스핀 수송

DOI: 10.3938/PhiT.20.043

류지수·김경환·이현우

Spin Transport

Jisu RYU, Kyoung-Whan KIM and Hyun-Woo LEE

This article aims to provide a pedagogical introduction to spin transport. After an introduction to the concept of the spin current, a few situations ranging from quite trivial spin transport to less trivial spin transport are discussed; Ways to generate the spin current are also discussed, as are applications of the spin current. One representative case is the spin transfer torque, for which the basic mechanism is presented. Lastly, the concept of the spin motive force is presented.

스핀전류란

도선에 전전지를 연결해 전류가 흐르는 상황을 고려해 봅시다(그림 1). 전류 크기가 I 라고 하면 I 는

$$I = (-e) \times (\text{단위시간당 지나가는 전자수})$$

입니다. 여기서 $-e$ 는 전자의 전하를 나타냅니다. 즉 I 는 단위시간당 지나가는 전하량을 나타내고 이런 이유에서 전하전

Fig. 1. Charge transport.

류라고 불리기도 합니다.

잘 알려진 것처럼 전자는 전하 $-e$ 외에도 스핀각운동량 (또는 간단히 줄여서 스핀) $\hbar/2$ 를 가집니다. 그림 2에서처럼 모든 전자의 스핀각운동량이 위쪽 방향을 향한 채 흘러가는 경우를 고려해 봅시다. 이 경우 스핀 전류 I^s 는 다음과 같이 정의됩니다.

$$I^s = \left(+\frac{\hbar}{2} \right) \times (\text{단위시간당 지나가는 전자수})$$

조금 더 일반적인 상황을 고려해 봅시다. 일반적인 상황에서 전자의 스핀 방향이 한쪽으로 정렬되어 있지 않습니다. 이 경우 스핀전류 I^s 는 다음과 같이 정의됩니다.

$$I^s = \left(+\frac{\hbar}{2} \right) \times (\text{스핀 } +\frac{\hbar}{2} \text{를 가지고 단위시간당 지나가는 전자수}) + \left(-\frac{\hbar}{2} \right) \times (\text{스핀 } -\frac{\hbar}{2} \text{를 가지고 단위시간당 지나가는 전자수})$$

이제 전하전류 I 와 스핀전류 I^s 의 크기를 비교해 봅시다. 만약 전도 전자들이 100% 스핀 $+\frac{\hbar}{2}$ 를 가지고 있다면 $(I^s/I)(-2e/\hbar) = 1$ 입니다. 그리고 만약 전도 전자들이 100% 스핀 $-\frac{\hbar}{2}$ 를 가지고 있다면 $(I^s/I)(-2e/\hbar) = -1$ 입니다. 좀

저자약력

류지수 학생은 2006년 가을에 포스텍 물리학과 대학원에 입학한 후 석박 통합과정 학생으로 자성나노선에서 스핀전류가 만들어 내는 스핀전달토크 현상에 대한 연구를 수행하고 있다. (feitw@postech.ac.kr)

김경환 학생은 2009년 가을에 포스텍 물리학과 대학원에 입학한 후 석박 통합과정 학생으로 자성체에서 스핀확산, 스핀기전력 등의 효과에 대한 연구를 수행하고 있고 2011년 미래 기초과학 핵심리더 양성사업의 National junior research fellow로 선정되었다. (bs1818@postech.ac.kr)

이현우 교수는 1996년에 미국 MIT에서 물리학 박사학위를 받았다. 그 후 2001년까지 서울대학교와 고등과학원에서 연구원으로 재직하였고 2002년부터 포스텍 물리학과 교수로 재직하고 있다. (hwl@postech.ac.kr)

Fig. 2. Transport of spin polarized electrons.

더 일반적인 상황에서 스핀전류가 전하전류에 비해 얼마나 큰지를 나타내기 위해 스핀 편극율 P 를 다음과 같이 정의합니다.

$$P(\%) = \frac{I_s - 2e}{I} \frac{\hbar}{h} \times 100\%$$

일반적으로 전자는 어떤 스핀 상태를 가지고 흘러갈까요? 구리, 알루미늄 등 우리가 흔히 접하는 금속에서는 그림 3(a)에서처럼 스핀 업($+\frac{\hbar}{2}$) 상태의 전도전자의 수와 스핀다운

