스핀전달토크를 이용한 스핀트로닉스 소자

DOI: 10.3938/PhiT.19.035

김우진·이경진

Spintronics Devices Using Spin-Transfer Torque

Woojin KIM and Kyung-Jin LEE

Spintronics is the spin-based electronics where the electron spin carries information. It offers opportunities for a new generation of devices combining standard electronics with spin-dependent effects. The conventional means to handle the electron spin has been the magnetic field. The spin-transfer torque (STT) was first predicted in 1996, and stimulated extensive studies on its rich physics and novel applications. STT enables us to manipulate the electron spin using the spin-polarized current, and thus broadens the degree of freedom to control the electron spin. Thanks to STT, Magnetic Random Access Memory (MRAM) was provided with the novel write scheme which solves crucial problems of the conventional field-induced magnetization switching. The current flowing in the magnetic nanowire induces the translational motion of the magnetic domain wall. The current-induced domain wall motion has provided the new concept of magnetic memory like Magnetic Racetrack Memory. Moreover, STT-induced magnetization oscillation is studied for the application of the GHz-range microwave generator. In this article, we will briefly look into the principles of STT and introduce the concepts of its principal applications with recent status.

들어가는 글

스핀트로닉스 분야는 전자의 스핀에 의해 발생하는 물리현

저자약력

김우진 박사는 한국과학기술원 공학박사(2009)로서 현재 고려대학교 신소재공학과에서 연구교수로 재직 중이다. (woojin.s.kim@gmail.com)

이경진 교수는 한국과학기술원 공학박사(2000)로서 삼성종합기술원 선임연구원, 프랑스 SPINTEC (CNRS-CEA) 박사 후 과정을 거쳐 현재 고려대학교 신소재공학과에서 부교수로 재직 중이다. (kj_lee@korea.ac.kr)

상과 이를 이용한 새로운 응용소자에 대해 연구하는 분야이다. 전자의 스핀특성을 이용한 다양한 물리현상 중 “스핀전달토크(Spin-Transfer Torque, 이후 STT)”로 불리는 현상은 1996년 미국 IBM의 Slonczewski 박사^[1]과 미국 카네기-멜론 대학의 Berger 교수^[2]에 의해 이론적으로 제안되었다. 이후 15년이 흐르는 동안 다양한 이론적 실험적 연구의 결과로써, STT는 차세대 DRAM용 자기메모리(STT-MRAM), 차세대 SRAM 혹은 Flash 메모리용 자벽메모리 소자(Magnetic Domain Wall Devices), 통신소자용 나노 스핀토크 발진기(Spin-Torque Nano-Oscillator) 등의 새로운 스핀트로닉스 소자의 연구개발에 중심축이 되어왔다. 특히 STT-MRAM의 경우 국내 반도체 기업인 삼성전자와 하이닉스에서 2000년대 중반부터 이에 대한 자체 연구개발이 진행 중이었으며, 2008년부터는 지식경제부의 지원 하에 국내 여러 연구그룹과 함께 고밀도용 수직 STT-MRAM에 대한 공동연구과제가 진행 중이며, 세계 유수의 반도체 기업, 연구그룹들과 경쟁적으로 STT-MRAM의 제품화를 위한 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

이 글에서는 STT의 원리와 지금까지 STT 실험을 통하여 밝혀진 특이한 자화거동현상을 요약하고, STT를 이용한 새로운 응용소자들의 구동기구를 소개해 본다.

STT의 원리

STT는 거대자기저항(Giant Magneto-Resistance, 이후 GMR) 효과의 반작용으로 설명할 수 있다. 그림 1과 같이, ‘자성층/비자성층/자성층’으로 이루어진 자성다층박막 구조에서 두 자성층의 자화방향이 평행일 때 전기저항이 작아서 많은 전류가 흐르고, 반평행일 때 전기저항이 커서 작은 전류가 흐르는 현상이 GMR 효과이다. 이 GMR 효과는 하드디스크드라이브(Hard Disk Drive, 이후 HDD)의 읽기헤드(Read Head)에 사용되어 HDD가 정보저장매체로서 널리 사용되는 데 결정적인 역할을 하였다. Peter Grunberg와 Albert Fert는 GMR

REFERENCES

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

Fig. 1. Schematic illustration of GMR effect in spin valve structure of ferromagnetic layer (FM) / non-magnetic layer (NM) / ferromagnetic layer (FM).

