

정명화 팀장

(한국기초과학지원연구원 양자물성팀)

1. 서론

정보산업은 전 세계적으로 비약적인 발전을 일으키고 있으며, 오늘날은 컴퓨터기술과 결합하여 더욱 가속적인 기술발전을 이끌어 가고 있다. 정보통신기술이 고도화되면서 앞으로 다가올 미래는 보다 복잡한 문제를 얼마나 효율적으로 처리할 수 있는가에 집중되고 있다. 빠른 정보처리 및 통신, 대용량의 정보저장이 가능한 전자소자 기술에 많은 관심이 집중되고 있는 이유가 이 때문이다. 또한 전자기기의 휴대성에 대한 요구가 증대되면서 초고속화, 소형화, 저전력화, 대용량화에 대한 요구가 또한 증대되고 있다.

이러한 요구에 부응하는 새로운 개념의 메모리소자로 자성재료를 사용하는 자기메모리(MRAM : Magnetic Random Access Memory)를 들 수 있다. MRAM의 경우는 DRAM이 가지는 고집적성과 SRAM이 가지는 고속성 및 Flash메모리가 가지는 비휘발성 등 각종 메모리의 장점을 동시에 가지고 있기 때문이다. MRAM용 스핀소자는 기본적으로 자성체/비자성체/자성체의 다층구조로 이루어져 있으며, 비자성체가 금속인 경우 측정되는 거대 자기저항(GMR : Giant Magneto-Resistance)과 절연체인 경우 측정되는 터널 자기저항(TMR : Tunneling Magneto-Resistance)으로 나뉜다(그림 1). 여기에 자기장을 인가하면 두 자기층 가운데 하나의 스핀 방향을 바꾸면서 소자에 흐르는 전류의 세기가 변화하며 자기저항이 낮고 높은 상태("0" 또는 "1")를 판별하며 정보를 쓰고 읽는 방식이다. 기존의 MRAM의 경우는 비자성체로 얇은 절연층의 비정질 산화알루미늄을 사용하였으나, 최근에는 이보다 훨씬 큰 신호 변화를 제공하는 결정상의 산화 마그네슘(MgO)이 얇은 절연층 재료로 각광을 받고 있다. 미국 Freescale Semiconductor社は 4 Mb MRAM 개발에 성공했으며, 2006년 상반기에 전지 백업용 SRAM을 대체하기 시작했다. 한편, 일본 Toshiba社は NEC와 공동으로 MRAM을 개발하고 있으며, 휴대전화용 웨도 SRAM 대체를 위한 양산화를 계획하고 있다. 그 외, 한국의 삼성전자, 미국의 IBM, 독일의 Qimonda 등의 대규모 LSI 업체의 경우는 동작 특성의 편차가 크고 아직은 양산에 적합한 기술 수준이 아니라고 평가받고 있다.

2. 본론

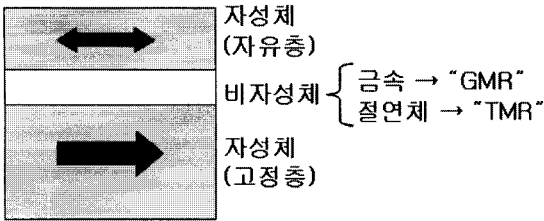


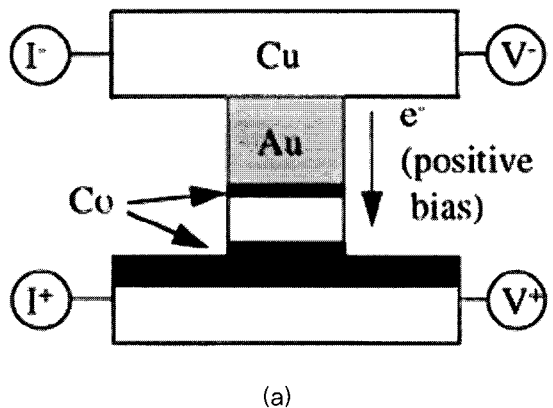
그림 1. MRAM의 기본 구조.