($-\frac{\hbar}{2}$) 상태의 전도 전자의 수가 같습니다. 이 경우 스핀전류

I^s 는 0이고 $P=0$ 이어서 이 상황에서는 순수한 전하전류가 흐른다고 말합니다(스핀 수송은 없이 전하 수송만 있다는 의미에서). 이제 그림 3(b)에 있는 것처럼 스핀 업 전자는 오른쪽 위 방향으로 움직이고 스핀다운 전자는 왼쪽 위 방향으로 움직이는 상황을 고려해 봅시다. 이 경우 전하전류의 방향은 아래쪽입니다(전자들이 움직이는 평균적인 방향이 위쪽이고 전하 $-e$ 가 음수이므로). 그러면 스핀전류의 방향은 어느 쪽 일까요? 이 경우 스핀전류의 방향은 위나 아래가 아니라 오른쪽입니다(스핀 업 전자가 움직이는 방향을 나타내는 벡터

에 $+\frac{\hbar}{2}$ 를 곱하고 스핀다운 전자가 움직이는 방향을 나타내

는 벡터에 $-\frac{\hbar}{2}$ 를 곱해서 두 벡터를 더한 방향). 즉, 스핀전류

의 방향은 전하전류의 방향과 아주 다른 엉뚱한 방향입니다. 이 상황이 아주 비현실적이라고 생각하는 독자들도 있겠지만 이런 상황이 실제로 생깁니다. 이런 상황이 생기는 구체적인 예제는 나중에 언급하겠습니다. 다음으로 그림 3(c)에 있는 것처럼 스핀 업 전자가 움직이는 방향과 스핀다운 전자가 움직이는 방향이 반대인 경우를 고려해 봅시다. 이 경우 전하전류는 0이지만 스핀전류는 0이 아닙니다. 즉 전하전류가 없어도 스핀전류는 유한한 값을 가질 수 있습니다. 이런 상황에서

Fig. 3. Various types of charge and spin flows. (a) The charge current is finite whereas the spin current is zero, (b) Both the charge and spin currents are finite, but their directions are orthogonal. (c) The charge current is zero but the spin current is finite.

는 순수한 스핀전류가 흐른다고 말합니다(전하 수송은 없이 스핀 수송만 있다는 의미에서). 순수한 스핀전류가 발생하는 구체적인 상황도 나중에 언급하겠습니다.

스핀전류는 언제 생기는

스핀전류가 생기는 제일 대표적인 상황은 자석에 전류가 흐를 때입니다. 자석에서는 잘 알려진 것처럼 전자들의 스핀이 어느 한쪽 방향으로 쏠려있고 이런 상황에서 전기장을 걸어 전자가 움직이게 하면 스핀전류가 생겨납니다. 스핀편극 P 가 큰 자석에서는 더 큰 스핀전류가 생겨나고 스핀편극이 P 가 작은 자석에서는 작은 스핀전류가 생겨납니다.

자석이 아닌 물질에서 스핀전류를 만들어 낼 수는 없을가요? 자석이 아닌 비자성 물질은 스핀 업을 가질 확률과 스핀 다운을 가질 확률이 같아 스핀전류가 없는 것이 자연스러워 보이는 하지만 어떤 상황에서는 비자성 물질에서도 스핀전류가 생겨날 수 있습니다. 그림 4처럼 자석과 비자성 물질을

Fig. 4. Spin polarized current in non-magnetic materials via the spin injection from ferromagnetic materials.

접합시킨 구조에 전류를 흘려준 경우를 고려해 봅시다. 단위 시간당 200개의 전자가 흘러간다고 하면 자석에서는 예를 들어 스핀 업 전자가 130개, 스핀다운 전자가 70개, 이런 식으로 스핀 편극이 되어 있습니다. 반면 비자성 물질은 스핀업과 스핀다운이 각각 100개씩 흘러가기를 원합니다. 그런데 자석과 비자성 물질의 경계면에서는 어떨까요? 스핀업의 경우 왼쪽 자석에서 130개씩 전자가 들어오고 오른쪽 비자성 물질에서는 100개씩만 뽑아가려 하지만 스핀업의 개수가 경계면에서 급격히 130에서 100으로 줄어들 수는 없으므로 경계면 근처에서 “타협”이 일어나 경계면의 오른쪽에서는 100보다 높아지고 경계면의 왼쪽에서는 130보다 낮아집니다. 스핀다운의 경우에도 비슷한 “타협”이 일어납니다. 경계면의 왼쪽에서 70, 오른쪽에서 100으로 급격한 숫자 변화가 일어나지 않고 경계면의 왼쪽에서는 70보다 높아지고 오른쪽에서는 100보다 낮아집니다. 이러한 타협의 결과로 경계면의 오른쪽에서는 비자성 물질임에도 불구하고 스핀 업으로 흐르는 전자가 스핀다운으로 흐르는 전자보다 많아져서 스핀전류가 생겨납니다. 이처럼 자석과 비자성 물질을 접합시킨 구조에서 전류를 흘려 비자성 물질에 스핀전류를 발생시키는 것을 스핀주입이라고 합니다.

