

# Thema | 고집적 MRAM 기술

김영근 교수  
(고려대 신소재공학부)

## 1. 디지털 정보저장산업과 MRAM

정보저장 산업은 21세기 거대 기간산업의 하나로 지속적이며, 새로운 기술혁신이 필요한 분야이며 우리나라의 국부를 창출하고 있는 산업이다. 최근 들어 PC를 비롯한 PDA, 디지털 카메라, 휴대형 단말기 등 각종 정보통신 관련 제품들은 초소형화, 고속화, 고성능화 및 저가격화 방향으로 빠르게 진화하고 있으며 유비쿼터스, 홈네트워킹, 모바일 컴퓨팅 등 새로운 기술의 발전과 더불어 Gb급 초고집적, ns급 초고속 비휘발성 메모리에 대한 수요가 증대되어, 정보저장에 대한 수요는 매 5년마다 10배씩 증가하는 추세에 있다. 휴대용 단말기의 경우 이미 6억대/년을 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 이루어지고 있다.

동 산업 기술의 최근 경향은 개인정보의 소요량이 급격히 증대되고, 정보의 질 또한 고급화로 변하고 있는 추세이다. 정보저장산업의 획기적인 발전을 위해, 현재 세계 각국에서 MRAM(Magnetic Random Access Memory)과 같은 자기소자(磁氣素子) 기술을 활발히 연구개발하고 있다. 자기소자 기술의 발달은 대용량, 고속 정보처리능력에 대한 수요가 폭발적으로 증가하고 있는데 반해, 기존의 메모리 성능으로는 이 수요를 만족시킬 수 없기 때문이다. 메모리 시장에서 한 기술이 차지하는 몫은 신기술을 적용하는 응용분야의 출현으로 점차 변화한다. 2002년 이후 디지털 휴대용기기 시장의 급성장으로 Flash ROM 메모리 수요가 급증하여 DRAM 제품의 매출은 시장의 60% 이하로 감소하였다. 향후 모바일 애플리케이션 시장은 지속적으로 성장하여 비휘발성 코드와 데이터 저장 능

력 수요의 지속적인 증가를 요구하며, 앞으로 이런 경향은 계속될 것으로 예상된다.

통상 자기소자 기술은 전자의 전하뿐만 아니라 스핀 자유도, 즉 업스핀 전자와 다운스핀 전자를 구분하여 전자의 이동을 제어하는 신기술을 의미한다. 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. 자기소자 기술은 전자의 스핀이동에 관한 학문적 흥미를 유발할 뿐 아니라 (1) 자기디스크형 디지털 저장기기 또는 비휘발성 고상메모리와 같은 대용량 초고속 정보저장기술, (2) 자동차 및 정보가전용 자동제어센서, (3) 생명공학용 단백질, DNA 바이오 검출기, (4) 스핀 광소자, 그리고 향후 출현이 예상되는 양자 컴퓨팅 등 그 응용범위가 매우 넓어 21세기 산업발전의 원동력이 될 것으로 예상되고 있다. 그림 1은 이러한 자기소자의 여러 가지 응용범위를 보여주고 있다.

시장조사기관인 Nano Market의 예측에 따르면 차세대 메모리기술은 2011년경 전체시장이 기존의 DRAM, Flash 시장을 웃도는 650억불 규모로 성장하며, 이 중 고집적 MRAM(Magnetic Random Access Memory)이 상용화되면 그 시장은 130억불 정도로 주도적인 위치를 점할 것이다[1]. 국내시장

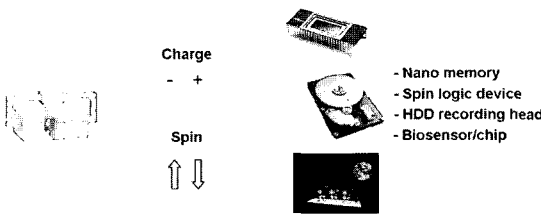


그림 1. 자기소자의 응용 분야.

규모가 세계 시장의 10% 정도라 추정하면, 2011년 국내 MRAM 시장규모는 약 1조 5천억 원에 달할 것으로 예측된다.