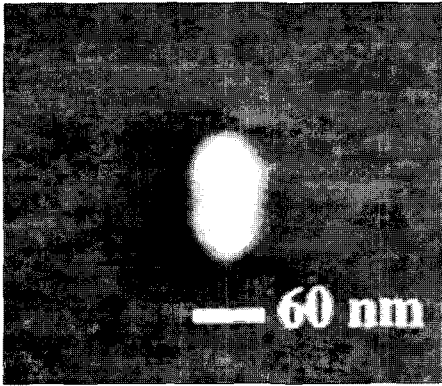
이와 같이 MRAM의 수많은 장점에도 불구하고 소자크기와 기록전력 및 제품비용 등 해결해야할 문제점들이 남아있다. 집적도를 높이기 위하여 소자의 크기를 미세화하면 오히려 기록전류가 증대하는 것이다. 이러한 문제를 극복하고자 새로운 개념의 자기 메모리 소자가 소개되는데, 이것이 바로 스핀 전달 토크 (STT : Spin-Transfer Torque)기술을 이용하는 STT-MRAM(이하, 스핀 토크 MRAM이라 일컬음)이다. 스핀 전달토크기술은 1996년 IBM의 Slonczewski[1], 카네기멜론 대학의 Berger[2] 등에 의해 제안된 새로운 기술로 나노크기의 스핀소자에 전류를 인가하면 스핀소자 내 자기층의 자화방향이 바뀌는 현상을 이용하는 것으로, 지금까지 스핀의 방향을 자기장에 의해 반전시키는 접근방식과 커다란 분별력을 가진다. 만약 전류와 자기장을 반대효과를 가지도록 동시에 인가하면, 스핀소자에 흐르는 전류의 세기는 스핀의 세차운동으로 인해 시간의 함수로 진동하게 된다. 스핀의 세차운동이 GHz 대역으로 매우 빠르게 움직이고 있다는 것을 고려할 때, 이 소자가 마이크로파를 방출하는 나노스케일소스로 작동할 수 있을 것으로 기대된다(이하, 마이크로파 발진기로 일컬음). 더욱이 스핀전달토크기술을 이용한 자기벽(Domain Wall) 이동에 의해 정보를 기록하고 재생할 수 있는 메모리로의 응용이 있다(이하, Race-track 메모리로 일컬음).

여기에서는 스핀전달토크현상을 이용한 이들 세개의 대표적 응용 기술을 소개하고 최근 연구동향에 대해서 기술하고자 한다.

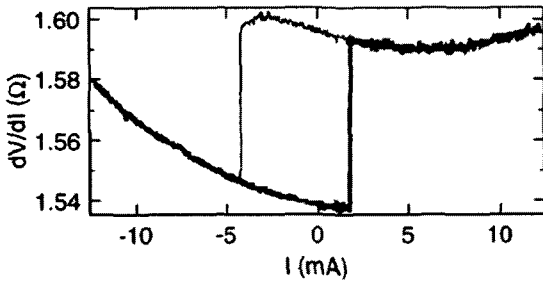
2.1 스핀 토크 MRAM

스핀전달토크효과에 의해 나노크기의 스핀소자에 전류를 인가하면 자기층의 자화방향이 바뀌는, 일명 전류유도자화스위칭(CIMS : Current-Induced Magnetization Switching) 현상이 나타난다. 두 개의 자기층의 상대적인 자화방향에 따라 저항이 낮은 상태(0, 두 자화의 방향이 평행일 때)와 높은 상태(1, 반평행일 때)를 판별함으로써 정보를 기록하고 재생할 수 있다는 점에서는 기존의 MRAM과 동일하지만, 자화의 방향을 바꾸는 소스가 다르다는 점에서 커다란 차이가 있다. 자기장 유도에 의한 자화반전을 활용하는 기존의 MRAM 구동방식과는 달리, 스핀토크 MRAM의 경우는 전류유도에 의해 변화하는 자화상태를 활용하는 새로운 개념의 메모리 소자이다. 스핀전달토크기술이 1996년 이론적으로 처음 제안된 이후, 미국 Cornell대의 연구팀을 필두로 1999년 이래 실험적으로 증명되기 시작했다. 그림 2는 Co(40 nm)/Cu(6 nm)/Co(2.5 nm) 구조를 가지는 Nanopillar(~60 x 130 nm²)에서 자기장과 전류 인가

