

## NiFe/Co/Cu/Co 스핀밸브 자기저항 메모리 셀에서 형상자기이방성이 메모리 특성에 미치는 영향

김형준 · 조권구 · 주승기

서울대학교 공과대학 재료공학부  
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1, 151-742  
서울대학교 신소재공동연구소 전자재료실험실

(1999년 10월 18일 받음, 1999년 11월 27일 최종수정본 받음)

보자력의 차이를 나타내는 NiFe(60Å)/Co(5Å), Co(30Å) 두 자성층으로 구성된 NiFe(60Å)/Co(5Å)/Cu(40~60Å)/Co(30Å) 스핀밸브 박막을 일반적인 사진식각 공정을 사용하여  $\mu\text{m}$  크기의 자기저항 메모리 셀로 패터닝하고, 형상자기이방성이 자기저항 메모리 셀의 스위칭 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 자기저항 메모리 셀의 출력 및 스위칭 특성은 셀의 크기에 따라 1 mA의 일정한 전류와 30 Oe 이내의 스위칭 자장에서 수 ~ 수십 mV의 출력 전압을 나타내었다. 특히, NiFe/Co/Cu/Co 스핀밸브 박막의 증착시 기판에 의해 유도된 결정성에 의한 일축자기이방성과 스핀밸브 박막을 직사각형 형태의 셀로 패터닝할 때 부가되는 형상자기이방성의 크기 및 방향을 적절히 조절함으로써, 메모리 셀을 구성하는 NiFe/Co 층의 스위칭 자장을 약 1/3로 감소시킬 수 있었으며, 이는 자기저항 메모리 셀의 크기가 서브마이크론 범위로 감소될 때 발생하는 스위칭 자장의 증가 문제를 해결하는 데 도움이 될 것으로 사료된다.

### I. 서 론

최근 비휘발성 메모리 소자에 대한 산업적 요구가 커짐에 따라, 자기저항 현상을 이용한 비휘발성 자기저항 메모리 소자에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다[1-3]. 자기저항 현상을 이용한 비휘발성 메모리 소자는 비휘발성, NDRO(Non-Destructive Read Out), no wear out, radiation hardness, 간단한 구조와 기존의 Si 기술을 사용할 수 있다는 면에서 주목을 받고 있으며, 특히 radiation hardness의 장점은 군사적인 용도 및 우주항공 분야에서의 응용에서 중요한 역할을 하고 있다. 최근 Toshiba에서는 자기저항 현상을 이용한 비휘발성 메모리 기본 소자를 시험 제작하여 일본응용자기학회에 발표하였으며[4], 이외에도 미국의 IBM, Motorola, 유럽의 지멘스, 필립스 등에서도 개발을 추진하고 있다. 이와 같이 자기저항 현상을 이용한 비휘발성 메모리 소자의 개발 및 연구는 최근 들어 거대자기저항 스핀밸브 박막을 이용한 메모리 소자와 터널링 자기저항을 나타내는 터널접합 박막을 이용한 소자의 개발로 구분되어 진행되고 있다. 터널링 자기저항을 나타내는 터널접합 박막을 이용한 메모리 소자의 경우 자기저항비의 측면에서 우수하나, 절연층의 안정적인 제조와 지속적인 특성 유지의 문제가 남아 있고 신호 대 잡음비가 스핀밸브 박막을 이용한 자기저항 메모리 소자에 비해 낮은 것으로 알려져 있다[5]. 반면 스핀밸브

박막을 이용한 자기저항 메모리 소자의 경우 소자의 신호 대 잡음비가 터널 접합을 이용한 메모리 소자보다 우수하며 소자의 제작이 용이한 장점이 있다.