스핀-궤도 결합

자석이 없이 스핀전류를 만들 수는 없을까요? 위에서 설명한 스핀주입의 경우 비자성 물질 내부에 스핀전류가 만들어지긴 했지만 자석과의 접합이 필수입니다. 자석을 전혀 사용하지 않고 비자성 물질에서 스핀전류를 만들어 낼 수는 없을까요? 이런 측면에서 아주 유용한 것이 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)입니다. 특수상대성 이론에 의하면 움직이는 전자들은 자기장이 없는 상태에서도 자기장이 있는 것처럼 느끼고 이 자기장은 전자의 운동량 $\vec{P}$ 와 전기장의 세기 $\vec{E}$ 에 비례합니다. 이런 특수 상대론적 효과 때문에 전자들은

$$H_{soc} = \lambda \vec{S} \cdot (\vec{E} \times \vec{P})$$

Fig. 5. (a) Schematic of the spin Hall effect. (b) Schematic of the (charge) hall effect.

라는 스핀-궤도 결합 에너지를 가지게 됩니다. 여기서 $\vec{S}$ 는 전자의 스핀을 나타내고 λ 는 스핀-궤도 결합을 나타내는 상수로 이 상수의 값은 물질마다 다릅니다.

스핀-궤도 결합이 스핀전류에 미치는 영향을 살펴보기 위해 다음 상황을 고려합니다. 예를 들어 $\vec{E}$ 가 $-\hat{y}$ 방향이어서 어떤 전자가 $+\hat{y}$ 방향으로 움직이고 있고 이 전자의 스핀은 $+\hat{z}$ 방향을 향하고 있으면 전자의 모멘텀 $\vec{P}$ 가 $\hat{y} \times \hat{z}$ 가 나타내는 $+\hat{x}$ 방향 또는 그 반대 방향인 $-\hat{x}$ 방향으로 들어지는지에 따라 H_{soc} 의 에너지가 낮아지거나 높아집니다. 그리고 에너지가 낮아지는 모멘텀 방향은 전자의 스핀 방향이 바뀌면 달라집니다. 그 결과로 인해 그림 5(a)처럼 위쪽으로 운동하는 전자의 스핀이 업인지 다운인지에 따라 전자궤도가 왼쪽 또는 오른쪽으로 휘게 됩니다. 이 상황은 그림 3(b)에서 고려한 상황과 유사하고 따라서 전하전류가 수직 방향일 때 스핀 전류는 수평으로 흐르게 됩니다. 즉 자성물질이 없이도 비자성 물질에서 스핀 전류가 생겨날 수 있고 이는 스핀-궤도 결합 때문입니다.

그림 5(a)에 있는 상황은 그림 5(b)에 있는 홀효과와 아주 비슷합니다. 그림 5(b)에서 자기장에 의한 로렌츠힘 때문에 원래 전류 흐름의 수직 방향으로 전하 전류가 생기고 이 전자들이 필름의 한쪽 경계면에 쌓여 전하 밀도가 음수가 되고 반대쪽 경계면에는 전자수가 줄어들어 전하 밀도가 양수가 됩니다. 이와 유사하게 그림 5(a)에서는 스핀-궤도 결합으로 인해 원래 전류 흐름에 수직 방향으로 스핀 전류가 생기고 이 스핀들이 필름의 경계면에 쌓여 한쪽 경계면에는 스핀 밀도가 음수가 되고 반대쪽 경계면에서는 스핀 밀도가 양수가 됩니다. 그림 5(a)와 (b)의 이런 유사성 때문에 그림 5(a)에 있는 효과를 스핀 홀 효과라고 부릅니다.

그림 6은 스핀 홀 효과를 검증하는 실험 결과입니다.^[1] 그림 6(a)에 있는 노란색 부분은 검정색 부분에 도핑된 반도체

REFERENCES

- [1] Y. K. Kato *et al.*, Science **306**, 1910 (2004).

Fig. 6. (a) Schematic of the experimental setup used to detect the spin Hall effect. (b) Result of the spin density scanning. (After Ref. [1])

전류가 위 아래로 흐르게 하기 위한 전극이고 그림 6(b)에 있는 그림은 그림 6(a) 검정색 부분의 각 지점에 스핀이 얼마나 쌓여 있는지를 레이저를 사용해 측정한 실험 결과입니다. 왼쪽과 오른쪽 끝에 있는 붉은색과 파란색 부분은 그 자리들에 스핀업과 다운이 쌓여 있다는 것을 나타내고 가운데 부분에 붉은 점과 파란 점이 뒤섞여 있는 것은 이 부분에는 전자스핀이 특정 방향으로 쏠려 있지 않다는 것을 의미합니다.

