자성나노선에서의 자화벽 운동

DOI: 10.3938/PhIT.20.005

이 현 우

Magnetic Domain Wall Motion in Magnetic Nanowires

Hyun-Woo LEE

In magnets, magnetic moments of electrons become ordered to generate magnetism. The direction of the magnetic ordering may vary from region to region, generating domains of different magnetic ordering. The magnetic domain wall refers to the boundary between such domains and its motion in nanoscale magnets such as magnetic nanowires received much attention recently. This increase of the interest is partly due to the recognition that the domain wall motion may have interesting device applications and also due to the realization that it provides a useful platform to test theoretical predictions of various physical phenomena in nanoscale magnetic systems. This article presents a brief introduction to those topics of recent interest about the domain wall motion in magnetic nanowires.

들어가는 글

일상생활에서 아주 흔하게 접하는 자석. 자석을 써서 음식 점 전화번호 한 두 개쯤 냉장고에 붙여 놓지 않은 집은 아마 거의 없을 것 같다. 자석의 N극과 S극은 전자의 자기모멘트(magnetic moment)가 한 방향으로 정렬되면서 생겨난다. 그런데 자석을 확대해 보면 자석 내부에서 자기모멘트의 정렬은 영역에 따라 다른 경우가 많다. 예를 들어 자석의 어떤 부

분에서는 자기모멘트가 오른쪽 방향으로 정렬되어 있는데 어떤 부분에서는 왼쪽 방향으로 정렬되어 있다든지 하면서 자화된 방향이 서로 다른 영역들이 존재한다. 신용카드 뒷면의 자기 테이프나 컴퓨터 하드디스크 내부의 자기 필름 등은 이처럼 자화 방향이 다른 영역들이 자석 내부에 생길 수 있다는 것을 이용해 정보를 저장한다. 이 글에서는 이런 영역들의 경계면인 자화벽(magnetic domain wall)의 움직임에 대해 소개하려 한다. 자화벽 운동과 관련된 몇 가지 물리 현상들로 인해 약 6년 전부터 자화벽의 운동에 대해 학계의 관심이 크게 늘었고 주요 학술지에서도 이 주제가 비중 있게 다루어지고 있다. 또 자화벽의 위치를 자유자재로 움직일 수 있을 경우 생겨나는 새로운 응용 가능성에 대한 연구도 많은 관심을 받고 있다. 이 글은 자화벽 운동을 활용한 새로운 응용 가능성과 또 이와 관련된 물리 현상들을 소개하고자 한다.

자화벽 운동의 원리: 자기장과 스핀전달토크

자화벽을 움직이는 가장 직관적인 방법은 아마도 자기장을 이용하는 방법일 것이다. 그림 1과 같이 자성 물질로 만들어진 나노선의 일부 영역은 오른쪽 방향으로 자화되어 있고 일부 영역은 왼쪽 방향으로 자화되어 있다고 하자. 이때 만약 오른쪽 방향으로 자기장을 가하면 오른쪽으로 자화된 영역은 에너지가 낮아지고 왼쪽으로 자화된 영역은 에너지가 높아지

Fig. 1. Effect of the magnetic field H on the magnetic domain walls. Green arrows denote the direction of the magnetization in each magnetic domains. As the field H is applied (black arrow), the domain walls move in such a way that the Zeeman energy is lowered. As a result, the blue colored domain shrinks. The upper and lower figures denote the magnetization configurations at earlier and later times.

저자약력

이현우 교수는 1996년에 미국 MIT에서 물리학 박사학위를 받았다. 그 후부터 2001년까지 서울대학교와 고등과학원에서 연구원으로 재직하였고 2002년부터 포스텍 물리학과에서 교수로 재직하고 있으며 저차원계에서의 전자 수송, 자성나노구조에서의 스핀동역학 등의 분야를 연구하고 있다. 이 글에 소개되는 자성나노선에서의 자화벽 운동에 대한 연구 결과를 Nature 등 여러 학술지에 게재하였고 이 연구업적으로 인해 교육과학기술부가 선정하는 이달의 과학기술자상 수상자로 2010년 9월 선정되었다.

(hwl@postech.ac.kr)

Fig. 2. Effect of the spin transfer torque on the magnetic domain walls. Green and black arrows denote the directions of the local magnetization and the spin magnetic moment of conduction electrons, respectively. Domain wall regions (marked by dashed circles) are magnified to depict the torques arising from the interaction between the local magnetization and the conduction electrons. Red and blue arrows in the magnified figures denote the direction of the torques acting on the local magnetization and the conduction electron spin magnetic moment, respectively. The red arrows amount to the adiabatic spin transfer torque. The black symbols pointing in the out-of-plane direction denote the nonadiabatic spin transfer torque.

