

자기터널접합을 활용한 고집적 MRAM 소자 기술

전병선 · 김영근*

서울특별시 성북구 안암동 5-1 고려대학교 공과대학 신소재공학부 정보소소재료연구실

(2006년 5월 21일 받음, 2006년 6월 21일 최종수정본 받음)

자기터널접합 기반의 MRAM(magnetic random access memory)은 자기저항효과를 응용하는 메모리소자로서 비휘발성과 고속 정보처리가 가능할 뿐만 아니라 고집적화 할 수 있는 차세대 통합형 비휘발성 메모리이다. 그러나 기존의 메모리 소자들에 비해 스위칭 산포가 크고, 기록마진(writing margin)이 확보되지 않아 아직까지는 고집적화가 어려운 실정이다. 최근 포화자화가 낮은 NiFeSiB 및 CoFeSiB과 같은 비정질 강자성체를 자기터널접합의 자유층 재료로 사용하여 스위칭 자기장의 거대화를 크게 감소시켜 MRAM의 기록마진을 높이는 연구결과에 관해 정리하여 보았다. 그리고 이러한 물질을 이용하여 자기터널접합의 재생마진(reading margin)과 관련된 터널자기저항비의 인가전압의존성을 저감시킬 수 있었다. 본고에서는 나노자기소자 기술의 중요한 분야인 MRAM의 기술발전 방향과 연구사례를 소개하고자 한다.

주제어 : 자기터널접합, MRAM, 나노기술, 비정질 강자성체

I. 나노자기소자와 정보저장산업

정보저장 산업은 21세기 거대 기간산업의 하나로 지속적이며, 새로운 기술혁신이 필요한 분야로 우리나라의 국부를 창출할 수 있는 신수종 산업이다. 현재 PC를 비롯한 휴대형 단말기 등 각종 정보통신 전자제품들은 기록밀도 증가에 따른 대용량화, 초소형화, 저능화, 고성능화, 저가격화 방향으로 빠르게 진화하고 있으며, 정보저장에 대한 수요는 매 5년마다 10배씩 증가하는 추세에 있다. 이러한 산업 기술의 최근 경향은 개인의 삶의 질 향상을 위하여 개인정보 소유량이 급격히 증대되고 있고, 정보의 질 또한 고급화로 변하고 있는 추세이며, 정보서비스 또한 고도화되고 있다. 이러한 정보저장 산업의 획기적인 발전을 위해 나노자기소자 기술이 현재 활발히 연구되고 있다.

나노자기소자 기술은 전자의 전하뿐만 아니라 스핀 자유도, 즉 업스핀 전자와 다운스핀 전자를 구분하여 전자의 이동을 제어하는 신기술을 통칭한다. 이미 이 기술은 금세기의 화두인 나노기술(Nanotechnology)의 한 축으로, 예전에는 볼 수 없었던 새로운 양자역학적 현상의 발견으로 지속적인 기술의 발전을 이루고 있으며, 특히 반도체, 광학, 생명공학 기술 등과의 접목을 통해 다양한 미래 신산업 응용분야를 창출하고 있다. 나노자기소자 기술은 전자의 스핀이동에 관한 학문적 흥미를 유발할 뿐 아니라 (i) 자기디스크 형 디지털 저장기기, 탐침형 저장기기 및 비휘발성 고상메모리와 같은 대용량 초

고속 정보저장기술, (ii) 자동차 및 정보가전 용 자동제어센서, (iii) 생명공학 용 단백질, DNA 바이오 검출기, (iv) 스핀 광소자, 그리고 향후 출현이 예상되는 양자 컴퓨팅 등 그 응용 범위가 매우 넓어 21세기 산업발전의 원동력이 될 것으로 예상되고 있다. Fig. 1은 이러한 나노자기소자의 여러 가지 응용범위를 보여주고 있다.