MRAM은 고속 동작이 가능하며, 공정적으로 고집적화 및 고속화가 가능하고, 소비에너지가 작으며, 비휘발성이며, 또한 무한대의 기록 및 재생에 대해 열화가 없으며, 우주공간에서의 방사능 내성의 특징도 있는 '유니버설 메모리'로, 이미 (1) 미사일, 우주선과 같은 군사용 제품에 쓰이고 있으며, 2~3년 내에 (2) 휴대전화기, PDA 같은 휴대단말기에 적용 가능성이 높은데, 이는 가격과 공간면에서 Flash와 DRAM을 대체할 수 있기 때문이다. 또한 (3) 컴퓨터/네트워크 분야에서 I/O 지연을 해결하기 위해 기존의 EEPROM이나 SRAM을 극복할 대안기술로 부각되고 있다. 그밖에 (4) 저가로 비휘발성을 요구하는 RFID 태그에 적용하려는 시도가 진행 중이며, (5) 공장자동화용 Microcontroller, 로봇 등에 활용가능성이 높다. 표 1을 보면 MRAM은 비휘발성이라는 탁월한 성능 이외에도 집적가능성, 구동전력 등에서 기존의 RAM이 갖고 있는 성능보다 훨씬 탁월하다는 것을 알 수 있다.

특히 2006년도 2월 미국 Freescale Semiconductors社에서 4 Mb MRAM 상용화와 16 Mb 개발에 성공하면서, 차세대 유니버설 메모리시장에서 주도권을 잡을 수 있는 위치를 선점하였다. Freescale社는 MRAM을 자동차용 정보저장기기에 응용하려

표 1. 여러 가지 메모리의 성능 비교[2].

Property	Memory Type				
	SRAM	DRAM	Flash	FeRAM	MRAM
Read	Fast	Moderate	Fast	Moderate	Moderate-Fast
Write	Fast	Moderate	Slow	Moderate	Moderate-Fast
Non-volatility	No	No	Yes	Partial	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

고 계획하는데 이는 넓은 온도범위에서 MRAM이 작동할 수 있으며, 차량충돌 기록 장치를 위해 사고 발생 시 보다 많은 데이터를 수집, 저장하여 자동차 사고나 고장의 원인을 알아내는데 도움을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 Airbag과 ABS와 같은 다양한 센서를 사용하는 자동차 어플리케이션에서 MRAM의 무제한적인 기록 사이클링 능력은 여타 메모리로는 확보할 수 없는 신뢰성을 보장해 줄 수 있다.

차후 MRAM 기술이 더욱 향상된다면 임베디드(Embedded) 시스템들의 아키텍처가 근본적으로 바뀔 수 있다. MRAM은 임베디드 MCU(Micro-Controller Unit)에서 각각 데이터 저장과 프로그램 메모리용으로 사용되는 RAM과 플래시 메모리를 통합 대체할 수 있는 잠재력을 갖고 있다. MCU가 갖고 있는 칩 특성의 ROM 코드를 MRAM이 대체하여 현장에서 빠른 프로그램이 가능한 업그레이드 능력을 제공할 수 있기 때문이다. 훨씬 더 큰 시스템에서 마이크로프로세서는 RAM 메모리를 고속 판독/기록 기능에 사용한다. DRAM은 어플리케이션 프로그램 로딩을 위한 임시 저장영역(Cache) 역할을 한다. 하드 디스크 드라이브에 어플리케이션 소프트웨어와 데이터를 위한 비휘발성 정보를 저장할 수 있지만, 판독 및 기록 속도가 느리다. 따라서 궁극적으로 MRAM이 정보저장부품들을 대체하게 되면, PC를 순간적으로 부팅할 수 있게 될 것이다.

전자제품의 개발추세를 고려할 때 DRAM, SRAM, FRAM 등은 2010년을 기점으로 Gb급 초고 집적, 초고속 차세대메모리인 MRAM을 중심으로

빠르게 재편될 것으로 기대된다.

## 2. 자기터널접합 기술

현재 자기소자 중 가장 각광을 받고 있는 것은 자기터널접합이다. 자기터널접합(Magnetic Tunnel Junction, MTJ)은 MRAM의 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.

