

TMR 소자를 이용한 MRAM의 기술 현황-TMR 소자의 자화반전을 중심으로

임상호

한국과학기술연구원 박막기술연구센터
서울 성북구 하월곡동 39-1번지

(2000년 9월 22일 받음)

I. 서 론

MRAM(magnetic random access memory)으로 알려진 자기메모리 소자는 넓은 의미로서 자성재료를 이용한 메모리 소자를 통칭하며, 이는 1970년대의 페라이트 코어로부터 출발하여 자기버블 기술까지 다소 오랜 역사를 가지고 있다. 그러나 협의의 자기메모리 소자는 자기저항(MR: magnetoresistance) 현상을 이용한 것으로서, 이러한 예로서 초기의 이방성(anisotropic) MR(AMR)에서 최근의 거대자기저항(GMR: giant magnetoresistance) 및 터널링형 자기저항(TMR: tunneling-type magnetoresistance) 현상을 이용한 자기메모리 소자를 들 수 있다. AMR 현상을 이용한 메모리 소자(간략히 AMRAM)는 1980년대 중반에 처음 제작되었으며, 군사 및 우주용으로 현재 제한적으로 사용되고 있다[1, 2]. AMRAM의 핵심소자는 Py/Ta/Ni(Py여기서 Py는 permalloy를 의미함)의 3층막으로 구성되어 있으며, 이러한 막에서 얻어지는 MR비는 2% 정도이다. 그러나 실제 소자에서 이용되는 MR비는 이의 1/4인 0.5% 정도로서 매우 낮다[2]. 이처럼 낮은 MR 비는 소자의 밀도를 높이는 데 큰 문제가 되고 있으며, 또한 소자의 속도를 느리게 하는 요인이 된다. 이러한 이유로 인하여 AMRAM의 가격은 다른 경쟁제품에 비하여 높기 때문에 응용이 특수한 분야에 한정되고 있는 실정이다. 반면 GMR 및 TMR 현상을 이용한 메모리 소자(이를 각각 GMRAM 및 TMRAM 간략히 칭함)는 출력이 AMR에 비하여 매우 높아 AMRAM이 가지는 문제들을 근본적으로 해결할 수 있을 것으로 기대되고 있으며, 따라서 이에 대한 연구가 현재 활발히 이루어지고 있다.

초기에는 GMRAM에 대한 연구가 많이 행해졌는데, 이 분야의 연구는 AMRAM에 대한 경험을 가지고 있는 Honeywell과 Motorola를 중심으로 이루어졌다. 특히 Motorola에서의 연구 활동이 활발하게 수행되었는데, 이

연구 그룹에서 사용한 GMR 소자는 기존의 자기기록에서 사용되고 있는 다층막보다 구조가 간단한 pseudo spin-valve이다[2-4]. 이 새로운 구조는 통상의 spin-valve와 달리 고정층이 antiferromagnetic(AF) 층에 의해 고정되지 않고, 자기 반자계(self-demagnetizing field)에 의한 형상이방성을 통하여 고정층과 자유층의 보자력 차이를 이용하여 자화를 고정시키는 방법을 사용하고 있다. 기술적인 측면에서 볼 때 GMRAM은 이미 기술이 확보된 AMRAM과 유사하기 때문에 상업화에 유리한 측면을 가지고 있다. 그러나 1995년에 개발된 TMR 소자의 MR비가 GMR에 비하여 월등히 높은데다가[5, 6], GMRAM의 경우 다수의 cell들이 series로 연결되어 있어 실제 얻을 수 있는 출력은 개개 소자의 출력에 비해 낮은 반면(N개의 소자들이 series로 연결되어 있는 경우 출력은 개개 소자에서 달성되는 출력을 N으로 나눈 것과 같음), TMRAM은 개개의 cell이 곧바로 다이오드와 연결되는 architecture를 이루고 있어서 소자의 출력을 그대로 얻을 수 있어 출력이 매우 크다[7]. 따라서 연구의 관심이 TMRAM으로 급격히 비우고 있는 상황에 있다. 이는 초기에 GMRAM에 많은 연구 성과를 내었던 Motorola가 최근에는 TMRAM에 대한 연구에만 몰두하고 있는 사실로부터 확연히 드러나고 있다. 소자 또는 시스템 수준에서 TMRAM을 연구하고 있는 회사로는 이미 언급한 Motorola 외에도 이 분야의 연구를 선도하고 있는 IBM, 최근에 연구를 시작한 Hewlett Packard, 그리고 유럽에서 이 분야의 연구를 선도하고 있는 Portugal의 INESC를 들 수 있다.

본 해설에서는 TMRAM에 대한 현재의 상황에 대하여 간단히 언급한 다음, TMRAM의 실용화에 가장 중요한 인자로 인식되고 있는 자화반전과 관련된 제 문제들에 대하여 주로 고찰하고자 한다. 본 해설에서는 각각의 주제에 대한 자세한 설명보다는 전체적인 perspective를 이해하는데 중점을 두었다. 보다 자세한 내용은 수록된 참고문헌을

참조하면 될 것이다.

II. TMRAM의 기술 상황

본 절에서는 TMRAM에서 가장 선두에 있는 IBM의 연구 결과를 중심으로 현재의 기술적 상황을 간단히 언급하고자 한다. IBM의 연구 결과는 Parkin 등이 발표한 최근 논문[7]을 많이 참고하였다.

TMR 소자는 고정층과 자유층의 2개의 강자성막과 이 사이의 절연층으로 주로 구성되어 있다. 이 중에서 고정층은 메모리 소자가 작동하는 동안 항상 고정되어 있으며, 자유층만이 고정층의 자화 방향에 대하여 평행 또는 반평행 방향으로 자화의 방향을 바꾸게 된다. 즉, 정보의 기록은 자유층의 자화반전에 의해서 달성된다. 이는 pseudo spin-valve 소자를 이용한 GMRAM과 매우 다른 점 중의 하나인데, pseudo spin-valve에서는 소자의 작동시 두 자성층 모두의 자화 방향을 바꾸는 것이 필요하다. 구체적으로 pseudo spin-valve에서 정보의 기록은 고정층의 자화반전에 의해 달성된다. 정보를 재생하는 과정은 다소 복잡한데, 중요한 것은 sense와 word current를 모두 ON 하는 것이 필요하며, 이 때 발생하는 자기장은 자유층의 자화를 반전시키기에는 충분해야 하지만 고정층의 자화를 반전시키기에는 충분하지 않아야 한다는 점이다. 이는 TMRAM이 GMRAM보다 간편한 하나의 예이다.

초기의 TMR에서 자화의 고정은 조성의 제어를 통한 보자력의 차이는 통하여 달성되었는데 [8], 통상 자유층의 자화반전에 필요한 자기장(즉 자화반전 자기장)이 수 Oe에서 100 Oe의 범위에 있음을 감안할 때, 고정층의 보자력은 이보다 훨씬 높아야 한다. 그러나 조성의 제어를 통하여 원하는 크기의 보자력 차이를 얻는 것이 쉽지 않을 뿐만 아니라, 공정상의 문제점도 있기 때문에(추가적인 타겟의 필요성 등), 자기 반자계에 의한 형상이방성을 통한 보자력 차이를 이용하여 고정층의 자화를 고정시키는 방법을 사용하게 되었다. 이는 이미 언급한 pseudo spin-valve의 원리를 그대로 적용한 것이다. 자기 반자계에 의한 자화의 고정은 자성막의 형상(주로 두께)과 포화 자화(조성)를 제어함으로써 달성된다. 그러나 지금까지의 연구 결과에 의하면 AF 층에 의한 자화의 고정이 가장 효과적인 것으로 알려지고 있다[7]. TMRAM에서 기록은 word 및 bit line에 동시에 전류가 흐르는(하나의 선택된) cell에서만 이루어진다. 이는 word나 bit 중 하나만 선택된 cell (half-selected cell)은 자유층의 반전이 일어나지 않아야

한다는 것을 의미한다. TMRAM의 작동시 하나의 cell이 half-selected 상태에 있는 경우가 매우 많기 때문에 이러한 cell들이 반복적으로 간섭을 받으며, 따라서 자기적 creep 현상이 나타나 자화가 중간 상태로 가거나 완전히 자화반전이 일어날 가능성이 있다[9]. 이는 메모리 소자의 에러를 유발하기 때문에 AF 층에 의한 자화의 강한 고정이 필요한 이유이다. 한가지 언급할 것은 TMRAM에서 AF 층으로는 통상의 spin-valve와는 달리 반드시 도전체인 금속막(주로 MnFe)을 사용해야 한다는 점이다. 왜냐하면 TMR 소자에서 전류는 막에 수직인 방향으로 흐르기 때문이다.