II. 자기터널접합과 MRAM의 활용분야

현재 나노자기소자 기술 중 가장 각광을 받고 있는 것 중의 하나가 자기터널접합이다. 자기터널접합(magnetic tunnel junction, MTJ)은 MRAM(magnetoresistive random access memory)의 구동 셀 또는 자기저항 센서 등의 응용분야에 가능성을 갖고 있기 때문에 현재 상당한 관심을 받고 있다. 전형적인 MTJ는 강자성체로 구성된 고정층(pinned layer)과 자유층(free layer)을 가지며 이는 터널배리어(tunnel barrier)로 사용되는 절연층에 의해 분리되어 있다. 이러한 구조로 구성되어 있는 자기터널접합은 정보통신산업, 자동차산업, 국방산업 및 바이오산업에 이르기까지 넓은 산업분야에 걸쳐 필요한 여러 소자, 부품, 시스템에 기능성을 제공하는 핵심기술이다. 이미 소자단위에서 기술적으로 검증된 MRAM 및 자기 기록센서 외에도, 최근 신개념이 제시된 능동형 논리회로 소자, 스핀공명터널소자 등은 부품 수준의 기술개발이 이루어진다면 메모리 분야 못지않은 성장잠재성이 매우 크다고 판단된다. 또한 자기터널접합은 다른 자기소자에 비해 쉽게 높은 신호 대 잡음비를 얻을 수 있어 분자단위의 검지가 필요한

*Tel: (02) 3290-3281, E-mail: ykim97@korea.ac.kr

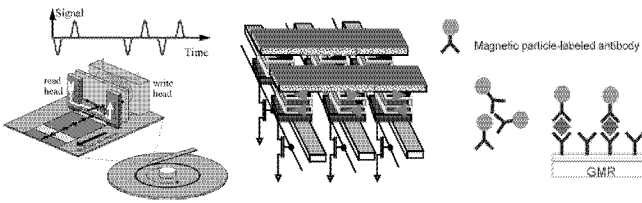


Fig. 1. Nano magnetic device applications (magnetic recording head, MRAM, and Nano-bio sensor).

초고감도 바이오센서로 응용가능성이 있다. Table 1은 자기터널접합을 근간으로 하는 기능별, 응용별 소자, 부품, 시스템 기술 및 당해 산업군을 보여주고 있다.

MRAM의 핵심기술은 나노자기터널접합 기술로써 스핀전자의 수송은 전자가 강자성층/배리어층/강자성층으로 이루어진 다층접합을 통과할 때, 두 강자성층의 자화배열에 따라 즉 평행/반평행 상태에 따라 전도의 양상이 달라진다. Fig. 2에 서와 같이 이러한 전도도의 차이(또는 자기저항비)는 자유층과 고정층으로 사용되는 강자성체의 스핀분극도(P)와 배리어 물질을 통한 전자의 터널링효과에 의존한다. 따라서 고스핀분극 강자성체로 확보, 터널배리어 물질 개발은 MRAM의 재생명진을 높이는 데 가장 중요한 핵심사항이다. 또한, MRAM의 상용화를 위해 관건이 되는 기술적 해결과제는 나노자기터널접합의 스위칭문제이다. 집적도가 Gb 급으로 갈수록 구동전류한계에 따라 특정 셀의 스위칭이 어려워지거나, 인접 셀에 의한 간섭문제가 발생한다. 스위칭은 강자성층의 용이한 자화반전이 관건이므로, 셀의 구조/형상제어와 더불어 저포화자화와 저자왜를 갖는 재료 발굴이 MRAM의 기록마진을 확보하는 핵심사항이다.

MRAM은 고속동작이 가능하며, 공정적으로 고집적화 및 고속화가 가능하고, 소비에너지가 작으며, 비휘발성이며, 또한 무한대의 기록 및 재생에 대해 열화가 없으며, 우주공간에서의 방사능 내성의 특징도 있어 이미 (1) 미사일, 우주선과 같은 군수용 제품에 쓰이고 있으며, 2~3년 내에 (2) 휴대전화기, PDA 같은 휴대단말기에 적용가능성이 높은 데, 이는 가격과 공간면에서 Flash와 DRAM을 대체할 수 있기 때문이다. 또

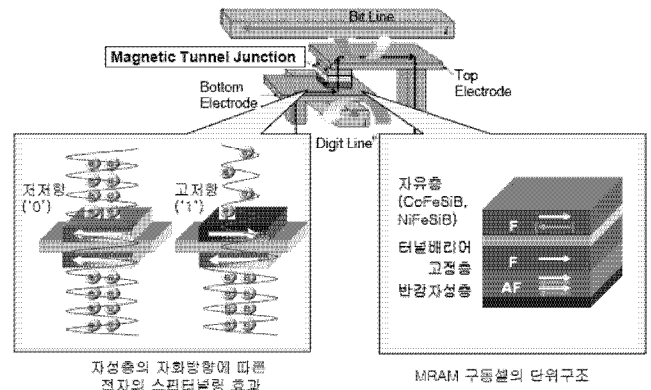


Fig. 2. Schematic diagram of MRAM including operating principles and magnetic tunnel junction structure.