표 2는 자기터널접합을 근간으로 하는 기능별, 응용별 소자, 부품, 시스템 기술 및 당해 산업군을 보여주고 있다. 자기터널접합은 정보통신산업, 자동차산업, 국방산업 및 바이오산업에 이르기까지 넓은 산업분야에 걸쳐 필요한 여러 소자, 부품, 시스템에 가능성을 제공하는 핵심기술이다. 이미 소자단위에서 기술적으로 검증된 MRAM 및 자기기록센서 외에도, 최근 신 개념이 제시된 능동형 논리회로 소자, 스핀공명터널소자 등은 부품 수준의 기술개발이 이루어진다면 메모리분야 못지않은 성장잠재성이 매우 크다고 판단된다. 또한 자기터널접합은 다른 자성소자에 비해 쉽게 높은 신호 대 잡음 비를 얻을 수 있어 분자단위의 검지가 필요한 초고감도 바이오센서로 응용가능성이 있다.

자기터널접합에서 스핀전자의 전도는 전자가 강

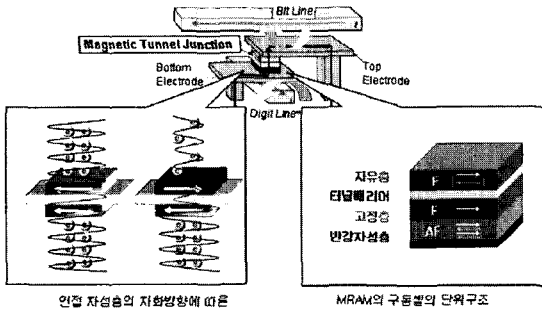
표 2. 자기터널접합을 기반으로 하는 소자, 부품 및 시스템.

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	자동화 센서, 로봇	자동화 산업
	논리소자	Chameleon Processor	신기능 정보처리 기기	정보처리 산업
	공명터널소자	스핀트랜지스터	신기능 정보처리 제품	정보처리 산업
	재생센서	자기기록 헤드	고기록밀도 HDD	정보저장 산업
	분자 검지소자	DNA/단백질 칩/센서	진단기기 시스템	바이오산업

자성층/배리어층/강자성층으로 이루어진 접합을 통과할 때, 두 강자성층의 자화배열에 따라 즉 평행/반평행 상태에 따라 전도의 양상이 달라진다. 그림 2에서와 같이 이러한 전도도의 차이(또는 자기저항비)는 자유층과 고정층으로 사용되는 강자성체의 스핀분극도와 배리어 물질을 통한 전자의 터널링효과에 의존한다. 따라서 높은 스핀분극을 갖는 강자성 재료 확보, 터널배리어 물질 개발은 MRAM의 재생마진(Reading Margin)을 높이는 데 가장 중요한 핵심사항이다.

아직까지 MRAM은 기존의 메모리에 비해 재생출력신호가 작으며, 기록시 스위칭 산포가 크고, 셀간 간섭 등의 문제로 인하여 아직까지는 Gb급 고집

적화가 어려운 실정이다. 최근 재생마진 향상(출력신호의 증가)의 관점에서, 터널배리어 재료인  $\text{AlO}_x$ 를  $\text{MgO}$ 로 대체하여 터널자기저항비(TMR)를 40%에서 200% 이상으로 정도의 올릴 수 있다는 보고가 세계 여러 곳에서 발표되어 고무적이다. 그러나 기록마진(Writing Margin)의 향상이라는 관점에서 관건이 되는 자기터널접합의 스위칭 자기장의 거대화 및 불안정에 대해서는 아직까지 마땅한 해결방안을 제시하지 못하고 있다. 자기터널접합의 재료, 형상 및 크기에 따라 스위칭특성이 미묘하게 변화하며, 집적도가 Gb급으로 갈수록 구동전류한계에 따라 특정 셀의 스위칭이 힘들거나, 인접 셀에 의한 간섭문제가 발생한다. 이를 제어하는 일이 고집적 MRAM의 기록마진을 확보하는 주요한 기술적 도전사항이지만 아직 뚜렷한 돌파구를 찾지 못하고 있다.



