스커미온 전자소자

DOI: 10.3938/PhiT.28.043

최 준 우

Skyrmion Electronics

Jun Woo CHOI

Magnetic skyrmions are cylindrical swirling topological spin structures found in chiral magnetic systems. The topology of a skyrmion determines many of its interesting fundamental and dynamical properties. Moreover, its nanometer size and efficient current-driven manipulation makes it suitable for information storage and logic operations. In this article, we briefly introduce the ongoing magnetic skyrmion research activity at the Korea Institute of Science and Technology (KIST).

초저전력-초고집적 스핀메모리 개발의 필요성

최근 빅데이터, 사물인터넷, 클라우드 컴퓨팅, 신경망 모사 등으로 인한 정보 저장 및 처리의 증가로 반도체 및 정보 소자의 수요가 급증하고 있다. 또한 반도체 소자의 미세화와 고집적화로 인해 전력 소모의 증가와 소자의 발열 문제가 발생하고 있다. 반도체 산업이 국가 경제를 이끄는 중요한 위치에 있음을 감안할 때, 초저전력-초고속-초고집적 차세대 메모리 반도체에 대한 투자와 연구가 중요한 상황이다.

차세대 메모리의 유력 후보 중 하나는 고집적 비휘발성 메모리인 스핀전달토크 자기 메모리(spin transfer torque magnetic random access memory, STT-MRAM)이다. STT-MRAM은 전류를 이용해 스핀 정보를 제어하는 방식으로 동작하며, 현재 실용화 단계에 있다. 하지만 STT-MRAM은 열적 안정성, 구동 효율 등에 문제점이 있어서 보다 성능이 우수한 스핀 메모리소자에 대한 연구가 필요하다. 스핀트로닉스 학계에서는

STT-MRAM 이후의 스핀 메모리 개발을 위해 스핀-궤도 토크를 이용하여 스핀 정보를 제어하고 저장하는 방식에 대한 연구, 초소형 스핀 구조체인 자성 스커미온(magnetic Skyrmion)을 활용한 스핀 전자소자 개발 연구 등이 활발히 이루어지고 있다.

자성 스커미온

강자성 물질에서는 exchange interaction으로 인해 인접한 전자의 스핀들이 같은 방향으로 정렬되는데, 특정 물질에서는 스핀들이 직각으로 정렬되게 하는 지알로신스키-모리야 상호작용(Dzyaloshinskii-Moriya interaction, DMI)이 존재한다.^[1,2] DMI는 반전 대칭성이 깨진 물질에서 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)으로 생기는데, 깨진 반전 대칭성은 격자 구조 자체 혹은 박막구조의 계면에서 생길 수 있다. DMI와 exchange interaction의 경쟁으로 스핀들이 방향성(왼쪽 혹은 오른쪽)을 가지고 나사선처럼 돌아가는 카이럴 자성(chiral magnetism)이 나타난다. 자성 스커미온은 카이럴 자성 물질에서 나타나는 대표적인 카이럴 자기 구역(magnetic domain) 구조로서, 수직자화 박막에서 Bubble 모양으로 나타나며 인접한 전자의 스핀들이 방향성(왼쪽 혹은 오른쪽)을 가지고 나사선 형태로 정렬되어 있다(그림 1a). 자성 스커미온은 대칭성이 깨진 격자구조의 단결정에서 2009년 처음으로 실험적으로 발견되었으며,^[3,4] 이후 고격자성 초박막(epitaxial ultrathin film)에서도 발견되었다.^[5] 이런 물질들에서는 자성 스커미온이 극저온, 고자기장에서 형성되었다.