한 (3) 컴퓨터네트워크 분야에서 I/O 지연을 해결하기 위해 기존의 EEPROM이나 SRAM을 극복할 대안기술로 부각되고 있다. 그밖에 (4) 저가, 비휘발성을 요구하는 RFID 태그에 적용하려는 시도가 진행 중이며, (5) 공장자동화 용 microcontroller, 로봇 등에 활용가능성이 높다. Table 2를 보면 MRAM은 비휘발성이라는 탁월한 성능 이외에도 집적가능성, 구동전력 등에서 기존의 RAM이 갖고 있는 성능보다 훨씬 탁월하다는 것을 알 수 있다.

최근 들어 PDA, 디지털 카메라, 휴대형 단말기 등 각종 정보통신 관련 전략제품들은 초소형화, 고속화, 고성능화 및 저가격화 방향으로 빠르게 진화하고 있으며 유비쿼터스, 홈네트워킹, 모바일 컴퓨팅 등 새로운 기술의 발전과 더불어 Gb 급 초고집적, ns급 초고속 비휘발성 메모리에 대한 수요가 증대되고 있다. 휴대용 단말기의 경우 이미 6억대선을 넘는 세계 유통시장을 형성하고 이미 DMB 방송수신, 의료용 자가진단, 화상통신 등 새로운 기능 및 콘텐츠가 추가된 신제품에 대한 무한 경쟁체제에 돌입하고 있다. 또한 초고속 컴퓨터, RFID, 의료기기, 일반가전에서 우주항공에 이르기까지 전체 전자기기들을 네트워킹화 하려는 시도가 진행되면서 중계기, 단말기 및 통신부품등에 사용되는 메모리의 성능 또한 고집적, 고속, 고기능화를 목표로 지속적인 개발요구가 이루어

Table 1. Magnetic tunnel junction based applications.

| 1차 기능(소재) | 2차 기능(소자) | 3차 기능(부품) | 4차 기능(제품/시스템) | 5차 기능(산업) |
|-----------|-----------|---------------------|---------------|-----------|
| 자기터널접합 | 비휘발성 MRAM | 고성능 디지털 메모리 | 컴퓨터, 네트워크 | 정보저장 산업 |
| | | 임베디드 칩 | 휴대폰, GPS, 단말기 | 정보저장 산업 |
| | | 임베디드 칩 | 스마트카드, RFID | 유비쿼터스 산업 |
| | | 방사능 내성 메모리 | 미사일, 우주선 | 국방산업 |
| | | Microcontroller | 자동차 센서, 로봇 | 자동차 산업 |
| | 논리소자 | Chameleon Processor | 신기능 정보처리 기기 | 정보처리 산업 |
| | 공명터널소자 | 스핀트랜지스터 | 신기능 정보처리 제품 | 정보처리 산업 |
| | 재생센서 | 자기기록 헤드 | 고기밀도 HDD | 정보저장 산업 |
| | 분자 검지소자 | DNA/단백질 칩/센서 | 진단기기 시스템 | 바이오 산업 |

Table 2. Comparison of memory performances between MRAM and other memories [1].

| Property | Memory Type | | | | |
|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|---------------|
| | SRAM | DRAM | Flash | FeRAM | MRAM |
| Read | Fast | Moderate | Fast | Moderate | Moderate-Fast |
| Write | Fast | Moderate | Slow | Moderate | Moderate-Fast |
| Nonvolatile | No | No | Yes | Partially* | Yes |
| Endurance | Unlimited | Unlimited | Limited** | Limited | Unlimited |
| Refresh | No | Yes | No | No | No |
| Cell Size | Large | Small | Small | Medium | Small |
| Low Voltage | Yes | Limited | No | Limited | Yes |

*Destructive read and limited read/write endurance

**Limited write endurance

Table 3. Forecasting of semiconductor memory market [2, 3].