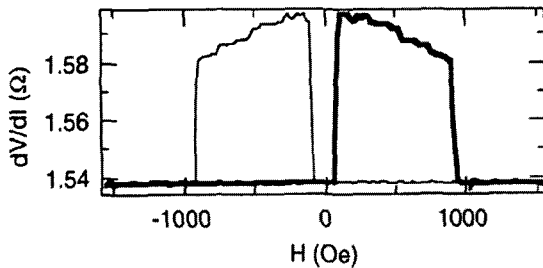




(b)



(c)

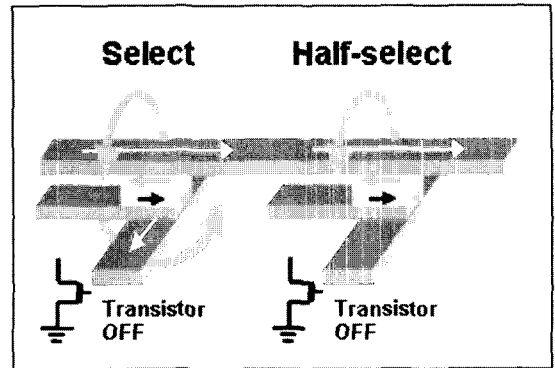


(d)

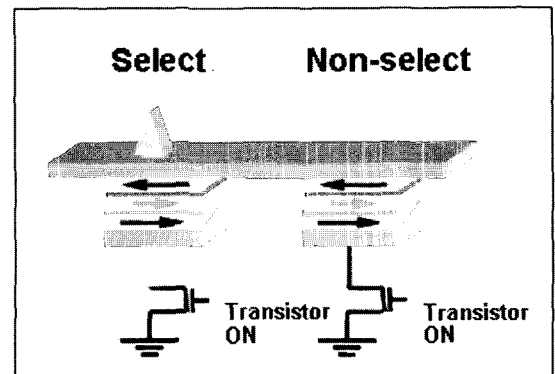
그림 2. (a) Schematic cross section of the nanopillar device. (b) Scanning electron micrograph of the Co nanomagnet. (c) Resistance as a function of current. (d) Resistance as a function of magnetic field[3].

에 의해 스위칭을 보이는 자기저항 곡선을 보여주고 있다.

스핀토크 MRAM의 경우는 기존의 MRAM과 달리 크게 다음의 두 가지 문제점을 해결할 수 있다. 스핀토크 MRAM은 자화 반전을 위한 스위칭 전류가 임계 전류 밀도에 의해 결정되기 때문에 소자의 크기가 작아질수록 오히려 소요되는 전류의 세기가 줄어들어 Scalability 이슈를 해결한다. 스핀토크 MRAM에서 자화 반전을 위한 전류는 단지 할당된 셀을 통해서 흐르기 때문에 Selectivity 이슈를 해결한다(그림 3). 하지만, 소자에 흐르는 전자의 스핀 주입이 작기 때문에 자화 반전에 필요한 임계전류밀도



(a)



(b)

그림 3. Selectivity issue (a) Conventional MRAM, (b) Spin-transfer torque MRAM.

가 $10^7 \sim 10^8 \text{ A/cm}^2$ 정도로 크다는 문제점을 안고 있었다. 최근에는 소자구조와 박막품질 등의 개량에 의해 $10^5 \sim 10^6 \text{ A/cm}^2$ 정도로 훨씬 낮아지고 있는 추세이다. 현재의 MRAM이 더 급격히 발전하기 위해서 스핀전달토크기술이 필요하다는 인식이 지배적이지만, 아직 신뢰성에 대한 문제가 남아있다.