자성 스커미온은 특유의 위상학적 안정성, 수 nm의 작은 크기, 효율적 움직임 등을 가지고 있어서 스커미온을 기본 정보 단위로 활용하는 스핀메모리, 스핀로직, 뉴로모픽 컴퓨팅 등이

저자약력

최준우 박사는 2008년 University of California, Berkeley에서 물리학 박사 학위를 취득했고, 2008년 12월부터 한국과학기술연구원(KIST) 차세대반도체연구소 스핀융합연구단에서 선임연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 자성 박막 및 스핀트로닉스이다.(junwoo@kist.re.kr)

REFERENCES

- [1] I. Dzyaloshinskii, J. Phys. Chem. Solids **4**, 241 (1958).
- [2] T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960).
- [3] S. Muhlbaier *et al.*, Science **323**, 915 (2009).
- [4] X. Z. Yu *et al.*, Nature **465**, 901 (2010).
- [5] S. Heinze *et al.*, Nat. Phys. **7**, 713 (2011).

Fig. 1. Schematic diagrams of a Neel wall skyrmion [adapted from <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2skyrmions.PNG>] and skyrmion memory.

제안이 되고 있다.^[6-10] 스커미온 전자소자의 구현을 위해서는 스커미온을 생성 및 소멸시키는 ‘쓰기’ 기술, 스커미온의 효율적 이동 등 ‘제어’ 기술, 스커미온을 검출하는 ‘읽기’ 기술의 개발이 필요하며, 이러한 기능들이 상온에서 전기적인 방법으로 가능해야 한다(그림 1b). 최근에 발견된 다층박막구조(Pt/Co/Ta, Pt/CoFeB/MgO 등) 소재의 스커미온은 상온에서 안정적으로 형성될 뿐만 아니라, 전류인가 동역학(dynamics)도 구현되어,^[10-15] 전자소자로의 활용이 기대되고 있다.

해외에서는 일본 동경대학교, 미국 MIT, 프랑스 파리대학교 등에서 경쟁적으로 스커미온에 대한 연구를 수행 중이다. 또한 스커미온 연구 분야에 대한 활발한 연구비 투자가 이루어지고 있다. 미국(C-SPIN/5년/330억 원)과 싱가포르(SG-SPIN/5년/300억 원)에서는 국가 주도의 스핀트로닉스 사업에서 스커미온 분야의 연구과제가 다수 수행되고 있으며, 영국(The Skyrmion Project/7년/105억 원)과 유럽연합(Magic-Sky/5년/40억 원)에서는 스커미온 연구만을 위한 국가적 대형연구과제가 수행되고 있다. 한국과학기술연구원(KIST) 차세대반도체연구소 스핀융합 연구단에서는 2016년부터 자성 스커미온 소자 및 소재에 대한 연구를 주도적으로 진행 중이다. 특히 스커미온 전자소자의 전류인가 동역학적 특성에 대한 연구를 집중적으로 수행 중이며, 준강자성체나 이차원 자성체 등 자성 스커미온이 형성되고 효율적으로 제어 가능한 소재에 대한 연구도 활발히 하고 있다.^[10,12-15]

전류인가 초고속 자성 스커미온 동역학

스커미온 기반 스핀 메모리 개발을 위해서는 전기적으로 스

Fig. 2. The multilayer structure and magnetic domains of $[Pt/CoFeB/MgO]_{20}$.^[12]

커미온을 제어할 수 있는 방법, 특히 펄스전류로 스커미온의 효율적인 움직임을 구현해야 한다. 나노초 펄스전류 인가 중에 스커미온의 동역학을 실시간 관측한다면, 전류 인가 스커미온 운동 메커니즘에 대한 물리적인 이해를 높일 수 있을 뿐만 아니라 새로운 나노초 동역학 모드도 탐색 가능할 것이다. 스커미온의 나노스케일 크기와 빠른 운동속도로 인하여 스커미온 동역학은 측정이 쉽지 않으며, 기존 연구에서는 펄스전류 인가 전후 스커미온의 ‘정적(static)’인 위치측정 등에 제한되어 있었다.^[11] 본 연구에서는 스커미온 관찰을 위해 높은 공간 분해능으로 자성 이미징이 가능한 방사광가속기의 투과엑스선 현미경(transmission x-ray microscopy)을 활용하였다(20 nm 내외의 공간 분해능). 투과엑스선현미경은 엑스선 자기 원편광 이색성(x-ray magnetic circular dichroism, XMCD)을 이용하여 자성신호를 검출한다. 또한, stroboscopic pump-probe 방식의 측정으로 자기장/전기장/펄스전류 인가 중 동역학 관찰이 가능하여(100 ps 내외의 시간 분해능), 일반적으로 알려진