인접 자성층의 자화방향에 따른 전자의 스핀터널링효과

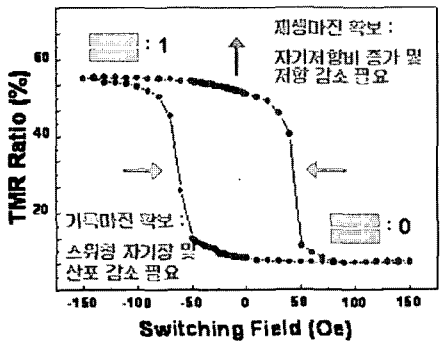
MRAM의 구동셀의 단위구조

### 3. 자기터널접합과 MRAM의 기술개발 동향

1995년 MIT의 Moodera팀에 의해 자기터널접합에서 높은 자기저항비를 얻은 이후[4], 고집적 MRAM 구현이 가시화되었다. 미국은 지난 10년간 MRAM 기초기술 개발을 DARPA Project 등 중점 국책연구 수행하였고 현재는 기업 중심의 상용화를 진행 중이다. Honeywell은 이미 미사일제어 등 군수용으로 저용량 MRAM을 납품하고 있다. 민간부문에서 IBM은 2000년 ISSCC 학회에서  $0.25 \mu\text{m}$  CMOS 기술을 적용하여 1 Kb 테스트 어레이를 발표하였고, 2004년 16 Mb 메모리 가능성을 검증하였다. 현재 Infineon과 손잡고  $0.13 \mu\text{m}$  CMOS 기술을 적용하여 양산용 256 Mb MRAM을 개발하고 있다. Motorola에서 분사한 Freescale Semiconductors는 2004년  $0.2 \mu\text{m}$  CMOS 기술을 적용한 Embedded 메모리 형태의 4 Mb MRAM 시제품을 출시한 이후, 2006년  $0.18 \mu\text{m}$  CMOS 기술과 35 ns의 액세스 시간을 갖는 4 Mb MRAM 상용화에 성공하였다. 동사는 2003년에 취득한 'Toggle Switching'이라는 원천특허를 기반으로 기록 문제를 해결하였다[5]. 동사는 현재 배터리 백업과 같은 틈새시장에 진출하고 있으나, 향후 자

(a)

자기터널접합의 핵심요구사항



(b)

그림 2. 자기터널접합의 구조 및 성능 지표.

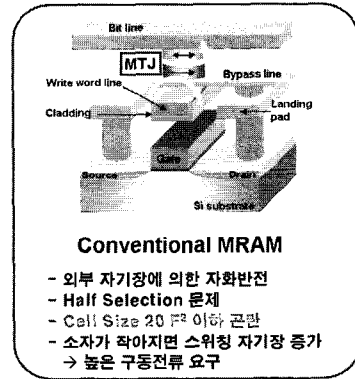
동차용 메모리 시장에 겨냥한 제품을 개발 중인데 이는 MRAM이 극심한 온도변화에도 비교적 견고하게 작동할 수 있다는 장점을 갖기 때문이다.

일본의 Toshiba-NEC 공동개발팀은 2004년 0.24  $\mu\text{m}$  자기터널접합기술로 제조된 1 Mb MRAM의 구현에 성공한 이래, 2006년 2월 0.13  $\mu\text{m}$  반도체 공정과 새로운 Power-forking 설계기술을 도입하여 16 Mb의 MRAM 기술을 발표하였다. 이의 정보처리속도는 200 MB/s로써 현재 발표된 MRAM 중 가장 빠른 속도를 자랑한다. 또한 Toshiba는 2006년 5월 IEEE Intermag Conference에서 64 Mbit MRAM 테스트 결과를 발표하였다. Renesas Technology는 100 MHz에서 동작하는 고속의 1.2 V 시작품을 발표하였고, 2005년 미국 Grandis社와 공동으로 스피노트크라는 새로운 스위칭 현상을 이용한 65 nm급 MRAM 기술을 제시하였다. 일본은 미국에 비해 뒤늦게 개발에 착수하였으나 반도체공정, 자성재료 분야에 풍부한 기반기술과 인적자원을 갖고 있어 매우 빠른 기술의 신장을 보이고 있다.