| | | 연도별 세계 반도체 메모리의 시장규모(백만\$) | | | | | |
|-------|------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 구분 | | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
| DRAM | WSTS | 16,800 | 21,700 | 27,200 | 22,200 | N/A | N/A |
| | IDC | 16,500 | 20,200 | 22,200 | 21,900 | 24,700 | 30,900 |
| | DQ | 17,500 | 25,200 | 27,700 | 19,100 | 24,000 | 29,500 |
| Flash | WSTS | 15,100 | 15,100 | 17,200 | 16,200 | N/A | N/A |
| | IDC | 10,800 | 14,100 | 13,500 | 15,200 | 16,000 | 17,100 |
| | DQ | 10,800 | 15,200 | 18,000 | 19,700 | 23,800 | 29,400 |
| MRAM | NanoMarket | N/A | 2 | 87 | 579 | 1,383 | 2,774 |

Table 4. Forecasting of MRAM application and market projection [3].

| | 응용분야에 따른 MRAM 시장규모(백만\$) | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|------|------|-------|-------|--------|
| | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2010 | 2012 |
| 휴대형 컴퓨터 | 0 | 20 | 112 | 304 | 2,928 | 6,445 |
| 가전컴퓨터 및 생활가전제품 | 0 | 0 | 156 | 329 | 976 | 1,555 |
| 기업컴퓨터 및 정보통신 | 0 | 0 | 18 | 38 | 678 | 1,224 |
| 휴대폰, GPS 및 정보단말기 | 0 | 23 | 125 | 318 | 1,625 | 2,602 |
| 휴대형 기록/표시/재생 단말기 | 0 | 15 | 59 | 165 | 723 | 1,218 |
| 제어시스템 및 임베디드 컴퓨팅 | 0 | 15 | 42 | 95 | 576 | 1,153 |
| 센서, 스마트카드, RFID 및 소모성 제품 | 0 | 2 | 17 | 45 | 471 | 1,077 |
| 군수 제품 | 2 | 12 | 50 | 89 | 445 | 828 |
| 총계 | 2 | 87 | 579 | 1,383 | 8,422 | 16,102 |

지고 있다. 이러한 전자제품의 개발추세를 고려할 때 DRAM, SRAM, FRAM 등은 2010년을 기점으로 Gb급 초고집적, 초고속 차세대메모리인 MRAM을 중심으로 빠르게 재편될 것으로 기대된다. Table 3과 4에 MRAM의 시장규모와 이의 응용가능 분야를 정리해 두었다.

III. 자기터널접합과 MRAM의 기술개발 동향

1995년 MIT의 Moodera에[4] 의해 자기터널접합에서 높은 자기저항비를 얻은 이후 고집적 MRAM 구현이 가시화되었다. 미국은 지난 10년간 MRAM 기초기술 개발을 DARPA Project 등 중점 국책연구 수행하였고 현재는 기업 중심의 상

용화 연구 진행 중이다. Honeywell은 이미 군수용으로 MRAM을 납품하고 있다. IBM은 2000년 ISSCC 학회에서 0.25 μm CMOS 기술을 적용하여 1 Kb 테스트 어레이를 발표하였고, 2004년 16 Mb 메모리 가능성을 검증하였다. 현재 Infineon과 공동개발로 0.13 μm CMOS 기술을 적용하여 양산용 256 Mbit MRAM을 개발하고 있다. Motorola(현, Freescale Semiconductors)는 2004년 0.2 μm CMOS 기술을 적용한 Embedded 메모리 형태의 4 Mb MRAM 시제품을 출시하였다. 동사는 주로 리치마켓용 메모리에 중점을 두고있다.

2004년 VLSI학회 설계분야에서 일본 Renesas Technology는 100 MHz에서 동작하는 고속의 1.2 V 시작품을 발표하였고, 스핀토크 스위칭 현상을 이용한 65 nm MRAM을 2005

년 미국 Grandis와 공동 개발하였다. 최근 Sony는 전류밀도가 기존대비 10분의 1로 낮은 스피너크 소자를 발표하였다. 2006년 2월 Toshiba-NEC는 새로운 Power-forking 설계기술을 도입하여 16 Mbit의 MRAM을 발표하였다. 이의 정보처리 속도는 200 MB/s로써 현재 발표된 MRAM 중 가장 빠른 속도를 자랑한다. 또한 Toshiba는 2006년 5월 IEEE International Magnetic Conference에서 64 Mbit MRAM 테스트 결과를 발표하였다[5]. 일본은 미국에 비해 뒤늦게 개발에 착수하였으나 반도체공정, 자성물질 분야에 풍부한 기반기술을 갖고 있으므로 매우 빠른 기술의 신장을 보이고 있다.