최근 수년간 TMR 다층막 연구에 있어서 많은 진전이 있어 왔다. 가장 큰 관심 중의 하나가 MR비를 증가시키는 것이며, 따라서 이에 대한 집중적인 연구가 행해졌다. 이러한 연구의 결과 상온에서 통상의 스파터링 방법에 의해 제조된 TMR 소자에서 40 % 이상의 MR 비가 얻어졌다[7]. MR 비가 TMRAM의 출력, 나아가서 밀도 및 속도에 큰 영향을 미치기 때문에 중요한 파라미터임에는 분명하다. 그러나 MR 비 못지 않게 TMRAM의 성공적인 실용화에 큰 영향을 미치는 요소들에 대해서도 큰 진전이 있었는데, 이러한 것으로는 다음의 2가지를 대표적으로 들 수 있을 것이다. 첫 번째는 TMR 접합 소자의 저항(구체적으로는 저항에 접합면을 곱한 비저항)을 $60 \Omega(\mu\text{m})^2$ 의 매우 낮은 값에서부터 $109 \Omega(\mu\text{m})^2$ 의 매우 높은 값까지 변화시키는 것이 가능하다는 것이다[7]. 이는 기본적으로 2자성층의 중간에 있는 산화막의 두께와 특성을 제어함으로써 달성되는 것으로 이해되고 있지만, 실제적으로는 많은 실험적 노하우를 필요로 한다. TMRAM에서 접합체의 저항은 적절한 값을 가져야 하는데, 저항이 너무 크면 임피던스 지연 효과에 의해 속도가 느리게 되며, 반대로 저항이 너무 작으면 출력이 작아지게 되어 바람직하지 않다. 이러한 사항을 감안할 때 접합면의 저항을 넓은 범위에 걸쳐서 조절하는 것이 가능하게 됨으로써 소자의 설계에 많은 자유를 주게 될 것이다. 또 하나의 중요한 진전으로는 저항 및 MR 비를 매우 균일하게 제어하는 것이 가능하다는 점이다. IBM에서 많은 수의 접합체를 대상으로 연구한 결과에 의하면[7], 저항 및 MR 비를 $\pm 1.5\%$ 이내의 오차에서 제어하는 것이 가능함을 보인 바 있다. Motorola에서는 6인치 웨이퍼에서 저항 자체는 다소 큰 변화를 보이거나(최대 1.8배) 균일한 MR비를 얻을 수 있었다[10]. 이는 저항 값 자체와 MR 비가 산화층의 두께와 상태에 매우 민감하다는 점을 고려할 때 매우 중요한 기

술적 진전이다. TMR 소자의 이러한 우수한 신뢰성은 성공적인 상업화에 큰 기여를 할 것으로 생각된다.

상기에서 언급한 바와 같이 지금까지 이 분야에서 큰 진전이 이루어졌음에도 불구하고, TMRAM의 성공적인 실용화를 위해서는 아직도 해결되어야 할 부분들이 많으며, 이 중에서도 기록을 위한 자화의 반전(스위칭)과 관련된 문제를 해결하는 것이 가장 중요한 이슈가 되고 있다. 정적인 상태에서의 자화반전 문제뿐만 아니라, 메모리 소자에서 자화의 반전이 통상 매우 짧은(수십 ns 이하) 펄스 자기장에 의해 일어나기 때문에 동적 상태에서의 자화반전 거동을 이해하는 것 또한 중요하다[4]. 웨이퍼 수준에서는 자유층의 보자력 및 bias 자기장이 작기 때문에 자화의 반전과 관련된 문제가 경미할 것으로 예상됨에도 불구하고 이러한 문제가 발생하는 것은 다음의 이유 때문이다. TMR 소자의 크기는 밀도와 직접적으로 연관되며 밀도를 높이기 위해서는 TMR 소자의 크기를 줄여야 한다. 현재 경쟁 관계에 있는 다른 메모리 기술과 경쟁하기 위해서는 소자의 크기는 submicron 수준이 되어야 하며, 이러한 크기에서 자화반전을 포함한 TMR 소자의 자기적 거동은 전체 자기에너지에 큰 부분을 차지하는 정자기에너지(magnetostatic energy)에 의해 큰 영향을 받게 된다[11-14]. 이를 구체적으로 언급하면, 자기 반자계가 원인인 형상 이방성에 의해 자성층의 보자력은 크게 증가하며, 또한 자성층 상호간의 정자기 자기장에 의해 bias 자기장(또는 offset 자기장)의 크기도 크게 변하게 된다. 이러한 이유로 인하여 실제로 TMRAM에 사용되는 패턴된 소자의 경우 자유층의 자화반전을 위해서는 매우 높은 자기장이 요구된다. 이는 도전체에 큰 전류를 흘려주어야 한다는 것을 의미한다. 그러나 도전체의 전류 밀도는 electromigration 및 발열에 의한 온도 상승 등 여러 가지 이유로 인하여 적정 수준 이하가 되어야 하기 때문에, 이는 도전체의 크기를 증가시키게 될 것이며 나아가서 메모리 소자의 밀도를 줄이는 요인이 된다. 이러한 점을 감안할 때, 가급적 낮은 자기장(전류에서 자화를 반전시키는 것이 필요하다.

자화의 반전과 관련된 "근본적인" 문제(큰 자화반전 자기장) 외에도 "실험적인" 측면에서도 해결해야 할 문제가 남아 있다. 많은 수의 TMR 접합체에 대한 IBM의 연구에서 현재의 기술로써 저항 및 MR 비를 균일하게 제어하는 것이 가능함에도 불구하고, 자화반전에 필요한 자기장에서는 매우 큰 오차가 관찰되고 있다는 점인데, 이는 그림 1의 결과로부터도 잘 드러나고 있다[7]. 그림 1에는 동일한 batch에서 제조된 시료를 각기 다른 2개의 크기, 즉

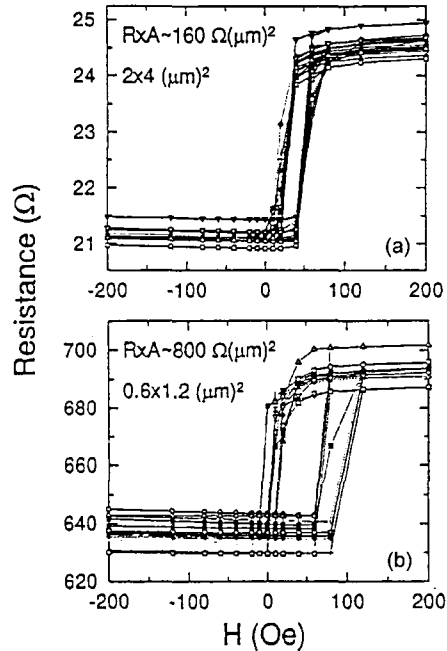


그림 1. 동일한 batch에서 제작되었으나 크기가 다른 2가지 cell에 대한 저항-자기장 곡선.

2 μm×4 μm 및 0.6 μm×1.2 μm로 미세 가공한 cell에 대한 저항이력곡선을 나타내고 있다. 여기에서 aspect ratio는 2로서 동일하다. 크기가 큰 cell의 경우(2 μm×4 μm) 자화반전이 일어나는 자계의 크기가 비교적 일정하지만, cell의 크기가 작아지게 되면(0.6 μm×1.2 μm), 자화반전이 일어나는 자계의 크기가 매우 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이에 관한 이유로서는 여러 가지를 생각할 수 있겠으나, 복잡한 자구구조에 의한 자화반전 거동의 복잡성, 식각 공정에 의해 제조된 패턴된 소자의 형상이 균일하지 않은 것이 중요한 요인으로 추정되고 있다.

III. 자화반전과 관련된 문제

전절에서 패턴된 submicron TMR 소자의 자화반전이 근본적 및 실험적인 측면 모두에서 현재 문제가 되고 있음을 지적하였는데, 본 절에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 시도로서, 자화반전에 영향을 미치는 여러 인자들을 찾아내고 가능한 해결책에 대하여 검토해 보고자 한다. 이러한 인자들로는 박막의 조성, 기하학적인 형상(geometry), 미세구조, 동적자화 거동, 자기적 배열(magnetic configuration)과 word 및 bit line 설계(architecture) 등을 들 수 있을 것이다. 이 중에서 자성막의 기하학적인 형상

은 자화반전에 매우 큰 영향을 미치며 따라서 이에 대한 연구가 광범위 진행되어 왔기 때문에, 이 부분은 하나의 독립된 다음 절에서 다루기로 하고, 본 절에서는 그 외의 인자들에 대하여 기술하고자 한다.