그림 7(a)는 스핀 홀 효과의 개략도입니다. 스핀 업과 다운 전자의 궤도가 휘어지는 효과로 인해 전하 전류로부터 스핀 전류가 생겨납니다. 그림 7(b)는 반대로 스핀 전류로부터 전하 전류가 생겨나는 효과에 대한 개략도로 이 효과는 역 스핀 홀(inverse spin Hall) 효과라고 불립니다. 그림 7(b)에 있는 것처럼(어떤 이유로) 순수한 스핀 전류가 생겨나면 스핀 업 전자와 스핀 다운 전자는 서로 반대 방향으로 움직입니다. 그런데 이 흐름에 스핀-궤도 결합이 작용해서 영향을 미치면 스핀 업 전자는 그림 7(a)에 있는 스핀 업 전자처럼 오른쪽으로 궤도가 휘어집니다. 그리고 그림 7(b)에 있는 스핀다운 전자가 스핀-궤도 결합 때문에 휘는 방향은 그림 7(a)에서 스핀다운 전자의 궤도로부터 유추할 수 있습니다. 그림 7(a)에 있는 스핀 다운 전자의 궤도가 왼쪽으로 휘어졌는데 그림 7(a)와 (b)에 있는 스핀다운 전자가 서로 반대 방향으로 움직이고 있기 때문에 그림 7(b)에 있는 스핀 다운 전자의 궤도는 오른쪽으로 휘어져야 합니다. 결과적으로 그림 7(b)에서는 스핀 업, 다운 전자가 모두 궤적이 오른쪽으로 휘어지게 되고 그 결과로 순수한 스핀 전류로부터 전하 전류가 생성됩니다.

그림 8은 스핀 홀 효과와 역 스핀홀 효과를 전기적으로 측정하는 실험의 개략도입니다. 이 개략도의 아이디어는 Hirsch라는 학자가 최초로 제안하였고^[2] 그 이후 여러 실험에서 활용되었고 그 과정에서 개량되었습니다. 그림 8(a)처럼 전자가 왼쪽에서 오른쪽으로 흐를 때 스핀 홀 효과에 의해 파란색

Fig. 7. (a) Schematic of the spin Hall effect and (b) schematic of the inverse spin Hall effect. (After Ref. [22])

스핀 업 전자와 붉은색 스핀 다운 전자는 서로 반대 방향의 “샛길”로 빠져나가려 합니다. 그 결과로 두 샛길의 끝에는 서로 반대 방향의 스핀이 쌓이지만 전자의 수 입장에서는 두 샛길이 동일하기 때문에 두 샛길 양단 사이에 전압이 발생하지 않아 전기적 방법으로 측정되지 않습니다. 이제 두 샛길의 끝을 연결한 상황을 생각해 봅시다. 두 끝이 연결되어 루프(loop)가 형성되면 스핀 업 전자와 스핀 다운 전자가 서로 반대 방향으로 움직이면서 순수한 스핀 전류가 생깁니다. 그림 8(b)는 순수한 스핀 전류를 전기적으로 측정하는 방법을 개략적으로 보여줍니다. 순수 스핀 전류가 좌우로 흐를 때 역 스핀 홀 효과 때문에 스핀 업 전자와 스핀 다운 전자 모두 두 “샛길” C와 D 중 특정한 쪽(그림 8(b)의 경우 C)으로 빠져나갑니다. 그러면 두 샛길 C와 D에 있는 전자의 수가 달라지고 이 전자 수의 차이는 C와 D 사이의 전압 측정으로 검출할 수 있습니다. 이처럼 역 스핀홀 효과는 스핀 전류를 전기적으로 측정하는 것을 가능하게 하는 유용한 효과입니다. 위 설명에서 그림 8(a)의 두 샛길을 연결해서 순수 스핀 전류를 만들어 내는 것을 가정했는데 실제 실험에서는 이보다 훨씬 간단한 방법을 이용해 순수 스핀 전류를 만들어 냅니다. 핵심 아이디어는 자석과 비자성 물질의 경계면에서 생기는 현상을 활용하는 것입니다. 그림 8(b)에서처럼 자석(FM)을 접합시키고 전자를 A단자에서 주입해서 B단자로 뽑아내는 경우를 고

REFERENCES

- [2] J. E. Hirsch, Phys. Rev. Lett. **83**, 1834 (1999).

