

# Thema | 스핀트로닉스를 이용한 정보저장 기술

## 1. 서론

신 경호 박사  
 (KIST 미래기술연구본부 나노소자센터)  
 석 중현 교수  
 (서울시립대 나노과학기술학과)  
 김 흥석 교수  
 (배재대 전자공학과)

스핀트로닉스(Spintronics) 혹은 스핀전자공학은 전자가 가지는 양자역학적 성질인 스핀을 고전역학적 성질인 전하와 함께 활용함으로써 기존의 전자공학적인 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대되는 학문을 일컫는다. 스핀을 활용하는 방법에 따라 스핀트로닉스의 세대를 구분하기도 한다. 제1세대의 기술은 스핀의 방향을 바꿈으로써 전하의 이동 여부 혹은 속도를 제어하는 것이고, 제2세대의 기술은 전자가 가지는 스핀간의 작용만을 이용하여 정보를 기록하고 처리하는 것이다. 후자의 활용방법을 통해서 스핀트랜지스터(Spin-FET)와 같은 스핀전자소자는 기존의 전자소자에 비하여 속도가 빠르고 소비전력이 매우 낮은 특성을 구현할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 첫 번째의 활용방법으로도 스핀의 고유한 특성에 힘입어 이미 고밀도, 비휘발성, 내환경성 및 고신뢰성이라는 장점을 확보하고 있어서, 예를 들면, 컴퓨터의 보조기억장치로 가장 널리 사용되고 있는 하드디스크 드라이브 제조에 활용되고 있다. 따라서 후자의 장점을 더 붙여 활용할 수 있게 된다면, 스핀전자공학은 휴대성과 대용량이 강조되는 차세대 정보화 시대에 가장 적합한 기술로 확고하게 자리매김할 것이다.

본고에서는 대표적인 제1세대 스핀트로닉스 기술이라고 할 수 있는 거대자기저항(이하, GMR; Giant Magneto-Resistance)과 터널링자기저항(이하, TMR; Tunneling Magneto-Resistance)을 비롯하여 여러 가지 자기저항에 대한 소개를 간단히 할 예정이다. 뒤이어, 이들 제1세대 스핀트로닉스 기술을 활용하여 이미 상용화되어 있는 하드디스크 드라이브와 곧 실용화될 것으로 기대되는 자기램(이하, MRAM; Magnetoresistive Random Access Memory) 등 두 가지 대표적인 정보저장 제품군의 제조 기술에 대하여 서술하고자 한다. 표1은 현재 사용하거나 가까운 시일 내에 상용화 될 정보저장기기의 장·단점을 분석하고 발전방향을 제시한 것인데, 스핀을 이용하여 정보를 저장하는 산업의 중요성과 발전가능성을 가늠하여 보고자 하였다.

표 1. 각 정보저장기기의 장·단점 및 발전방향.

	HDD (3.5, 2.5, SFF)	Solid State (Flash, M-RAM)	Optical Disk (CD, DVD..)
<b>Pros</b>	<input type="checkbox"/> High Capacity <input type="checkbox"/> Cost Effectiveness <input type="checkbox"/> Massive Storage <input type="checkbox"/> High Speed	<input type="checkbox"/> Mobility <input type="checkbox"/> Temp Sensitivity <input type="checkbox"/> Power Consumption <input type="checkbox"/> Noise Performance	<input type="checkbox"/> Data storage <input type="checkbox"/> Removal Storage <input type="checkbox"/> Low Cost
<b>Cons</b>	<input type="checkbox"/> Mobility: Shock, Size <input type="checkbox"/> Power Consumption <input type="checkbox"/> Noise Performance	<input type="checkbox"/> High Cost <input type="checkbox"/> Low Speed <input type="checkbox"/> Low Capacity	<input type="checkbox"/> Mobility: Size, Shock <input type="checkbox"/> Low Speed <input type="checkbox"/> Low density <input type="checkbox"/> Size
<b>Development Direction</b>	<input type="checkbox"/> Anti-Shock & Vib. <input type="checkbox"/> Small Form Factor <input type="checkbox"/> Lower noise	<input type="checkbox"/> High capacity <input type="checkbox"/> High Speed	<input type="checkbox"/> High Density <input type="checkbox"/> High Speed

표 2. 여러 가지 MR 소자.

종류	설명	재료	특징
AMR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anisotropic Magneto Resistance의 약자로 스핀 이방성 배열에 기인하는 기본적인 현상</li> <li>스핀이 전류방향에 대해 수직인 경우 저항이 커지는 것으로 1995년 이전의 HDD 헤드 및 소형모터의 자기센서로 채용되는 범용 MR.</li> </ul>	NiFe (Permalloy)	<ul style="list-style-type: none"> <li>MR비가 &lt;2%로 작음.</li> <li>외부자계 10 Oe 이하에서도 동작가능</li> <li>단층금속이므로 공정간단</li> <li>기본저항이 작아 소비전력 저감</li> </ul>
GMR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Giant Magneto Resistance의 약자로 거대자기저항효과</li> <li>자성층/비자성층/자성층 구조로 자성층간의 교환작용으로 자성층스핀의 평행, 반평행의 관계에서 발생</li> <li>활용MR이 8%정도로 자기센서로 응용</li> </ul>	Co/Cu/Co Fe/Cr/Fe	<ul style="list-style-type: none"> <li>MR비가 10% 정도로 우수.</li> <li>외부자계 10 Oe 이상에서 동작이 가능한 문제가 있다.</li> <li>최소 3층이상의 적층공정 필요.</li> <li>비자성층의 두께에 따른 교환작용의 변화로 특성이 변화하므로 최적두께 및 확산방지 공정이 중요</li> </ul>
Spin Valve	<ul style="list-style-type: none"> <li>GMR이 MR비는 우수하지만 외부자계가 큰 단점을 극복하고자 개량된 밸브형소자</li> <li>기존 GMR 원리에 강자성층을 영구자석으로 보강하고 (Pinned Layer), 연자성층(Free Layer)을 채용하여 구현</li> </ul>	free/NM/pinned Py/Cu/Co/MnFe	<ul style="list-style-type: none"> <li>MR비가 10%~25%정도로 우수</li> <li>외부자계 20 Oe 이하에서 동작이 가능</li> <li>최소 4층이상의 적층공정 필요</li> <li>HDD헤드에 가장 널리 채용되어 활용중</li> </ul>
TMR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tunnel Magneto Resistance의 약자로 스핀의 터널링에 자기저항효과 통칭.</li> <li>자성층/절연층/자성층 구조.</li> <li>수직형으로 MRAM에 적합</li> <li>HDD헤드로서도 활용 시도 중</li> </ul>	Py/AIO/Co Py/AIO/Co/PtMn CoFeB/MgO/CoFeB	<ul style="list-style-type: none"> <li>MR비가 50%~230%정도로 우수하나 기준저항이 큰 편임.</li> <li>외부자계 50 Oe 이하에서 동작이 가능</li> <li>최소 4층이상의 적층공정 및 미세공공정 필요</li> <li>터널배리어의 조절이 중요</li> </ul>
CMR	<ul style="list-style-type: none"> <li>Colossal Magneto Resistance의 약자로 스핀의 터널링에 자기저항효과 통칭.</li> <li>Perovskite 구조.</li> <li>기초연구단계</li> </ul>	LaBaMnO	<ul style="list-style-type: none"> <li>MR비가 300%정도로 우수하나 기준저항이 매우 큼.</li> <li>외부자계 10000 Oe 이상에서 동작이 가능.</li> <li>아직 공업적 이용이 곤란한 차세대 소자</li> </ul>

## 2. 자기저항의 종류와 특징

‘자기저항(MR; Magneto-Resistance)’이란 외부에서 인가하는 자기장의 방향과 크기에 따라 물질의 전기적 저항이 바뀌는 물리적 현상을 일컫는다. 자기저항에는 반도체를 포함한 모든 도체가 기본적으로 경험하는 Ordinary MR이 있으며, 강자성체에서 관찰할 수 있는 이방성(Anisotropic) MR, Colossal MR, 거대 (Giant) MR[이하, GMR], 터널링(Tunneling) MR[이하, TMR], Anomalous MR, Ballistic MR 등이 있다[1]. 표2에 여러가지 자기저항의 종류에 따라 작동원리와 재료계 그리고 각각의 쓰임새에 대하여 간단히 정리하여 보았다. 실용적인 측면에서는 표2에 음영처리하여 강조한 것처럼, GMR의 일종인 스핀밸브형 자기소자와 TMR 소자가 가장 널리 활용되고 있으며 향후에 스핀트로닉스 소자에서도 중추적인 역할을 담당하게 될 것이다.