3.1. 조성

TMR 소자를 이루고 있는 자성막의 고유 성질에 직접적으로 연관되는 인자로서, 특히 자성막의 보자력 및 포화자속밀도에 영향을 미친다. 보자력은 조성 고유 성질에 의해 영향을 받기도 하지만 유도자기이방성의 크기에 의해서도 간접적으로 영향을 받는데, 일반적으로 유도자기이방성은 단일 조성보다는 합금 조성에서 크며, 합금 조성에서도 원자비가 비슷할 때가 크다. 포화자속밀도는 정자기 에너지의 형태로 보자력 및 bias 자기장에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 이러한 영향을 최소화하기 위해서는 자기적 성질의 열화를 최소화하는 범위에서 포화자속밀도를 줄이는 방향으로 합금을 설계하는 것이 필요하다.

3.2. 미세구조

동일한 조성이라 하더라도 미세구조에 따라 자기적 성질이 변화하리라는 것은 쉽게 예상되는 바이다. 구체적으로 자기적 성질에 영향을 미치는 것으로는 집합조직(texture)과 결정립의 크기를 들 수 있다. Fcc Co의 경우(111)에서는 보자력이 작으며 (001) 또는 (011)에서는 보자력이 큰 것은 집합조직이 자기적 성질에 영향을 미치는 하나의 예가 될 것이다[15]. 결정립의 크기 및 결정립 사이의 자기적 상호작용도 자기적 성질에 영향을 미치는데, 이러한 인자들이 자기적 성질에 미치는 영향은 간단하지 않다. 한 예로서 결정립 간의 교환자기결합은 각형비를 향상시키며 보자력을 낮추는 것으로 알려져 있다[16].

3.4. 동적자화 거동

동적자화와 관련된 변수로는 자기장을 인가한 시점에서 원하는 자기장의 크기까지 도달하는데 걸리는 rise time과 원하는 자기장의 크기에서 자기장을 유지하는 시간인 pulse width를 들 수 있을 것이다. 동적자화 거동에 대한 연구는 TMR 소자보다는 pseudo spin-valve에서 많이 행해졌다[4, 17, 18]. Pseudo spin-valve에서 2층의 자화가 평행한 상태에서 자화를 모두 반전시키는 경우, 고정층의 자화반전은 rise time이 작을수록 낮은 자기장에서 일어난다는 연구결과가 보고되었다(그림 2) [17, 18]. 이는 rise time이 크게 되면 자유층이 먼저 자화가 일어나 2개의 자

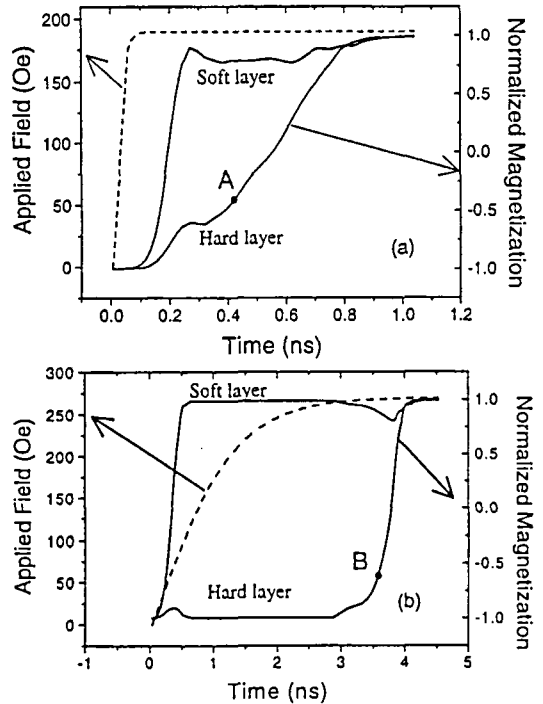
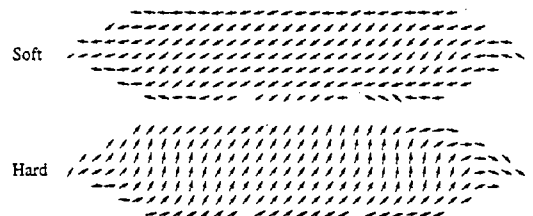


그림 2. 의사 (pseudo) 스핀밸브 NiFeCo (3.5 nm)/Cu (3.5 nm)/ NiFeCo (5.5 nm)에서 고정층과 자유층의 시간 의존 자화반전 특성. 그림에서 실선으로 나타난 부분이 시간에 따른 인가자기장의 변화 (즉 rise time)를 나타내는데, rise time은 (a) 0.032 ns, (b) 1.28 ns 임.

(a) Rise time 0.032 ns (point A)



(b) Rise time 1.28 ns (point B)

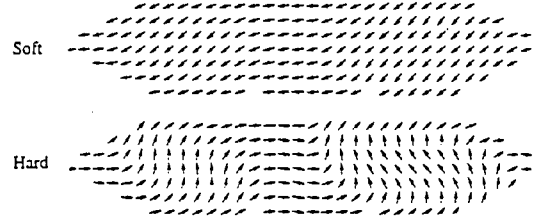


그림 3. 그림 2의 점 A와 B에 해당하는 지점에서 고정층 및 자유층의 자화배열. Rise time은 (a) 0.032 ns, (b) 1.28 ns임. 초기에 자화는 2자성층 모두에서 오른쪽을 향하며, 인가 자기장은 왼쪽을 향함.

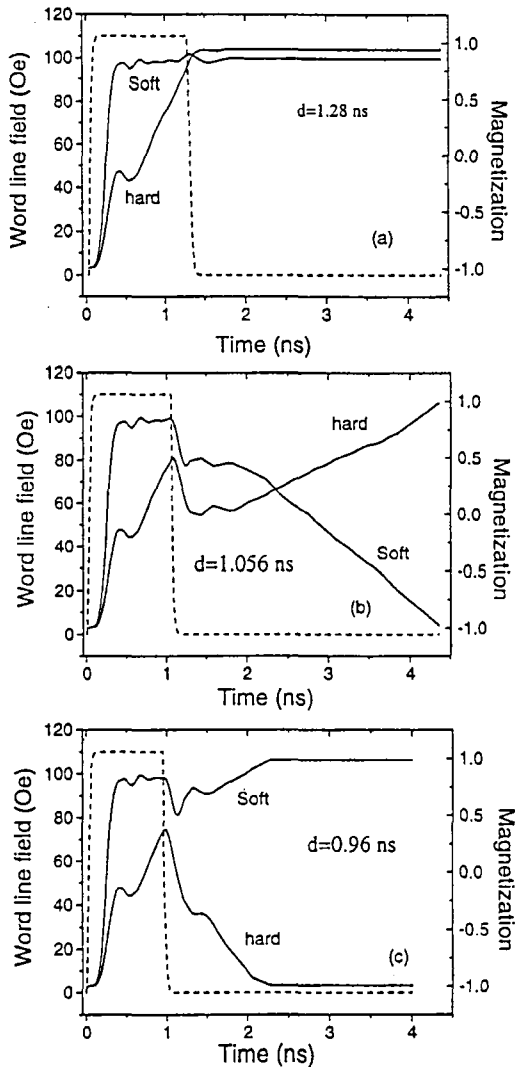


그림 4. Word line의 pulse 폭에 따른 고정층과 자유층의 자화반전 거동. Pulse 폭은 (a) 1.28 ns, (b) 1.056, (c) 0.96 ns이며, rise time은 공히 0.032 ns임.