효과의 발견으로 2007년 노벨 물리학상을 수상하였다.^[3]

뉴턴의 제 3 법칙은, 모든 작용에는 그 크기가 같고 방향이 반대인 반작용이 발생함을 명시한다. GMR 효과는 자화의 방향에 따라 흐르는 전류 (스핀전류)의 양을 변화시킨다. 따라서 여기에 대한 반작용으로 전류 (스핀전류)를 가함으로써 자화의 방향을 변화시키는 것 역시 가능하고, 이것이 바로 STT이다. STT는 기본적으로 양자역학적인 효과이다. 전류를 이루는 전도전자의 스핀은 전류가 비자성금속(NM)과 자성금속(FM)으로 구성된 NM/FM/NM 구조를 통과하여 흐르면서 스핀분극되는데, 이를 스핀여과(spín-filtering) 효과라고 한다. 이는 비자성금속과 자성금속의 경계면에서 전도전자의 반사 확률이 자성금속의 자화 방향에 대한 전도전자의 스핀 방향에 따라 달라지기 때문이다. 스핀여과의 결과로서 전도전자의 스핀 방향, 즉 전류의 스핀분극 방향은 자성금속의 자화 방향과 같게 된다. 그림 2(a)는 자성체가 완벽한 스핀여과체(spín-filter)라고 가정했을 때의 스핀여과 효과를 개략적으로 보여준다. NM/FM1/NM/FM2/NM의 스핀밸브(spín valve) 구조에서 FM1에 의해 여과된 전도전자의 흐름, 즉 스핀분극 전류(spín-polarized current)는 FM1에 대하여 비평행한(non-collinear) 자화 방향을 가진 FM2에 의하여 다시 한 번 여과된다. 두 번째 스핀여과 과정에서 전도전자의 스핀은 FM2의 자화방향으로 스핀분극된다. 이때 스핀각운동량은 항상 보존되어야 하기 때문에, 전도전자의 스핀각운동량 변화에 상응하는 힘이 FM2의 자화에 전달되어 전도전자의 스핀분극 방향 변화와 반대 방향으로 FM2의 자화 방향을 변화시키는 돌림힘(torque), 즉 스핀전달토크(STT)가 FM2의 자화에 작용하게 된다(그림 2(b)). STT는 자화가 자기장이 아니라 전류와 직접 상호작용하여 방향이 변화하는 현상이다. 따라서 이를 이용하면 자기장 없이 전류를 인가하는 것만으로도 자화의 방향을 바꿀 수 있다. 앞에서 예로 들었던 스핀밸브 구조에서

Fig. 2. Schematic illustrations (a) of spin-filtering assuming the ferromagnet (FM) as a perfect spin-filter, and (b) of spin-transfer torque.

자화의 방향을 바꾸는 것 외에도, 적절한 크기와 방향의 자기장과 전류를 동시에 가하면, 자화가 자기장이나 전류가 유도하는 방향으로 고정되지 않고, 일정한 주파수로 계속해서 회전하도록 만들 수 있다. 나노 소자의 크기가 작아지면 일반적으로 자기장을 가하였을 때, 소자는 균일한 자화 상태의 거동을 보인다. 하지만 STT에 의한 자화 상태의 거동은 자기장을 가했을 경우보다 훨씬 작은 크기의 소자에서도 복잡한 자화 상태를 만들어 낸다. 미소자기학 모델링을 사용한 연구는 이러한 복잡한 자화 상태가 STT에 의한 자화 거동의 특성에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였다.^[4]

또한, STT는 스핀밸브구조와 같은 자성다층 구조에서만 발생하는 것이 아니라, 균일한 자화 방향을 갖지 않는 단일 자성체에 전류가 흐를 때에도 작용한다. 자성체에서 자화의 방향이 균일한 영역을 자구(Magnetic Domain)라고 하고, 서로 다른 자구 사이에 자화의 방향이 변화하는 영역을 자구벽(Magnetic Domain Wall, 또는 자벽)이라고 부른다. 자벽은 자화 상태가 균일하지 않은 자성체에서 일반적으로 관찰할 수 있는 자화 구조이다. 전류는 자성체 내부를 흐를 때, 자성체의 자화방향으로 스핀분극되어 흐른다. 따라서 자성체의 자화방향이 변화하면 전류의 스핀분극 방향도 변화하는데, 이때 자성체의 자화와 상호작용하여 STT를 발생시키고, 결과적으로 자성체의 자화 방향을 변화시키게 된다. 그림 3의 개략도를 보면, 자성체의 왼쪽과 오른쪽에 반대 방향의 자화를 갖는

REFERENCES

- [3] S. M. Thompson, J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 093001 (2008).
- [4] K. -J. Lee, A. Deac, O. Redon, J. -P. Nozieres and B. Dieny, Nat. Mater. **3**, 877 (2004).