국내의 삼성전자는 2004년 Intermag 학회에서 셀 면적을  $8 F^2$ 로 획기적으로 줄일 수 있는 On-Axis 아키텍처를 제시한 바 있다. 여기서 F는 반도체공정으로 최소의 셀을 제작할 수 있는 Feature Size를 말하는 데,  $F^2$ 가 작다는 의미는 고집적화에 유리하다는 것을 뜻한다. 그밖에 2006년 동학회에서 Digit Line이 필요 없는 저전력 스위칭 방식인 Local Field Switching을 이용한 MTJ를 발표한 바 있다. 본 저자의 연구팀은 MTJ의 스위칭 자기장을 감소하기 위해 재료공학적 접근방법으로 지난 수년간 비정질 강자성체를 자유층으로 이용한 자기터널접합의 자화 스위칭 특성을 실험하였다. 신물질인 CoFeSiB와 NiFeSiB를 최초로 도입한 결과 기존의 물질인 CoFe보다 낮은 포화자화를 갖는 반면, NiFe보다 높은 자기이방성을 가지고 있어 스위칭 자기장을 최대 5배 정도 줄이는데 효과적이었다[6]. 또한, 실제 MRAM이 소자로서 작동하게 될 때, 0.4 V의 전압이 단일 MTJ 셀에 인가되는데, 이는 전자의 스핀분극도를 떨어뜨려 저기저항비를 감소시키게 된다. 이를 해결하기 위하여 비정질층과 이중(Double) 터널배리어 구조를 도입하여, 인가전압  $V_{1/2} = 1.1 \text{ V}$ (자기저항이

절반으로 감소하는 인가전압) 및 Breakdown 전압 2.0 V라는 세계적 수준의 결과를 획득하였다[7].

최근 MRAM분야의 기술 환경변화를 살펴보면, 높은 재생마진 확보를 위해 에피택셜(Epitaxial) 구조의 MgO 터널배리어를 사용하는 연구가 주류를 이루고 있다. 2004년에 일본 AIST의 Yuasa팀이 MgO를 터널배리어로 사용하여 20 K에서 250 %, 상온에서 180 %의 자기저항비를 획득하였다[8]. 거의 동시에 미국 IBM의 Parkin 팀도 MgO 터널배리어로 유사한 수준의 자기저항비를 얻었다[9]. 높은 자기저항비는 재생마진을 획기적으로 향상시켜 충분한 신호대잡음비를 확보할 수 있다. 그 후 지속적으로



(a)



(b)

그림 3. 자기장 스위칭 방식의 기존 MRAM과 스핀전달 토크 스위칭 방식의 MRAM 비교.

세계 여러 연구그룹에서 MgO 터널배리어를 사용한 자기터널접합의 연구를 수행하였으며, 2006년에는 Tohoku대의 Ono팀과 Hitachi는 공동연구를 통하여 5 K에서 804 %, 상온에서 472 %라는 최고수준의 자기저항비를 획득한 바 있다[10].

기록마진 확보에 관한 연구를 살펴보면, 메모리 고밀도화에 따라 셀 사이의 거리가 짧아지고, 셀 크기가 감소하면서, 기존의 외부 자기장을 이용한 자화반전방식에서는 셀의 선택적 스위칭이 불안정하고 큰 외부자기장이 필요하기 때문이다. 1996년 IBM의 Slonczewski가 이론적으로 제안하였고[11], 1999년 Cornell대의 Buhrman팀에서 실험적으로 입증한 [12] 스핀전달토크(Spin Transfer Torque)라는 새로운 물리현상에 기초한 전류주입형 자화방식의 연구가 최근 각광을 받고 있다. 스핀전달토크 방식은 외부 자기장에 의해 MTJ의 자화방향을 바꾸는 방식이 아니라 직접 전류를 주입하여 스위칭하는 방식이므로 소자크기가 작아질수록 전류소모가 적어지며 아울러 MRAM의 아키텍처가 단순해 고집적에 유리한 구조이다(그림 3).

전류주입형 자화방식의 연구에 있어서 2006년 Tohoku대의 Ohno팀에서 MgO를 터널배리어로 사용한 자기터널접합을 전자빔 패터닝공정을 통한 미세가공으로  $80 \times 240 \text{ nm}^2$  크기의 셀에서  $2.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 의 전류를 인가하여 자화반전에 성공을 하였고 160 %의 자기저항비를 획득하였다. MRAM에서 각각의 셀에 접합되는 트랜지스터에 흐를 수 있는 전류가 일반적으로 0.1 mA이므로 자화반전에 필요한 전류는 이보다 낮아야한다. 따라서 전류밀도가  $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  이하인 접합소재의 개발이 필수적이며, 아울러 열적안정성 및 인가전압 안정성 확보가 제품화를 위한 선결과제이다.

국내에서도 21세기 프린터 사업의 일환으로 테라급나노소자개발사업단의 과제에 참여하는 삼성종합기술원, 한국과학기술연구원을 중심으로 여러 대학의 연구자들이 참여하여 Gb급 스핀전달토크 MRAM 기술개발에 힘을 쏟고 있다.