나노자기터널접합을 사용하는 MRAM은 저항이 높고 열적 안정성이 낮다는 여러 문제점들이 있음에도 불구하고 비휘발성, 고집적성, 고속, 방사능 내성, 및 비파괴성등 주목할 만한 가치가 있어 해외 선진 연구 그룹 및 회사에서 경쟁적으로 연구 및 발표가 이루어지고 있다. 여타 차세대 메모리 기술과 마찬가지로 MRAM은 메모리 아키텍처 설계, 구동회로 설계, 인터페이스 등과 같은 공통 주변기술의 확보와 더불어 구동 셀(core cell)로 쓰이는 나노자기터널접합과 관련한 핵심기술인 기록 및 재생마진 확보가 고집적화 시 첨예한 문제로 부각되고 있다. 특히 기록마진은 강자성체의 재료물성 자체에, 재생마진은 자기저항비에 큰 영향을 받는다. 문제는 향후 5년내 다가올 수 Gb 이상의 초고집적도를 달성하기 위해서는 수십 나노미터 셀 구조가 필수불가결하며, 셀 크기감소에 따른 강자성체 자화반전의 제어와 큰 자기저항비 확보가 필수적이다. 기록기술과 관련하여 Motorola는 2003년 Toggle 스위칭이라는 원천특허를 취득하여 돌파구를 제시하였다. 다만 기록시간이 길다는 단점을 극복하는 것이 기술과제이다. 2004년말 미국 IBM의 Parkin과[6] 일본 AIST의 Yuasa 그룹은[7] MBE로 MgO 단결정 터널배리어를 합성하여 각각 200%의

높은 자기저항비를 갖는 터널접합구조를 발표하여 재생마진을 획기적으로 향상시켜 주목을 끌었다. 고집적시 요구되는 SNR을 확보가능성이 제시되었으나 대면적 저가 증착기술 개발이 필요하다.

MRAM의 재생마진 확보에의 문제점은 상대적으로 낮은 자기저항비와 인가전압의 증가에 따른 자기저항비의 감소가 있다. 따라서 본 연구실은 일반적으로 자기터널접합의 자유층으로 사용되는 결정질 자성재료 CoFe 또는 NiFe을 대신하여 비정질 자성재료인 NiFeSiB과 CoFeSiB을 나노자기터널접합의 자유층으로 사용하여 높은 인가전압에서도 자기저항비의 감소없이 스위칭 자기장을 감소시키고자 하였다[8-11].

Ni₁₆Fe₆₂Si₈B₁₄과 Co_{70.5}Fe_{4.5}Si_{1.5}B₁₀ 단일층은 Co₉₀Fe₁₀(M_s = 1,400 emu/cm³)에 비해 낮은 포화자화값(M_s = 800 emu/cm³ 및 560 emu/cm³)을 가지며 Ni₈₀Fe₂₀(K_u = 1,000 erg/cm³)에 비해 높은 이방성 상수(K_u = 2,800 erg/cm³ 및 2,700 erg/cm³)를 갖는다. Si/SiO₂/Ta 45/Ru 9.5/TrMn 10/CoFe 7/AlO_x 1.5/NiFeSiB, CoFeSiB, CoFe, 또는 NiFe 7/Ru 60(nm) 구조의 자기터널접합을 스퍼터링 증착방법을 사용하여 제작하였고 사진식각 기술을 이용하여 10×10 μm²에서 100×100 μm² 크기의 셀로 만들었다. 일반적으로 자기터널접합의 자유층으로 사용되는 CoFe과 NiFe은 비교의 목적으로 제작하였다.

Fig. 3은 NiFeSiB과 CoFeSiB을 자유층으로 사용한 10×10 μm² 크기의 자기터널접합의 터널자기저항비와 스위칭 자기장을 나타낸다. NiFeSiB과 CoFeSiB을 자유층으로 사용한 자기터널접합은 각각 30%와 29%의 터널자기저항비(tunneling magnetoresistance ratio)를 나타내었고, 이때 CoFe과 NiFe 자유층 구조는 각각 36%와 19%의 터널자기저항비를 나타내었다. 스위칭 자기장은 NiFeSiB과 CoFeSiB을 사용하였을 경우 각각 4 Oe와 2 Oe 이었으며 CoFe은 54