Fig. 3. Schematic illustration to show the magnetic domain and magnetic domain wall, and to describe the motion of domain wall induced by current. Cartoons from top to bottom indicate the time-evolution of the domain wall motion under the applied current in left direction as shown at the figure.

자구가 있고, 그 가운데에 자벽이 존재하고 있다. 이때, 전류를 왼쪽 방향으로 가하면 자벽은 전도전자의 방향, 즉, 전류와 반대 방향인 오른쪽으로 움직이게 되고, 결과적으로 전도전자가 흘러온 쪽, 즉 전류가 흘러가는 쪽인 왼쪽의 자구가 넓어진다. 반대로 전류를 오른쪽 방향으로 가하면 자벽 역시 반대인 왼쪽 방향으로 움직이고, 오른쪽의 자구가 넓어지게 된다. 이와 같은 전류에 의한 자구벽의 이동 현상은 STT가 만드는 대표적인 효과 중 하나이다.

STT-MRAM

STT가 발견되기 전까지 자화를 조작하기 위한 유일한 수단은 자기장을 이용하는 것이었고, 자기장은 도선을 흐르는 전류로부터 얻어진다. 기존의 MRAM은 그림 4의 개략도와 같이, 직교하는 두 도선에서 발생하는 자기장으로 자성층의 자화 방향을 바꾸어 정보를 기록한다. 이때, 정보가 기록되는 소자는 자유층/터널배리어/고정층/반자성층으로 이루어진 자기터널접합(Magnetic Tunnel Junction)이라고 하는 구조이다. 자기터널접합에서도 GMR과 마찬가지로, 비자성층인 터널배리어에 인접한 두 자성층, 자유층과 고정층의 상대적인 자화방향에 따라 저항이 높고 낮은 것을 이용하여 정보를 저장한다. 고정층의 자화는, 접해있는 반자성층과의 교환상호작용 때문에 방향이 고정되어 있고, 쉽게 자화의 방향이 바뀌지 않는다. 따라서 자기장이 가해지면 자유층의 자화 방향만 바뀌게 된다. 즉, 자유층의 자화를 스위칭시켜서, 두 자성층의 자화 방향이 평행하여 저항이 작은 상태와 반평행하여 저항이 큰 상태를 각각 0과 1로 정하여 정보를 저장한다. 이와 같은 기존의 MRAM 기술을 이용하여, Everspin과 같은 기업

Fig. 4. Schematic illustration of structure and operation of a conventional MRAM device. Red arrows in the word line and bit line indicate the flow of electric current. Thick curved blue arrows around the word line and bit line indicate the magnetic field induced from the current-flow from both lines.

에서 16 Mb 용량의 상용제품을 생산하고 있다. 하지만 기존의 MRAM에는 몇 가지 문제점이 있다.

먼저 자화를 스위칭시키기 위해 자기장을 가했을 때, 원하지 않는 소자의 자화의 방향이 바뀌어서 정보가 소실될 수 있는 기록 선택감도(Write Selectivity) 문제를 내포하고 있다. 기존의 MRAM에서는 그림 4와 같이 직교하는 전류라인의 교차점에 위치한 소자의 자화를 스위칭시킨다. 이때, 교차점에 위치한 소자 외에 각 전류라인 상에 위치한 셀들은 필연적으로 반(half)-선택된다. 각 소자를 스위칭시키기 위해 필요한 기록전류는 완벽하게 같은 것이 아니라 어느 정도 분포를 갖게 되는데, 이 분포가 매우 좁지 않으면 반-선택된 소자에서 의도하지 않은 자화의 스위칭이 발생할 수 있다. 이는 곧 메모리의 오작동을 의미한다. 이를 해결하기 위해 모토로라의 Savtchenko 등은 그림 5와 같이 합성반자성층(Synthetic Anti-ferromagnetic Layer) 형태의 자유층에 직교하는 도선에서 발생하는 자기장을 시간차를 두고 가하는 toggle-writing 방식을 고안하여 기록 선택감도를 크게 개선하였으나,^[5] 근본적인 해결책이 되지는 못하였다. 하지만, 그림 6에서와 같이 STT-MRAM에서는 전류가 하나의 소자만을 흐르기 때문에, 원천적으로 반-선택된 소자가 존재하지 않는다. 따라서 기록 선택감도 문제와 관련된 기록 에러가 발생하지 않는다. 또한 기존의 MRAM에서는 소자의 크기가 작아질수록 기록 전류의

REFERENCES

- [5] L. Savtchenko, A. Korkin, B. N. Engel, N. D. Rizzo and J. A. Janesky, U.S. Patent No. 6,545,906 (2003).