## 3. 하드디스크 드라이브 제조기술

### 3.1 하드디스크 드라이브 산업

21세기 들어오면서 각종 정보관련기기들이 하나의 종합기기로 그 기능들이 합쳐지면서 정보저장량이 기하급수적으로 늘어나게 되었다. 또한, 하나의 기기내에서도 다른 정보처리, 정보표시, 정보통신 소자들과의 정보교환이 더욱 빈번하게 되면서 정보 저장 속도가 더욱 빨라질 것을 요구받고 있다. 정보용량의 대형화, 정보기기/부품/소자의 소형화, 정보교환의 신속화 등의 특성을 동시에 만족하면서도 소비자가 원하는 가격대에 정보저장 제품을 제공하기란 여간 어렵지 않다. 1인치 혹은 0.85인치와 같은

초소형 하드디스크 드라이브가 속속 선보이게 되는 것도 이러한 소비자의 욕구에 응하기 위해서이다. 그림1과 같이 하드디스크 드라이브는 불휘발성 정보저장 메모리와 함께 유비쿼터스 환경에서 가장 널리 사용되는 정보저장기기가 될 것으로 전망되고 있다.

이러한 전망을 아래 도표로 수치화 하였는데(표 3), 하드디스크 드라이브의 세계 및 국내 시장 수급동향 및 전망을 나타낸 것이다. 300억불의 거대한 시장을 가지고 있으며 앞으로도 지속적으로 성장할 것으로 예측되는 산업으로서 그 중요성이 크다 하겠다.

### 3.2 하드디스크 드라이브 기능 및 핵심부품

하드디스크 드라이브는 대량의 정보를 정확하게 저장하였다가 필요에 따라 저장된 정보를 검색하거나 가공할 수 있도록 고안된 장치이다. 이 때, 각종 정보는 디지털 바이트(Byte)의 형태로 저장된다. 하나의 바이트는 8개의 비트(Bit)로 이루어져 있으며, 각 바이트는 256(=2<sup>8</sup>) 가지의 1과 0의 조합에 의하여 하나의 문자나 숫자를 나타내도록 정의되어진다. 드라이브 공간은 주어진 정보를 논리적으로 처리하기 위하여 512개의 정보를 담고 있는 섹터(Sector)들로

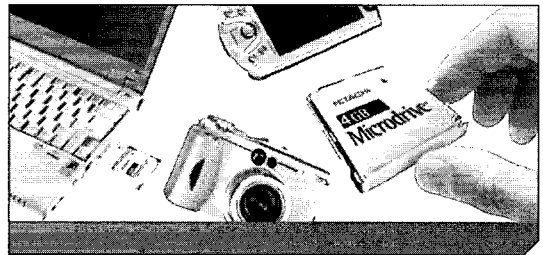


그림 1. 초소형 드라이브의 응용제품 실례[2].

표 3. HDD 수급동향 및 전망

(단위 : 물량-M Units, 금액-M \$)

구분		2004년	2005년	2006년	2007년	2008년
세계 시장	물량	466.58	528.78	572.15	615.94	TBD
	금액	2,764.21	3,185.07	3,410.79	3,591.15	TBD
국내 시장	물량	36.97	47.68	69.28	97.71	TBD
	금액	202.29	272.30	382.30	518.16	TBD

▶ 산출근거 : Trendfocus

나뉘어져 있다. 원형의 자기디스크가 자기헤드의 아래(혹은 위)에서 한 바퀴 돌면서 만들어 내는 원형궤적을 트랙(Track)이라고 한다. 하나의 트랙은 정해진 수만큼의 섹터로 구성되어 있다. 디스크 양면의 각 표면에는 데이터를 저장, 검색하는데 사용되는 여러 개의 트랙이 동심원을 그리며 존재한다.

디스크 드라이브가 정보의 저장 및 검색이라는 기능을 수행하기 위하여 가장 먼저 할 일은 스피업(Spin-up)이다. 이는 디스크를 회전시키기 시작하여 원하는 속도까지 회전시키는 과정이다. 일단 원하는 회전속도에 다다른 이후에는 주어진 오차범위 내에서 일정한 속도를 유지하여야 한다. 두 번째로 필요한 일은 정보를 다루기 위하여 재생 및 기록용 자기헤드를 주어진 트랙 위치로 이동시킨 후, 그 트랙에서 벗어나지 않도록 유지시키는 것이다. 이를 시이킹(Seeking) 및 세틀링(Settling)이라고 한다. 세 번째로 드라이브가 가져야 할 필요조건은 자기헤드가 데이터를 읽고 쓸 수 있도록 자기헤드를 디스크 표면에 근접시키는 일이다. 이 때, 자기헤드가 디스크 표면에 얼마나 근접되어 있는지를 나타내는 물리량을 플라잉하이트(Flying Height)라고 일컫는다. 2005년도 현재 시판되고 있는 드라이브의 플라잉하이트가 대략 6 nm 정도이다. 또 다른 필요조건으로는 데이터를 암호화하고 해독하는 일인데, 암호화 및 해독 과정에서 본래의 데이터를 변형시키지 않고 정확하게 처리하여야 함은 물론이다. 이것을 데이터인TEGRITY(Data Integrity)라고 한다. 마지막 필요조건으로는 드라이브가 저장 및 검색기능을 완수할 수 있도록 사용자의 장비에 연결(Interface)시켜 명령에 따라 데이터를 주고받을 수 있도록 하는 것이다.

그림2는 하드디스크 드라이브의 주요부품이 어떻게 구성되어있는지를 보여주는 개략도이다. 디스크 드라이브의 주요부품으로는 종이 역할을 하는 미디어(Media), 기록할 때는 펜의 역할을 함과 동시에 읽을 때는 눈의 역할을 하는 자기헤드(Magnetic Head), 디스크 원판을 회전시키는 스피너모터(Spin Motors), 헤드를 특정 트랙으로 이동시키는데 필요한 보이스코일 자석(Voice Coil Magnets), 드라이브의 각종기능을 통제하는 전자회로 등으로 구성되어

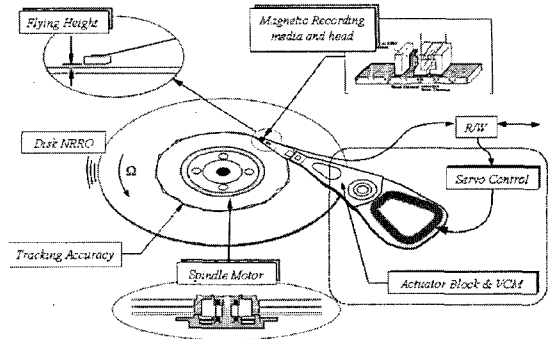


그림 2. 하드디스크 드라이브의 주요부품 구성 개략도.

있다. 이들 중에서도 특히, 미디어와 자기헤드가 중요한데, 이들 두 개의 부품을 구입하는데 드는 비용이 총 부품 구입비의 거의 절반에 이른다.

### 3.3 자기기록의 한계, 그 도전과 응전

자기기록매체를 이용한 자기식 정보저장 방식은 1898년 덴마크의 Valdemar Poulsen이 처음 발명한 이래로 오디오, 비디오, 컴퓨터 등 정보저장기기의 발전에 중추적인 역할을 하여 왔다. 특히 컴퓨터용 하드디스크 드라이브는 1956년, 2 Kbit/in<sup>2</sup>급의 RAMAC을 IBM社가 제조하여 시장에 내놓은 이래로 괄목할 만한 성장을 거듭하여 왔다. 1991년까지는 연평균 기록밀도의 증가율이 30%이었으나, MR헤드가 채택된 1991년 이래로 60%의 연평균 증가율을, 1996년 GMR 헤드의 개발에 힘입어 2005년 현재까지는 100%~60%의 경이적인 증가율을 보이고 있다.