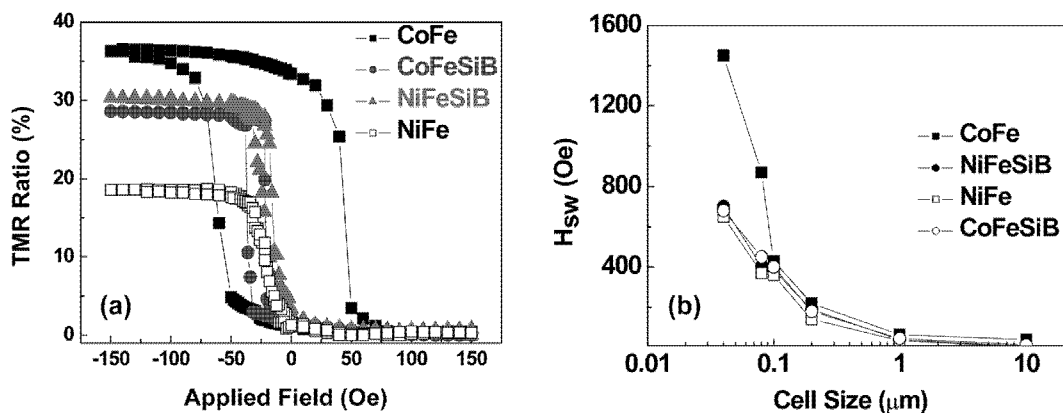


Fig. 3. (a) Collection of R-H curves for a 10×10 μm² MTJ incorporating various free layers. The TMR ratios are 36, 30, 28, 19% and H_{sw} values are 54, 4, 6, and 2 Oe for CoFe, NiFeSiB, CoFeSiB and NiFe, respectively. (b) Size dependence of the switching field obtained by the LLG simulation with respect to the free layer material. For 40~80 nm cell sizes, the H_{sw} values of the NiFeSiB and CoFeSiB-MTJs are about half of the CoFe-MTJ.

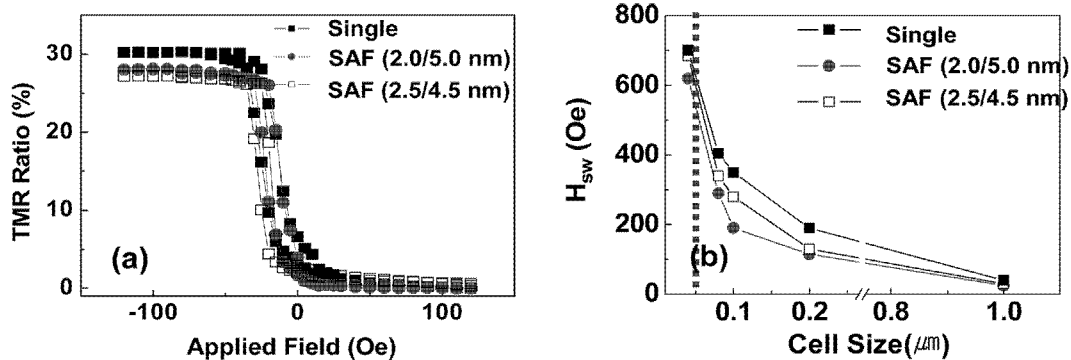


Fig. 4. (a) TMR ratio and H_{sw} for single and SAF NiFeSiB free layered MTJs. The TMR ratios and H_{sw} values of SAF (2.5/0.5/4.5), SAF (2.0/0.5/5.0), and single (7 nm) free layered structures were 27, 28, and 30 % and 6, 6, and 8 Oe, respectively. (b) Size dependence of the switching field obtained by the LLG simulation for single and SAF NiFeSiB free layered MTJs.

Oe NiFe는 2 Oe였다. 즉 NiFeSiB과 CoFeSiB을 자유층으로 사용한 자기터널접합에서 중요한 것은 매우 낮은 스위칭 자기장을 갖는다는 것이다.

이는 NiFeSiB과 CoFeSiB의 낮은 포화 자화값으로 인해 이를 사용한 자기터널접합의 스위칭 자기장은 CoFe에 대비하여 약 7배 정도의 낮은 값을 갖는다. Gb급 소자 크기인 수십 nm 크기의 셀에서 스위칭 거동을 비교분석하기 위해 Landau-Lifschitz-Gilbert(LLG) 방정식을 이용한 전산모사법을 사용하였다. 전산모사를 이용시 CoFe는 셀의 크기가 100 nm 이하가 될 때 스위칭 자기장이 급격하게 증가하게 되고 셀의 크기가 40 nm가 되면 대략 1500 Oe 정도가 되어 NiFeSiB과 CoFeSiB에 비해 2배 정도의 큰 스위칭자기장을 갖게 된다. 따라서 이러한 신강자성 물질은 Gb급 고집적화에 유리하다.