Fig. 5. Schematic illustration of operation of toggle-writing in MRAM.

Fig. 6. Schematic illustration of structure STT-MRAM device. Red arrow indicates the flow of electric current.

크기가 커진다. 하지만 MRAM의 기록 전류는 전형적인 CMOS 회로가 공급할 수 있는 전류보다 작아야 하므로 기존의 MRAM은 소자의 크기를 줄이는데 근본적인 한계가 존재한다. STT-MRAM에서는 원리상 소자의 크기가 작아질수록 필요한 기록 전류의 크기는 작아진다. 현재 연구되고 있는 STT-MRAM 소자의 기록 전류는 아직 큰 편이지만, 다양한 소재와 기술에 관한 연구를 통해 상용화에 근접한 기록 전류로 낮추어 가고 있다.

실제 정보가 기록되는 자기터널접합에는 현재 충분히 큰 터널링 자기저항비(Tunneling Magneto-Resistance Ratio)를 얻을 수 있는 CoFeB/MgO/CoFeB의 기본적인 구조가 널리 사용되고 있다.^[6] 일정 수준의 자기저항비가 확보되어야 저장된 정보를 충분히 빠른 속도로 읽을 수가 있다. 그리고 MRAM에서는 소자의 크기가 작아지면 열 효과에 의한 자화 요동 때문에 자화가 임의로 스위칭될 가능성이 높아지는 정보의 열적 안정성 문제가 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 특정 다층자성박막 구조나, 자성합금을 이용해서 자기이방성(Magnetic Anisotropy)을 확보하는 것이 필요하다. 최근에는 CoFeB/MgO/CoFeB 구조에서도 충분한 자기이방성을 얻을 수 있다는 연구결과가 발표되어 크게 주목받고 있다.^[7] 차세대 비휘발성 메모리로서 IBM, 도시바 등 세계 유수의 반도체

메모리 기업에서 STT-MRAM의 가능성을 높게 평가하며 기술 연구 개발에 노력하고 있다. 우리나라의 삼성전자와 하이닉스도 STT-MRAM과 관련하여 높은 수준의 기술을 보유하고 지식경제부의 주도 아래 국내 연구 인프라를 이끌고 STT-MRAM을 차세대 메모리로 상용화하기 위해 노력하고 있다.

자력 메모리 소자

앞에서 STT는 스핀밸브 구조의 자화를 스위칭시킬 뿐 아니라, 단일 자성체에서 자화의 방향을 변화시킬 수 있으며, 전류에 의한 자력의 이동 현상이 그 대표적인 효과임을 언급하였다. 일본의 NEC에서 전류에 의한 자력 이동 현상을 이용하여 자유층의 자화방향을 바꾸어 정보를 기록하는 방식의 MRAM을 개발하여 제품화를 눈앞에 두고 있다.^[8] 이러한 방식의 MRAM을 자력이동 MRAM(Domain Wall Motion MRAM, 이후 DWM-MRAM)이라고 부른다. 그림 6의 개략도에서 볼 수 있듯이, DWM-MRAM에서 자유층의 양쪽 끝에는 자화 방향이 반대인 pinning layer가 붙어있다. 따라서 pinning layer와 접해 있는 자유층의 고정영역(Fixed Region)은 각각 자화 방향이 접해 있는 pinning layer의 자화와 같은 방향으로 고정되고, 그 사이의 자유영역(Free Region)은 전류를 인가함에 따라 그 방향이 바뀌게 된다. 그림 7(a)와 같은 자화 상태에서는 터널배리어를 사이에 두고 참조층(Reference layer)과 자유층 자유영역의 자화 방향이 같으므로 저항이 낮은 상태이다. 이때 전류가 자유층에서 오른쪽 방향으로 가해지면, 자유층에서 자유영역과 오른쪽 고정영역 사이의 자력이 왼쪽으로 움직인다. 자력은 자유층의 왼쪽 고정영역과 자유영역 사이까지 움직여서 그림 7(b)와 같이 자유영역의 자화방향이 오른쪽 고정영역과 같아지고, 참조층과 자유층 자유영역의 자화 방향이 반대가 되어 저항이 높은 상태가 된다. 이 상태에서 전류를 자유층에서 왼쪽 방향으로 가하면 자력이 반대 방향으로 움직여서 다시 그림 7(a)의 상태가 된다.