1956년 하드디스크 드라이브가 첫 선을 보인지 50여년이 지난 2005년 현재, 면기록밀도가 처음 것에 비하여 무려 육천만(60,000,000)배가 증가한 120 Gbit/in<sup>2</sup>급을 상회하는 초고밀도 제품이 상품으로 판매되고 있는 실정이다. 다시 말하면, Charap 등[3]이 자기기록에서의 면기록밀도 한계라고 예견하였던 40 Gbit/in<sup>2</sup>급 제품은 이미 시장에서 자취를 감추기 시작하는 구닥다리가 되어 버렸다. 제법 오래 전부터 자기기록의 한계에 대해서 논의하여 왔으나 이번이 그 한계를 뛰어 넘어 왔던 자기기록 연구진에게도 40 Gbit/in<sup>2</sup>급 제품 개발은 힘겨워 보였다.

왜냐하면, 앞서 언급한 바와 같이, 자기기록관련 연구에서 명성을 가지고 있는 카네기멜론 대학의 Charap 등[3]이 1997년에 ‘이제는 더 이상 갈 곳이 없다’ 라고 자기기록의 한계를 수식과 현존하는 물질의 수치를 들어 선명하게 지적하였기 때문이었다. 그런 의미에서 2001년도, 40 Gbit/in<sup>2</sup>급 제품의 출현은 더욱 시사하는 바가 크다. 자기기록계의 천재들은 물리학자가 씌어놓은 울가미를 어떻게 벗어 던질 수 있었을까?

면기록밀도가 증가함에 따라 정보저장의 최소단위라고 하수 있는 비트(Bit)의 크기 즉 비트의 부피가 지속적으로 감소하고 있다(그림3). 여기서 잡음에 대한 신호비(S/N Ratio)와 각 비트내에 있는 결정립의 개수(N)와의 비례관계가 아래의 식(1)과 같아서 비트의 부피감소는 결정립 크기의 감소에 직결됨을 알 수 있다.

$$S/N \propto N^{0.6} \quad (1)$$

다시 말해서 기록매체로부터 나오는 S/N비의 값을 그대로 유지하기 위해서는 박막매체내의 결정립 크기를 면기록밀도의 증가에 따라 그 비례만큼 감소시켜야 한다. 결정립의 크기는 금속간 화합물계인 NiAl, CoTi 등의 씨앗층 및 하지층의 도입으로 단자구(Single Domain) 크기보다 작은 10 nm이하를 실현하는 데에 성공하였다. 그러나 문제는 결정립의 크기를 마음대로 줄일 수 없다는 데에 있다. 왜냐하면, 미세 영구자석의 열적인 안정성은 결정립의 크기에 의해서 결정되기 때문이다. 강자성 물질의 열적 안정성은 식(2)와 같이 주어진다.

$$\tau = \tau_0 \exp(K_u V / kT) \quad (2)$$

- $\tau$ : relaxation time
- $\tau_0$ : relaxation constant
- $K_u$ : anisotropy energy
- V: individual grain volume
- kT: Boltzman constant
- kT: temperature

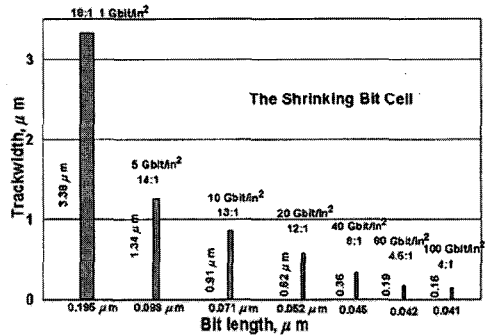


그림 3. 면밀도 증가에 따른 비트 크기의 감소.

여기서 Relaxation Time은 주어진 정보를 안정적으로 저장할 수 있는 시간을 학문적으로 표현한 것인데, 자성물질의 자기이방성에너지가 클수록, 각 결정립의 부피가 클수록, 그리고 온도가 낮을수록 커지는 값이다.

그러면, 식(2)에 현실적인 값들을 넣어 계산한 자기기록의 한계값인 40 Gbit/in<sup>2</sup>보다 더 큰 면기록밀도를 실현하는 것은 불가능할 것인가? 그러나, 자기기록관련 연구 개발자들의 천재성과 파괴력은 이번에도 유감없이 발휘되었다. 여러 가지 가능성 중에서 가장 먼저 상품화에 성공한 것은 일본의 Fujitsu社와 미국의 IMB社에서 거의 동시에 개발하여 발표한 소위 “AFC(Anti-Ferromagnetically Coupled)매체”이다[4,5].

그림4는 AFC 매체의 단면을 도식적으로 나타낸 것이다. 기존의 매체가 한 층의 자성층을 자기기록층으로 사용하는데 비하여 AFC 매체는 두 개의 자성층과 그 사이에 루테늄(Ru)이라는 금속을 넣은 다층막을 사용한다. 여기서 흥미로운 것은 AFC 매체에서 아래층과 윗층의 자성막 사이에는 반강자성적으로 상호작용한다는 사실이다. 즉, 윗층의 자성막이 오른쪽으로 기록되는 경우에, 아래층의 자성막은 윗층의 영향을 받아 왼쪽으로 자화된다. 결론적으로 말하면, 아래층과 윗층의 자성막을 합한 것이 자성 결정립의 부피이기 때문에 열적 안정성을 도모할 수 있게 된다.

한편, 고밀도 기록을 근본적으로 제한하는 William-Comstak Transition Parameter는 아래 식

(3)으로 표현된다.

$$\text{sharpness of transition} \propto \left( \frac{Mr \cdot \delta}{Hc} \right)^n \quad (3)$$

Mr : 잔류자화    δ : 자성막두께  
Hc : 보자력    n : 0.5 ~ 1

AFC 매체의 경우 윗층 자성막의 Mr · t에서 아래층 자성막의 Mr · t를 뺀 값의 Mr · t만을 매체나 헤드가 느끼기 때문에 식(3)의 분자값이 충분히 작아서 천이길이 짧아지고 그만큼 고밀도 기록이 가능하게 되는 것이다. Mr · t값이 줄어들면 어쩔 수 없이 자성체의 결정립 크기가 작아질 수밖에 없을 것이라는 상식을 깨 패거라고 할 수 있다. IBM社は AFC 매체를 채택하여 25.7 Gbit/in<sup>2</sup>의 면기록밀도를 가지는 노트북용 드라이브를 시장에 내어 판매했던 것이 2001년이며, 2004년에는 100 Gbit/in<sup>2</sup>의 면기록밀도를 실현하였다.

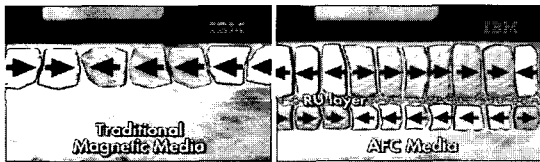


그림 4. AFC 매체 단면의 도식적 그림.

1970년대 중반부터 일본 동북대학의 Iwasaki, Ouchi 등이 고안한 수직기록 방식이 궁극적으로는 기존의 수평기록 방식을 대체하여 1 Tbit/in<sup>2</sup>의 면기록밀도를 실현할 수 있는 유망주로 기대하고 있다. 그림5에 나타내 보인 것처럼, 수평기록 방식이 인접하는 비트 사이에 상당히 큰 감자작용(Demagnetizing Interaction)을 하고 있는 것에 반하여 수직기록의 경우에는 오히려 인접 비트의 열적 안정성을 지원하는 실정이다. 수평기록 방식 한계의 시점이 MR 및 GMR/TMR 헤드의 출현, AFC 매체의 발명 등 신기술의 지원에 힘입어 지속적으로 미루어짐에 따라 수직기록 방식의 산업화가 미루어져 왔으나, 결국 수직기록 방식의 정보저장기기가 상품화되어 주류가 될 것이라는 것이 보편적인 시각이다. 그림6

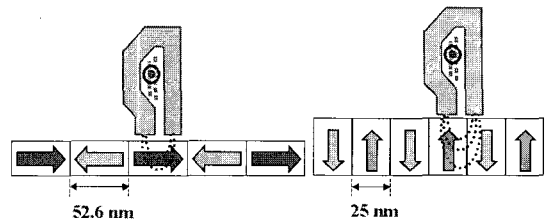


그림 5. 수평기록과 수직기록 방식의 비교.