전술한 바와 같이 자기터널접합소자와 MRAM에 관한 연구는 그 중요성에 비해 미국, 일본 등의 선진국에서도 최근에서야 실용화 단계에 진입하여 기술

을 도입할 수 없는 실정이다. 따라서 핵심기술의 확보는 국내의 차세대 비휘발성 MRAM 메모리 산업의 발전을 도모할 수 있을 뿐 아니라 막대한 시장을 선점할 수 있어 그 파급효과는 지대할 것이다.

#### 4. 결론

정보기술(IT) 이후에 찾아올 미래사회의 메가트렌드는 IT, BT, NT 등이 어우러진 기술융합이다. 자기터널접합은 정보통신산업, 자동화산업, 국방산업 및 바이오산업에 이르기까지 넓은 산업분야에 걸쳐 필요한 다양한 소자, 부품, 시스템에 기능성을 제공하는 기술융합형 핵심소재기술이다. 자기터널접합을 기반으로 한 고집적 MRAM 기술은 차세대메모리 소자제조 전반의 기술경쟁력을 제고하고 미래 시장을 창출하는데 크게 기여할 것이라 생각한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007년 과학기술부의 재원으로 한국과학재단 국가 지정 연구실 사업(과제번호 M10500000105-05J0000-10510)의 지원에 의하여 작성하였음.

#### 참고 문헌

- [1] NanoMarket, 'Magnetic Memory : An analysis and forecast of the market for MRAM', January (2005).
- [2] G. Grynkewich et al., 'Nonvolatile Magnetoresistive Random-Access Memory Based on Magnetic Tunnel Junctions', MRS Bulletin, Nov. 818 (2004).
- [3] 전병선, 김영근, '자기터널접합을 활용한 고집적 MRAM 소자 기술', 한국자기학회지, 16, 186(2006).
- [4] J. S. Moodera et al., Phys. Rev. Lett. 74, 3273(1995).
- [5] L. Savtcheko et al., U.S. Patent 6,545,906(2003).
- [6] B. S. Chun et al., 'Magnetization switching and tunneling magnetoresistance effects of synthetic antiferromagnet free layers consisting of

amorphous NiFeSiB', Appl. Phys. Lett. 87, 082508-1(2005).

[7] Y. S. Kim et al., 'Bias voltage dependence of magnetic of tunnel junctions comprising double barriers and CoFe/NiFeSiB/CoFe free layer', IEEE Trans. Magn. 42, 2649(2006).

[8] S. Yuasa et al., 'Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions' Nature Materials 3, 868(2004).

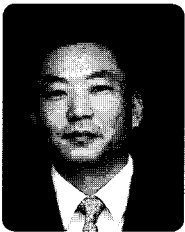
[9] S. S. P. Parkin et al., 'Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers', Nature Materials 3, 862(2004).

[10] J. Hayakawa et al., 'Current-Induced Magnetization Switching in MgO Barrier Based Magnetic Tunnel Junctions with CoFeB/Ru/CoFeB Synthetic Ferrimagnetic Free Layer', Jpn. J. Appl. Phys. 44, L1057(2006).

[11] J. C. Slonczewski et al., 'Current-driven excitation of magnetic multilayers', J. Magn. Magn. Mater. 159, L1(1996).

[12] E. B. Myers et al., 'Current-Induced Switching of Domains in Magnetic Multilayer Devices', Science, 285, 867(1999).

저|자|약|력



성 명 : 김영근  
(ykim97@korea.ac.kr)

- ◆ 학 력
- 1985년 서울대 금속공학과 공학사
- 1987년 서울대 금속공학과 공학석사
- 1993년 MIT 재료공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 1993년 - 1997년 Quantum Corporation, Senior Engineer
- 1997년 - 2000년 삼성전기(주) 수석연구원
- 2000년 - 현 재 고려대 공과대학 신소재공학부 조/부/정교수
- 2002년 - 현 재 IEEE Transactions on Magnetics, Editorial Board Member
- 2005년 - 현 재 나노소자특화팀 이용자협의회 부회장
- 2005년 - 현 재 과학기술부/과학재단 국가지정연구실 책임자 (<http://idm.korea.ac.kr>)

