

## NiFeCo/Cu/Co 삼층막의 자기저항 메모리 특성에 관한 연구

김형준 · 이병일 · 주승기

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

(1997년 6월 3일 받음, 1997년 6월 20일 최종수정본 받음)

$Ni_{66}Fe_{16}Co_{18}$  /Cu/Co 삼층막을 4° tilt-cut Si(111) 기판과 Cu(50 Å) 바닥층 위에 형성하고, 사진식각 및 에칭 작업을 통해 자기저항 메모리 소자를 제작하여 자기저항 메모리 특성을 연구하였다. 외부 자장의 인가 없이 증착한 NiFeCo/Cu/Co 삼층막은 4° tilt-cut Si(111) 기판과 Cu(50 Å) 바닥층의 영향으로 면내 일축자기이방성을 형성하였으며, 낮은 자장 내에서 높은 자기저항비와 자기저항민감도 등 자기저항 메모리 소자에 응용이 가능한 우수한 자기저항 특성을 나타내었다. NiFeCo/Cu/Co 삼층막의 Cu 사잇층 두께 변화에 따라 삼층막을 이루는 두 자성층 간에 강자성 및 반강자성 결합력이 관찰되었으며, 결합력은 사잇층 두께에 민감하게 변화하여 NiFeCo/Cu/Co 삼층막의 메모리 특성에 영향을 끼쳤다. 사잇층 두께의 변화에 대해 최적화된 [NiFeCo(60 Å) /Cu(25 Å) /Co(30 Å)] /Cu(50 Å) /Si(111, 4° tilt-cut) 스핀밸브 삼층막을 이용하여 거시적 자기저항 메모리 소자를 제작하고, 시험 소자의 메모리 동작에 대해 관찰하였다. Sense 전류는 10 mA로 고정하고, 약  $5 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>의 word 전류를 가해 약 10 mV의 출력 전압을 시험 소자에서 얻었으며, NiFeCo/Cu/Co 스핀밸브 삼층막의 자기저항 메모리 소자에의 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

### I. 서 론

최근 스핀밸브 구조의 거대자기저항 재료는 자기저항 헤드 뿐만 아니라 자기저항 메모리 소자로 응용을 위해 활발히 연구가 진행되고 있다[1, 2, 3]. 자기저항 메모리 소자는 전원을 꺼도 기억된 정보가 지워지지 않는 비휘발성 및 기억된 정보를 읽을 때 정보의 손상이 없는 NDRO (Non-Destructive Read Out) 특성을 나타내며, 수 nano 초 수준의 빠른 셀 스위칭 속도를 통해 빠른 읽기와 쓰기 기능이 가능하다. 또한, 기존의 4~6개의 트랜지스터를 사용하는 SRAM 이나 1개의 트랜지스터와 1개의 축전기로 이루어진 DRAM 메모리 소자에 비해 매우 간단한 구조로 구성되는 장점이 있다[4].

스핀밸브 재료가 우수한 특성을 나타내는 자기저항 메모리 소자에 응용되기 위해서는 강한 일축자기이방성과 작은 자장 내에서 큰 자기저항 효과의 재료적 요건을 만족해야 한다. 이미 주 승기 등은 증착 중 외부 자장의 인가 없이 4° tilt-cut Si(111) 기판과 Cu(50 Å) 바닥층 위에 NiFeCo, Co 및 NiFe 등의 자성층을 증착하면 자성층 내에 일축자기이방성이 유도됨과 동일한 기판과 바닥층 위에서 NiFeCo/Cu/Co 삼층막은 자기저항 메모리 소자에 적용 가능한 자기저항 특성을 보임을 보고한 바 있다 [5, 6].

본 연구에서는 이미 4° tilt-cut Si(111) 기판과 Cu(50

Å) 바닥층 위에서 자기저항 메모리 소자에 응용 가능한 특성을 보인 NiFeCo/Cu/Co 삼층막에서 Cu 사잇층 두께의 변화에 따른 자기저항 특성의 변화를 분석하고, 사잇층 두께에 대해 최적화된 NiFeCo/Cu/Co 삼층막을 이용하여 거시적 자기저항 메모리 소자를 제작함으로써 NiFeCo/Cu/Co 삼층막의 실제 자기저항 메모리 소자로서 응용 가능성을 살펴보고자 하였다.