게 된다. 그러면 자화 상태의 에너지를 낮추려는 과정에서 오른쪽으로 자화된 영역은 시간이 지나면서 넓어지고 왼쪽으로 자화된 영역은 점점 좁아지면서 자화벽이 움직이게 된다.

자화벽을 움직이는 또 한 가지 방법으로 스핀전달토크(spin transfer torque) 현상^[1]을 이용하는 방법이 근래에 많이 연구되고 있다. 스핀전달토크 현상은 자화 방향과 다른 방향의 스핀 자기모멘트를 가진 전자가 자성체 내에 생성되었을 때 이 전자들의 스핀각운동량(spin angular momentum)이 다른 전자들로 전달되면서 토크(torque)가 생성되어 자화 방향이 바뀌는 현상이다. 그림 2는 자성나노선(magnetic nanowire)에서 스핀전달토크가 구현되는 과정을 개략적으로 설명하고 있다. 자성나노선에 전류를 흘려주면 전도전자들은 스핀자기모멘트(spin magnetic moment)의 방향을 자화 방향과 일치시켜서 자기적 교환에너지를 낮추려고 한다. 그런데 자화벽 근처에서처럼 자화 방향이 공간적으로 계속 변하고 있는 영역에서는 전도전자의 스핀각운동량 방향이 자화 방향과 완전히 일치하지 못하고 약간 어긋나게 된다. 즉 나노선에 전류를 흘려주는 간단한 방법으로 자화 방향과 다른 스핀자기모멘트를 가진 전자들을 자화벽 근처에 생성시킬 수 있다. 자화 방향과 다른 스핀각운동량을 가진 전도전자들이 만들어내는 스핀전달토크를 직관적으로 이해하는 한 가지 방법은 전도전자와 나머지 다른 기존 전자간의 상호 작용에 작용-반

작용의 원리를 적용하는 것이다. 기존 전자들은 그림 2에 파란색 화살표 방향으로 토크를 발생시켜 전도전자들의 스핀자기모멘트가 가능한 자화 방향과 일치되게 만들려고 한다. 그러면 작용-반작용의 원리에 따라 전도전자들이 반대 방향의 토크를 그림 2의 붉은색 화살표 방향으로 발생시켜 기존 전자의 자화 방향을 변화시키려 하고 이 토크가 바로 스핀전달토크이다. 나노선 각 지점의 자화 방향이 스핀전달토크 작용 방향으로 변화할 경우 자화벽의 위치는 전도전자의 운동방향으로 (또는 전류의 반대 방향으로) 옮겨지게 되어 스핀전달토크는 자화벽 위치 제어를 구현하는 새로운 방법을 제공한다.

스핀전달토크에 의한 자화벽 운동은 자기장에 의한 자화벽 운동과 한 가지 점에서 크게 다르다. 그림 1에서처럼 두 개의 자화벽이 있는 자성 나노선에 자기장을 걸어 자화벽을 운동시켰을 경우 파란색 영역이 점점 좁아지는 방향으로 자화벽이 움직이므로 두 개 자화벽의 운동 방향이 반대가 된다. 그리고 두 자화벽이 만날 경우 파란색 영역이 사라져 버릴 수도 있다. 반면 자성 나노선에 전류를 흘려 전도 전자에 의한 스핀전달토크를 발생시킨 경우에는 스핀전달토크가 두 자화벽을 모두 똑같이 전자 운동 방향으로 이동시키므로 (그림 2) 자화벽들 간의 간격을 일정하게 유지하는 것이 가능해진다. 이 특성은 스핀전달토크를 기반으로 한 새로운 응용 가능성을 열어준다.