REFERENCES

- [6] A. Fert, V. Cros and J. Sampaio, Nat. Nanotechnol. **8**, 152 (2013).
- [7] N. Nagaosa and Y. Tokura, Nat. Nanotechnol. **8**, 899 (2013).
- [8] W. Kang *et al.*, Proc. IEEE **104**, 2040 (2016).
- [9] X. Zhang *et al.*, Sci. Rep. **5**, 9400 (2015).
- [10] K. M. Song *et al.*, arxiv 1907.00957 (2019).
- [11] S. Woo *et al.*, Nat. Mater. **15**, 501 (2016).
- [12] S. Woo *et al.*, Nat. Commun. **8**, 15573 (2017).
- [13] S. Woo *et al.*, Nat. Commun. **9**, 959 (2018).
- [14] S. Woo *et al.*, Nat. Electronics **1**, 288 (2018).
- [15] T. E. Park *et al.*, arxiv 1907.01425 (2019).

Fig. 3. Time resolved measurements of current pulse induced magnetic skyrmion dynamics.^[12]

스커미온 동역학의 시간 범위인 수 나노초 동안의 현상 변화에 대한 분석이 매우 용이하다.

실험에 사용한 소재는 스퍼터 증착된 Pt/CoFeB/MgO 수직 자화 박막이 20번 반복되는 자성 다층 박막 구조로(그림 2a), 이 구조에서는 dipolar interaction으로 인해 무자기장 상태에서는 자화가 up인 자기 구역과 자화가 down인 자기 구역이 50:50으로 존재하는 stripe domain이 형성된다(그림 2b; 검은 색과 흰색 영역은 각각 자화가 +z, -z 방향인 자기 구역임). 또한 Pt/CoFeB 계면에서 생기는 DMI에 의해 자기 구역(자기 구역의 경계면)의 스핀들이 방향성을 가지고 돌아가는 chiral Neel 자기 구역벽을 형성한다(그림 2c). Stripe 형태의 자기 구역에 자기장을 인가하면 100 nm 내외의 크기의, 몇 개의 고립된 bubble 형태의 스커미온이 형성된다(그림 2b).^[12]

Pt/CoFeB에 전류를 흘려주면, Pt에 생기는 스핀홀 효과(전류에 의한 전류에 수직인 방향으로 발생하는 스핀 분극)에 의해 스핀-궤도 토크(spin-orbit torque, SOT)가 발생한다. SOT로 인해 스커미온의 chiral Neel 자기 구역벽이 움직이게 되어, 전류 인가 스커미온 이동, 생성, 소멸 등의 동역학적 특성

이 나타난다. 스커미온 동역학을 관측하기 위해 2 micron 너비의 wire 형태로 제작된 소자에 바이폴라(bipolar) 전기펄스를 인가하면서 투과엑스선현미경 측정을 실시하였다(그림 3a, b). Pump-probe 방식의 측정을 위해 전기펄스 간의 간격을 방사광속기 광(light)펄스와 동기화시키고 전기펄스와 광펄스 사이에 시간지연(time delay)을 주었다. 앞서 언급한 바와 같이 SOT에 의해 스커미온 동역학이 유도되는데, 전류 크기에 비례하는 SOT를 제어하기 위해 3가지 다른 진폭의 펄스를 인가하였다($V_a = 1.5$ V, 2.0 V, 2.5 V). 1.5 V 펄스에서는 작은 스핀-토크로 스커미온이 아무런 움직임을 보이지 않았다. 2.0 V 펄스를 인가하면, 스커미온의 중심 위치는 고정되어 있고 그 크기가 주기적으로 변화하는 ‘호흡’ 운동과 같은 동역학 모드를 관측할 수 있다(그림 3c, e). 2.5 V 펄스를 인가하면, 스커미온이 이동하는 것이 관측된다(그림 3d, f). + 방향 pulse에서는 스커미온이 위쪽으로 움직이고(그림 3d 위쪽 패널들), - 방향 pulse에서는 스커미온이 방향을 바꾸어 아래쪽으로 움직이는 것을 볼 수 있다(그림 3d 아래쪽 패널들). 즉, bipolar 펄스를 인가하면 스커미온이 전류방향을 따라(전자와 반대 방향) 위쪽