거대자기저항 스핀밸브 박막을 이용한 비휘발성 메모리 소자가 기존의 비휘발성 메모리 소자와 경쟁하기 위해서는 증착된 박막의 자기저항 특성뿐만 아니라 박막을 패터닝하여 제작한 메모리 셀의 자기저항 특성이 매우 중요하며, 이는 메모리 특성과 직접 관련된 특성이다. 현재 보고된 바에 의하면, 메모리 셀의 형상 및 구조에 의해 셀의 자기저항 특성이 심각하게 변화하며, 메모리 셀의 패터닝 크기가 서브마이크론 수준으로 감소함에 따라, 셀을 구성하는 자성층의 스위칭 자장이 크게 증가하여 메모리 셀에 저장된 정보를 읽고 쓰기 위한 자장이 증가하는 것으로 알려져 있다[3,6]. 메모리 셀의 패터닝 전에는 자성층의 스위칭 자장에 미치는 요인으로서 자성층 내의 일축자기이방성과 자성층 간의 결합력 등이 있을 수 있으나, 패터닝 후에는 형상 자기이방성 및 정자기 결합력, 반자장(demagnetizing field) 등의 요인이 부가되어 스위칭 자장의 증가가 유발되는 것으로 보고되고 있으며, 이는 메모리 셀에 저장된 정보를 읽고 쓰기 위해 더욱 큰 전류가 소자에 인가되어야 함을 나타낸다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로 크기의 스핀밸브 자기저항 메모리 셀을 일반적인 사진식각 공정에 의해 제작하여, 패터닝된 셀의 크기에 따른 형상자기이방성의 방향과 크기를 적절히 조절함으로써 메모리 셀을 구

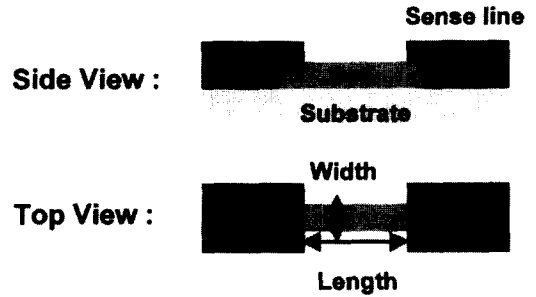
성하는 자성층의 스위칭 자장 증가 문제를 해결하고자 하였다.

### II. 실험 방법

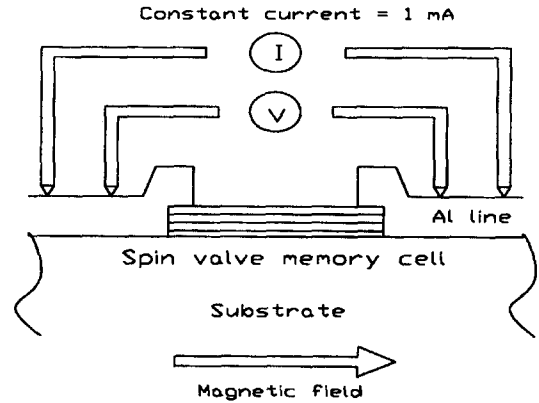
고주파 마그네트론 스퍼터링 방법에 의해 4° tilt-cut Si(111) 기판과 50 Å 두께의 Cu 바닥층 위에 NiFe(60Å)/Co(5Å)/Cu(40~60Å)/Co(30Å) 스핀밸브 박막을 형성하였다. 4° tilt-cut Si(111) 기판은 회석된 불산 용액을 사용하여 증착전 기판 표면의 자연산화막을 제거하였고, 증착도중 외부 자장은 인가하지 않았다. 스퍼터링시 초기 진공은  $1 \times 10^{-6}$  Torr 이하로 유지하였고, 아르곤을 이용하여 스퍼터링 압력은 3 mTorr로 고정하였다. 이미 보고된 바와 같이[7], 4° tilt-cut Si(111) 기판과 Cu 바닥층은 스핀밸브 박막 내에 우선배향성을 통한 일축자기이방성의 유도에 효과적이므로, 증착시 외부 자장의 인가 없이 기판과 바닥층을 이용하여 자기저항 메모리 셀을 구성하는 스핀밸브 박막 내에 일축자기이방성을 유도하였고, 형성된 스핀밸브 박막의 거대자기저항 특성은 상온에서 4 탐침법에 의해 행하였다. 위에 기술한 방법에 의해 형성된 스핀밸브 박막을 반도체 소자 제작 공정에 사용되는 일반적인 사진식각 방법에 의해  $\mu\text{m}$  수준의 직사각형 형태의 자기저항 메모리 셀로 패터닝하였으며, 메모리 셀의 제작에 관련된 사진식각 공정은 Table I에 간단히 요약하고, 제작된 메모리 셀의 간략한 그림을 그림 1에 나타내었다. 패터닝된 메모리 셀의 폭 : 길이의 비율은 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3, 1 : 5, 1 : 10으로 변화시켰으며, 길이의 크기는 5  $\mu\text{m}$ 에서 50  $\mu\text{m}$ 까지 변화시켰다. 약 2000 Å 정도 두께의 Al을 열기화증착법으로 증착하여 메모리 셀의 sense line 및 패드(pad)로 사용하였으며, 패터닝된 셀의 출력 및 메모리 특성은 그림 2에 나타낸 바와 같이, probe station 내의 현미경과 미세한 팁을 이용하여, 상온에서 1 mA의 일정한 전류를 인가하며 전자석에 의해 발생하는 외부 자장에 따른 메모리 셀의 전압 변화를 측정하였다.