### II. 실험 방법

4° tilt-cut Si(111) 기판과 Cu(50 Å) 바닥층 위에  $Ni_{66}Fe_{16}Co_{18}$  /Cu/Co 스핀밸브 삼층막을 3-gun 고주파 마그네트론 스퍼터링 방법에 의해 증착하였다. 증착 중 외부 자장은 인가하지 않았으며, 희석된 불산을 이용하여 Si 기판의 표면 산화막을 제거하였다. 증착 전 기초 진공도는  $1 \times 10^{-6}$  Torr 이하로 유지하였고, 아르곤 스퍼터링 압력은 3 mTorr 로 고정하였다. 증착된 막의 자기저항 및 자기적 특성은 DMS 880 시편진동자력계와 4 탐침법을 이용하여 상온에서 측정하였다.

NiFeCo(60 Å) /Cu(25 Å) /Co(30 Å) 삼층막을 이용하여 실제 시험 소자를 제작하였으며, 시험 소자의 단면을 Fig. 1에 나타내었다. 사진식각 및 에칭 작업을 통해  $2 \times 2$  mm<sup>2</sup> 크기의 셀을 정의하였고, 약 1000 Å 두께의 Al 을 이용하여 각각 3 mm, 0.5 mm 폭의 sense line

과 word line 을 구성하였다. 이 때, sense line 은 셀의 자화용이축 방향으로, word line 은 셀의 자화곤란축 방향으로 형성하여 두 line 을 면내에서 상호 수직으로 정렬하였다. 두 line 을 전기적으로 절연하기 위해 1.1  $\mu\text{m}$  두께의 감광막을 사용하였다. 제작된 시험 소자에 10 mA 의 sense 전류와 약  $5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  의 word 전류를 동시에 인가함으로써 sense 전류에서 감지되는 전압의 변화를 측정하였다.

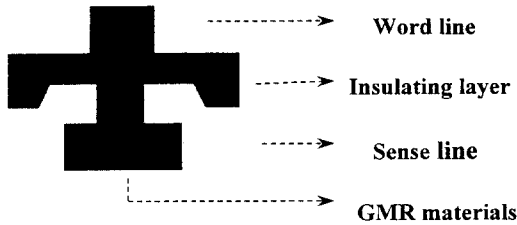


Fig. 1. Schematic illustration of test Magnetoresistive RAM (MRAM) cell.

### III. 결과 및 고찰

Fig. 2는 4° tilt-cut Si(111) 기판과 Cu(50 Å) 바닥층 위에서 NiFeCo(60 Å)와 Co(30 Å) 단층막의 자기이력 특성을 나타낸다. 일정한 방향으로 인가되는 자장 내에서 각각의 단층막을 면내에서 회전해가며 자기이력곡선을 측정할 때, 각각의 단층막은 면내 일축자기이방성을 나타낼 수 있었고, 이 때 자화용이축은 4° tilt Si <112> 방향으로 관찰되었다. NiFeCo(60 Å)와 Co(30 Å) 단층막의 자화용이축 방향으로 측정된 보자력은 각각 153 Oe와 22 Oe 를 나타내었다.

동일한 기판과 바닥층 위에 NiFeCo(60 Å)/Cu/Co(30 Å)의 삼층막을 형성하여 자기저항곡선과 자기이력곡선을 측정할 때 두 자성층 간의 결합력을 고려하지 않은 전형적인 곡선 형태를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (a)에서 보이는 바와 같이 4° tilt Si <112> 방향으로 측정된 자기이력곡선은 보자력이 작은 NiFeCo 층과 보자력이 큰 Co 층의 자화반전 거동이 명확히 구분되어 삼층막의 자화반전이 2 단계로 급격히 일어남을 보이고 있으며, 이는 각 자성층이 단층막에서 관찰된 자화용이축을 그대로 유지하기 때문으로 생각된다. 단층막에서 관찰된 자기이방성이 박막의 결정성에 크게 의존하고, 일반적으로 NiFeCo, Cu, 극히 얇은 Co 각 물질의 결정구조가 면심입방구조로서 격자상수가 약 3.6 Å로 알려진 것을 고려할 때, 위의