자화벽 운동의 응용:

레이스트랙 메모리와 자화벽 자기램

IBM의 Parkin 박사는 2004년에 미국 특허청에 등록된 특허^[2] 통해 자화벽 운동을 이용한 새로운 비휘발성(nonvolatile) 정보저장 소자인 레이스트랙 메모리(racetrack memory)를 제안했다. 레이스트랙 메모리는, 스핀전달토크에 의해 자화벽을 이동시킬 경우 자화벽들 간의 간격을 일정하게 유지시키면서 이동시킬 수 있다는 특성에 기초하고 있다. 그림 3은 레이스트랙 메모리의 개략도이다. 나노선에 전류를 흘려 나노선의 자화벽을 이동시키면서 나노선 상의 고정된 위치에 설치된 정보 판독, 기록 장비를 이용해 나노선의 자화 상태를 읽어 내고 또 정보를 나노선에 기록한다. 컴퓨터에 많이 사용되는 하드디스크와 비교할 때 자화 방향을 이용해 0, 1의 정보를 저장한다는 점에서는 레이스트랙 메모리가 컴퓨터 하드디스크와 유사하지만 레이스트랙 메모리에서는 정보만 움직

REFERENCES

- [1] D. C. Ralph and M. D. Stiles, J. Mag. Mag. Mater. **320**, 1190 (2008).

물리학과 첨단기술의 세계

Fig. 3. Schematic structure of the racetrack memory.^[2]

일 뿐 기계적 운동이 전혀 관여되어 있지 않다는 점에서 크게 차이가 있다. 이 차이를 운동 경기 응원 때 자주 사용되는 카드 섹션에 비유하자면 레이스트랙 메모리의 경우 카드 섹션을 하는 사람은 전혀 움직이지 않고 사람들이 들고 있는 카드만 바꿔 움직이는 패턴을 구현하는 경우에 해당하고 하드 디스크의 경우는 경기가 열리는 경기장 전체를 돌려 움직이는 패턴을 구현하는 것에 해당한다.

레이스트랙 메모리는 몇 가지 면에서 현재 많이 사용되는 다른 비휘발성 메모리인 하드디스크나 플래시램(flash RAM)에 비해 장점을 가질 수 있을 것으로 예측되고 있다. 우선 첫 번째 장점으로 속도가 거론되고 있다. 레이스트랙 메모리는 기계적인 운동이 전혀 관여되어 있지 않아 컴퓨터 하드디스크보다 훨씬 빠른 동작 속도가 가능할 것으로 기대되고 있는데 2008년에 발표된 논문^[3] 의하면 레이스트랙 메모리의 가능한 정보 처리 속도가 하드디스크의 100,000배 정도, 플래시램의 1000배 정도일 것으로 추정되고 있다. 레이스트랙 메모리의 고속 동작을 위해서는 스핀전달토크를 이용해 자화벽을 빠른 속도로 움직이는 것이 필요한데 근래의 실험을 통해서 초속 100 m 이상의 고속으로 자화벽을 움직이는 것이 실험에서 구현되었^[4] 이 속도는 시속 360 km에 해당하는 속도로 KTX 기차 속도보다 빠르다. 또한 레이스트랙 메모리는 3차원 적층 구조로 만드는 것이 원칙적으로 가능하기 때문에 테라비트 메모리의 후보로도 거론되고 있다. 이런 장점으로 인해 2009년에 발표된 MIT의 Technology Review에서는^[5] 레이스트랙 메모리를 10대 미래 신기술(emerging technology)의 한 가지로 선정하기도 하였다. 이 외에도 레이스트랙 메모리는 컴퓨터 하드디스크와 달리 모바일 용도로 사용하는데 문제점이 없고 또 플래시램과 달리 수억 번 이상 정보를 고쳐 쓰더라도 성능이 퇴화하지 않는 장점 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 하지만 다른 한편으로는 레이스트랙 메모리는 기존의 메모리와 아주 다른 물질을 사용해 아주 다른 동작 원리로 동작되는 메모리로서 기존의 메모리 기술을 거의 활용할 수 없기 때문에 레이스트랙 메모리라는 아이디어를 실제로 상용화하기 위해서는 수많은 생산, 공정 기술

Fig. 4. Schematic structure of the domain wall magnetic RAM.

들을 새로 개발해야 한다는 단점이 있다. 이로 인해 레이스트랙 메모리가 조만간 “미래 메모리” 상태에서부터 “실용화 가능한 메모리”로 진화하기는 어려워 보인다.