2.2 마이크로파 발진기

스핀전달토크기술을 이용한 다른 하나의 응용 목적으로 나노크기의 마이크로파 발진기를 들 수 있다. 나노크기의 다층구조를 가지는 스핀소자에 전류와 자기장을 동시에 인가하면, 예를 들면 전류는 두 자기층의 자화방향이 평행이 되는 효과를 주고 자기장은 반평행이 되는 효과를 주도록 충분히 인가하면, 자유로운 자기층에 있는 자화방향이 평행과 반평행 사이를 왔다 갔다 하는 세차운동을 하게 된다. 따라서 스핀의 세차운동으로 인해 자기저항이 시간의 함수로 진동을 하게 되는데, 그 세차운동을 하는 회전속도가 나노초 정도로 매우 빨라 공명주파수는 거의 GHz 대역까지 이른다(그림 4). 이러한 스핀의 세차운동에 의한 자기저항 변화를 이용하는 것이 마이크로파 발진기이다.

유럽에서는 2005년부터 FP6 프로그램의 일부로 IMEC가 주관하는 TUNAMOS(Tunable Nano-Magnetic Oscillator)라는 프로젝트를 시작하였다. 이 마이크로파발진기는 작은 DC전류에 의해 고품질 가변마이크로파 발진이 발생할 수 있는 나노패턴 스핀소자이기 때문에 이동통신, GPS수신기, 무선네트워크 등에 사용되는 발진소자의 크기, 성능한계를 크게 뛰어넘을 수 있는 잠재성이 있다. 인가하는 자기장 또는 전류의 세기에 의해서 스핀의 진동주파수를 바꾸어 줄 수 있으며, 매우 높은 Q인자 값($\sim 18,000$)이 관측되고 있다. 또한, 나노크기의 발진기로 유일하게 단일소자에서 발진 특성이 발현된다는 점에서 기존의 LRC를 이용한 발진소자와 차별력을 가진다. 표 1에 스핀토크발진소자의 특성을 기존의 발진소자와 비교 요약하고 있다. 특히, 고품질의 동조와 높은 집적도를 겸비하고 있기 때문에 저전력과 저비용 및 광대역 가변이 가능하다는 점에서 있어서 핵심적이다.

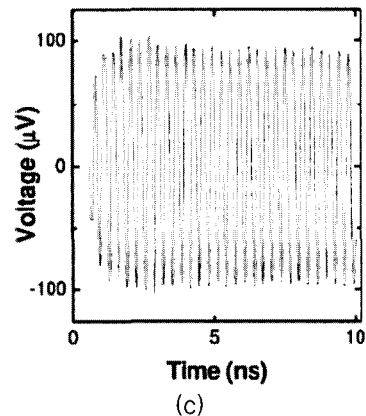
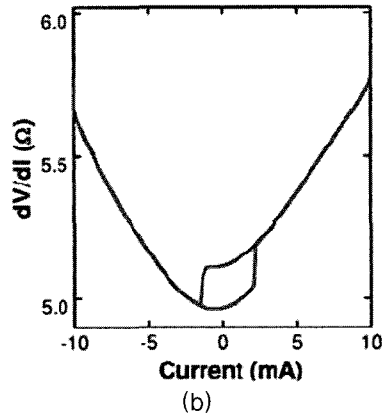
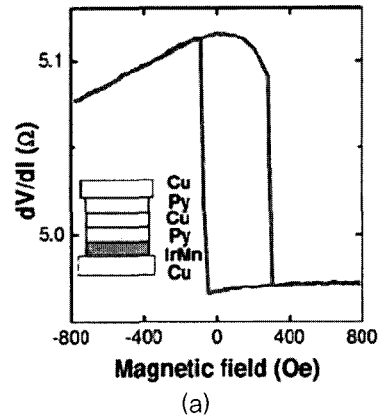


그림 4. (a) Resistance as a function of magnetic field. (b) Resistance as a function of current. (c) Oscillatory voltage generated by spin precessional motion in the free magnet under 8 mA and 630 Oe. The precessional frequency is about 3.12 GHz[4].