스위칭 자기장을 더욱 감소시키기 위해 NiFeSiB 합성형 반강자성체 구조의 자유층을 사용하였다. Fig. 4에서와 같이 단일 자유층 구조에 비해 합성형 반강자성체 자유층 구조를 사용함으로써 스위칭 자기장의 감소, 민감도의 증가가 관찰되었는데, 이는 자기터널접합 자유층의 정자기 에너지와 정자기 교환에너지의 감소에 의한 것이다.

현재 본 연구실에서는 실제 MRAM 구동시 바이어스 전압 인가에 따른 신호의 감소문제를 해결하기 위해, 이중(double) 터널베리어를 갖는 자기터널접합 구조를 개발 중이다. 일례로 Si 기판에 Ta 45/Ru 9.5/IrMn 10/CoFe 7/ AlO_x 1.5/자유층/ AlO_x 1.5/CoFe 7/IrMn 10/Ru 60 nm (여기서 자유층으로는

CoFe 7, NiFeSiB 7, CoFe 3.5/NiFeSiB 3.5, 및 NiFeSiB 3.5/CoFe 3.5) 접합을 제조하였다. Table 5에서와 같이 NiFeSiB이 사용된 자기터널접합은 CoFe이 사용된 자기터널접합에 비해 높은 표면평활도를 가짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 NiFeSiB은 비정질이라 결정립계가 없어 주상정 성장을 할 수 없고 이로 인해 터널베리어의 표면평활도는 증가하기 때문이다. 접합저항, 터널자기저항비, V_h (Half voltage, 0 V 대비 자기저항비가 반감되는 전압)과 V_{bd} (Breakdown voltage, 파괴전압)를 마찬가지로 Table 5에 나타내었다.

터널자기저항값은 거의 차이가 없으므로 이는 큰 의미를 내포하고 있지는 않지만 NiFeSiB을 사용함으로써 V_h , V_{bd} 그리고 접합저항이 증가하는데 이는 표면 평활도가 증가하기 때문이다(Fig. 5). 즉, 이러한 비정질 강자성체를 사용한 결과, 반감 전압(자기저항비가 반감되는 전압)이 1.1 V, 파괴전압이 2.0 V 정도로 높은 고무적인 결과를 얻고 있다. CoFe/NiFeSiB 혼성 자유층 구조에서 나타나는 중요한 양상은 증착순서에 의하여 자기터널접합의 특성이 결정된다는 것이다. 하부 터널베리어 바로 위에 NiFeSiB을 증착한 시편의 상부 터널베리어가 상부 터널베리어 하부에 NiFeSiB을 증착한 시편에 비해 더욱더 표면평활도가 좋아져 V_h , V_{bd} 등의 특성이 향상된다.

IV. 맺음말

나노자기터널접합은 정보통신산업, 자동차산업, 국방산업 및

Table 5. The rms surface roughness of top tunnel barrier, resistance, TMR ratio, V_h , and V_{bd} depending on the free layer structure in double barrier MTJs.

| Free Layer Structure (nm) | Roughness (nm) | Resistance (ohm) | TMR Ratio (%) | V_h (V) | V_{bd} (V) |
|---------------------------|----------------|------------------|---------------|-----------|--------------|
| CoFe 7 | 0.35 | 250 | 29 | 0.7 | 1.3 |
| NiFeSiB 7 | 0.17 | 860 | 28 | 1.1 | 2.0 |
| CoFe 3.5/NiFeSiB 3.5 | 0.30 | 280 | 27 | 0.8 | 1.5 |
| NiFeSiB 3.5/CoFe 3.5 | 0.22 | 770 | 27 | 1.0 | 1.8 |

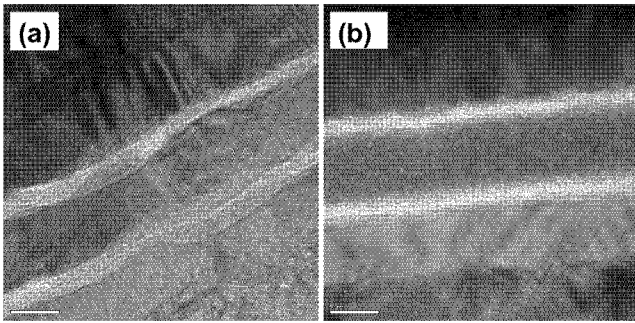


Fig. 5. HRTEM images of the DMTJs consisting of (a) CoFe 7, and (b) NiFeSiB 7 nm, respectively. The white layers are top and bottom tunnel barriers.