REFERENCES

- [6] S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. Ashizawa, Y. M. Lee, K. Miura, H. Hasegawa, M. Tsunoda, F. Matsukura and H. Ohno, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 082508 (2008).
- [7] S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, J. Hayakawa, F. Matsukura and H. Ohno, *Nat. Mater.*, published online (2010).
- [8] S. Fukami, T. Suzuki, K. Nagahara, N. Ohshima, Y. Ozaki, S. Saito, R. Nebashi, N. Sakimura, H. Honjo, K. Mori, C. Igarashi, S. Miura, N. Ishiwata and T. Sugibayashi, *Symp. on VLSI Tech.* (2009), p. 230.

Fig. 7. Schematic illustration to describe the structure of domain wall motion (DWM) MRAM, and its magnetization configurations for low and high resistance. Red and blue arrows indicate the directions of magnetization.

Fig. 8. Schematic illustration of Magnetic Racetrack Memory.^[8] Red- and blue-colored strips indicate the opposite magnetization directions, thus different bits of information.

자성 특성을 이용한 정보저장매체로 현재 널리 사용되는 하드디스크드라이브(Hard Disk Drive, 이후 HDD)는 자기디스크와 읽기/쓰기 헤드의 기계적으로 움직여서 원하는 정보의 위치에 접근한다. IBM의 Parkin은 이와 같은 기계적인 움직임을 전류에 의한 자벽의 이동으로 대체하는 Magnetic Racetrack Memory를 제안하였다.^[9] 그림 8의 개략도에서 볼 수 있듯이, Magnetic Racetrack Memory에서 정보는 자성나노선에 서로 반대방향의 자화를 갖는 자구의 형태로 저장된다. 그림 8과 같이, 자구의 자화방향을 바꾸어 정보를 기록하는 것은 쓰기소자의 자구벽에서 발생하는 자기장을 이용하여, 기록된 정보는 자성나노선에 부착된 읽기소자의 자기터널접합에서 발생하는 저항차이로부터 읽어낸다. 그리고 자성나노선에 전류를 흘려서 자성나노선의 자구와 자구벽들을 동시에 움직임으로써, 자성나노선에 기록된 정보 중 원하는 위

Fig. 9. Schematic illustration of reading and writing in Magnetic Racetrack Memory.^[7] Red- and blue-colored strips indicate the opposite magnetization directions, and black arrows indicate the current flow.

치의 정보에 접근하게 된다.

Magnetic Racetrack Memory는 아이디어와 개념은 정립되어 있으나 이를 구현하기 위해서는 극복해야 할 기술적 난관이 많다. 우선 자성나노선에서 자벽을 움직이기 위해서 필요한 전류밀도가 높아서 나노선에서 많은 열이 발생하는 등의 문제가 있기 때문에 구동 전류밀도를 낮추어야 한다. 그리고 많은 수의 자벽을 원하는 거리만큼 일정하게 움직여서 원하는 위치에 고정되도록 하는 것 역시 앞으로 많은 연구가 필요하다. 최근 Parkin은 반복된 전류 펄스로 3개의 자벽을 동시에 원하는 위치로 옮겨 놓는 결과를 발표하였다.^[10]

나노 스핀 발진소자

스핀전달토크를 통해 전류를 이용하여 자화의 방향을 바꿀 수 있지만, 자화에는 기본적으로 자기장의 영향을 받아서 움직인다. 그림 10(a)와 같이 적절한 크기의 자기장과 스핀전달토크가 동시에 자화를 서로 반대쪽으로 움직이려는 방향으로 가해지면 자화는 자기장이 유도하는 방향이나 스핀전달토크가 유도하는 방향을 향하지 못하고 계속해서 일정한 주파수로 회전하게 된다. 이때 자화의 회전 주파수는 인가하는 자기장과 전류의 크기가 변화함에 따라 달라지며, 수 GHz ~ 수십 GHz 대역의 넓은 주파수 범위에서 조절이 가능하다. 일정한 자화 방향을 갖는 고정층에 대해서 자유층의 자화가 회전함에 따라 자기저항이 계속해서 변하게 되므로, 이를 통해 직류

REFERENCES

- [9] S. S. P. Parkin, U.S. Patent No. 6,834,005 (2004).
- [10] M. Hayashi, L. Thomas, R. Moriya, C. Rettner and S. S. P. Parkin, Science **320**, 209 (2008).