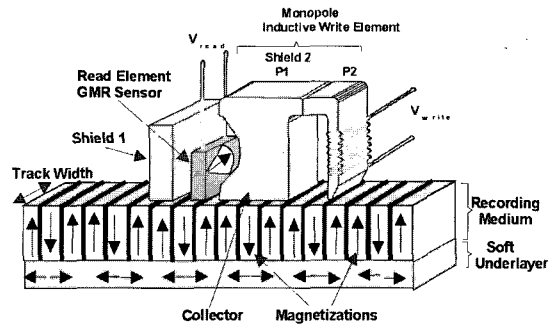


그림 6. 싱글폴형 GMR헤드를 사용한 수직자기기록 작동원리.

은 수직기록의 상세를 엿볼 수 있는 하나의 일례를 펴본 것이다.

식(2)를 보면, Relaxation Time을 증가시킬 수 있는 또 다른 방안을 강구할 수 있다. 지금 널리 사용하고 있는 Co계 합금보다 자기이방성이 큰 자성물질을 기록층으로 사용하는 것이 바로 그것이다. 자기이방성이 큰 자성물질로서 활발하게 연구되어온 것들로는 Barium Ferrite, CoPt, FePt, SmCo<sub>5</sub> 등이 있다. 그림7은 FePt계 자성박막에 대한 실험결과로서 0.3 이하의 매우 낮은 값의 Mr · t에서도 5,000 Oe 이상의 높은 보자력을 가질 수 있음을 시사하고 있다. 자기이방성이 큰 자성물질들은 Ordered 결정구조를 가지는 것으로서 대부분 500 °C 혹은 그 이상의 고온에서 열처리함으로써 얻어진다. 이때 결정립의 불필요한 성장억제, 자화용이축의 조절, 결정립간의 자기적 상호작용 최소화 등 해결하여야 할 문제를 많이 안고 있다.

식(1)과 식(2)를 잘 들여다보면 고밀도 기록을 실현하면서도 결정립 크기를 줄이지 않을 수 있는 방

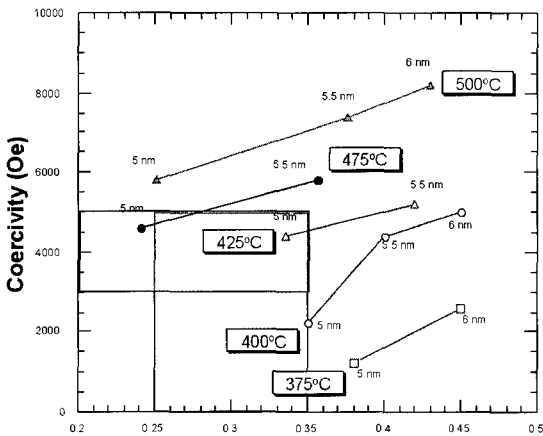


그림 7. FePt 박막 보자력의 열처리온도와 Mrt에 따른 변화.

법을 생각해 낼 수 있을 것이다. 예컨대, 식(1)을 무시하는 것이다. 다시 말하면, 하나의 결정립으로 하나의 비트를 만들어 입자형태의 자성막이 가지는 통계학적 노이즈를 제거하자는 것이다. 이렇게 될 수만 있다면 초상자성 문제는 먼 훗날의 이야기가 되는 것이다. 50 nm 정도의 직경을 가지는 결정립을 독립적으로 배열시키어 하나의 비트로 활용할 수 있다면, 무려 64 Gbit/in<sup>2</sup>의 먼기록밀도에 해당하는 것인데, 열적 안정성 측면에서 볼 때, 50 nm의 결정립 크기란 얼마나 여유가 있는가? 이러한 개념을 구체화한 것이 소위 'Patterned Media'이며, 제조방법으로 가장 가능성이 있는 것은 스탬핑(Stamping) 그리고 이온빔 패터닝(Ion Beam Patterning) 방법이다. 패턴드 미디어에 대해서는 다음 절에 조금 더 설명하고자 한다.

### 3.4 하드디스크 드라이브 제조기술의 향후 전망

HDD가 Flash Memory와 같은 막강한 저장매체와 모바일 시장에서 경쟁하기 위해서는 기술적으로 해결해야 할 몇 가지 문제점이 있다. 첫째로 아직까지 기록매체의 기록밀도가 수요의 요구조건에 미치지 못하기 때문에 고밀도 기록매체 제조기술 개발이 절실히 필요한 상황이다. 현재 고밀도기록매체로 가장 유력한 것이 수직기록매체인데 이 매체를 가지고 향후 500 Gbit/in<sup>2</sup> 정도까지 사용이 가능할 것으로

생각된다. 둘째는 충격에 매우 취약한 특성을 가지고 있기 때문에 Mobile 기기의 저장매체로 사용되기 위해서는 이 부분의 기술력 개발이 매우 필요한 상황이다. 이 부분의 해결을 위해서는 헤드와 매체의 Tribology 뿐 아니라 HDD 구조 개선자체가 필요한 상황이다.

3.5 inch HDD 뿐 아니라 1 inch Micro Drive까지 사용되는 기록매체 제조기술은 현재까지는 수평기록방식의 기록매체가 사용되고 있다. 그러나 수평기록방식은 열적안정성 관점에서 물리적 한계를 가지고 있으므로 차세대 160 Gb/in<sup>2</sup> 이상의 영역에서는 수직기록방식이 사용되어야 한다. 그림8은 연도별 HDD 헤드/매체의 가능한 기술진행 방향이다. 현재까지 기술수준은 Toshiba 1.8 inch HDD가 수직기록방식으로는 최초로 상품을 출시하고 있는 상황이다. 이 매체의 기록밀도는 133 Gbit/in<sup>2</sup> 인데 현재까지 상품으로는 최고 기록밀도이다. 그리고 실험실 수준의 최고 밀도는 170 Gb/in<sup>2</sup> 매체를 Seagate에서 데모한 바 있다. 향후 앞으로 HDD 시장에서 매체는 수직기록매체로 대체될 예정이며 이 방식으로 기술이 계속 발전하면 500 Gb/in<sup>2</sup> 정도까지 사용이 가능할 것으로 예측하고 있다. 그 이상의 기록밀도를 위해서는 Patterned Media나 HAMR(Heat Assisted Magnetic Recording) Media가 사용될 것으로 생각된다. 본고에서는 이들 두 가지 기술에 대하여 간단한 소개를 하고자 한다.

우선 패턴드매체는 한 개의 Cell이 하나의 Bit를 이루는 기록매체이다. FePt와 같은 이방성에너지가 큰 물질을 사용하면 2~3 nm 크기의 열적으로 매우 안정한 Cell을 만들 수 있다. 이 Patterned 매체는 다결정립기록매체에 비해 열적으로도 훨씬 안정하여 500 Gb/in<sup>2</sup> ~1 Tb/in<sup>2</sup> 정도까지 사용가능할 것으로 예측되고 있다. 그림9는 연속막막형 기록매체와 Patterned 매체의 비교를 나타내는 개략도이다. 그림9에서 보는 바와 같이 Patterned 매체는 한 개의 Cell이 Island를 이루고 있으므로 천이영역 노이즈도 없고 비선형 천이영역 Shift도 없다. 현 단계에서 가장 중요한 기술은 Lithography 기술이다. 이 기술은 가능한 작은 Pattern을 만드는 것과 또한 디스크로 사용하기 위해 원형으로 Pattern을 정렬하는 것

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
3.5" (GB/P)	125	160	200	300	400	500	600
TPI (K)	120	150	190	220	263	300	330
BPI (K)	755	800	940	1015	1130	1240	1350
Density(Gb/in <sup>2</sup> )	90.6	120	178.6	223.3	297.2	372	445.5
Writer Design Integration	LMR		PMR (1 <sup>st</sup> Gen)		PMR (2 <sup>nd</sup> Gen)		
	FOD 1 <sup>st</sup> Gen			FOD 2 <sup>nd</sup> Gen			
Reader Integration	Adv SV	Dual SV / TuMR		CPP	CPP / BMR		
	Write Yoke + Shield Shunting to Ground, Lead + Shield Shunting						
Slider Integration	Pico		Femto / Pemto				
	DSA						
Media	AFC		PMR		PMR / Tilted + Fine Grain		
	Patterned Media (Track Defined :?)						