**Table I.** Optical lithography process conditions for the fabrication of MRAM cells.

Spin Coating : Negative PR (~1 $\mu\text{m}$ ) deposition
Soft Baking : 95°C, 30 min.
U.V. exposure & Developing
Hard Baking : 115°C, 30 min.
Etching : HNO <sub>3</sub>
Stripping



**Fig. 1.** Schematic diagram of spin valve MRAM cells fabricated in this work.



**Fig. 2.** Schematic diagram of measurement configuration of the patterned MRAM cells.

### III. 실험 결과 및 고찰

그림 3(a)는 자기저항 메모리 셀의 제작을 위해 Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut) 위에 형성된 NiFe(60Å)/Co(5Å)/Cu(60Å)/Co(30Å) 스핀밸브 박막의 전형적인 M-H 및 R-H 곡선을 나타낸다. 이미 보고된 바와 같이[7], NiFe(60Å)/Co(5Å) 층과 Co(30Å) 층은 기판과 바닥층에 의해 일축자기이방성을 나타내었으며, 특히 각 층의 자화 용이축은 같은 방향으로 정렬되어 그림 3(a)에 보이는 바와 같이 매우 각형성(squareness)이 우수한 곡선이 관찰되었다. 스핀밸브 박막의 M-H 곡선에서 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층이 약 25 Oe에서 자화반전을 함에 따라 R-H 곡선에서의 자기저항비는 증가하고 있고, 약 150 Oe에서 Co(30Å) 층이 자화반전을 함에 따라 자기저항비는 감소하여, NiFe(60Å)/Co(5Å)/Cu(60Å)/Co(30Å) 스핀밸브 박막의 M-H 및 R-H 곡선은 상호 잘 일치하는 특성을 보이고 있으며, 이는 자기저항 메모리 소자로의 응용에 유리한 특성이라고 판단된다. 이와 같은 거대자기저항 특성을 나타내

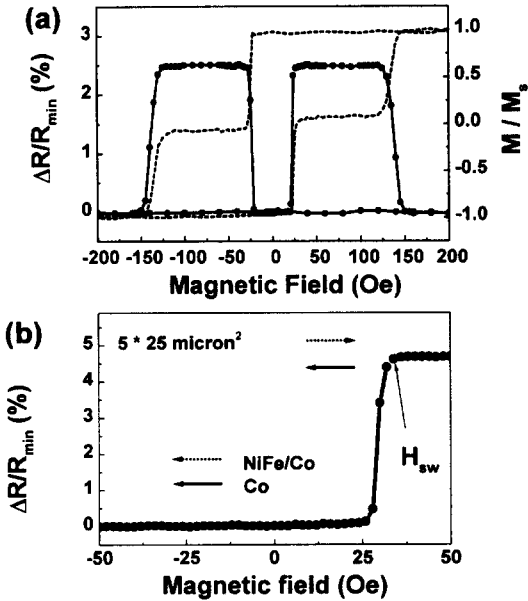


Fig. 3. Typical (a) M-H and R-H curves of NiFe(60 Å)/Co(5 Å)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) spin valve sheet films and (b) switching characteristics of the patterned MRAM cells.

는 스핀밸브 박막을 이용하여 그림 1의 형태로 제작한 자기저항 메모리 셀은 가로 및 폭의 크기에 따라 1 mA의 일정한 전류에서 수 ~ 수십 mV의 출력 전압을 나타내었고, 그림 3(b)에 보이는 바와 같이, 스핀밸브 박막을 구성하는 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 자화 방향이 Co(30Å) 층의 자화 방향과 평행 상태에서 반평행 상태로 전이하는 자장으로 정의된 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 스위칭 자장이 약 30 Oe 이내로 관찰되었다.