Fig. 10. (a) Schematic illustration of the operation of spin-torque nano-oscillator (STNO). (b) Frequency vs. current plot from single-domain modeling for STNO. (c) Time-evolution of magnetization oscillation at two data points (I1, I2) in (b).

입력 신호로부터 교류 출력 신호를 얻을 수 있다. 그림 10(b)와 (c)는 스핀밸브 구조의 나노 스핀토크 발진소자를 단자구 모델링(Single-Domain Modeling)을 사용하여 전산 모사한 결과로 단일 소자에서 전류를 변화시켜서 넓은 대역의 주파수의 균일한 신호를 발생시킬 수 있음을 보여준다. 나노스케일의 크기를 갖는 나노 스핀토크 발진소자는 기본적으로 기존의 발진소자에 비해 크기가 작아서 고집적화에 유리하고, 단일 소자로 주파수 가변이 가능하며, 발진 주파수의 질을 나타내는 Q-인자가 매우 큰 값을 갖는 등 많은 장점을 가지고 있다. 앞으로 이동통신, 무선네트워크, GPS 수신기 등 무선통신 소자의 수요는 크게 확대될 것이며, 특히 개인용 휴대전화기들의 무선통신 기능이 보편화됨에 따라 저전력 GHz 대역 가변 발진기로서 높은 가능성을 잠재하고 있는 나노 스핀토크 발진기에 대한 연구가 세계적으로 널리 이루어지고 있다.

스핀전달토크를 이용한 나노 고주파 발진기는 그림 10(a)와 같은 스핀밸브 나노기동 구조에서 뿐 아니라, 그림 11(a)와 같이 나노 컨택트(Nano Contact)를 통해서 자유층에 전류를 인가하는 구조에서도 구현되었다.^[11] 나노 컨택트 구조에서 특이한 점은, 각 나노 컨택트에서 발생하는 자화의 회전이 상호작용하여 공명 주파수를 만들어낸다는 점이다. 이를 통하여 여러 나노 컨택트 소자로부터 얻은 같은 주파수의 출력을 더하여 훨씬 강한 출력을 얻을 수 있게 된다. 또한 자기장이 없이 전류만을 인가하여 자화를 회전시킬 수 있는 방안에 대해서도 연구가 이루어지고 있다. 먼저 그림 10(b)와 같이 자유

Fig. 11. Schematic illustrations of spin-torque nano oscillators, (a) using the nano contact structure, and (b) using polarizer with perpendicular-to-the-plane magnetization.

층의 자화는 평면상에 존재하는데 반해 스핀전달토크를 인가하는 polarizer의 자화방향은 평면에 수직으로 만들어서 자화를 회전시켜 고주파 출력을 얻은 연구 결과가 발표되었다.^[12] 그리고, 스핀밸브 구조를 구성하는 물질을 조절하여 스핀전달토크가 작용하는 방향이 자성층 사이의 각도에 따라 반대가 되도록 함으로써 한 방향의 직류 전류를 인가하였을 때 자화가 계속해서 회전하도록 만든다는 발표도 있었다.^[13] 또한 자기저항비가 월등히 높은 자기터널접합을 사용하여 고주파 신호의 출력을 향상시키는 등,^[14] 스핀전달토크를 이용한 나노 고주파 발진기의 성능 향상을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.