성층이 안정한 반평행 상태가 되기 때문에 뒤따르는 고정층의 자화반전이 어렵게 되기 때문이다. 이러한 결과는 그림 3에 나타난 바와 같이 미소자기계산에 의한 자화배열에 의해서도 잘 이해되는데, 그림 3의 결과는 그림 2에서 점 A와 B로 표시한 지점에서 자유층 및 고정층의 자화배열을 보여주고 있다. Pulse width도 자화반전에 큰 영향을 미치는데(그림 4참조), 앞의 경우와 동일한 조건(pseudo spin-valve에서 자화가 평행한 경우)에서 pulse width가 충분히 크면 2자성층 모두에서 자화반전이 일어나지만(그림 4(a)), pulse width가 작은 경우 고정층의 자화반전

이 일어나지 않게 된다(그림 4(c)) [18]. 한가지 흥미있는 사실은 중간 정도의 pulse width에서(그림 4(b)) 고정층은 자화반전이 일어나고 자유층은 자화가 반전되지 않은 비정상 현상이 생긴다는 점이다[18]. 이것 또한 정자기에너지의 기여가 크기 때문인데, 구체적인 이유를 설명하면 다음과 같다. 이 정도의 pulse width에서 2 자성층 모두에서 자화반전이 상당히 진행되지만 그렇다고 완전히 일어난 상태는 아니다. 이러한 상태에서 자기장을 제거하게 되면 보자력이 상대적으로 작은 자유층이 원래의 위치로 되돌아가게 되고, 이러한 자유층의 자화 상태는 중간 정자기 상호자기장에 의해 고정층의 자화를 반전시키는 역할을 하게 된다. 이러한 예에서 보는 바와 같이, 동적자화 거동은 예상보다 훨씬 복잡하며, 이러한 원인에는 큰 정자기에너지가 자리하고 있다. 현재의 기술로서 pulse width를 2 ns 정도까지 제어하는 것이 가능한 것으로 알려지고 있다 [19]. 그러나 pulse width가 10 ns 이하가 되면 자화반전에 필요한 자기장(또는 전류)이 증가하기 때문에, 이것을 어느 수준 이하로 낮추는 것이 어렵다[19]. 통상의 pseudo spin-valve에서 1 mA의 전류에서 얻어지는 자기장은 15 Oe 정도이다. 최근 IBM에서는 TMRAM에서 10 ns의 기록과 재생을 달성한 것으로 보고되고 있으며, 이는 현재의 DRAM보다 6배 정도 빠른 수준이다[20]. 이러한 우수한 속도는 TMR 소자의 높은 MR비와 낮은 비저항에 기인한다.

3.5. 자기적 배열

Pseudo spin-valve를 사용하는 메모리 소자는 작동시 고정층과 자유층 모두의 자화반전을 수반하므로 4가지의 자기적 배열이 존재한다. 그러나 TMRAM에서는 고정층의 자화는 항상 고정되어 있으므로 2가지의 자기적 배열만이 존재한다. 따라서 TMR 소자를 이용한 메모리 소자에서 자기적 배열에 따른 자화반전 거동은 pseudo spin-valve 메모리 보다 간단하다. 그러나 cell의 크기가 작아짐에 따라 자기적 배열의 영향이 증가하기 때문에 이에 대한 이해가 필요하다. 이러한 영향을 최소화하기 위해서는 자화를 고정시키는 고정층으로서 synthetic AF 층을 사용하는 것도 하나의 방법이다[7, 21]. 이러한 예로서 IBM의 Parkin 등은 MnFe 10 nm/Co 4 nm/Ru 3 nm/Co 3 nm/Al₂O₃ 0.7 nm/60Py 7.5 nm 구조를 제안한 바가 있다[7]. (그러나 실제 전체 막의 구조는 Ta 5 nm/Al 25 nm/60Py 4 nm/Mn₅₄Fe₄₆ 10 nm/Co 4 nm/Ru 3 nm/Co 3 nm/Al₂O₃ 0.7 nm/60Py 7.5/Al 25 nm/Ta 7.5 nm이다.) 이러

한 구조에서 고정층(Co 3 nm)의 자화가 MnFe층에 인접한 4 nm Co 층의 자화와 반평행 상태에 있기 때문에, 자유층에 미치는 정자기 상호작용을 감소시킬 수 있다. 부가적인 장점은 이러한 구조에서 고정층의 자화 pinning이 크게 증가한다는 것이다.

3.6. Word 및 Bit Line 설계(Architecture)

자화의 반전은 word line과 bit line의 설계에 따라 달라지는데, pseudo spin-valve의 경우 동일한 전류에서 발생하는 자기장은 wrapped word line이 single word line보다 크며, 또한 자기장도 더욱 균일한 것으로 보고되었다 [2, 19]. 그림 5에는 wrapped word line을 가진 cell의 구조를 보여주고 있으며, 그림 6에는 single word line과 wrapped word line을 가진 cell 구조에서 자화반전에 필요한 전류(자기장)의 크기 및 분포에 대한 결과를 보여주고 있다. 그림으로부터 자화반전은 wrapped word line에서 낮은 전류에서 일어나며, 전류의 크기 분포 또한 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과들은 pseudo spin-valve에서 얻어졌지만 TMRAM에서도 유사하게 적용될 것이다.

주어진 소자에 대하여 word line에 가해진 전류(자기장)와 bit line에 가해진 전류의 함수에 따른 자화반전을 조사하는 것은 메모리 소자의 신뢰성에 매우 중요하다. 초기의 연구에서는 먼저 TMR 소자의 자화반전 거동만을 조사하기 위하여 집적화된(integrated) word 및 bit line 대신에 외부에서 90도 방향으로 정렬된 2쌍의 Helmholtz coil에

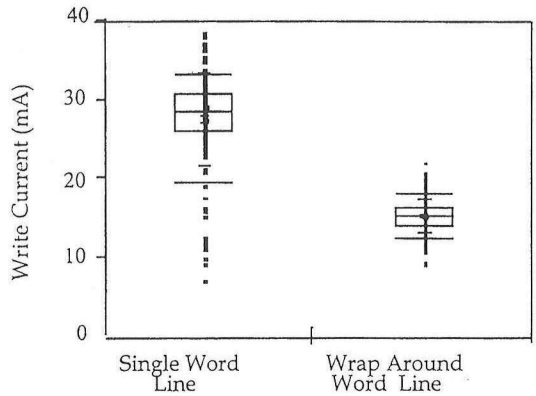


그림 6. Single word line(cell의 위에 위치하고 있음)과 wrapped word line을 가진 cell에서의 기록 전류 비교.

서 발생하는 자기장을 이용하는 것이 바람직하다. 이러한 실험을 통하여 cell에 대한 asteroïd switching threshold 곡선을 구할 수 있다. 다음 단계는 집적화된 word 및 bit line에서 발생된 자기장으로부터 asteroïd 곡선을 얻는 것인데, 이를 통하여 실제 메모리 소자에서의 자화반전 거동을 이해할 수 있을 것이다.

Asteroïd 곡선은 별 모양을 가지며(asteroïd라는 이름이 여기서 유래되었음), 간단한 모델 시스템인 경우 쉽게 구할 수 있다. 잘 알려진 Stoner-Wohlfarth 모델[22]에서 asteroïd 곡선을 구하면 다음과 같다[23]. 일축자기이방성(K)을 가진 단자구가 외부 자기장에 반응하는 것을 기술하는 Stoner-Wohlfarth 모델에서 자기(magnetic) 자유에너

Prototype MRAM Cell

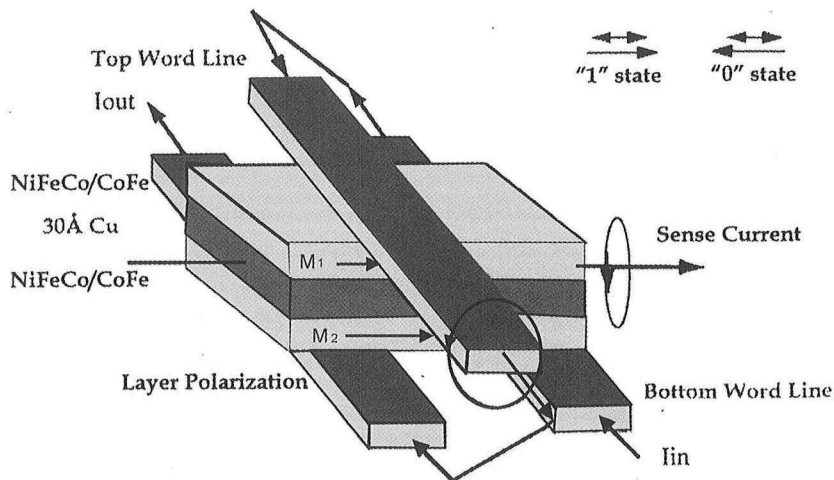


그림 5. Wrapped word line을 가진 메모리 cell의 구조.

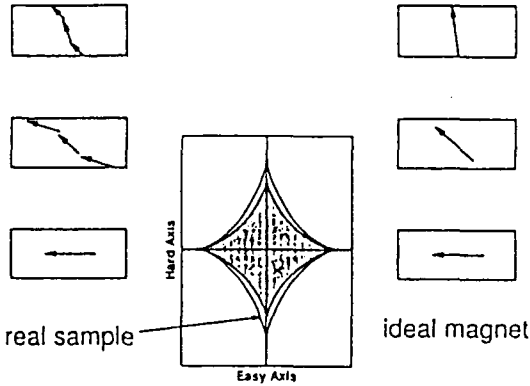


그림 7. 이상적인 대칭 astroid와 실제 관찰되는 비대칭적인 astroid의 모식도. 대부분의 실험결과들은 자화곤란축 방향으로 길게 늘어진 형상을 보이고 있음.