일본의 NEC는 기존의 자기램(magnetic RAM)에 레이스트랙 메모리의 장점을 일부 차용한 자화벽 자기램(domain wall magnetic RAM)이라는 새로운 메모리를 제안했다. Everspin 등의 기업체에 의해 이미 상용화된 자기메모리는 적층된 두 자성층의 자화방향이 같은지 다른지를 이용해 0, 1의 정보를 저장하는 장치로 정보의 저장을 위해서는 자성층의 자화 방향을 바꾸는 작업이 필요하다. NEC에서 제안한 자화벽 자기메모리의 경우 그림 4에서와 같이 두 개의 자성층 중 어느 한 자성층에 자화벽을 생성시키고 이 자화벽의 위치를 움직여 두 자성층이 접하고 있는 영역의 상대적인 자화 방향을 바꾸어 이 영역에 저장된 정보를 0 또는 1로 바꾸는 것을 구현하자는 아이디어에 기초하고 있다. 자화벽 자기메모리는 자기메모리를 구현하는 새로운 가능성 중의 하나로 거론되고 있다.

자화벽 운동에 관한 물리학적 연구 주제들

자화벽 운동을 기반으로 한 여러 가지 미래 소자의 고안은

REFERENCES

- [2] S. S. P. Parkin, U.S. Patents 6,834,005 (2004).
- [3] S. S. P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomas, *Science* **320**, 190 (2008).
- [4] M. Hayashi, L. Thomas, C. Rettner, R. Moriya, Y. B. Bazaliy and S. S. P. Parkin, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 037204 (2007).
- [5] Technology Review, March/April issue (2009).

지난 5~6년 사이에 자화벽 운동에 관한 많은 연구가 이루어지게 한 중요한 계기로 작용했다. 자화벽 운동이 학계의 많은 관심을 받게 된 또 한 가지 이유는 자화벽 운동에 관한 연구를 통해 자성체의 여러 중요 물리 현상을 탐구할 수 있기 때문이다. 자화벽 운동에 영향을 주는 여러 중요 물리 현상들에 대한 연구는 자화벽 운동에 대한 좀 더 정량적인 예측을 가능하게 하고 이는 자화벽 운동에 기반한 미래 소자 구현에도 많은 도움이 될 것으로 기대된다. 지금부터는 자화벽 운동과 관련되어 현재 학계의 연구 대상이 되고 있는 몇 가지 주요 물리 현상들을 소개하겠다.

자화벽 운동과 같은 자화상태의 동역학에 영향을 주는 중요한 요인 중의 하나는 자기에너지(magnetic energy)가 보존되지 않고 열에너지로 전환된다는 점이다. 전하가 움직여 전류가 생성되면 전기에너지가 열에너지로 전환되는 것처럼 자화상태가 시간에 따라 변하면 자기에너지가 열에너지로 전환되는데 이 전환이 얼마나 빨리 일어나는지가 자화벽 운동 속도에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 자기장에 의한 자화벽 운동을 고려해 보자. 자기장의 효과는 제만 에너지(Zeeman energy)를 통해 기술되는데 자화벽이 그림 1에서처럼 나노선을 따라 계속 움직이려면 제만 에너지는 계속 감소해야 한다. 그런데 제만 에너지는 보존력이기 때문에 자기에너지가 열에너지로 변환되는 과정이 없는 제만 에너지가 계속 감소하는 것은 불가능하고 따라서 자화벽 운동도 일어나지 않는다. 그러므로 자기장에 의한 자화벽 운동의 속도가 얼마인가는 에너지 감쇠가 얼마나 빨리 일어나는지에 따라 크게 영향을 받는다.

자성체에서의 에너지 감쇠는 흔히 길버트 감쇠계수(Gilbert damping coefficient)^[6] 또는 란다우-리프쉬츠 감쇠계수(Landau-Lifshitz damping coefficient)^[7]를 통해 기술되는데 이 계수들은 전자회로의 비저항(resistivity)과 유사하게 각 자성체마다 고유한 값을 가지고 자성체의 모양, 크기의 영향을 받지 않는다고 믿어져 왔다. 그런데 1999년에 자성나노구조에서의 스핀전달토크 효과에 대한 실험 결과가 Science에 게재되었고^[8] 이 실험 결과를 분석하는 과정에서 실험에 사용된 자성체에 대한 감쇠계수가 기존에 알려진 값보다 열 배 이상 크다는 것을 가정하지 않으면 실험 결과를 설명하기 어렵다는 것이 발견되었다. 그 후 2002년에 발표된 이론 논문을 통해서^[9] 자성체의 크기가 작아지면 스핀펌핑(spine pumping)이라는 양자효과가 중요해지면서 감쇠계수가 자성체의 크기, 모양 등에 영향을 받는다는 것이 알려지게 되었다. 스핀펌핑 외에도 다른 여러 양자효과가 감쇠계수에 미치는 영향에 대한 연구가 현재 진행 중이고^[10,11] 이 연구들을 통해서 자기자유도(magnetic degree of freedom)가 전기자유도(electric degree

Fig. 5. The relation between the domain wall velocity v_{DW} and the current density j . As the ratio β/α grows, the relation changes from red to black to blue lines. Here α and β denote the Gilbert damping coefficient and the nonadiabaticity coefficient, respectively. For the red line, the ratio is zero and for the black line, the ratio is 1.

of freedom) 등의 다른 자유도와 상호작용하는 미시적 과정에 대한 점점 더 정밀한 지식이 얻어지고 있다.