맺는 글

반도체를 기반으로 한 전자소자 기술은 지금까지 급속한 진보를 통하여 오늘날 정보화 시대를 주도하고 있다. 하지만 반도체 기반 전자소자 기술은 물리적 기술적 한계에 다다르고 있으며, 따라서 이러한 한계를 극복할 수 있는 차세대 전자소자 기술로 큰 주목을 받고 있는 것이 바로 스핀트로닉스 기술이다. 스핀트로닉스 기술은 전자의 전하와 스핀을 동시에 제어하여, 전자의 전하만을 제어하는 기존 전자소자 기술의

REFERENCES

- [11] S. Kaka, M. R. Pufall, W. H. Rippard, T. J. Silva, S. E. Russek and J. A. Katine, *Nature* **437**, 389 (2005).
- [12] D. Houssameddine, U. Ebels, B. Delaet, B. Rodmacq, I. Firastrau, F. Ponthenier, M. Brunet, C. Thirion, J. -P. Michel, L. Prejbeanu-Buda, M. -C. Cyrille, O. Redon and B. Dieny, *Nat. Mater.* **6**, 447 (2007).
- [13] O. Boulle, V. Cros, J. Grollier, L. G. Pereira, C. Deranlot, F. Petroff, G. Faini, J. Barnas and A. Fert, *Nat. Phys.* **3**, 492 (2007).
- [14] A. M. Deac, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, Y. Suzuki, S. Yuasa, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira and N. Watanabe, *Nat. Phys.* **4**, 803 (2008).

Table 1. Candidate technologies for solid-class memory.^[14] (SONOS: Silicon-Oxide-Nitride-Oxide-Silicon, FeRAM: Ferroelectric RAM, PCRAM: Phase-Change RAM, RRAM: Resistance RAM).

	Flash	SONOS flash	FeRAM	MRAM	Racetrack	PCRAM	RRAM
Knowledge Level	Product	Advanced Development	Product	Product	Basic Research	Advanced Development	Early Development
Smallest Demonstrated Cell	4F ²	4F ²	15F ² at 130 nm	25F ² at 180 nm	—	5.8F ² diode at 180 nm	—
Prospects for Scalability	Poor	Maybe	Poor	Poor	Unknown	Promising	Unknown
Prospects for Fast Readout	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Prospects for Writing	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Sometimes
Prospects for Low Switching Power	Yes	Yes	Yes	No	Uncertain	Poor	Sometimes
Prospects for High Endurance	No	Poor	Yes	Yes	Unknown	Yes	Poor
Prospects for Nonvolatility	Yes	Yes	Yes	Yes	Unknown	Yes	Sometimes

한계를 극복할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 스핀전자 소자는 스핀의 고유특성인 비휘발성(Nonvolatility)을 기본적으로 가지고 있을 뿐 아니라, 초고속, 저전력, 고주파 등의 특성을 가지고 있기 때문에 차세대 전자소자로서의 가능성이 매우 높다. 표 1^[15]은 2008년 IBM의 연구개발 저널에서 현재 개발 중인 차세대 메모리 기술들을 비교 정리한 것으로, 기존 방식의 MRAM과 Racetrack Memory가 다른 차세대 메모리 기술에 뒤지지 않는 가능성으로 주목받고 있음을 확인할 수 있다. STT-MRAM은 기존 MRAM의 취약점인 scalability와 switching power 문제를 해결하는 가능성을 제시하여 대표적인 스핀트로닉스 소자로서 실용화 가능성을 더욱 밝게 하고 있다. 앞에서 살펴본 것처럼, 스핀전달토크는 MRAM 외에도 자벽메모리 소자나 나노 스핀 발진소자와 같이 다양한 스핀트로닉스 소자에 핵심적인 작동 원리가 되고 있다. 또한 스핀전달토크는 본격적인 연구가 이루어진 것이 10년 남짓으로

금속 스핀밸브에서와는 다른 Magnetic Tunnel Junction에서 작용하는 스핀전달토크의 물리적 특성^[16]과 같이 스핀전달토크에 관한 연구가 계속해서 이루어지고 있다. 그리고 연구가 계속됨에 따라 전류와 자화 사이에서 발생하는 다양한 물리적 현상이 새롭게 발견되고 주목받고 있기 때문에, 스핀전달토크에 관한 연구를 통하여 앞으로도 더욱 다양한 스핀트로닉스 소자의 활용이 기대된다.

REFERENCES

- [15] G. W. Burr, B. N. Kurdi, J. C. Scott, C. H. Lam, K. Gopalakrishnan and R. S. Shenoy, IBM J. Res. & Dev. **52**, 449 (2008).
- [16] S. -C. Oh, S. -Y. Park, A. Manchon, M. Chshiev, J. -H. Han, H. -W. Lee, J. -E. Lee, K. -T. Nam, Y. Jo, Y. -C. Kong, B. Dieny and K. -J. Lee, Nat. Phys. **5**, 898 (2009).