있다. 즉, 교류전류 인가에 의해 발생한 스핀 전류가 자화에 전달하는 각운동량, 즉 토크에 의해 같은 주기로 흔들리게 되면, 인가된 교류전류 신호의 반주기에 해당하는 전압신호가 나타난다는 것을 의미한다. 반주기에 해당하는 전압신호는 lock-in amplifier의 2차 고조파(2nd

harmonic) 신호검출로 관측이 가능하다. 더 자세한 내용은 참고 문헌 [10], [11]을 참조하기 바란다. 삼성전자 종합기술원 소속의 피웅환 박사에 의해 처음 제안되고 일본 이화학 연구소의 김준연 박사에 의해 완성된 이 방법^[10,11]은 일반물리 수준에서의 아주 단순한 접근이고 측정도 편리하기 때문에 새로운 물리량을 측정하기에는 더할 나위 없이 좋은 방법이라고 할 수 있다. 실제로 전 세계적으로 SOT 측정에 가장 광범위하게 활용되

고 있는 방법이다. 다만, Joule 발열 효과나 스핀 고유의 열전도 현상(스핀 Seebeck 효과나 스핀 Nernst 효과), 측정 잡음 문제 등 개선이 필요한 방법이기도 하다. 아주 엄밀한 측정값을 구하는 것이 아니라면, 이 분야에 처음 발을 들여놓는 연구자들에게는 SOT를 측정할 수 있는 가장 좋은 방법 중 하나가 될 것이다. **C. 스핀 토크 강자성 자기 공명 측정**(spin torque ferromagnetic resonance, ST-FMR)은 기존 알려진 FMR 모델을 응용한 방법인데, 자화 동역학(dynamics)이 SOT에 영향을 받아 FMR 스펙트럼에 나타나는 신호의 해석에 관한 것이라고 할 수 있다.^[12] 공명 모드가 일어나는 자기장 영역에서 스핀 전류에 의한 SOT는 FMR 스펙트럼의 대칭성에 기여를 한다. 이때 고주파(RF) 전류에 의한 Oersted 자기장은 비대칭성에 기여를 하고, 측정된 FMR 신호에서 대칭 및 비대칭 신호를 구분해 내면 아래 식을 이용하여 SOT에 의한 유효 자기장 크기를 계산할 수 있게 된다.

$$V_{\text{mix}} = V_s F_s(H) + V_a F_a(H) \quad (1)$$

여기서 대칭(symmetric) 신호는 Lorentzian 함수인 $F_s(H) = \Delta^2 / [\Delta^2 + (H - H_0)^2]$, 비대칭(antisymmetric) 신호는 비대칭 Lorentzian 함수인 $F_a(H) = F_s(H)(H - H_0) / \Delta$ 의 관계를 이용해 구할 수 있다. Δ 는 FMR 스펙트럼의 선포, H_0 는 FMR이 일어나는 자기장의 세기이다. FMR을 이용한 방법은 RF 전원을 사용하고 있어 진입장벽은 다소 높지만, 자화의 감쇠와 같은 GHz대의 동역학적 정보를 얻을 수 있기 때문에 물리학자들에게는 아주 매력적인 방법이 된다. FMR이 중요한 이유는 스핀 펌핑

REFERENCES

- [10] U. H. Pi, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 162507 (2010).
- [11] J. Kim, *et al.*, Nat. Mater. **12**, 240 (2013).
- [12] Y. Wang, *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 273002 (2018).

현상 역시 관측이 가능하기 때문이다. 여기서 주목할 점은 자기 공명에 의해서도 스핀 전류가 발생할 수 있다는 것인데, 이를 스핀 펌핑이라고 부른다. 스핀 펌핑에 의해 중금속에 주입된 스핀 전류는 역 스핀 홀 효과에 의해 전하 전류로 전환이 되어 소자에 직접 전류를 인가하지 않아도 전압 변화의 관측이 가능하다. 다시 말해 스핀 기전력을 유도할 수 있다는 것이다. 필자는 개인적으로 이런 물리적 현상은 자연이 나노 세계에 숨겨놓은 놀라운 선물이라고 생각하고 있다. 우리는 전하의 흐름을 스핀의 흐름으로, 또는 스핀의 흐름을 전하의 흐름으로 마음껏 바꿀 수 있다는 것을 의미하기 때문이다! 이 밖에도 **D. 자기장에 의한 자화반전에 나타나는 전류 효과를 관측**(그림 3c)하거나 **E. 스**