지는 다음과 같이 주어진다.

$$E(H) = -H \cdot M + K \sin^2 \theta$$

여기서 H 와 M 은 통상의 의미를 가지며, θ 는 자화와 이방성 사이의 각이다.

이 모델에서 자화의 반전은 다음의 조건을 만족하는 경우 급격히(abrupt) 일어난다.

$$H_x^{2/3} = -H_y^{2/3} = (2K/M_s)^{2/3}$$

이 식은 (H_x , H_y) 좌표상에서 그림 7에서와 같은 별 모양의 폐쇄된 곡선을 나타내는데, 자화의 반전은 곡선의 내부에서는 일어나지 않고 곡선을 포함하여 외부에 있는 (H_x , H_y)에서 일어난다. 위 식으로부터 H_x 및 H_y 축과는 $2K/M_s$ 에서 만나는데 이는 이상적인 경우이며, 실제로는 자화 곤란축 방향으로 길게 늘어진 모양을 가지고 있다. 이는 자화곤란축 방향으로 자기장을 인가하는 경우 자화반전에 필요한 자기장의 크기가 자화용이축보다 크다는 것을 의미하는데, 이에 대한 원인은 아직 확실히 알려지지 않고 있다. 하나의 가능한 설명으로는 그림 7에 도식적으로 나타난 바와 같이 자화반전이 하나의 단자구 상태로 회전하지 않고, 표면에 발생하는 free pole의 크기를 줄이기 위하여(따라서 정자기에너지의 크기를 최소화하기 위하여) incoherent 자화회전을 하는 것을 들 수 있다. 비대칭 astroid의 예로서 그림 8에는 미세가공된 TMR cell에 대한 astroid 곡선의 한 예를 보여주고 있다.

현재까지 메모리 소자에 대한 자화반전 연구는 대부분 외부의 자기장을 사용하여 수행되었으며, 실제로 집적화된 word 및 sense(또는 bit) line을 사용하여 자화반전 연

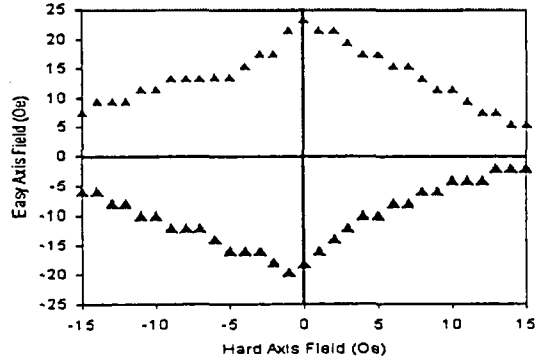


그림 8. 미세가공된 TMR cell(크기 $0.9 \mu\text{m} \times 1.8 \mu\text{m}$)의 astroid 곡선.

구를 수행한 경우는 많지 않으며, 현재 초보 단계의 연구가 이루어지고 있다[3, 24, 25].

IV. 자화반전과 기하학적 형상

기하학적 형상으로는 자성막의 두께, aspect ratio(길이/폭 비) 및 자성막의 모양을 들 수 있다. 자기 메모리에 해당되는 cell의 크기 영역(submicron)에서, 자성막의 두께와 aspect ratio는 정자기에너지, 구체적으로는 자기 반자계에 의한 형상이방성과 층간 정자기 상호작용에 의한 자기장에 큰 영향을 미치며 따라서 자화반전에 큰 영향을 미친다. 이는 앞절에서 언급한 조성 및 미세구조가 박막의 고유 자기적 성질에 영향을 미치는 것과 대비된다. 그런데 submicron 영역에서 고유 자기적 성질보다는 정자기에너지에 의한 자기적 성질의 기여가 훨씬 크기 때문에, 이에 대한 영향을 정확히 이해하는 것이 반드시 필요하다. 자성막의 두께와 aspect ratio뿐만 아니라 자성막의 모양 또한 자구의 구조를 통하여 자화반전 거동에 영향을 미치는데, 특히 자화반전이 일어나는 자기장의 크기뿐만 아니라 자화반전이 일어나는 자기장의 크기 범위(신뢰성)에도 영향을 미치기 때문에 메모리 소자에서 중요한 요소이다.

자성막의 크기가 자력의 크기보다 작은 submicron이 되면 단자구 형태로 존재할 것으로 예상하였다. 그러나 이러한 예상이 틀렸다는 것을 Shi 등은 최초로 실험적으로 밝힌 바 있다[26]. 이들은 MFM 실험을 통하여 submicron 영역에서도 cell 전체가 하나의 자구로 구성되어 있지 않고 소자의 끝 부분에 end domain이 존재한다는 것을 관찰하였으며, 이러한 실험결과는 미소자기계산에 의해서도 확인되었다. 그림 9에는 이에 대한 결과를 나타내었다. 그

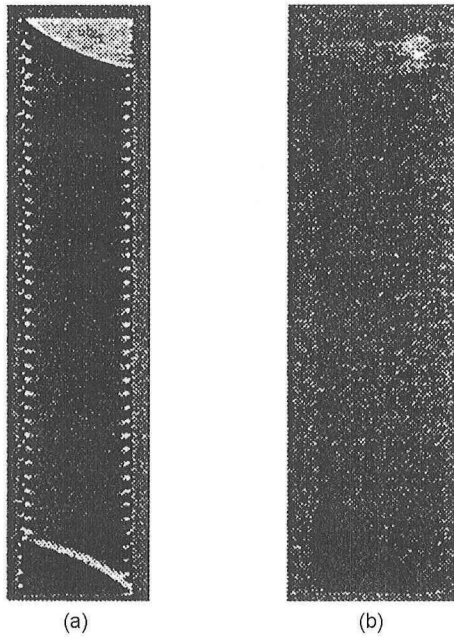


그림 9. 두께가 0.02 μm(20 nm)이며, 크기가 0.4 μm×2.0 μm인 NiFe 단층막에 대한 자기구조. (a)는 미소자기계산에 의한 결과이며, (b) MFM에 의한 결과임.

러나 여기서 주목할 것은 end domain이 존재하는 영역이 소자의 끝 부분에만 한정되어 있다는 점이다. 이러한 실험 결과는 단자구에 근거한 모델이 메모리 소자의 자화반전을 완전히 설명하지 못할 것이라는 예상을 갖게 한다. 다른 한편으로는 end domain이 존재하는 영역이 작은 조건에서는 시료의 대부분이 단자구로 구성되어 있기 때문에, 자기적 성질은 단자구 모델에 의해 잘 설명될 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 예상은 Shi 등이 발표한 최근의 연구 결과에 의해 잘 뒷받침되고 있다[26]. Shi 등은 동일한 조성의 합금(permalloy)에서 두께(5 및 20 nm) 및 일정한 두께(5 nm)에서 포화자화의 크기(permalloy 및 NiFeCo 합금)가 보자력에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였으며, 이에 대한 결과를 그림 10에 나타내었다. 또한 이러한 결과를 단자구 모델과 비교함으로써 정자기에너지의 영향을 조사하였다.

단층막에서 정자기에너지를 고려한 Stoner-Wohlfarth의 단자구 모델에서 보자력은 다음과 같이 주어진다[26].

$$H_c = \frac{t}{w} f(e), \quad e \equiv \left(1 - \frac{w^2}{l^2}\right)^{1/2}$$

이 식은 길이 l, 폭 w 및 두께 t인 rectangle에 대한 것이

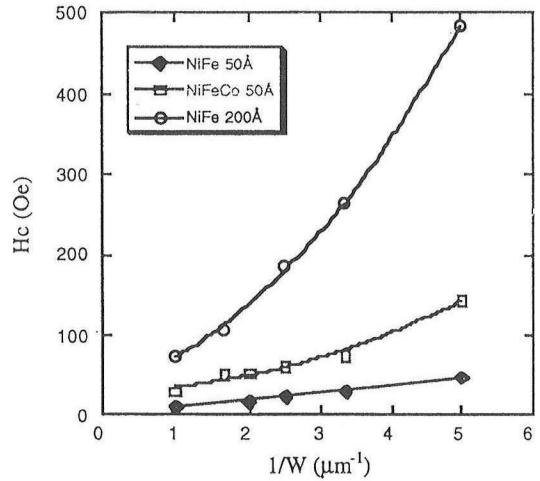


그림 10. 3가지 각각 다른 종류의 단층막에 대하여 aspect ratio가 5로 일정할 때 보자력의 박막 폭(실제로는 폭의 역수) 의존성.