Fig. 4. Ferrimagnetic skyrmions and the reduced skyrmion Hall effect.^[13]

으로 움직였다가 다시 원위치로 돌아온다. 한편, SOT에 의한 자기 구역력의 이동 방향은 스커미온의 chirality(스핀들이 돌아가는 방향성)에 의해 결정되기 때문에, 스커미온 이동 방향으로부터 이 박막구조의 스커미온은 left-handed chirality를 가지는 것을 알 수 있다.^[12]

기존에 보고된 정적(static) 측정과 달리, 본 연구에서는 최초로 전류 펄스 인가 중의 나노초 스커미온 동역학을 실시간으로 측정하였다. 특히 같은 스핀 전자 소자에서 외부 전기 신호의 크기만 변화시킴으로써 스커미온 호흡운동과 스커미온 이동 등의 서로 다른 동역학 모드를 제어할 수 있는 것을 밝혔다.

준강자성체 스커미온

Pt/CoFeB/MgO와 같은 강자성체 스커미온에서는 전류 방향(또는 반대 방향)으로의 움직임에 더해, 스커미온 홀효과(Skyrmion Hall effect)에 의해 스커미온이 전류의 횡축(transverse) 방향으로의 움직임도 발생한다.^[16] 스커미온 홀효과가 있으면 스커미온이 wire 모양 소자의 가장자리로 이동하여 소멸하게 되어 스커미온 메모리 개발에 문제가 된다. 전산 모사 결과에 의하면, 준강자성체(ferrimagnet)나 반강자성체(antiferromagnet)에서는 자화가 반대인, 강하게 결합된 두 스

커미온에 작용하는 스커미온 홀효과가 반대여서 전체 스커미온 홀효과가 감소되거나 상쇄될 것으로 예측이 된다.^[17,18]

본 연구에서는 준강자성체 $Gd_{25}Fe_{66}Co_9$ 다층박막(Pt/GdFeCo/MgO)에서 스커미온을 관측하고자 하였다. 이 구조에서도 마찬가지로 무자기장 상태의 stripe domain이 자기장 인가 후에는 몇 개의 고립된 스커미온이 되고(그림 4a), 펄스전류를 가하면 전류방향으로 스커미온이 이동하는 것을 볼 수 있다(그림 4b). 한편 XMCD 효과로 자성을 측정하는 투과엑스선현미경은 원소 선택적인 측정이 가능하다. 그림 4a에서 GdFeCo 다층박막의 Fe의 자기 구역과 Gd의 자기 구역의 명암이 반대로 관측되는 것은 여기서 관측된 스커미온들은 Gd의 스핀들과 Fe의 스핀들이 반평행하게 정렬되어 있는 준강자성 스커미온임을 의미한다(그림 4c). 스커미온이 전류방향과 그 횡축 방향으로 이동한 거리의 비율인 스커미온 홀 각도를 구하면, 준강자성 스커미온의 스커미온 홀 각도는 $\sim 10^\circ$ 정도로, 강자성 스커미온의 스커미온 홀 각도($\sim 30^\circ$)보다 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 즉 강자성 스커미온에 비해 준강자성 스커미온의 스커미

REFERENCES

- [16] W. Jiang *et al.*, Nat. Phys. **13**, 162 (2016).
- [17] J. Barker *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 147203 (2016).
- [18] X. Zhang *et al.*, Sci. Rep. **6**, 24795 (2016).