자화벽 운동에 영향을 주는 또 하나의 주요한 요인은 소위 비점진적 스핀전달토크(nonadiabatic spin transfer torque)라고^[12,13] 불리는 새로운 종류의 스핀전달토크이다. 반면 위에서 설명한 스핀전달토크는 점진적 스핀전달토크(adiabatic spin transfer torque)라고 불린다. 그림 2에서 붉은색 화살표가 점진적 스핀전달토크의 방향을 나타내는 반면 그림에서 검은 색으로 표시된 수직 방향으로 나오는 토크가 비점진적 스핀전달토크의 방향을 나타내고 이 두 가지 스핀전달토크는 항상 서로 수직을 이룬다. 비점진적 스핀전달토크가 발생하는 원인은 전도전자의 스핀 자기모멘트가 자화방향과 작용-반작용을 하면서 주고 받는 스핀각운동량의 방향이 점진적 스핀전달토크를

REFERENCES

- [6] T. L. Gilbert, Phys. Rev. **100**, 1243 (1955).
- [7] L. D. Landau, E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevski, *Statistical Physics*, Part 2, 3rd ed. (Pergamon, Oxford, 1980).
- [8] E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie and R. A. Buhrman, Science **285**, 867 (1999).
- [9] Y. Tserkovnyak, A. Brataas and G. E. W. Bauer, Phys. Rev. Lett. **88**, 117601 (2002).
- [10] K. Gilmore, Y. Y. Idzerda and M. D. Stiles, Phys. Rev. Lett. **99**, 027204 (2007).
- [11] I. Garate, K. Gilmore, M. D. Stiles and A. H. MacDonald, Phys. Rev. B **79**, 104416 (2009).
- [12] S. Zhang and Z. Li, Phys. Rev. Lett. **93**, 127204 (2004).
- [13] A. Thiaville, Y. Nakatani, J. Miltat and Y. Suzuki, Europhys. Lett. **69**, 990 (2005).

논의하는 과정에서 가정한 방향과 어긋나기 때문에 발생하는 것으로 이 어긋나는 정도가 자화벽 운동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 2005년에 발표된 논문^[13] 의하면 어긋나는 정도를 기술하는 비점진 계수(nonadiabaticity coefficient)가 길버트 감쇠계수와 같은 값을 가질 때는 비점진적 스핀전달토크와 에너지 감쇠 효과가 서로 상쇄되면서 점진적 스핀전달토크의 효과만 남아 자화벽 운동 속도가 전류 밀도에 비례하지만 (그림 5 참조) 비점진 계수가 길버트 감쇠계수와 다를 경우에는 전류 밀도의 크기에 따라 자화벽 운동 속도와 전류 밀도와의 관계가 그림 5에서처럼 달라지는 것으로 예측되었다.

비점진 계수는 스핀전달토크에 의한 자화벽 운동에 영향을 미치는 중요한 변수이지만 비점진 계수의 값에 대해서는 아직 확실히 밝혀진 것이 많지 않다. 일부 이론에 의하면^[14,15] 길버트 감쇠계수에 기여하는 에너지 감쇠 메커니즘이 비점진 계수에도 동일한 기여를 만들어내기 때문에 두 계수의 값이 항상 같다고 하는 반면 또 다른 일부 이론에서는^[16,17] 두 계수의 비율이 일반적으로 같을 이유가 없다고 주장하고 있다. 실험에서 이 두 계수의 비율을 측정하려는 시도도 여러 번 있었지만 보고된 값은 1에서 10 사이의 넓은 범주에 퍼져 있어서 계속 논쟁의 대상이 되고 있다. 이상적인 자성나노선의 경우에는 자화벽 운동 속도와 전류 밀도와의 관계로부터 이 두 계수의 비율을 바로 결정할 수 있지만 실제 실험 상황에서는 자화벽의 운동을 방해하는 불순물들이 항상 존재하고 현재까지의 모든 실험에서는 불순물들의 효과가 상당하기 때문에 이 두 계수의 비율을 실험에서 정확하게 정하기 어려운 상황이라서 여러 실험적 노력에도 불구하고^[18] 비점진 계수에 관한 논란은 계속될 전망이다.