그림 8. 연도별 HDD 헤드 / 미디어 기술진행 방향.

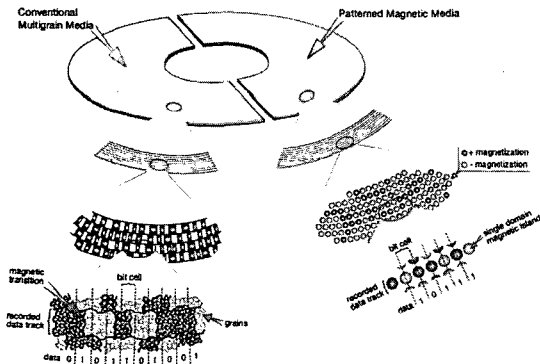


그림 9. Patterned Media 개략도.

이 핵심기술이다. 그 외 헤드의 Servo Tracking 등이 해결해야할 핵심기술이다.

한편, HAMR(Heat Assisted Magnetic Recording) 매체는 이방성 에너지가 큰 자성막을 Laser 등의 Heat Source로 열을 가해 자화 반전을 하는 매체이다. 그림10은 HAMR 매체의 개략도이다. Laser에 의해 매체의 온도가 올라가면 그 부분의 보자력이 내려가기 때문에 수직이방성에너지가 큰 매체도 자화

반전이 가능해져 기록할 수 있게 된다. 이방성에너지가 매우 큰 재료를 사용하여 이론적으로 계산하면 수십 Tb/in<sup>2</sup>까지 기록이 가능하다. 그리고 Patterned 매체와 달리 Patterning을 할 필요가 없는 장점을 가지고 있다. 그러나 고밀도 기록이 가능하기 위해서는 Laser Spot의 크기를 줄이는 기술이 필요하며, 열에 의한 반응으로 자화 반전을 일으키는 것이기 때문에 속도면에서 불리하다. 그러므로 반응 속도를 높이는 것이 해결해야할 핵심 기술이다.

Patterned 매체 기술에 대해서는 미국이 오래전부터 대학과 연구소에서 연구해 오고 있으며, 국가주도 하에 INSIC(Information Storage Industry Consortium)을 구성하여 기업과 대학, 연구소간에 협조 하에 연구를 진행하고 있는 상황이다. 유럽에서는 네덜란드나 영국에서 대학연구소 규모로 연구를 진행하고 있는 상태이다. 그러나 이 분야는 아직 제대로 연구가 진행되지 않은 상태이고 미리 연구를 진행해온 상태나 연구 인력의 차이가 날뿐 기술력에 있어서는 어느 그룹이 크게 앞서 있다고 말할 수 없으며 어느 그룹도 산업화의 전망을 쉽게 하고 있지



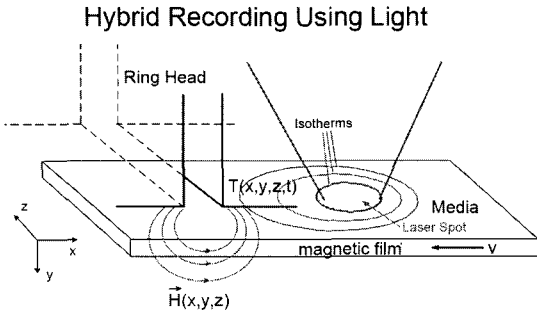


그림 10. HAMR(Heat Assisted Magnetic recording) 의 개략도.

못한 실정이다.

마지막으로 HAMR 매체기술의 경우 미국의 Seagate나 IBM이 최근 집중적으로 연구를 하고 있으며 논문발표도 많이 나오고 있다. 특히 최근 Hybrid 형태의 Head도 선보이고 있으며 어느 정도 진전도 있는 듯하다. 그러나 해결해야 할 문제가 아직 매우 많은 상태이다. 그리고 일본의 경우 Sony 등의 회사에서 Head 개발에 투자를 하고 있는 상황이다. 유럽에서는 네덜란드에서 Probe Recording 형태의 HAMR를 연구 중에 있다. 현재 한국에서는 이 분야의 연구가 진행된 바 없다.

세계 HDD분야의 기술력을 비교해 보면 미국이 인력 및 규모에 있어서 크게 앞서고 있고 일본이 그 뒤를 쫓고 있다. 이는 HDD 제조 회사가 대부분 미국이며 그 뒤에 일본이 있고 한국은 삼성전자가 유일하다. 특히 차세대 HDD시장을 장악하게 될 수직기록기술에 대해서는 일본과 한국이 오래전에 대학과 연구소에서 연구를 미리 시작하였으나 최근 3~4년 전부터 미국이 우수한 연구 Infra를 가지고 집중 투자한 결과 제품출시 발표는 일본의 Toshiba가 먼저 공표하였으나 현재 기업체의 축적된 기술력을 전반적으로 평가하면 미국이 일본보다 다소 앞선다고 말할 수 있고 산업화 측면에서 Infra가 미국이 더 유리하므로 실제 HDD 시장에서는 미국이 조금 앞서 있는 듯하다. 한국은 연구실 규모는 계속 해왔지만 산업체와의 연구가 병행되지 못 했기에 이 분야에서 미국과 일본에 뒤쳐져 있는 형편이다. 최근 삼성전자가 연구 규모를 크게 키울 움직임을 보이고 있고

미국에 있는 SISA를 통해 연구하고 있기 때문에 이 분야에 어느 정도 선진국과의 기술격차가 줄 수 있을 것으로 기대되고 있는 상황이다.

## 4. MRAM(MagnetoResistive andom Access Memory) 제조 기술

### 4.1 MRAM의 특징과 시대적 배경

정보의 저장과 처리를 직접 담당하고 정보의 표시와 통신을 간접적으로 지원하는 메모리에 있어서 '비휘발성'이라는 특성이 21세기에 접어들어 가장 중요한 화두가 되었다. '언제 어디서나 하고 싶은 일을 할 수 있는' 유비쿼터스 환경에서 사용할 수 있도록, 가능한 많은 정보관련 기능을 하나의 모바일 기기로서 구현하고자 하는, 소위, 디지털 컨버전스(Digital Convergence) 현상이 빠른 속도로 진행되고 있기 때문이다. 보다 구체적으로 풀어 말하면, 모바일 디지털 컨버전스형 정보기기에 적합한, 정보 저장과 처리를 동시에 구현할 수 있는 유니버설 메모리 혹은 통합솔루션이 그 어느 때보다 필요하게 되었기 때문이다. '비휘발성' 유니버설 메모리는 작고, 가벼우며, 전력소모가 작을 뿐 아니라 정보를 저장하고 처리하는 속도까지 빠를 수 있어서 휴대성과 고성능을 필요로 하는 유비쿼터스 기기용 메모리로서 제격이라고 할 수 있다. 한편, 비휘발성 메모리 반도체로서 플래쉬 메모리가 최근 각광을 받고 있지만, 차세대 메모리로서는 분류하지 않는다. 그 이유는 플래쉬 메모리에 데이터를 저장하는데 걸리는 시간이 매우 길어서 휘발성인 D램이나 S램에 비하여 1000배 혹은 그 이상인 탓에 데이터에로의 임의접근성이 현저히 떨어지기 때문이다. 그래서 플래쉬 메모리는 RAM(Random Access Memory)으로 구분하지 않고 ROM(Read Only Memory)으로 분류되며, 인터랙티브(Interactive) 기능이 절대적으로 필요한 유니버설 메모리로는 사용될 수 없다.