그림 4는 이와 같은 자기저항 메모리 셀의 스위칭 자장을 감소시키기 위해 제안된 메모리 셀의 패턴 형태를 나

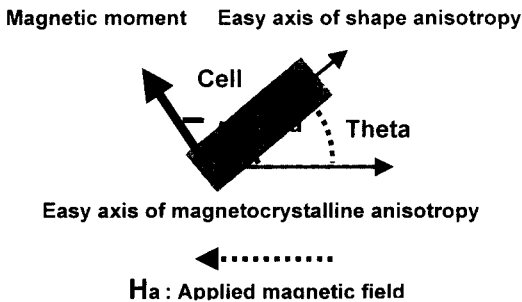


Fig. 4. Schematic diagram of the patterned cell alignment with respect to the easy axis of magnetocrystalline uniaxial anisotropy.

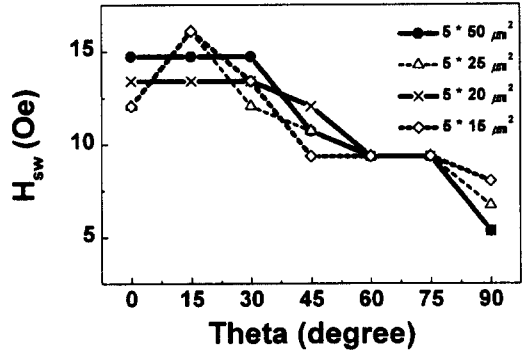


Fig. 5. Variation of switching threshold of soft NiFe(60 Å)/Co(5 Å) layer consisting of spin valve MRAM cells with respect to  $\theta$ .

타낸다. 스핀밸브 박막을 이용하여 자기저항 메모리 셀을 패턴할 때, 셀의 길이 방향을 스핀밸브 박막이 나타내는 결정자기이방성에 의한 일축자기이방성의 자화용이축과  $\theta$ 를 이루도록 정렬시키면, 메모리 셀이 나타내는 형상자기이방성의 자화용이축과 결정자기이방성의 자화용이축은  $\theta$ 를 이루게 된다. 이 때 외부 자장은 결정자기이방성의 자화용이축과 평행하게 인가하면서 메모리 셀의 스위칭 특성 및 출력 특성을 측정하였고, 다양한 크기의 셀에서 NiFe(60Å)/Co(5Å)의 스위칭 자장에 미치는  $\theta$ 의 효과를 그림 5에 나타내었다.

5  $\mu\text{m}$ 의 일정한 폭으로 패턴된 자기저항 메모리 셀에서  $\theta$ 가 0°에서 90°로 증가함에 따라 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 스위칭 자장은 약 15 Oe에서 5 Oe로 약 1/3 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 형상자기이방성과 결정자기이방성의 자화용이축이 같은 방향으로 정렬된  $\theta=0^\circ$ 인 경우와 상호 직각을 이루는  $\theta=90^\circ$ 인 경우, 일정한 폭으로 패턴된 메모리 셀의 길이의 크기가 15  $\mu\text{m}$ 에서 50  $\mu\text{m}$ 으로 증가함에 따라 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 스위칭 자장은 각각 다소 증가하는 경향과 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 일정한 폭의 메모리 셀에서 길이의 길이가 증가함에 따라  $\theta$ 의 증가에 의한 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 스위칭 자장의 감소 효과가 증대되는 것을 나타내는 것으로 생각된다.

그림 6은 5  $\mu\text{m}$ 의 폭과 50  $\mu\text{m}$ 의 길이로 패턴된 자기저항 메모리 셀의 스위칭 특성과 출력 특성을 나타낸다. 그림 5에서 기술한 바와 같이,  $\theta$ 가 0°에서 90°로 증가함에 따라, NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 스위칭 자장은 감소하는 경향을 보여주고 있다.  $\theta$ 의 크기에 상관없이, 메모리 셀의 출력 전압은 약 15 mV로 관찰되었으며 이는 본 연

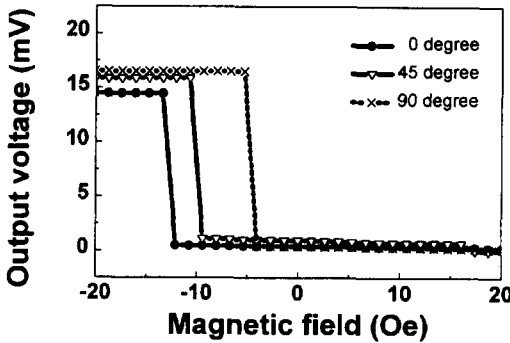


Fig. 6. Switching characteristics of soft NiFe(60 Å)/Co(5 Å) layer consisting of  $5 \times 50 \mu\text{m}^2$  spin valve MRAM cells with respect to  $\theta$ .