Fig. 8. Schematics of electric voltage measurements for the spin Hall effect (a) and the inverse spin Hall effect (b). (<http://www.azoquantum.com/article.aspx?ArticleId=8>)

려해 봅시다. A단자에서 단위 시간당 200개의 전자가 주입되는데 이중 130개가 스핀 업을 가지고 70개가 스핀 다운을 가진다고 합시다. 반면 비자성 물질로 이루어진 B단자로 흘러 나가는 전자의 총 개수는 200개로 동일한데 스핀 업과 다운이 동일하게 100개씩일 겁니다. 그러면 스핀 업 전자 입장에서는 A단자에서 130개가 흘러 들어와 100개만 B단자로 흘러 나가므로 자석과 비자성 물질의 경계면에 스핀 업 전자가 쌓이게 되고 스핀 다운 전자는 반대로 A단자에서 70개만 흘러들어 오는데 B단자로 100개가 흘러나가므로 스핀 다운 전자는 경계면에서 모자라게 됩니다. 이처럼 경계면에서 전자 수가 과잉/결핍이 되게 되면 과잉된 스핀 업 전자는 오른쪽 방향으로 확산되어 퍼져가고 결핍된 스핀다운 전자는 오른쪽에서 확산되어 들어와 결핍을 메우려고 합니다. 그 결과로 인해 경계면의 오른쪽 부분에서 그림 8(b)와 같이 스핀 업 전자와 스핀 다운 전자가 서로 반대 방향으로 움직이면서 순수한 스핀 전류를 만들어 냅니다.

스핀전달토크

위에서 스핀전류가 생기는 상황들, 그리고 스핀전류의 특성에 대해 간단히 언급했습니다. 이런 특성들은 학문적으로 흥미로운 대상이기도 하지만 응용 측면에서도 상당한 가치가 있을 수 있습니다. 스핀전류를 활용한 대표적 응용 가능성으로 거론되고 있는 스핀전달토크(spin transfer torque)에 대해

Fig. 9. Schematics of the spin-transfer torque (a) between one conduction electron spin and the ferromagnet, and (b) in a spin-valve system.

서 간략히 살펴보겠습니다. 스핀전달토크의 핵심은, 자성 금속 내부에서 전도 전자의 스핀이 금속 내부의 자기 모멘트와 상호작용한다는 점입니다. 이 상호작용에 의해 자성 금속 내부의 전도 전자 스핀 방향은 자성 금속의 자화 방향과 평행하게 되려고 합니다. 그림 9(a)는 하나의 전도 전자가 자성 금속을 통과할 때, 전도 전자의 스핀과 자성 금속 내부의 자화 방향이 어떻게 변하는지를 간단히 나타낸 그림입니다. 자성 금속의 자화 방향과 다른 방향으로 자화된 전도 전자가 자성 금속을 통과하면, 자성 금속을 통과한 이후의 전도 전자는 자성 금속과 같은 방향으로 자화됩니다. 이때, 전체 계의 스핀 각운동량은 보존되므로, 전도 전자 스핀 방향이 금속 내부의 자화 방향에 의해 변화되는 만큼, 금속 내부 자화 방향도 변화해야 하는데 이로 인해 자화 방향에 토크가 발생하고 이 토크를 스핀전달토크^[3,4]라 합니다. 따라서 스핀전달토크는 전도 전자의 자화 방향이 자성 금속 내부의 자화 방향에 의해 변하는 토크에 대한 반작용이라 할 수 있습니다.

스핀전달토크가 발생되는 대표적인 상황은 두 자성 금속층 사이에 비자성 금속을 삽입한 스핀 밸브(spin valve, SV)나 두 자성 금속층 사이에 아주 얇은 절연체를 삽입해 전도전자가 양자터널링(quantum tunneling)을 통해 절연체를 지나가도록 한 자기터널접합(magnetic tunnel junction, MTJ)이 있습니다. SV 또는 MTJ에서 스핀전달토크가 어떻게 구현되고 어떤 작용을 하는지 알아보기 위해 그림 9(b)에 있는 것과 같이 서로 다른 방향으로 자화된 두 자성 금속층 FM1, FM2와 세 개의 비자성 금속층 NM1, NM2, NM3이 번갈아 존재하는 SV의 오른쪽에서 왼쪽으로 전류가 흐르는 상황을 고려해 봅시다(이때, 전도 전자는 NM1에서 NM3 방향으로 이동). NM1에서 전도 전자들은 아직 특정 방향으로 스핀이 정렬되

REFERENCES

- [3] J. C. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater. **159**, L1 (1996).
- [4] L. Berger, Phys. Rev. B **54**, 9353 (1996).