'비휘발성'이라는 특성을 가지면서도, 기존의 반도체 메모리인 DRAM과 SRAM에 버금가는 메모리 성능을 가지는 차세대 메모리로서는 대표주자격인 FeRAM(Ferroelectric RAM), MRAM(MagnetoResis-

tive RAM), Phase-Change RAM과 메모리 소자로서 개념정립 단계에 있는 PoRAM(Polymer RAM), SET-RAM(Single Electron Transistor-RAM), CNT-RAM(Carbon Nano Tube-RAM), Molecular RAM 등이 있다(그림11)[6]. FeRAM은 플래시 메모리에 비하여 메모리특성이 우수한 특성을 가진 비휘발성 메모리이지만 파괴적인 읽기방식과 제한된 기록/재생 수명 그리고 복잡한 제조공정 등의 단점을 가지고 있다. Phase-Change RAM은 고밀도화의 가능

성이 높고 제조공정이 상대적으로 간단하여 각광을 받고 있으나, 정보 기록 속도와 데이터 신뢰성의 문제를 해결할 수 있는 획기적인 재료를 개발하여야만 진정한 유니버설 메모리의 반열에 들어설 수 있다. 이들에 비해, MRAM은 비휘발성, 내구성, 정보 기록/재생 속도와 수명, 정보저장 밀도 등 여러 면에서 월등하게 우수한 성능을 보이고 있다(표 4). 웨이퍼 레벨에서 절연막의 두께를 얼마나 균일하게 조절할 수 있느냐가 MRAM 상용화 가능성을 좌우한다고 할 수 있는데, Motorola로부터 최근 독립한 Freescale Semiconductor社의 개발담당자에 의하면, 4 Mb급 MRAM의 경우 8인치웨이퍼에서의 저항분포 표준편차가 5%이하이며 전체공정의 수율이 80% 이상으로 높은 편이어서 지금 당장 양산할 수 있는 수준이라고 한다. 기존의 메모리가 서로의 단점을 보완하기 위하여 여러 종류의 메모리를 함께 써야 하는 점을 고려할 때, MRAM은 보조 메모리 없이도 혼자서 충분히 쓸 수 있어서 진정한 유니버설 메모리로서 자리매김할 가능성이 높다.

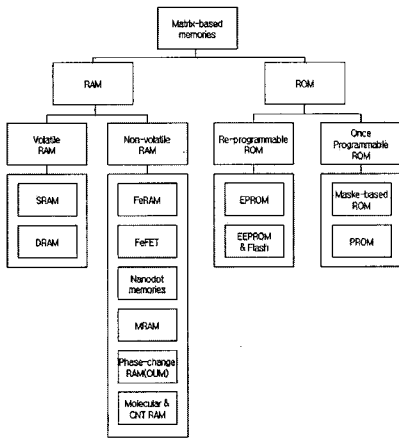


그림 11. 메모리의 종류와 계통도[6].

4.2 MRAM의 구조와 동작원리

MRAM은 두 개의 자성박막과 그 사이에 한 개의 절연막을 끼워놓은 구조의 자기터널접합(MTJ);

표 4. MRAM과 여러가지 경쟁 메모리의 성능 비교[7].

Attributes	SRAM	FLASH	MRAM	FeRAM	PC-RAM
Memory Cell Type	SRAM	FLASH	MRAM	FeRAM	PC-RAM
Memory Action	CMOS Latch	Floating Gate	MTJ	Atomic Displ.	Phase Change
Cell Size @ 90nm (μm <sup>2</sup> )	0.97	0.23	0.29	0.42	0.4?
Cell Feature Size (F)	90 (9X10)	16 (4X4)	24 (6X4)	30 (5X6)	30 (?)
READ (Destructive?)	No	No	No	Yes	No
READ Access Time	3nS	15nS	10nS	20nS	20nS
READ Endurance	Unlimited	Unlimited	Unlimited	10 <sup>12</sup>	Unlimited
WRITE Voltage	VDD	10V	VDD	5V	VDD
WRITE Time	3nS	10mS	10nS	40nS	20nS
Typ. WRITE Energy (pJ/bit)	0.5	50000	100	5000	50
WRITE Endurance	Unlimited	10 <sup>8</sup>	Unlimited	10 <sup>12</sup>	No Data
Masking Steps (over GMOS)	0	10	5	3?	3?
Scaling Barriers	6T	Switch E Fld	Switch H Fld	Cap. Size	Swch. Current
Array Efficiency	Good	Poor	Fair	Fair	Fair?

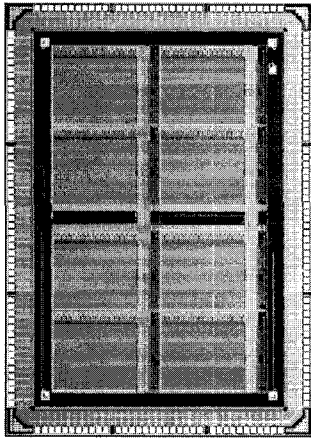


그림 12. 4 Mb MRAM 제품 사진.

Magnetic Tunnel Junction) 소자를 기존의 CMOS 구조 안에 만들어 넣어 만든다. 이 때, MTJ는 DRAM에 있어서 커패시터(Capacitor)와 같은 역할을 한다. 그림13의 사진은 미국 프리스케일 메모리社(Freescale Memory Co.)에서 제작하여 시판하고 있는 4 Mb MRAM 주요부분을 보여주는 단면을 나타내 보이고 있다. 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 하단의 Semiconductor CMOS부(Front End 공정)와 상단의 메모리부의 TMR Cell(Back End 공정)이 결합되어 있음을 알 수 있다.

MTJ의 자성층 사이에 전압을 인가하면, 절연체를 터널하는 전자의 Conductance가 두 개의 자성층에서의 상대적인 자화방향에 따라서 바뀌게 된다. 즉, 두 개의 자성층에서의 자화방향이 서로 평행할 때 반평행한 경우에 비하여 저항이 작아진다. 그림13의 개념도로는 MRAM을 이용하여 어떻게 정보를 저장하는가하는 기록동작원리를 설명할 수 있다. 개념도에서와 같이, Matrix 형상으로 배선된 Bit선(BL, Write Line 2)과 Word선(WL, Write Line 1)의 교점에 Memory Cell을 배치한다. 그리하여 각 배선을 흐르는 전류가 만들어낸 합성자장에 의해서 교차한 cell내의 자유자성층(Free Magnetic Layer)의 자성 Spin을 원하는 방향으로 배열시킬 수 있다. 고정자성층(Pinned Magnetic Layer)의 자화방향은 고정되어 있으므로 두 개의 자성층의 자화방향을 평행 혹

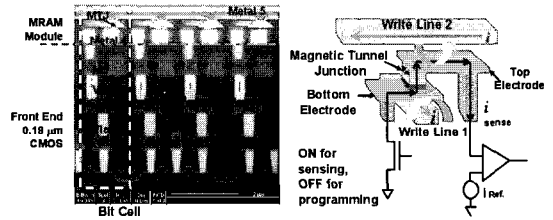


그림 13. 한 개의 MOS transistor와 한 개의 TMR cell로 구성된 MRAM의 unit cell 구조(좌측)와 RAM의 작동원리를 보여주는 모식도(우측).

은 반평행의 두 가지 상태를 구현함으로써 “1”과 “0”이라는 디지털 신호를 기록할 수 있게 된다. 정보를 읽어낼 때는 이미 설명한 바대로 MTJ 소자에서의 TMR(Tunnelling Magneto-Resistance)효과를 이용하여 행한다. 이는 판독할 때에 spin을 반전시키지 않고 Tunnel 접합소자(MTJ)의 저항이 높기 때문에 작은 판독 전류로 큰 출력력을 얻을 수 있다고 하는 특징이 있다. 또한 Cell 선택용 Switch가 통상적으로 필요하며 그림13에 나타난 것처럼 각 Bit는 1개의 MTJ 소자와 1개의 MOS Transistor로 구성된다(1T1J). 이것은 기본적으로 DRAM의 Capacitor를 MTJ 소자로 바꿔 놓은 구조이다. Spin 반전자장은 Bit선과 Word선을 흐르는 전류자장의 합성으로 주어진다. 선택되지 않은 Cell에는 BL 또는 WL 중 어느 한 쪽의 전류자장만이 인가되어 반전자장이 불충분하기 때문에 기입이 불가능해진다. MTJ는 Spin 반전이 ns이므로 대단히 빠르다. 그러므로 SRAM과 같은 정도의 고속성과 DRAM과 같은 정도의 대용량을 갖춘 비휘발성 메모리로서 기대된다. 특히 실온에서 박막성장을 할 수 있고, 소자 크기를 작게 하더라도 TMR이 변하지 않는다는 특징은 FRAM이나 DRAM에는 없는 큰 장점이다.