구에서 제안된 메모리 셀의 패턴 형태가 출력 전압의 저하 없이 셀의 스위칭 자장의 감소에 효과적임을 나타내는 것으로 사료된다.

이와 같이  $\theta$ 의 증가에 따라, 스핀밸브 메모리 셀을 구성하는 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 스위칭 자장의 감소 효과를 이해하기 위해 다음의 요소들을 고려하였다. 본 연구에서 제작된 자기저항 메모리 셀을 구성하는 NiFe(60Å)/Co(5Å) 자성층의 자기이방성이 형상자기이방성과 결정자기이방성의 두 가지 자기이방성 요소로 구성되어 있고 메모리 셀을 구성하는 두 자성층 간의 결합력을 무시하면, 외부 자장 내에서 NiFe(60Å)/Co(5Å) 자성층의 자기이방성 에너지는 다음과 같이 간략히 표현할 수 있다.

$$E_{total} = E_{mc} + E_s \quad (1)$$

NiFe(60Å)/Co(5Å) 자성층이 단자구조로 구성되어 있음을 가정하고, 형상 및 결정자기이방성 요소가 일축자기이방성 특성을 나타내므로, (1) 식의 각 항은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_{mc} = K_{mc} \times \sin^2 \alpha, E_s = K_s \times \sin^2 (\alpha - \theta) \quad (2)$$

따라서, NiFe(60Å)/Co(5Å) 자성층의 자화 모멘트 (magnetic moment) 가 외부 자장 내 의해서 자화반전, 즉 그림 4에 나타난  $\alpha$ 가 0°에서 180°로 변화하는 과정 중의 전체 자기이방성 에너지는

$$E_{total} = K_{mc} \times \sin^2 \alpha + K_s \times \sin^2 (\alpha - \theta) \quad (3)$$

이 되고,  $\theta=0^\circ$ 와  $90^\circ$ 일 경우  $E_{total}$ 을 도시하면 그림 9와 같다.

NiFe(60Å)/Co(5Å) 층이  $M_s \sim 800 \text{ emu/cc}$ ,  $H_k \sim 50 \text{ Oe}$ ,

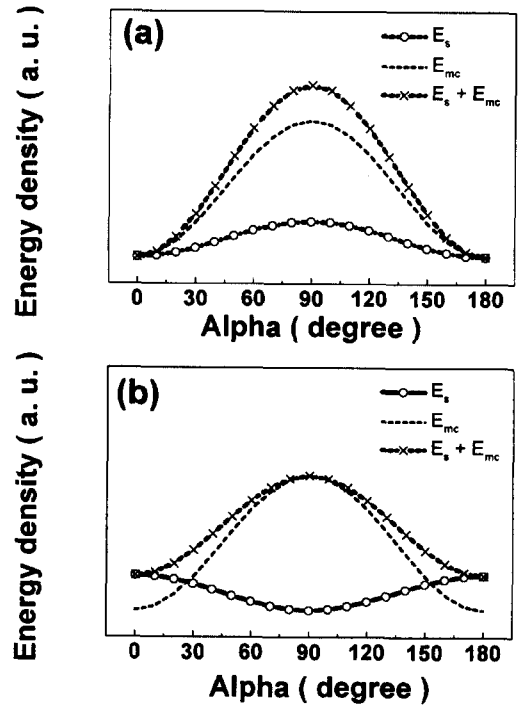


Fig. 7. Schematic illustration of shape and magnetocrystalline anisotropy energies of the spin valve MRAM cells with respect to  $\alpha$ . (a)  $\theta=0$  degree, (b)  $\theta=90$  degree.

$T=65 \text{ Å}$ 이고, 메모리 셀의 폭이 수 ~ 수십  $\mu\text{m}$ 이므로,  $K_{mc}$ 와  $K_s$ 는 다음 식에 의해 각각  $\sim 10^4 \text{ erg/cc}$ 과  $10^3 \sim 10^4 \text{ erg/cc}$ 로 근사할 수 있다[8-9].

$$K_{mc} = (M_s \times H_k) \div 2, K_s = 2\pi \times M_s^2 \times (T \div W) \quad (4)$$