Fig. 10. Schematics of the conventional MRAM.

지 않은 상태입니다. 이 전도 전자들이 FM1을 지나면, FM1과 같은 방향으로 자화되므로, NM2에 있는 전도 전자들은 FM1과 같은 방향으로 자화되어 있습니다. FM1과 같은 방향으로 자화된 전도 전자들이 NM2에서 FM2로 주입되면, FM2는 FM1과 같은 방향으로 자화되려는 스핀전달토크를 받게 됩니다. 또 전류의 방향이 반대가 되면, FM2에 작용하는 스핀전달토크의 방향도 반대가 됩니다. 실제 SV나 MTJ 구조에서는 FM1의 두께를 FM2보다 두껍게 만들거나, FM1을 반자성 물질에 접합시켜 FM1을 자화 방향이 쉽게 바뀌지 않는 고정층으로, FM2를 자화 방향을 비교적 쉽게 바꿀 수 있는 자유층으로 만듭니다. 이 경우, 전류의 방향을 조절하는 것으로 FM2의 자화방향을 FM1과 평행 혹은 반평행하게 바꿀 수 있습니다.

이 현상을 이용하면 스핀전달토크를 활용해 자기메모리(Magnetic RAM, MRAM)에 정보를 기록할 수 있습니다. MRAM은 하나의 MTJ를 단위 메모리로 사용합니다(그림 10). TJ의 두 자성층이 평행한 방향으로 자화되어 있는 상태를 “0”, 반평행한 방향으로 자화되어 있는 상태를 “1”에 대응시킨다고 합니다. 기존의 자기메모리는 MTJ에 정보를 기록하기 위해 자기장을 이용하여 자성층의 자화 방향을 변화시키는 방법을 사용하였습니다. 각각의 MTJ는 그림 10과 같은 방식으로 두 개의 전선에 연결되어 있고, 특정 MTJ의 자화 상태를 바꾸기 위해서는, 그 MTJ에 연결된 두 개의 전선에 동시에 전류를 걸어주면 중첩된 유도 자기장(Oersted field)이 MTJ의 자유층의 자화방향을 바꾸게 됩니다. 이렇게 자기장을 이용한 방법(Field-Induced Magnetization Switching, FIMS)으로 정보를 기록하는 경우, 단위 메모리의 크기를 줄일수록 기록에 필요한 전류가 증가하므로 메모리 소자의 집적도를 높이는 데에 한계가 있습니다.^[5] 반면 스핀전달토크를 이용하면 MTJ에 직접 전류를 걸어줌으로써 정보를 기록할 수 있고 이런 방식으로 정보를 기억하는 자기메모리를 STT-MRAM이라고 부릅니다. 이 경우, MTJ에 작용하는 STT의 크기는 MTJ에 걸어진 전류 밀도에 비례하므로, 정보를 기록하기 위해서 필요한 전류의 크기가 MTJ의 부피에 비례하게 되고 따

Fig. 11. Schematics of the spin-transfer torque oscillator.

라서 STT-MRAM의 경우 MTJ의 크기가 줄어들수록 필요한 스핀전류가 줄어들어 고집적 소자를 만들기에 좋습니다.^[6]

STT-MRAM이 스핀전달토크를 이용해 MTJ의 자유층의 자화 방향을 바꾸는 데에 비해, STT를 자기장과 함께 작용시켜 자유층의 자화 방향이 일정한 주기로 계속 회전하게 만들 수도 있습니다(그림 11). 자기모멘트의 자화 방향에 평행하지 않은 자기장을 걸어주면, 자기모멘트는 자기장을 중심으로 시간이 지날수록 진폭이 점점 줄어드는 세차운동을 하다가 자기장과 같은 방향으로 정렬합니다. 세차운동의 진폭이 점점 줄어드는 것은 감쇠 토크(damping torque) 때문입니다. 이 때, 감쇠 토크와 반대방향으로 작용하는 스핀전달토크를 걸어주면, SV나 MTJ의 자유층이 자기장 방향으로 정렬하지 않고, 일정한 주기로 계속 세차운동을 하게 만들 수 있습니다. 자유층의 자화 방향이 일정한 주기로 진동하면, 거대자기저항(GMR) 혹은 TMR에 의해 SV나 MTJ에 걸리는 전압도 진동하게 되므로, 이를 이용해 고주파 발진기(Spin-transfer nano oscillator, STNO)를 만들 수 있습니다. 자유층 자기모멘트의 세차운동 주기는 가해진 전류와 자기장의 세기에 따라 변하므로, 기존의 발진기가 소자 당 하나의 주파수만을 발생시키는데 반해, STNO는 수 GHz ~ 수십 GHz 범위의 주파수를 발생시킬 수 있습니다. 또한, STNO는 기존 발진소자에 비해 크기가 작고, 발진 주파수의 질을 나타내는 Q-인자가 기존의 발진기의 100배 이상 크다는 장점이 있습니다.^[7]