며, $l \gg w \gg t$ 일 때 성립한다. 이 식으로부터 보자력은 일정한 aspect ratio에서 폭에 반비례하고 두께에 비례한다. 모델에 의한 이론적인 결과와 그림 10에 나타난 실험 결과를 비교해 보면, 두께가 작고 포화 자화가 작은 박막(5 nm 두께의 permalloy)에서는 실험결과와 이론적 예측이 잘 일치한다. 그러나 두께가 두껍거나 포화 자화가 크면(20 nm 두께의 permalloy 및 NiFeCo 박막) 단자구 모델은 실험 결과를 잘 설명하지 못한다. 동일한 박막에서도 크기가 감소함에 따라 실험결과가 단자구 모델에서 벗어나는 정도가 커진다. 이러한 결과는 다음과 같이 설명될 수 있을 것이다. (1) 두께가 두꺼워지면 전체 에너지에서 정자기에너지의 기여가 증가하므로, 정자기에너지를 줄이기 위하여 end domain의 형성을 용이하게 한다. (2) 동일한 aspect ratio에서 크기가 감소하면 end domain이 차지하는 영역이 상대적으로 증가한다. (3) 동일한 형상의 시료라 하더라도 포화 자화가 크면 정자기에너지가 증가하므로 end domain 형성을 용이하게 한다.

Zhu 등은 단층막이 아닌 permalloy sandwich 구조에서 자화반전 거동에 대한 연구를 수행하였다[27]. 다층막에서의 연구 결과 또한 단층막과 유사하게 설명될 수 있는데, 한가지 차이점은 다층막의 경우 자기 반자장에 의한 보자력의 변화에 추가하여 중간 정자기 상호 작용에 의한 bias 자기장의 영향을 고려해야 한다는 점이다. 유사한 연구가 고전적인 spin-valve에 대하여 Russek 등에 의하여 행해졌다[28]. 이들은 일정한 aspect ratio에서 시료의 크기와 일정한 폭에서 aspect ratio에 따른 자화반전 거동을 실험

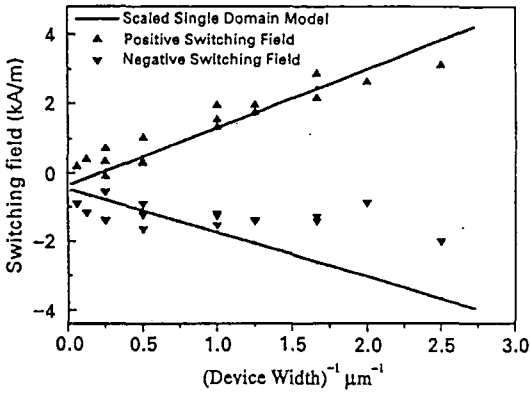


그림 11. 스핀밸브 다층막에서 aspect ratio가 10으로 일정할 때 자화반전 자계의 박막 폭(실제로는 폭의 역수). 실선은 단자구 모델에 의한 결과로서, 0.4의 인자로 줄인 것임.

적으로 관찰하였으며, 이러한 실험결과를 단자구 모델과 비교하였다. 그림 11에는 하나의 결과로서 aspect ratio가 10으로 일정할 때 자화반전 자계가 박막의 폭(실제로는 폭의 역수)에 따라 변화하는 결과를 나타내었다. 그림에는 실선은 단자구에 의한 결과를 나타내고 있다(실제로는 0.4의 인자로서 줄인 것임). 2가지의 자화반전 자계 중에서 양의 자화반전 자계에 대한 결과가 음의 자화반전 자계에 대한 결과보다 잘 일치하는 결과를 보이고 있으며, 또한 박막의 폭이 긴 경우가 짧은 경우보다 실험결과가 단자구 모델과 잘 일치한다.

자성막의 모양이 자화반전 거동에 미치는 영향은 micromagnetic 계산을 통하여 Carnegie-Mellon 대학의 Zhu 교수 연구실을 중심으로 수행되었다[26, 29-31]. 이미 MFM 실험을 통하여 확인된 바 있지만 micromagnetic 시뮬레이션에 의해서도 end domain의 존재가 관찰되었다. 자기 메모리 소자에서 end domain은 자화반전을 incoherent 하게 일어나게 함으로써 MR비를 감소시키며, 또한 자화반전을 불규칙하게 함으로써 자화반전이 일어나는 자기장의 크기가 일정하게 되지 않기 때문에 소자의 신뢰성에 큰 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 일환으로 Zhu 등은 cell이 rectangular, tapered 및 elliptical 모양일 때 자화반전 거동을 micromagnetic 계산을 통하여 연구하였다[26, 30]. 이러한 연구의 결과 rectangular 형상에서는 end (또는 edge) domain이 존재하며, 이러한 end domain은 2개의 안정된 자구구조(A 상태 및 B 상태)를 가지는 것이 관찰되었다. 단자구 상태가 아니고 end domain이 존재하게 되면 자기저항곡선은 각형이 아니고, 자화반전이

2단계에 의해 일어나는 경향이 있는데, 이는 A 및 B 상태의 2개의 안정된 end domain 구조와 연관되는 것으로 이해되고 있다. A 상태는 end domain의 자화 방향이 같은 경우이고, B 상태는 end domain의 자화 방향이 반대인 경우이다. A 상태는 자화 회전에 의해 자화반전이 일어나며, B 상태는 자구벽의 이동(구체적으로는 자구벽의 핵생성과 이동)에 의해 자화반전이 일어난다. 보자력은 end domain이 A 상태일 때가 B 상태일 때보다 작은 것으로 계산되었다. 반면에 cell이 tapered 및 elliptical 형상을 가질 때는 end domain이 존재하지 않으며 단자구 형태가 된다. 이때 자화반전은 coherent rotation에 의해 일어나며 자구의 핵생성이 내부에서 일어나 edge로 향한다. 이는 rectangular 형상을 가진 cell에서 자구의 핵생성이 edge에서 일어나 내부로 향하는 것과 대비된다.

자화반전이 일어나는 자기장(switching threshold)은 cell의 형상이 rectangular, tapered, elliptical로 감에 따라 증가한다[30]. 자기 메모리 소자에서 가장 중요한 문제 중의 하나가 낮은 자기장 (전류)에서 자화를 반전시키는 것임을 생각할 때, end domain이 존재하는 rectangular 형상의 cell이 일견 바람직할 것으로 생각되기도 한다. 그러나 end domain이 존재하게 되면 이미 언급한 바와 같이 MR비가 낮아질 뿐만 아니라 자화가 반전되는 자기장의 크기가 불규칙하기 때문에 바람직하지 못하다[30]. 그러나 tapered 및 elliptical 형상을 가진 cell은 자화반전이 큰 자기장에서 일어나지만 자화가 반전되는 자기장은 일정하다[30].

여기서 한가지 지적할 것은 비록 cell이 rectangular 모양이라 하더라도 aspect ratio가 크면 end domain의 상대적 기여가 크게 감소하기 때문에 단자구 거동과 유사해진다라는 점이다. 실제로 pseudo spin-valve에서 aspect ratio가 10이고, cell의 폭이 0.7 μm 이하가 되면 V-H (또는 R-H) 곡선이 각형을 보이는데[2], 이는 cell이 준 단자구 상태이며 자화반전이 flip에 의해 일어나는 것을 의미한다. 또한 자화반전이 coherent하게 일어나기 때문에 MR 비가 큰데, 2 nm 두께를 가진 Cu층으로 구성된 spin-valve에서 7%의 MR 비가 얻어졌다[2]. 이는 통상적인 스핀밸브에서도 관찰되는데[29], 이에 대한 결과는 그림 12와 13에 나타내었다. 그림의 자기저항 곡선으로부터 aspect ratio가 작은 경우 자기저항의 크기가 감소하는데, 이는 미소자기계산에 의한 자기배열에 의해서 매우 잘 설명된다. 즉, 저 저항 잔류자속밀도 상태에서의 자기배열을 비교해보면 aspect ratio가 작은 경우(그림 12) end domain의

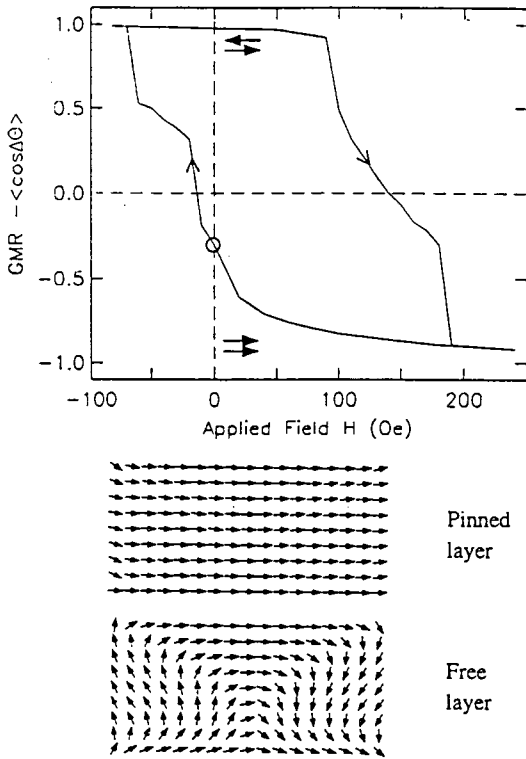


그림 12. 크기가 $1.0\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$ (aspect ratio 2)인 스핀밸브의 자기저항 곡선과 저 저항 잔류자속밀도 상태(그림에서 원으로 표시한 부분)에서의 자기배열.