핀 홀 자기저항(이후 SMR)을 관측하는 방법(그림 3d)들도 많이 활용이 되고 있다. 필자에게는 SOT의 응용까지 설명을 해야 하는 “아무도 강요하지 않은” 의무가 있기 때문에 D와 E에 대한 자세한 방법은 여기서 생략하도록 하고 설명이 아주 잘 되어있는 참고문헌 [13]과 [14]를 참조하는 것을 추천하는 바이다. 잘 이해가 되지 않을 경우 독자들께서 직접 필자에게 문의해 주시면 개인적으로 큰 영광일 것이다. 독자들의 이해를 돕기 위해 각 측정 방법에 대한 간략한 정보와 장단점을 표 1에 정리하였다.

SOT의 응용

SOT의 응용은 자화를 효율적으로 제어할 수 있는 좋은 방법인 만큼 2011년에 처음 보고가 된 후에 그간 많은 응용이 제시되어 왔다. 그 중에 메모리와 밀접한 연관이 있는 스위칭 소자와 관련된 것을 제외하고 필자에게 가장 큰 인상을 남겼던 네 가지 응용 사례를 소개하고자 한다.

1. 스핀 토크 발진기의 동기화(synchronized spin oscillator)

스핀 각운동량 전달에 의한 자화 동역학을 이용하면 GHz 영역의 발진기를 만들 수가 있다. 그러나 스핀 토크 발진기는 발진 신호가 약하고, 신호의 반치폭이 넓어서 실제 응용을 하기 어려웠던 게 사실이다. 2017년 스웨덴 J. Akerman 그룹의 A.

Fig. 4. Spin orbitronic devices. **a.** Mutual synchronization of spin Hall nano-oscillator.^[15] **b.** SOT-driven memristive device composed of a ferromagnet and an antiferromagnet.^[16] **c.** Skyrmion racetrack memory device.^[17] **d.** THz emitting device.^[18]

A. Awad는 그림 4a와 같은 톱날 형태의 모양을 갖는 와이어 형태를 제작하여 와이어에서 SOT가 최대점이 되는 가장 좁은 구역(그림 4a 참조)들의 발진신호를 관측하였다.^[15] 이때 각 영역에서는 SOT에 의해 발진신호가 검출되고, 홀과 홀 사이의 발진신호들이 서로 동기화된다는 것을 관측하였다. 스핀 발진기의 동기화는 신호의 증폭과 반치폭의 최소화 측면에서 중요한 의미를 갖고 있어 기존에 여러 번 보고가 되어왔으나, 모두 1 μm 이하의 간격을 두고 있는 수백 나노미터 크기의 소자 조합에 의해서만 관측이 되어왔다. 그러나 A. A. Awad는 실험을 통해 SOT를 이용할 경우 여러 개의 톱나 홀을 연결하여 4 μm 까지 동기화 영역을 확장시킬 수 있음을 증명하였고 기존 스핀 발진기의 단점을 극복할 수 있는 가능성을 제시하였다.

2. 멤리스터(memristor) 소자

스핀 소자는 스핀 업과 다운이라는 두 가지 상태를 활용할 수 있어 디지털 소자로 활용이 가능하다고 알려져 왔다. 그러나 최근에는 전류 밀도에 따라 저항이 바뀌는 소위 멤리스터 소자로 활용이 가능하다는 것이 증명이 되었다. 차세대 정보 저장장치

REFERENCES

- [13] C.-F. Pai *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 144409 (2016).
- [14] H. Nakayama, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 206601 (2013).
- [15] A. A. Awad, *et al.*, Nat. Phys. **13**, 292 (2017).

Fig. 5. a. Long range magnon propagation with spin supercurrent.^[19] b. Schematic images of orbital current flow.^[20]

라고 여겨지는 신경회로 소자 구현에는 우수한 메모리스트 특성이 요구되는데, 스핀 전류를 발생시키는 반강자성 층과 강자성층의 접합 소자에서 메모리스트 특성이 발견된 것이다.^[16] 따라서 신경회로 소자 개발을 위해 반강자성/강자성 접합에 관한 연구가 프랑스 CNRS와 일본 AIST, 그리고 한국의 DGIST를 중심으로 활발히 진행이 되고 있다. SOT를 이용해서 반강자성체 자체의 스핀 방향을 제어하는 연구도 활발하게 진행되고 있는데 이는 뒤의 THz 전자기파 발생 연구와 함께 설명하도록 하겠다.