스핀기전력

스핀전류를 발생시키는 새로운 방법으로 스핀기전력(spin motive force, SMF)에 대한 연구가 최근에 각광을 받고 있습

REFERENCES

- [5] J. Åkerman, Science **308**, 508 (2005).
- [6] Y. Huai *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84**, 3118 (2004).

Fig. 12. Time variation of magnetization results in spin misalignment between the magnetization (blue arrow) and conduction electron spin (yellow arrow). In order to reduce the exchange energy, electron (red ball) tends to move toward the place where there exists spatial variation of magnetization. This force is the origin of SMF.

니다. 스핀기전력은 패러데이 법칙에 의한 (전하)기전력과 유사하게 전자에 작용하는 전기장이 발생하는 현상인데 전자의 스핀 방향에 따라 이 전기장의 방향이 달라진다는 점에서 스핀기전력이라고 불립니다. 스핀기전력이 작용하면 스핀 업 전자와 스핀 다운 전자가 서로 반대 방향으로 움직이면서 스핀 전류가 생성됩니다. 스핀기전력은 스핀전달토크와 더불어 스핀 전류와 자화 상태간의 상호작용을 기술하는 대표적인 현상으로 여겨집니다. 스핀기전력의 존재가 처음 예측된 것은 비교적 오래 전이지만,^[8] 그 이론은 최근에야 공식화되었습니다.^[9] 대개의 경우 스핀기전력의 크기는 그리 크지 않지만 나노 자성 구조에서의 스핀트로닉스가 응용단계로 나아가기 위해서는 자화 동역학 이론의 정확도가 중요하다는 측면에서 스핀기전력에 대한 연구가 필요하고 더불어 아래에서 언급할 고전 전자기학과 유사성도 SMF 연구의 중요성을 더해줍니다. 이런 점들에 힘입어 스핀기전력은 최근에 주목받아 활발히 연구되고 있습니다.^[10-21]

스핀전달토크와 스핀기전력이 보존법칙을 만족시키기 위해 발생하는 물리량이라는 점에서 유사성을 갖기는 하지만, 구체적인 현상은 정반대입니다. 스핀전달토크가 스핀 전류에 의해 자화 상태의 변화를 유발하는 현상인 반면, 스핀기전력은 자화 상태의 시공간적 변화가 추가적인 스핀 전류를 발생시키는 현상입니다. 정리하면, 스핀 전류는 스핀전달토크를 통해 자화 상태를 변화시키고, 자화 상태의 변화는 스핀기전력을 통해 다시 스핀 전류에 영향을 미치게 됩니다. 이것은 고전 전자기학에서 전기장의 변화가 자기장을 만들고, 자기장의 변

화가 다시 전기장을 만드는 것과 유사합니다. 고전 전자기학이 전기장과 자기장의 변화를 동시에 고려해야 완전히 기술되듯, 자화 상태와 스핀 전류도 스핀전달토크와 스핀기전력이 동시에 고려되어야 완전히 기술될 수 있습니다. 더불어 맥스웰은 전자기장의 대응관계로부터 앙페르의 법칙을 수정하여 전자기파라는 새로운 물리 현상을 발견한 바 있는 것처럼 마찬가지로 스핀전달토크와 스핀기전력의 대응관계^[3]를 바탕으로 스핀기전력의 이론을 다듬으면 새로운 물리 현상이 발견될 수 있을 거라고 기대됩니다. 그림 12는 스핀기전력이 발생하는 과정을 개략적으로 그린 것입니다. 스핀전달토크가 발생하는 직접적인 원인은 전도 전자의 스핀 방향이 자화 방향과 다른 방향을 가지기 때문입니다.^[20] 스핀전달토크를 계산할 때와 같이 전자의 스핀 방향이 자화 방향과 같은 방향을 가진다는 것은 통상적으로 좋은 근사이지만, 자화 상태의 시간적 변화가 있다면 전자 스핀 방향이 자화 방향을 미처 따라가지 못하게 됩니다. 여기서 자화가 공간적으로도 변하고 있었다면, 전자는 교환 에너지(exchange energy)를 낮추기 위해서 자신의 스핀 방향과 같은 방향의 자화 상태를 가진 곳으로 이동하려고 할 것입니다. 그 결과 전자는 추가적인 기전력을 받게 되고, 이 기전력은 전자의 스핀에 기인하므로 스핀기전력이라고 불립니다.