바이오산업에 이르기까지 넓은 산업분야에 걸쳐 필요한 여러 소자, 부품, 시스템에 가능성을 제공하는 핵심기술이다. 본 연구를 통해 얻은 신 강자성체 나노자기터널접합을 활용한 고집적 MRAM 소자재료 기술은 차세대메모리 소자제조 전반의 기술경쟁력을 제고하는데 크게 기여할 것이라 생각한다.

감사의 글

이 논문은 과학재단 국가지정연구실사업 과제번호 M10500000105-05J0000-10510의 지원에 의하여 작성하였으며, 2005년 4월 한국과학기술정보연구원에서 시행한 위탁연구과제(G-04-TJ-02-01A-1)인 ‘국내외 나노기술 동향 비교분석 연구’의 연구결과 일부내용을 소개하였음.

참고문헌

- [1] G. Grynkewich, et al., MRS Bulletin, Nov. 818 (2004).
- [2] WSTS, ‘Semiconductor market forecast’, (‘03.10), IDC, ‘World wide DRAM forecast and analysis 2003-2007’ (‘03.12), DQ, ‘World wide memory forecast IQ04 update’ (‘04.3), NanoMarket, ‘Magnetic Memory : An analysis and forecast of the market for MRAM’ (‘05.1).
- [3] NanoMarket, ‘Magnetic Memory : An analysis and forecast of the market for MRAM’ (2005).
- [4] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong, and R. Meservey, Phys. Rev. Lett., **74**, 3273 (1995).
- [5] H. Yoda, et al., 2006 IEEE International Magnetics Conference, Digest EB-05 (2006).
- [6] S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S.-H. Yang, Nature Materials, **3**, 862 (2004).
- [7] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, Nature Materials, **3**, 868 (2004).
- [8] B. S. Chun, Y. K. Kim, J. Y. Hwang, J. R. Rhee, T. Kim, and W. Park, Appl. Phys. Lett., **87**, 082508, (2005).
- [9] J. Y. Hwang, S. S. Kim, J. R. Rhee, B. S. Chun, I. S. Yoo, B. S. Oh, Y. K. Kim, T. Kim, and W. Park, IEEE Trans. Magn., **45**, 2685, (2005).
- [10] B. S. Chun, S. P. Ko, Y. K. Kim, J. Y. Hwang, J. R. Rhee, and T. Kim, J. Appl. Phys., **99**, 08A902 (2006).
- [11] J. Y. Hwang, J. R. Rhee, B. S. Chun, Y. K. Kim, and T. Kim, J. Appl. Phys., **99**, 08T315 (2006).

High Density MRAM Device Technology Based on Magnetic Tunnel Junctions

Byong Sun Chun and Young Keun Kim*

Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received 21 May 2006, in final form 21 June 2006)

Ferromagnetic amorphous $\text{Ni}_{16}\text{Fe}_{62}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ and $\text{Co}_{70.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ layers have been devised and incorporated as free layers of magnetic tunnel junctions (MTJs) to improve MRAM reading and writing performance. The NiFeSiB and CoFeSiB single-layer film exhibited a lower saturation magnetization ($M_s = 800 \text{ emu/cm}^3$, and 560 emu/cm^3 , respectively) compared to that of a $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ($M_s = 1400 \text{ emu/cm}^3$). Because amorphous ferromagnetic materials have lower M_s than crystalline ones, the MTJs incorporating amorphous ferromagnetic materials offer lower switching field (H_{sw}) values than that of the traditional CoFe-based MTJ. The double-barrier MTJ with an amorphous NiFeSiB free layer offered smooth surface resulting in low bias voltage dependence, and high V_h and V_{bd} compared with the values of the traditional CoFe-based MTJ.

Key words : magnetic tunnel junction, MRAM, nano-technology, amorphous ferromagnet