표 1. 스피너토크발진소자와 기존의 발진소자와의 비교.

분류	수동 발진소자	기계적 발진소자	나노 스피너 발진소자
구조	LC, Quartz-crystal	RF-MEMS	GMR or TMR
주파수	1 ~ 500 MHz	1 MHz ~ 6 GHz	1 ~ 수십 GHz
특성	<ul style="list-style-type: none"> • 1~수십 mm² 크기 • 고집적화 어려움 • 성능지수 낮음 	<ul style="list-style-type: none"> • 소형 (수백 μm²) • 공정 복잡함 • 출력전력 낮음 • 주파수 가변 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> • 초박형 (수십 nm²) • 고품질 동조 • 고집적화 가능 • 주파수 가변 쉬움

한편, 2005년 거의 동시에 미국 NIST 연구소와 Freescale Semiconductor社의 연구진들은 두 개의 발진 소자가 충분히 가까워지면 마이크로파의 위상이 동조되는 현상(Phase Locking)을 발표하였다. 여기서 사용한 발진소자는 앞서 설명한 Nanopillar 모양이 아니라, GMR구조의 다층자성박막에 나노 크기의 구멍을 만들어서 전기적 접촉을 하는 Nano-contact구조를 가지는 소자이다. 두개의 Nano-contact가 수백 나노미터 정도로 가까워지면 두 소자로부터 각각 발진하고 있는 마이크로파의 위상이 고정되어 예상보다 매우 높은 출력을 방출한다(그림 5). 만약에 N개의 소자로부터 발생하는 마이크로파의 위상이 고정된 어레이가 개발된다면 출력은 N²에 비례하면서 발생할 것으로 예측되기 때문에 좀 더 응용에 가까워지고 있음을 시사하고 있다.

스핀 토크 발진 소자의 경우처럼 입력하는 작은 DC 전류에 의해 초고주파 AC 전압이 발생하기도 하지만, 나노크기의 스피너소자에 고주파 AC 전압 인가에 의해서 DC 신호가 발생하기도 한다. 일본 AIST 연구소의 연구팀은 이러한 현상을 이용한 신형 스피너 토크 다이오드를 개발하여 발표하였다. 외부에서 걸어주는 주파수가 자유로운 자기층에 있는 스피너고유진동주파수와 일치할 때 발생하는 자기공명현상에 기인한다. 현재 우리가 사용하고 있는 반도체 다이오드의 경우는 저항값이 높기 때문에 소형화 하는데 있어서 마이크로파 배선과 저항값과의 정합이 어려워 에너지 전달 효율이 나빠지는 문제가

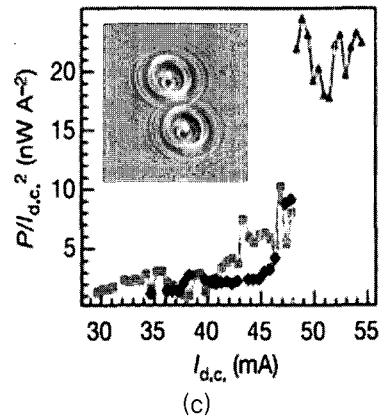
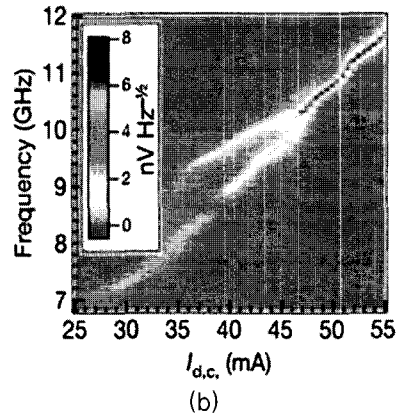
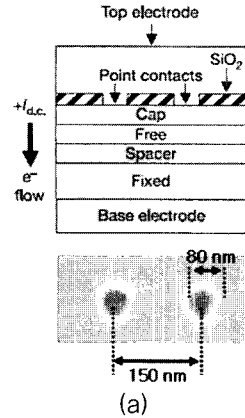
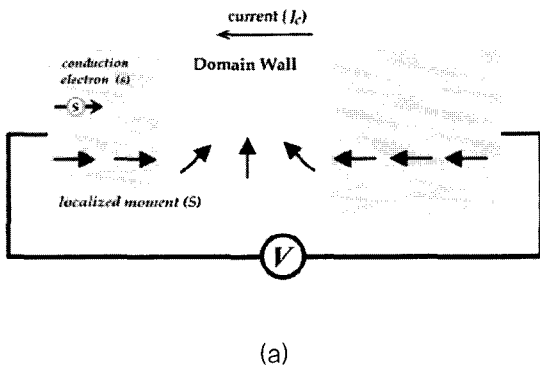