자화벽 운동과 관련되어 스핀기전력(spin motive force)이라는^[19] 물리현상이 근래에 관심을 받고 있다. 스핀기전력 현상은 자성체 내에 있는 전자가 스핀 때문에 느끼는 기전력으로서, 자기장이 변할 때 기전력(electromotive force)이 발생한다는 Faraday 법칙과 유사하지만 전하의 역할을 스핀이 대신한다는 점에서 차이가 있다. 일반 기전력의 경우는 전하가 느끼는 자기장 변화로 인해 발생하지만 스핀기전력의 경우는 자성체 안에 있는 스핀이 느끼는 자성체 자화 방향의 변화로 인해 발생한다. 또 일반 기전력에 의해 전자에 가해지는 힘은 전하의 부호에 따라 방향이 달라지지만 스핀 기전력에 의해 전자에 가해지는 힘은 스핀 성분의 부호에 따라 방향이 달라진다. 예를 들어 +z 방향으로 자화된 영역에서 스핀이 +z 방향인 전자와 -z 방향인 전자가 느끼는 스핀기전력에 의한 힘은 서로 반대 방향이다. 자화벽 운동 때 발생하는 스핀기전력이 실험에서 측정되어^[20] 2009년에 보고되었고

자기터널접합에서 발견된 스핀배터리(spin battery) 현상도 스핀기전력과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되었다.^[21] 초기 몇몇 중요 실험을 통해 스핀기전력의 존재 자체는 실험적으로 확립이 되었지만 스핀기전력의 성질 및 효과에 대해 아직 이해되지 않은 것이 많이 남아 있어서 많은 추가 연구가 필요하다.

맺는 글

나노자성체를 만드는 능력이 급속히 좋아지면서 오랫동안 이론적 상상에 머물렀던 여러 가지 흥미로운 현상들이 실험적으로 검증되기 시작하였다. 전자들이 스핀각운동량을 주고 받으면서 발생하는 스핀전달토크의 경우 이론상으로 이 가능성이 논의되기 시작한 것은 1970년대 후반부터이지만^[22] 스핀전달토크 효과가 실험에서 검증되기 시작한 것은 2000년 전후부터이다. 또한 정밀한 실험을 통해서 이전에 예측하지 못한 새로운 현상들이 발견되고 이를 이해하기 위한 이론적 노력들이 더해지면서 나노자성체 분야는 최근 10년 동안 실험과 이론의 긴밀한 협조 아래 큰 발전을 이루어냈다. 그리고 실험, 이론 양쪽에서의 빠른 발전은 나노자성체 기반 미래 소자들의 구현 가능성을 점점 높이고 있다. 자화벽 운동은 나노자성체 분야의 이런 급속한 발전에서 중요한 역할을 한 현상으로 앞으로도 실험과 이론 양쪽 모두에서 중요한 연구 주제로 많은 추가 연구가 이루어질 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [14] S. E. Barnes and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett. **95**, 107204 (2005).
- [15] Y. Tserkovnyak, H. J. Skadsem, A. Brataas and G. E. W. Bauer, Phys. Rev. B **74**, 144405 (2006).
- [16] H. Kohno, G. Tatara and J. Shibata, J. Phys. Soc. Japan **75**, 113706 (2006).
- [17] R. A. Duine, A. S. Nunez, J. Sinova and A. H. MacDonald, Phys. Rev. B **75**, 214420 (2007).
- [18] C. Burrowes, A. P. Mihai, D. Ravelosona, J.-V. Kim, C. Chappert, L. Vila, A. Marty, Y. Samson, F. Garcia-Sanchez, L. D. Buda-Prejbeanu, I. Tudosa, E. E. Fullerton and J.-P. Attane, Nat. Phys. **6**, 17 (2010).
- [19] S. E. Barnes and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett. **98**, 246601 (2007).
- [20] S. A. Yang, G. S. D. Beach, C. Knutson, D. Xiao, Q. Niu, M. Tsoi and J. L. Erskine, Phys. Rev. Lett. **102**, 067201 (2009).
- [21] P. N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka, S. E. Barnes and S. Maekawa, Nature **458**, 489 (2009).
- [22] L. Berger, J. Appl. Phys. **3**, 2156 (1978).