따라서, 그림 7에서 보이는 바와 같이  $K_{mc}$ 와  $K_s$ 를 각각  $\sim 10^4 \text{ erg/cc}$ 과  $\sim 10^3$ 로 근사해서 도시할 경우, NiFe(60 Å)/Co(5 Å) 층이  $\alpha$ 가 0°에서 180°로 자화반전 과정 중에 극복해야할 에너지 장벽의 높이가 낮아짐을 알 수 있다. 이는 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 스위칭 자장이  $\theta$ 가 0°에서 90°로 증가함에 따라 감소하는 결과와 일치하는 것으로 사료되며, 자기저항 메모리 셀의 크기가 감소함에 따른 스위칭 자장과 사용 전력의 증가 문제를 해결하는 데 유용할 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

고주파 마그네트론 스퍼터링 방법에 의해 Si(111, 4° tilt-cut) 기판과 Cu(50Å) 바닥층을 사용하여 NiFe(60Å)/

Co(5Å)/Cu(40-60Å)/Co(30Å) 스핀밸브 박막을 형성한 후, 일반적인 사진식각 공정을 이용하여 마이크로 수준의 자기저항 메모리 셀을 패턴하여 셀의 출력 및 스위칭 특성을 고찰하였고, 메모리 셀의 크기가 감소함에 따른 스위칭 자장의 증가 문제를 해결하기 위해 셀의 형상자기이방성을 이용하여 새로운 방법을 제시하였다. 자기저항 메모리 셀은 1 mA의 일정한 전류에서 수 ~ 수십 mV의 출력 전압과 약 30 Oe 이하의 스위칭 자장을 나타내었으며, 메모리 셀의 형상자기이방성의 자화용이축이 스핀밸브 박막의 결정자기이방성의 자화용이축과 이루는 각이 커짐에 따라 메모리 셀을 구성하는 NiFe(60Å)/Co(5Å) 층의 스위칭 자장이 약 15 Oe에서 5 Oe로 감소함이 관찰되었다. 이는 자기저항 메모리 소자의 밀도가 증가함에 따른 정보의 쓰기 및 읽기에 요구되는 전류 및 전력 소비를 감소시킴으로써 자기저항 메모리 소자의 산업화에 도움이 될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 1999년도 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] K. K. Kung, D. D. Tang, and P. K. Wang, US patent, 5,343,422(1994).
- [2] J. M. Daughton, Thin Solid films, **216**, 162(1992).
- [3] B. A. Everitt, and A. V. Pohm, J. Vac. Sci. Technol. A., **16**(3), 1794(1998).
- [4] 전자신문 (1998년 9월 22일자).
- [5] J. M. Daughton, J. Appl. Phys., **81**(8), 3758(1997).
- [6] B. A. Everitt, and A. V. Pohm, IEEE Trans. Magn., **33**, 3289(1997).
- [7] H.-J. Kim, B.-I. Lee, and S.-K. Joo, IEEE Trans. on Magn., **34**(2), 558(1998).
- [8] B. D. Cullity, Introduction to magnetic materials, (1972).
- [9] E. Y. Chen, S. Tehrani, T. Zhu, M. Durlam, and H. Goronkin, J. Appl. Phys., **81**(8), 3992(1997).

## Effects of Shape Anisotropy on Memory Characteristics of NiFe/Co/Cu/Co Spin Valve Memory Cells

Hyeong-Jun Kim, Kwon-Ku Cho and Seung-Ki Joo

School of Materials Science and Engineering, Seoul Nat'l University  
San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-ku, Seoul, 151-742, Korea

(Received 18 October 1999, in final form 27 November 1999)

NiFe(60 Å)/Co(5 Å)/Cu(60 Å)/Co(30 Å) spin valve thin films were patterned into magnetoresistive random access memory (MRAM) cells by a conventional optical lithography process and their output and switching properties were characterized with respect to the cell size and geometry. When 1 mA of constant sense current was applied to the cells, a few or a few tens of mV of output voltage was measured within about 30 Oe of external magnetic field, which is an adequate output property for the commercializing of competitive MRAM devices. In order to resolve the problem of increase in the switching thresholds of magnetic layers with the downsizing of MRAM cells, a new approach using the controlled shape anisotropy was suggested and interpreted by a simple calculation of anisotropy energies of magnetic layers consisting of the cells. This concept gave a reduced switching threshold in NiFe(60 Å)/Co(5 Å) layer consisting of the patterned cells from about 15 Oe to 5 Oe and it was thought that this concept would be much helpful for the realization of competitive MRAM devices.