3. 스컬미온(skyrmion) 소자

중금속/강자성체 접합의 계면에서는 중금속이 갖고 있는 강한 스핀-오비탈 결합에 의해 Dzyaloshinskii-Moriya(DM) 상호작용이 발생한다. DM 상호작용은 위상학적으로 안정한 스컬미온(skyrmion)이라는 준입자를 만드는 가장 중요한 요소이다. 자성 스컬미온은 나노미터 수준의 크기에서도 위상학적으로 안정하기 때문에 정보를 저장하는데 활용하기 용이하고, 중금속/강자성체 접합에서 발생하는 SOT를 이용하면 낮은 전류 밀도에서도 움직일 수 있기 때문에 최근 가장 많은 연구가 이뤄지고 있는 주제이기도 하다. 그림 4c에서 볼 수 있듯이 스컬미온이 SOT에 의해 초당 100 m를 움직일 수 있음이 메사추세츠 공과대학의 G. Beach 그룹에 있던 우성훈 박사에 의해 증명되었고 이는 스컬미온 동역학 연구의 시작이 되었다.^[17]

4. THz 전자기파의 발생

중금속/강자성 접합에 펨토 초 레벨의 레이저 펄스를 입사시키면 자화가 흔들리게 되고 이에 따라 스핀 펌핑 현상이 일어나게 된다. 이때 중금속 층으로 주입된 스핀 전류가 소멸하는데 걸리는 시간이 수 피코 초 정도가 되는데, 이로 인해 THz의 전자기파가 발생하게 된다는 것을 싱가포르 국립대학의 양현수

교수 그룹의 Y. Wu가 실험적으로 관측하였다.^[18] SOT를 이용한 THz 광원 소자는 낮은 제작 비용, ZnTe를 뛰어넘는 강도, 0.15 mW의 저전력이라는 강점이 있다. SOT를 이용하면 반강자성의 자화 방향을 바꿀 수도 있는데, 반강자성체의 경우 특유의 스핀배열로 인해 THz 영역의 동역학 연구가 가능하다고 알려져 있었다. 그러나 반강자성체를 제어할 방법이 없어서 L. Néel의 유명한 말처럼 “재미는 있는데 쓸모는 없는” 물질이라 여겨져 왔다. 최근 SOT를 이용하여 반강자성체의 스핀을 제어할 수 있다는 것이 실험적으로 보고되면서^[19] 이를 이용한 메모리소자나 THz 발진소자의 개발에도 박차를 가하고 있다.

Beyond the spin orbitronics: 스핀트로닉스 4.0?

필자가 느끼기에는 스핀 오비트로닉스 분야가 열리면서 기존 자성체 물리 분야에 국한이 되어왔던 스핀트로닉스 연구가 스핀-오빗 상호작용이라는 응용물리 공통의 관심사로 인해 응집물리 분야 전반으로 크게 확대된 것 같다. 이렇게 확대된 흐름 속에서 분명 스핀 오비트로닉스를 넘어선 새로운 형태의 연구가 진행될 수 있다고 본다. 최근에 실험적으로 관측된, 소멸되지 않고 뻗어나가는 스핀 각운동량, 즉 스핀 초유체(spin superfluid)의 응용^[20]이나 포항공대 이현우 교수와 고동욱 박사과정 학생이 제안한 오비탈 전류의 관측과 응용^[21]은 새롭게 나타나게 될 연구 형태의 대표적인 예라고 할 수 있다(그림 5). 필자 역시 새 보금자리에서 지금까지 하던 연구를 발전시켜 스핀 오비트로닉스를 넘어선 새로운 형태의 연구를 하기 위해 새로운 아이디어를 구상하는데 많은 시간을 보내고 있다. 항상 느끼는 것이지만 우리가 본인이 하고 있는 연구를 넘어 새로운 분야를 개척을 하기 위해서는 다양한 분야가 협력을 해야 할 것이다. 이 글이 스핀을 활용한 다양한 형태의 연구 협력이 이루어지는데 조금이나마 도움이 되길 바라면서 글을 마치고자 한다.

REFERENCES

- [16] S. Fukami, *et al.*, Nat. Mat. **15**, 535 (2016).
- [17] S. Woo, *et al.*, Nat. Mat. **15**, 501 (2016).
- [18] Y. Wu, *et al.*, Adv. Mat. **29**, 1603031 (2017).
- [19] P. Wadley, *et al.*, Science **351**, 587 (2016).
- [20] W. Yuan, *et al.*, Sci. Adv. **4**, eaat1098 (2018).
- [21] D. Go, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **121**, 086602 (2018).