기여가 커서 고정층과 자유층 사이의 스핀이 평행한 부분이 매우 작으나, aspect ratio가 큰 경우는(그림 13) 대부분의 영역에서 고정층과 자유층의 자화가 평행하며 따라서 낮은 저항을 보이게 된다.

지금까지 언급한 박막의 기하학적인 형상이 자화반전에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 대부분 단층막 이거나 GMR spin-valve에 대한 것이다. 그러나 기본 원리는 유사하기 때문에 이러한 연구 결과는 TMR 소자에서도 그대로 적용될 것이다. 실제로 아주 최근 TMR 소자에 대하여 연구한 결과는 이러한 사실을 잘 뒷받침한다. Parkin 등은 aspect ratio를 2로 일정하게 한 상태에서 소자의 크기를 $0.4\ \mu\text{m} \times 0.8\ \mu\text{m}$ 에서 $8\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$ 으로 변화시켜 가면서 R-H 곡선의 변화를 조사하였으며, 이에 대한 결과를 그림 14에 나타내었다[7]. 자유층의 보자력은 자기 반자계에 의한 형상이방성 때문에 cell의 크기가 감소할수록 증가하였는데, 보다 자세한 분석에 의하면 보자력은 cell의 크기에 반비례하는 것으로 관찰되었다. 이는 단층막과 spin-valve에서 얻어진 결과와 일치한다.

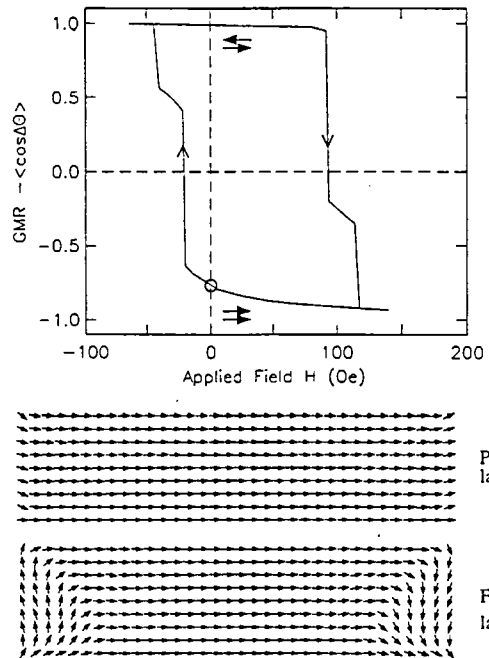


그림 13. 크기가 $2.0\ \mu\text{m} \times 0.5\ \mu\text{m}$ (aspect ratio 4)인 스핀밸브의 자기저항 곡선과 저 저항 잔류자속밀도 상태(그림에서 원으로 표시한 부분)에서의 자기배열.

V. 요약 및 결론

자기 메모리용 TMR 소자에 대한 그동안의 연구는 큰 성과를 거둔 것으로 생각된다. 가장 중요한 특성 중의 하나인 MR 비는 상온에서 40% 이상 달성되었으며, 또한 넓은 범위에서 비저항을 제어하는 것이 가능하게 되었다.

이러한 결과는 다층막 제조기술의 향상에 기인하는데, 특히 2 자성막 사이에 있는 산화막의 두께, 계면 및 산화막 자체의 특성을 정확하게 제어하는 기술의 확보에 기인한다. 높은 MR 비는 메모리 소자의 속도 및 밀도를 높이는 매우 중요한 요인이 되며, 저항비를 넓은 범위에서 제어하는 것이 가능한 것은 메모리 소자를 설계하는데 큰 freedom을 줄 것이다. TMR 소자 자체의 특성뿐만 아니라 많은 수의 접합체 및 넓은 웨이퍼에서 균일한 자기적 특성들(구체적으로 MR 비 및 비저항)을 달성하는 기술이 확보되었는데, 이는 TMRAM의 실용화에 큰 기여를 할 것이다.

이러한 진전에도 불구하고 아직도 해결해야 할 문제들이 많이 남아 있는데, TMR 소자와 관련하여 가장 중요한 것은 자화반전과 관련된 문제로 생각된다. TMRAM이 다른 메모리와 경쟁하기 위해서는 TMR 소자의 크기가

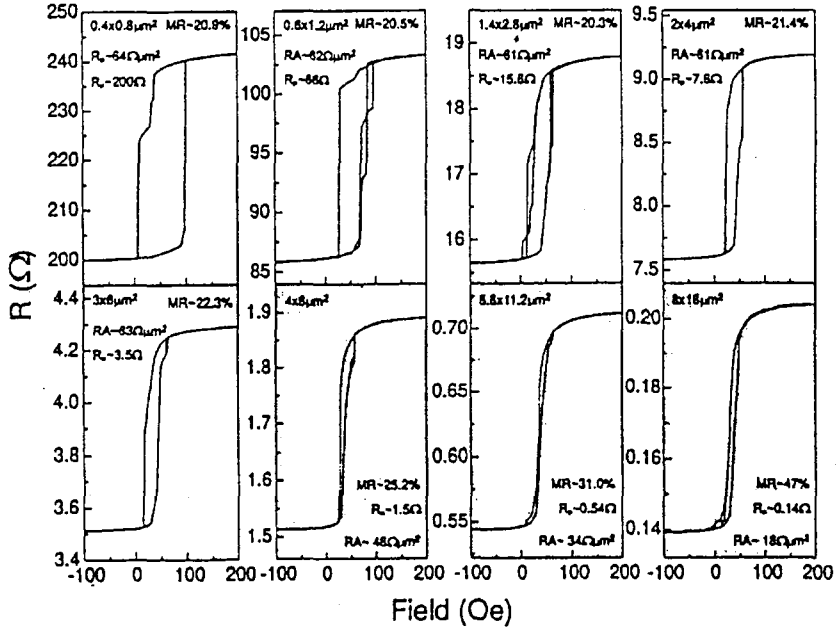


그림 14. 동일한 TMR 다층막에서 cell의 크기 따른 자기저항 곡선의 변화. 다층막의 구조는 Ta 5 nm/Al 25 nm/60Py 4 nm/Mn₅₄Fe₄₆ 10 nm/Co 4 nm/Ru 3 nm/Co 3 nm/Al₂O₃ 0.7 nm/ 60Py 7.5/Al 25 nm/Ta 7.5 nm임. 3개의 가장 큰 cell의 경우 접합을 통한 전류의 흐름이 일정하지 않기 때문에 저항은 임의로 줄였으며 비저항은 임의로 증가시켰음.

submicron 영역이어야 하는데, 이 영역에서 TMR 소자의 자화를 반전시키는데는 매우 큰 자기장이 필요하다. 이미 언급한 바와 같이 TMRAM의 작동시 자유층에서만 자화 반전이 일어나는데, 이 층의 자화반전을 이해하기 위해서는 자유층의 보자력과 bias 자기장에 대한 이해가 필요하다. 웨이퍼 수준의 시료에서 자유층의 보자력 및 bias 자기장은 모두 10 Oe 정도로서 크지 않다. 보자력은 통상 일축 유도자기이방성에 의한 것이며, bias 자기장은 자유층과 고정층 사이의 Neel orange peel coupling이라고 불리는 교환상호작용 때문이다(이는 대부분 강자성 교환 결합을 하고 있다.). 보자력과 bias 자기장이 자화반전에 필요한 자기장과 어떤 관계를 가지는지를 이해하기 위하여 보자력과 bias 자기장 모두 10 Oe이라고 가정해 보기로 하자. 또한 외부 자기장이 x 방향으로 인가되고 고정층의 자화 방향이 -x 라고 가정해 보자. 자유층의 자화를 -x 에서 (이 경우 2개의 자성층이 평행임) +x 방향으로의 자화반전은 2 자성층 사이의 강자성 교환 결합 때문에 +20 Oe에서 일어날 것이며, 반대로 +x에서 -x 방향으로의 자화반전은 0 Oe에서 일어날 것이다. 그러나 submicron 영역에서의 자화반전은 자기 반자계에 의한 보자력 및 층간 정자기 상호 작용에 의한 bias 자기장의 급격한 증가에 의