그림 5. (a) Schematic cross section of two point contacts. (b) Scanning electron micrograph of two 80-nm-diameter contacts with 150 nm centre-to-centre spacing. (c) Map of spectrum amplitude versus frequency and applied current bias $I_{d.c.}$. (d) Integrated power P normalized by $I_{d.c.}^2$ versus $I_{d.c.}$ [5].

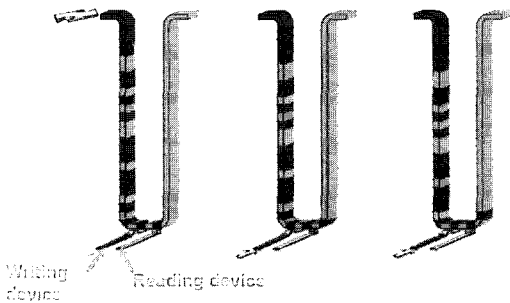
있었는데 이를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 Race-track 메모리

스핀토크기술을 응용한 새로운 개념의 비휘발성 메모리로 미국 IBM社가 제안한 자기 Race-track 메모리를 들 수 있다. 나노 크기의 선폭을 가지는 자기선에 자구(Magnetic Domain)가 생성되고, 자구 하나하나가 정보 "0"과 "1"을 기억하는 비트 셀에 해당하며 스핀의 방향이 반대 방향인 자구 사이에는 자벽(Domain Wall)이 형성된다(그림 6). 나노선의 선폭이 좁고 얇을수록 Transverse 타입의 자벽이 선



(a)



(b)

그림 6. (a) Schematic domain wall structure. (b) Domain wall motion by applied pulsed current(출처: IBM-Stanford Spintronic Science and Applications Center[6,7]).

폭이 넓고 두꺼울수록 Vortex 타입의 자벽이 형성되는 것으로 대체로 알려져 있다. 이러한 Race-track 소자에 펄스전류를 인가하면 자벽이 이동하게 되는데, 이 현상을 응용하면 또 다른 새로운 개념의 비휘발성 메모리의 실현이 가능할 것으로 기대되고 있다.

미국 IBM 연구팀의 제안에 의하면 Race-track 소자의 경우는 Si기판에 대해 수직 방향으로 100개 정도의 비트셀을 쌓아 올린 3차원적 구조를 취할 수 있기 때문에 하드디스크와 비슷한 저장용량 및 제조비용을 달성할 수 있다. 정보를 기록하고 재생하는 평균 액세스시간이 50 ns 정도로 현재의 DRAM과 비슷한 수준이다. 하지만 현재 Race-track 메모리가 가지는 최대의 기술적인 문제점은 스핀 토크 MRAM과 마찬가지로 임계전류밀도가 $10^7 \sim 10^8 \text{ A/cm}^2$ 정도로 크다는 것이다. 한편 일본 Tohoku대학 연구진은 기존의 강자성 금속 대신에 강자성 반도체 (Ga,Mn)As를 사용하면 $10^6 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ 정도의 작은 임계 전류 밀도가 실현 가능하다고 제안하고 있으나, 강자성 전이온도가 $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하라는 점과 자벽 이동 속도가 강자성 금속에 비해 10-100배 느리게 움직인다는 문제를 안고 있다. 현재 Race-track 메모리에 관한 연구는 기초적인 수준이며 실용화는 5-10년 후가 될 것으로 전망되고 있다.