Fig. 5. Current pulse induced skyrmion writing and deleting.^[14]

온 홀 효과가 확연히 줄어드는 것을 알 수 있다(그림 4d).^[13] GdFeCo에서는 Gd 자화와 FeCo 자화의 크기가 달라서 스커미온 홀 효과가 완전히 상쇄되지 않는데, 자화가 완전히 상쇄되는 반강자성 스커미온에서는 스커미온 홀 효과를 최소화할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, 전산모사에 의하면 반강자성체에서는 스커미온 이동도도 획기적으로 증가할 것으로 예측되어 훨씬 효율적인 전류 인가 스커미온 동역학을 보일 것으로 예상된다.^[17,18]

펄스전류에 의한 자성 스커미온 쓰기 및 지우기

스커미온 기반 메모리 개발을 위해서는 스커미온 이동 등의 ‘제어’ 기능뿐만 아니라 전기적인 방법으로 스커미온을 생성-소멸시키는 ‘쓰기 및 지우기’ 기능을 수행할 수 있어야 한다. 이를 위해 해외 여러 선도그룹에서 펄스전류 등으로 단일 스커미온을 생성-소멸시키는 연구를 수행하고 있는데 대부분 전산모사나 초기실험 단계에 머물러 있다. 이러한 방법을 최적화하고, 생성-소멸 과정 메커니즘의 이해를 위한 추가적인 연구가 필요하다.

Pt/GdFeCo/MgO 준강자성체 다층 박막 구조에서 단일 스커미온을 생성(쓰기)하고 소멸(지우기)시키기 위해 서로 반대 방향의 극성을 가진 10 ns 길이의 bipolar 펄스를 인가하였다. - 방향 전류가 먼저 인가되는 bipolar 펄스의 경우 스커미온

이 생성되며, + 방향 전류가 먼저 인가되는 bipolar 펄스의 경우 스커미온이 소멸되는 것을 관찰하였다(그림 5).^[14] 펄스-프로브 방식으로 측정한 투과엑스선현미경 이미지들은 10^9 회 이상 반복된 측정의 평균 이미지로 반복적인 현상만 관측이 가능하다. 따라서 관측한 전류 인가 자성 스커미온 생성/소멸 과정이 랜덤한 위치에서 일어난 것이 아니고 같은 위치에서 반복적으로 생성/소멸된 것으로 deterministic 쓰기/지우기 방법이다. 전산모사로 실험적으로 관측한 쓰기/지우기 방법의 메커니즘을 이해하고, 단일 스커미온 쓰기/지우기를 위한 적절한 펄스전류의 크기 및 시간길이를 찾을 수 있었다. 한편, 펄스전류의 크기를 증가시키면 단일 스커미온이 아닌 다수의 스커미온도 쓰기/지우기할 수 있어서 전류(또는 전압) 크기에 따라 스커미온의 개수를 제어 가능함을 보였다.^[14]

향후 전망

스커미온 전자소자의 구현을 위해서는 본 연구들에서 보여준 스커미온 쓰기-지우기 기술, 스커미온 이동 기술과 함께 스커미온 ‘읽기’ 기술의 개발이 필요하다. 스커미온을 전기적으로 검출하기 위해 자기터널저항(tunneling magnetoresistance)나 홀효과(Hall effect)에 기반한 여러 가지 방법이 제안이 되고 있다.^[19-21] 또한 초고집적-초저전력-초고속 소자 동작을 위해 DMI, SOT, 자기 구역벽 이동 속도 등이 향상된 자성 소재의 최적화가 필요하다. 다강체, 산화물 이중접합, 반데르발스 자성체 등의 소재에서도 자성 스커미온이 발견되어서^[15,22,23] 새로운 양자 물리 현상의 발견과 함께 다양한 가능성을 가진 스커미온 스핀소자의 개발이 기대되고 있다.

REFERENCES

- [19] D. M. Crum *et al.*, Nat. Commun. **6**, 8541 (2015).
- [20] C. Hanneken *et al.*, Nat. Nanotechnol. **10**, 1039 (2015).
- [21] C. H. Li *et al.*, Nat. Nanotechnol. **9**, 218 (2014).
- [22] S. Seki *et al.*, Science **336**, 198 (2012).
- [23] L. Wang *et al.*, Nat. Mater. **17**, 1087 (2018).