### 4.3 MRAM의 고밀도화, 도전과 응전

메모리 발전방향의 가장 큰 축이 바로 ‘고밀도화’이다. ‘고밀도화’는 메모리의 비트당 가격을 낮추어 가격경쟁력을 확보하는 결정적인 장점 외에, 소형화, 대용량화, 저소비전력화 등 부수적인 장점을 제공한다. MRAM의 경우, ‘고밀도화’를 위해서 넘어

서야 할 기술적 장벽이 여러 가지가 있겠으나, 그 중에서도 고밀도화에 따른 '고보자력(High Coercivity) 문제', '비트 선택도(Bit Selectivity) 문제' 등이 중단기적으로 해결하여야 할 문제들이다. 이들 문제 외에도, 근본적인 문제로서, 수십 테라비트(Tb)급의 초고밀도에 접근할 때 자기적으로 기록된 정보가 숙명적으로 가지게 되는 '초상자성 한계'를 극복하여야 하는데 이는 '고보자력 문제'와 직접적인 관계가 있다.

'고보자력 문제'는 자성박막의 크기가 작아질수록보자력이 커져서 기록에 필요한 자기장이 커지고 이에 따라 도선에 흘려주어야 할 전류의 양이 커져야하므로 메모리 작동에 어려움을 더하게 한다. 한편, 자기적으로 기록된 정보는 상온에서 열적으로 불안정해 질 수 있는데, 자기기록정보의 열적 안정성은 소위 Relaxation Time,  $\tau$ 에 의하여 정량적으로 주어진다. 즉,

$$\tau = \exp(KuV/k_B T) / f_0 \quad (4)$$

의 식으로 표현되는데, 이 때,  $Ku$ 는 자기이방성 에너지,  $V$ 는 자기셀의 부피(Magnetic Cell Volume)이며,  $f_0$ 는 시도주파수로서 약  $10^9$  Hz의 값을 가진다. MRAM이 고밀도화 되면서 셀의 크기가 작아짐에 따라 자기셀의 부피가 작아지게 되고 식(4)에 주어진 바처럼 Relaxation Time은 급격히 감소하게 된다. 자기셀의 부피가 동일할 경우, 자기이방성 에너지가 큰 자성물질을 사용함으로써 열적 안정성을 확보할 수도 있다. 그러나 자기이방성 에너지는보자력을 증가시키는 역할을 하기 때문에 고밀도화에 따른 '고보자력화 문제'를 더욱 가중시키게 된다. '비트 선택도 문제'는 한편으로는 셀의 크기가 작아질수록 제조공정상 자기셀의보자력을 균일하게 만들기가 점점 더 어려워지기 때문에, 다른 한편으로는 셀과 셀 간의 거리가 가까워짐에 따라 원하는 자기셀 뿐 아니라 인접 자기셀도 스윗칭되는, 소위 Cross-talk 현상을 야기하기 때문에 발생한다.

MRAM의 고밀도화에 따른 상기의 문제들은 현재의 MRAM 기록방식이 바뀌지 않는 한, 획기적으로 극복하기 힘들어서 기가비트(Gb)급 메모리를 실

현하기에도 여간 어렵지 않을 전망이다. 현재 MRAM에서는 서로 수직한 두 개의 도선인 워드라인과 비트라인에 필요한 만큼의 전류를 각각 인가하여 두 도선의 교차점에 있는 자기셀(Magnetic Cell) 내의 자유층(Free Layer)의 자화방향을 스윗칭 함으로써 원하는 정보를 기록하고 있다(그림13). 도선에 전류를 흘리면 도선의 주위에 원형의 자기장이 유도된다는 원리, 그리고 임계값 이상의 전류를 도선에 흘려 자성박막의보자력보다 큰 자기장을 셀 근처에 형성할 때 도선에 흐르는 전류의 방향에 따라 자성박막으로 이루어진 자유층의 자화방향을 결정할 수 있다는 원리를 활용한 것이다. 이때, 두 개의 수직한 도선에 전류를 인가하는 이유는, 교차점에 있는 자성층의 자화방향을 스윗칭 하는데 필요한 전류의 임계값이 하나의 도선에 전류를 흘려 스윗칭 하는데 필요한 임계값에 비하여 절반 정도로 작기 때문이다. 여기서 우리는 MRAM이 고밀도화 함에 따라 기술적 어려움이 배가되는 원인이 바로 MRAM에서 현재 채택하고 있는 기록방식의 원리에 기인한다는 것을 알 수 있다. 메모리가 고밀도화 됨에 따라 셀과 셀 사이의 거리가 짧아지는데, 셀을 스윗칭하여 정보를 기록하기 위하여 도선으로부터 발생하는 자기장을 이용하는 한, 근본적으로 Cross-talk 현상으로부터 자유로워질 수 없다. 도선 주위의 자기장은 하나의 셀에 한정되어 작용할 수 없는 탓이다. 자기장은 거리에 반비례하여 약해지는데 셀과 셀 사이의 거리가 짧아질수록, 즉 고밀도화 되면 될수록 Cross-talk 현상은 점점 더 심해질 것이므로 MRAM의 고밀도화에 어려움을 가중하고 있다. 도선을 투자율이 높은 연자성 물질로 감싸서 자기장을 주어진 셀에 국한시키거나, Toggle 스윗칭[8]이라는 독특한 기록방식을 고안하는 등 매우 기발한 아이디어를 고안하여 MRAM의 고밀도화 가능성을 한층 높였으나, 근본적으로 문제를 해결한 것은 아니다.

한편, 도선에 전류를 흘려서 발생하는 자기장으로 자기셀을 스윗칭하는 현재의 MRAM 기록방식과는 전혀 다른 기록방식이 제안되어 현재 연구개발 중이다. 전류구동형 자화스윗칭(이하, CIMS; Current Induced Magnetization Switching)[9-12],

Precessional 스윙칭[13], 열보조 스윙칭[14,15] 등이 그 것인데, 이들 모두 기존 방식에 비하여 ‘비트 선택도 문제’를 현저하게 개선하였다. 이중에서도 CIMS 방식이 성공가능성이 가장 높은 것으로 평가되는데, 1996년도에 그 기본원리가 제안되어[9,10] 1999년과 2000년도에 실험적으로 입증된 바 있다[11,12]. 자기셀의 크기가 작아질수록 CIMS에 의한 정보기록이 보다 용이해지기 때문에 MRAM의 기록밀도를 테라비트(Tb)급 이상으로 높일 수 있을 것으로 기대되고 있다. CIMS 방식에 있어서 가장 큰 어려움으로는 정보를 기록할 때 필요로 하는 임계전류밀도가  $10^7$  A/cm<sup>2</sup>로 너무 크다는 점[3]과 기록 정보를 재생할 때 신호(이 경우엔, 자기저항값)가 1% 내외로 너무 작다는 점 등이 있는데, 이 소자를 실용화하는데 반드시 극복하여야 하는 문제이다.