3. 결론

급변하고 있는 정보산업의 발전에 따라 다양한 기능을 가지는 전자기기의 보급으로 인해, 대용량의 정보를 얼마나 빠르게 비휘발적으로 처리할 수 있는가에 관심이 집중되고 있다. 소형화를 통한 소자의 초고집적화와 저전력화 및 초고속화를 위한 연구 노력 중에, 자성재료를 활용하면 비휘발성의 장점까지 첨부되어 그 효과가 배가된다.

스핀전달토크기술은 1996년 제안된 새로운 기술로 자기장에 의해 스핀의 자유도를 제어할 수 있다는 기존의 지식을 넘어서, 전류에 의해 스핀의 방향을 바꿀 수 있다는 새로운 개념에서 시작한다. 스핀 분극화된 입사 전자들로부터 지협적 자하로의 스핀 각 모우멘트(Spin Angular Moment)의 전달에 의한

것이다.

스핀전달토크현상을 활용하는 대표적인 응용기술로 (1) 스핀토크 MRAM의 경우는, 전류에 의해 유도된 자화스위칭을 활용하는 새로운 개념의 비휘발성 메모리이다. 스핀토크 MRAM 메모리는 100 nm 이하의 나노패턴 및 터널장벽의 불균일로 인한 기존의 MRAM의 Scalability와 Selectivity의 심각한 문제를 해결할 수 있는 커다란 장점이 있다. 하지만, 임계전류밀도가 높아 저전력화에 문제가 있으며 신뢰성에 대한 문제도 남아 있다. (2) 마이크로파발진기의 경우는, 스핀소자의 자유층에 있는 자화방향의 세차운동에 의해 초고주파 마이크로파가 발생하는 발진기이다. 나노크기의 단일소자에서 고품질의 1-10 GHz 광대역에서 가변이 가능한 초고주파를 발생하는 소스로 사용할 수 있다. 하지만, 임계전류밀도 이상의 전류 하에서 작동하기 때문에 견고한 구조의 소자개발이 요구되며, 원천 기술의 확보가 시급한 실정이다. (3) Race-track 메모리의 경우는, 나노선에 생성되는 자구의 이동에 의해 정보를 기록하고 재생하는 메모리이다. 3차원적 구조를 취할 수 있어 하드 디스크와 비슷한 저장용량 및 제조비용을 달성할 수 있으며 고속화가 가능하다. 하지만, 스핀토크메모리와 마찬가지로 임계전류밀도가 크다는 문제점과 나노패턴의 어려움이 남아 있다.

참고 문헌

[1] J. C. Slonczeski, "Current-driven excitation of magnetic multilayers", J. Magn. Magn. Mater. Vol. 159, p. L1, 1996.
 [2] L. Berger, "Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current", Phys. Rev. B, Vol. 54, p. 9353, 1996.
 [3] F. J. Albert et al. "Spin-polarized current switching of a Co thin film nanomagnet", Applied Physics Letters, Vol. 77, p. 3809, 2000.
 [4] I. N. Krivorotov et al. "Time-domain measurements of nanomagnet dynamics driven by spin-transfer torques", Science, Vol. 307, p. 228, 2005.
 [5] F. B. Mancoff et al. "Phase-locking in double-point-contact spin-transfer devcies", Nature, Vol. 437, p. 393, 2005.
 [6] US patent 6834005, "Shiftable magnetic shift

register and method of using the same", 2004.
 [7] US patent 20040252538, "System and method for writing to a magnetic shift register", 2005.

저자약력



성명 : 정명화

◆ 학력

- 1995년
성균관대 물리학과 이학사
- 1997년
성균관대 대학원 물리학과 이학석사
- 2000년
(일)Hiroshima Univ. 물성물리학과 이학박사

◆ 경력

- 2000년 - 2002년
(미)Los Alamos National Laboratory 박사후 연구원
- 2003년 - 2004년
한국기초과학지원연구원 극한물성팀 선임연구원
- 2005년 - 현재
한국기초과학지원연구원 양자물성팀 팀장