위 논의에서 알 수 있듯이 스핀기전력이 발생하려면 자화 상태의 시간적 변화와 공간적 변화가 필요합니다. 이것은 가장 낮은 차수의 계산 결과가 스핀기전력이 자화 상태의 시간 변화율과 공간 변화율에 비례할 것을 암시합니다. 그러므로

REFERENCES

- [7] S. I. Kiselev *et al.*, Nature **425**, 380 (2003).
- [8] L. Berger, Phys. Rev. B **33**, 1572 (1986).
- [9] S. E. Barnes and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett. **98**, 246601 (2007).
- [10] Y. Tserkovnyak and M. Mecklenburg, Phys. Rev. B **77**, 134407 (2008).
- [11] S. Zhang and S.-L. Zhang, Phys. Rev. Lett. **102**, 086601 (2009).
- [12] Y. Tserkovnyak and C. H. Wong, Phys. Rev. B **79**, 014402 (2009).
- [13] R. A. Duine, Phys. Rev. B **79**, 014407 (2009).
- [14] J. Ohe *et al.*, Appl. Phys. Lett. **95**, 123110 (2009).
- [15] J. Ohe and S. Maekawa, J. Appl. Phys. **105**, 07C706 (2009).
- [16] P. N. Hai *et al.*, Nature **458**, 489 (2009).
- [17] S. A. Yang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 067201 (2009).
- [18] C. H. Wong and Y. Tserkovnyak, Phys. Rev. B **81**, 060404(R) (2010).
- [19] S. A. Yang *et al.*, Phys. Rev. B **82**, 054410 (2010).
- [20] Y. Yamane *et al.*, J. Appl. Phys. **109**, 07C735 (2011).
- [21] G. E. Volovik, J. Phys. C **20**, L83 (1987).

스핀기전력이 커지려면 자화 상태가 시간에 따라 급격하게 변하거나, 공간적으로 급격하게 변해야 합니다. 일반적으로 스핀기전력을 유발하는 전기장이 눈에 띄게 관찰되기 위해서는 수 nm 안에 자화 구조가 분포해야 하고, GHz 정도의 시간 변화율이 필요합니다. 비록 자화 구조가 분포하는 공간이 작아지면 작아질수록 더 큰 전기장이 발생하지만, 발생하는 구간도 같이 작아지므로 측정되는 전압이 커진다고 할 수는 없습니다. 하지만, 시간 변화율의 경우 커지면 커질수록 스핀 기전력도 같이 커지게 하므로 높은 진동수의 자화 변화를 일으키는 경우 스핀기전력이 점점 중요해지게 됩니다. 또한 스핀기전력은 스핀 관련 현상이므로, 스핀-궤도 결합 등 다른 스핀 관련 물리 현상과 맞물려 상당히 증폭될 가능성도 있습니다. 스핀기전력과 다른 스핀 현상들과의 상호 관계, 상호 작용은 미래 연구의 중요 주제가 될 것으로 예측됩니다. 스핀 기전력은 다른 스핀 현상에 영향을 주기도 하지만, 그 자체로 응용적 의미를 가지고 있기도 합니다. 스핀기전력의 크기는 자화 상태의 구체적인 모양에 의존하므로 스핀기전력을 전기적으로 측정함으로써 자화 상태의 구조를 간접적으로 알아낼

수 있습니다. 다시 말해서 전기적인 신호를 통해 자화 상태의 정보를 알아낼 수 있다는 것인데, 이를 이용하여 MRAM으로 응용될 수 있다는 점이 보고되었습니다.^[14] 이것은 스핀기전력이 직접적으로 응용될 수 있음을 보여주는 사례라고 할 수 있습니다.

맺는 말

스핀 수송에 대한 근본 연구 및 스핀 수송을 활용한 응용 가능성에 대한 연구는 스핀 수송에 대한 연구의 주된 축입니다. 지난 20년 간의 여러 연구를 통해 스핀 수송에 대한 많은 새로운 현상이 발견되었는데 앞으로도 현재 기대하지 못했던 현상들이 계속 발견되어 전자의 스핀 수송에 대한 더욱 깊이 있고 정확한 이해가 이루어지기를 기대합니다.

REFERENCES

- [22] S. Maekawa, Nature Materials **8**, 777 (2009).