## 5. 결론

하드디스크 드라이브 제조 및 동작원리를 제공하는 자기기록재생 기술은 ‘초상자성 문제’라는 심각한 하고도 근본적인 한계가 있음을 인식하였으나, 창조적인 지혜로써 이를 극복하여 왔으며, ‘지금까지의 문제들도 해결하여 왔다’라는 역사적 자신감을 바탕으로 정보저장 기술 및 산업을 앞으로도 선도하여 갈 것임을 믿어 의심하지 않는다. 반도체 메모리에 버금가는 거대한 시장을 형성한 배경이 관련기술의 발전속도가 매우 빨라서 비트당 가격에서의 절대적 우위를 점하고 있기 때문이라고 할 수 있는데, 이런 관점에서 볼 때, 하드디스크 드라이브는 다른 기술이 지배하여 왔던 응용분야에서도 발군의 실력을 선보이고 있다. 수직자기기록 방식의 본격적인 채택과 함께 또 다른 중흥기를 맞이할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 향후, Patterned Media나 HAMR(Heat Assisted Magnetic Recording) Media와 같이 완전히 새로운 매체기술, TMR을 적용한 CPP형 자기헤드의 본격적인 채택, MEMS나 NIMS와 같은 기술을 적용한 서보트랙킹 및 Tribology 기술, 고밀도/초고속 신호처리 및 채널기술 등 요소기술들이 가미될 때마다 하드디스크 드라이브는 새로운 강자로 거듭 태어날 것이다. 다만, 우리나라가 하드디스크 드라

이브 관련분야에서 경쟁력 및 성장 동력을 확보하기에는 그동안 Infra 축소에 따른 여파로 인하여 절대역부족을 느끼고 있으며 기술적으로도 Component의 기술이 Nano-Technology로 진입하면서 더욱 어려움이 가중되고 있는 것은 다소 아쉬운 점이다. 범국가적으로 연구체제를 구축하여 자기저장용 핵심 부품에 대한 체계적이고도 효율적으로 연구개발 인프라를 재구축하여 운영하는 것은 매우 중요하고도 시급한 사안임을 인식하고 재출발한다는 자세로 관련기술개발에 힘을 모아야 할 때이다.

휴대성과 고성능을 필요로 하는 유비쿼터스 기기용 유니버설메모리에 대한 욕구가 강한 만큼 이들 차세대 메모리 기술간의 주도권 경쟁은 어느 때보다도 치열하다. 비휘발성, 내구성, 정보 기록/재생 속도와 수명, 정보저장 밀도 등 여러 면에서 FeRAM, Phase-Change RAM 등 경합메모리에 비하여 월등하게 우수한 성능을 보이고 있는 MRAM은 그간 기술적 어려움으로 지적되어 왔던 여러 가지 문제들을 속속 해결하여 오면서 ‘유니버설메모리’에서 최강자의 위치를 굳혀가고 있다. 특히, MgO 절연막을 사용함으로써[16,17] 출력에서의 마진과 기록/재생 속도의 향상을 꾀할 수 있게 되었고, MTJ 기술의 연장선상에서 전류구동형 자화반전소자를 제작할 수 있음이 확인되면서 MRAM의 초고밀도화 기술의 근간을 마련하게 되었다. 이와 같은 최근 관련연구에서의 획기적인 기술개발이 스핀제어기술의 발전과 맥을 같이 한다고 볼 수 있어서 스핀트로닉스 학문에 거는 기대 또한 어느 때보다 높다고 할 수 있다. Spin FET와 같은 능동소자 제조기술, 단일전자 터널링에 있어서의 스핀의존전도 및 감지 등 스핀제어기술 등 제2세대 스핀트로닉스 기술이 개발되고 이들 스핀트로닉스 기술을 기반으로 한 ‘양자컴퓨터’가 제작되어 널리 활용될 것으로 기대한다.

## 참고 문헌

- [1] Stuart Parkin, Xin Jiang, Christian Kaiser, Alex Panchula, Kevin Roche, and Mahesh Samant, Proc. IEEE 91, p. 661, 2003.
- [2] <http://www.hitachigst.com/hdd/micro>
- [3] S.H.Charap, Pu-Ling Lu, Yanjun He, IEEE Trans.

Magn., Vol. 33, p. 978, 1997.

[4] E.N.Abarra, H.Sato, A.Inomata, I.Okamoto, and Y.Mizoshita, J. Appl. Phys. Lett., Vol. 77, p. 2581, 2000.

[5] E.E.Fullerton et al, J. Appl. Phys. Lett., Vol. 77, p. 3806, 2000.

[6] Rainer Waser (Ed.), Nanoelectronics and Information Technology, p. 532, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, 2003.

[7] Jon Slaughter, TND Technical Forum, 6 October, 2005.

[8] L. Savtcheko, B. N. Engel, N. D. Rizzo, M. F. Deherrera, and J. A. Janesky, U.S. Patent 6,545,906, 8 April, 2003.

[9] J. C. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater., 159, L1, 1996.

[10] L. Berger, Phys. Rev. B, 54, p. 9353, 1996.

[11] E. B. Myers, D. C. Ralph, J. A. Katine, R. N. Louie, and R. A. Buhrman, Science 285, p. 867, 1999.

[12] J. A. Katin, F. J. Albert, and R. A. Buhrman, Phys. Rev. Lett. Vol. 84, p. 3149, 2000.; F. J. Alber, J. A. Katine, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, Appl. Phys. Lett., Vol. 77, p. 3809, 2000.

[13] H. W. Schumacher, Phys. Rev. Lett., 90, p. 017201, 2003.; H. W. Schumacher, Phys. Rev. Lett., Vol. 90, p. 017204, 2003.

[14] J.M. Daughton, and A. V.Pohm, J. Appl. Phys. 93, p. 7304, 2003.

[15] I. L. Prejbeanu, IEEE Trans. Magn. 40, p. 2625, 2004.; R. C. Sousa, J. Appl. Phys. 95, p. 6783, 2004.

[16] Stuart S.P. Parkin, Christian Kaiser, Alex Panchula, Philip M. Rice, Brian Hughes, Mahesh Samant and See Hun Yang, Nature Materials, Vol. 3, p. 862, 2004.

[17] Shinji Yuasa, Taro Nagahama, Akio Fukushima, Yoshishige Suzuki and Koji Ando, Nature Materials, Vol. 3, p. 862, 2004.

저자약력

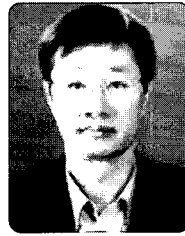


성명 : 신 경 호

◆ 학 력  
 · 1981년 서울대 금속공학과 공학사  
 · 1982년 KAIST 재료공학과 공학석사  
 · 1992년 Univ. of Pennsylvania 재료공학과 공학박사

◆ 경 력

· 1981년 - 1987년 LG전선(구 금성전선) 주임연구원  
 · 1989년 - 1992년 Knogo社(미국 New York) 선임연구원  
 한국과학기술연구원 미래기술 연구본부 나노소재연구센터 책임연구원  
 · 1996년 - 1996년 Maxtor社(미국 Colorado) 기술고문  
 · 1997년 - 2001년 한양대 금속재료공학부 겸임교수  
 · 2001년 - 현재 International R&D Academy 재료공학과 교수  
 · 2002년 - 현재 KISTI 나노기술정보 자문위원  
 · 2004년 - 현재 과학기술연합대학원대학 재료공학과 교수



성명 : 석 중 현

◆ 학 력

· 1984년 서울대 물리교육과 B.S  
 · 1986년 서울대 대학원 물리학 M.S.  
 · 1995년 Iowa State Univ. Condensed Matter Physics, Ph. D

◆ 경 력

· 1990년 - 1995년 미 Ames Lab R.A,  
 · 1995년 - 1996년 일본 ISTE C Fellow(Po-stdoc)  
 · 1996년 - 2002년 삼성종합기술원 반도체소자 램 수석연구원  
 · 2002년 - 2004년 세종대 나노공학과 교수  
 · 2004년 - 현재 서울시립대 나노과학기술학과 교수



성명 : 김 흥 석

◆ 학 력

· 1985년 서울대 전자공학과 공학사  
 · 1989년 North Carolina State Univ. 전기공학과 공학석사  
 · 1996년 North Carolina State Univ. 전기공학과 공학박사

◆ 경 력

· 1996년 - 1999년 LG반도체 중앙연구소 책임연구원  
 · 1999년 - 2000년 현대전자 중앙연구소 책임연구원  
 · 2000년 - 현재 배재대 전자공학과 교수