하여 웨이퍼 시료에서 관찰되는 “고유” 특성과는 매우 다르다. 보자력 및 bias 자기장의 크기는 정자기에너지에 영향을 미치는 인자들(예를 들면 자성막의 크기, 두께, aspect ratio 및 포화 자화)에 크게 의존하는데, Zheng과 Zhu가 통상의 pseudo-spin valve에 대하여 연구한 결과에 의하면 1.0 μm×0.25 μm의 자성막에서 보자력과 bias 자기장 모두 100 Oe 정도인 것으로 보고한 바가 있다[29]. 이는 자화반전에 요구되는 자기장의 크기가 200 Oe 정도는 되어야 하며, 통상의 pseudo spin-valve에서 15 Oe/mA임을 감안하면 13 mA 이상의 매우 큰 전류가 필요하다는 것을 의미한다. 여기서 한가지 언급할 사항은 패턴된 TMR 소자에서 고유 특성과는 달리 2개의 자성층이 반평행 상태에서 평행 상태로 자화반전되는데 필요한 자기장이 그 반대의 경우보다 크다는 점이다. 이는 자화가 반평행 상태일 때의 정자기에너지가 반대의 경우보다 훨씬 작기 때문이다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 물론 보자력과 bias 자기장을 줄이는 것이 필요하다. 가장 간단한 방법은 포화 자화가 작은 합금을 개발하는 것인데, 합금의 조성은 MR 비를 포함한 자기적 성질에 매우 민감하다는 점에 주의해야 할 것이다. 비록 MR 비가 작더라도 자성막의 포화 자

화가 기존의 재료보다 매우 작은 합금이 개발된다면 보자력과 bias 자기장을 동시에 크게 줄이게 될 것이다. 보자력을 줄이기 위한 하나의 현실적인 방안으로는 자성막의 두께를 줄이고 aspect ratio를 감소시키는 것을 들 수 있을 것이다. 그러나 자성막 두께는 자기적 성질에 영향을 미친다는 점이 고려되어야 할 것이며, aspect ratio를 감소시키는 것은 자화반전이 incoherent rotation에 의해 일어날 가능성이 증가하여 MR 비를 크게 감소시키며 또한 자화반전이 일어나는 자기장의 크기가 일정하지 않은 문제가 발생한다. 자성막의 모양(rectangular, tapered 및 elliptical 모양)에 따른 연구에서 rectangular 모양을 가진 자성막의 자화는 end domain의 존재에 의해 incoherent하게 일어나며 따라서 보자력이 작다. 그럼에도 불구하고 rectangular 모양이 바람직하지 않다고 생각하는 것은 자화반전이 일어나는 자기장의 크기가 일정하지 않기 때문이다. 그러나 자화반전 문제가 TMRAM에 가장 심각한 문제가 된다면 이러한 방향으로의 문제 해결도 완전히 배제할 수는 없을 것이다. 이 경우 MR 비의 감소를 최소화하는 것과 보자력의 크기를 일정하게 하기 위한 방안이 강구되어야 할 것이다. Bias 자기장을 줄이기 위해서는 고정층이 자유층에 미치는 dipole 상호작용을 최소화해야 하는데, 이미 사용 중인 synthetic AF 층은 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 노력이다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Daughton, Thin Solid Films, **216**, 162(1992).
- [2] S. Tehrani, E. Chen, M. Durlam, M. DeHerrera, J. M. Slaughter, J. Shi and G. Kerszykowski, J. Appl. Phys., **85**, 5822(1999).
- [3] D. D. Tang, P. K. Wang, V. S. Speriosu, S. Le and K. K. Kung, IEEE Trans. Magn., **31**, 3206(1995).
- [4] B. A. Everitt, A. V. Pohm, R. S. Beech, A. Fink and J. M. Daughton, IEEE Trans. Magn., **34**, 1060(1998).
- [5] J. S. Moodera, L. R. Kinder, T. M. Wong and R. Meservey, Phys. Rev. Lett., **74**, 3273(1995).
- [6] T. Miyazaki and N. Tezuka, J. Magn. Magn. Mater., **139**, L231(1995).
- [7] S. S. P. Parkin, K. P. Roche, M. G. Samant, P. M. Rice, R. B. Beyers, R. E. Scheuerlein, E. J. O'Sullivan, S. L. Brown, J. Bucchigano, D. W. Abraham, Yu Lu, M. Rooks, P. L. Trouilloud, R. A. Wanner and W. J. Gallagher, J. Appl. Phys., **85**, 5828(1999).
- [8] S. S. P. Parkin, Paper No. GA-03, Abstracts of the 43rd Annual Conf. on Magn. Magn. Mater., 9-12 November 1998, Miami, Florida, USA.
- [9] S. Gider, B.-U. Runge, A. C. Marley and S. S. P. Parkin, Science, **281**, 797(1998).
- [10] S. Tehrani, J. M. Slaughter, E. Chen, M. Durlam, J. Shi and M. DeHerrera, IEEE Trans. Magn., **35**, 2814(1999).
- [11] R. W. Cross, Y. Kim, J. O. Oti and S. E. Russek, Appl. Phys. Lett., **69**, 3935(1996).
- [12] J. O. Oti, R. W. Cross, S. E. Russek and Y. K. Kim, J. Appl. Phys., **79**, 6386(1996).
- [13] S. H. Lim, K. H. Shin, K. Y. Kim, S. H. Han and H. J. Kim, J. Magnetism, **5**, 19(2000).
- [14] S. H. Lim, S. H. Han, K. H. Shin and H. J. Kim, (Unpublished Results).
- [15] Y. Zheng and J. -G. Zhu, J. Appl. Phys., **85**, 4776 (1999).
- [16] J.-G. Zhu, Ph. D. Thesis, "Interactive Phenomena in Magnetic Thin Films," University of California, San Diego, 1989.
- [17] A. V. Pohm, J. M. Anderson, R. S. Beech and J. M. Daughton, **85**, 4771(1999).
- [18] T.-N. Fang and J.-G. Zhu, IEEE Trans. Magn., **35**, 2835 (1999).
- [19] S. Tehrani, E. Chen, M. Durlam, J. M. Slaughter and J. Shi, Paper No. GA-02, Abstracts of the 43rd Annual Conf. on Magn. Magn. Mater., 9-12 November 1998, Miami, Florida, USA.
- [20] IBM home page <http://www.almaden.ibm.com/st/projects/magneto/mram>.
- [21] J. L. Leal and M. H. Kryder, J. Appl. Phys., **83**, 3720 (1998).
- [22] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, Philos. Trans. Trans. Royal Soc. London, Ser A **240**, 599(1948).
- [23] Yu Lu, P. L. Trouilloud, D. W. Abraham, R. Koch, J. Slonczewski, S. Brown, J. Bucchigano, E. O'Sullivan, R. A. Wanner, W. J. Gallagher and S. S. P. Parkin, J. Appl. Phys., **85**, 5267(1999).
- [24] K. Matsuyama, H. Asada, Y. Hosokawa and K. Taniguchi, IEEE Trans. Magn., **34**, 1072(1998).
- [25] K. Matsuyama, H. Hosokawa and Y. Nozaki, IEEE Trans. Magn., **35**, 2826(1999).
- [26] J. Shi, T. Zhu, M. Durlam, E. Chen, S. Tehrani, Y. F. Zheng and J.-G. Zhu, IEEE Trans. Magn., **34**, 997 (1998).
- [27] T. Zhu, J. Shi, K. Nordquist, S. Tehrani, M. Durlam, E. Chen and H. Goronkin, IEEE Trans. Magn., **33**, 3601(1997).
- [28] S. E. Russek, J. O. Oti and Y. K. Kim, J. Magn. Magn. Mater., **198-199**, 6(1999).
- [29] Y. Zheng and J.-G. Zhu, IEEE Trans. Magn., **32**, 4237(1996).
- [30] J. Gadbois, J. -G. Zhu, W. Vavra and A. Hurst, IEEE Trans. Magn., **34**, 1066(1998).
- [31] J.-G. Zhu and Y. Zheng, IEEE Trans. Magn., **34**, 1063(1998).