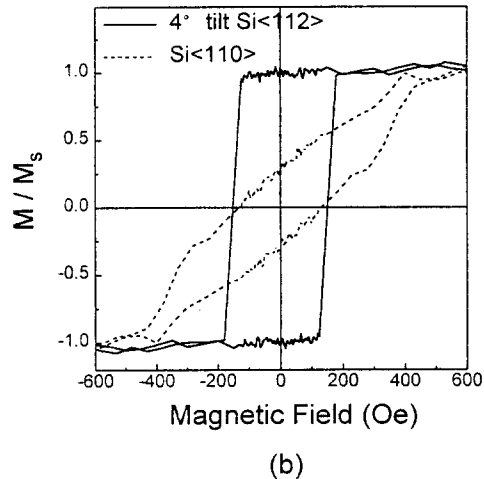
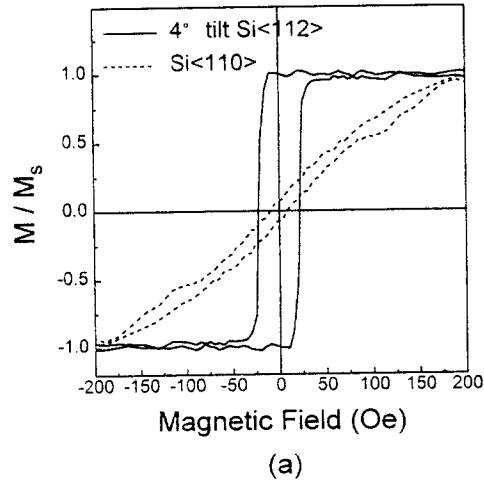


Fig. 2. Uniaxial magnetic anisotropies in (a) NiFeCo(60 Å) and (b) Co(30 Å) films deposited on 4° tilt-cut Si(111) substrates with a Cu(50 Å) underlayer.

NiFeCo/Cu/Co 삼층막을 이루는 각 층은 기판과 바닥층에 의해 특정 방향으로 정합을 이루며 성장하여 단층막에서의 결정성이 그대로 유지되어 자성층의 자화용이축이 유지된 것으로 추론할 수 있다. Fig. 3 (b)에서 보이는 바와 같이 4° tilt Si <112> 방향으로 측정된 자기저항곡선은 삼층막의 자기이력 특성을 반영하며 높은 각형성 (squareness)을 나타내고 있다. 보자력이 작은 NiFeCo 층이 자화반전함에 따라 자기저항은 급격히 증가하며 일정한 자기저항이 유지된 후, 보자력이 큰 Co 층이 자화반

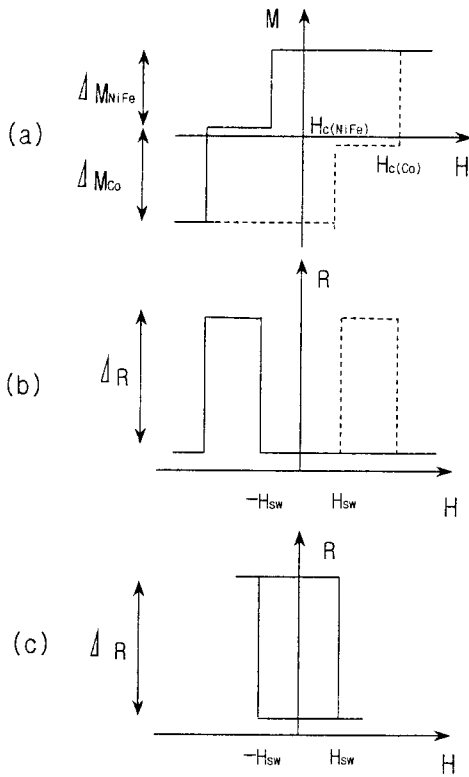


Fig. 3. Typical R-H and M-H curves of NiFeCo(60 Å)/Cu/Co(30 Å) trilayers deposited on 4° tilt-cut Si(111) substrates with a Cu(50 Å) underlayer.

- (a) M-H curve
- (b) Major R-H curve
- (c) Minor R-H curve

전함에 따라 자기저항은 급격히 감소한다. 삼층막을 포화시킨 후, NiFeCo 층만 자화반전을 일으킬 수 있는 자장 범위에서 자기저항 곡선 (minor R-H curve)을 측정할 때 Fig. 3 (c)와 같은 곡선 형태를 나타낸다. 외부 자장이 인가되지 않을 때 2 가지 자기저항 상태를 나타내며, 각각의 자기저항 상태는 Fig. 3의 (c)에 정의된  $-H_{sw}$ 와  $H_{sw}$ 를 삼층막에 인가함으로써 바뀔 수 있으므로 자기저항 메모리에 응용이 가능하다. 즉, 다양한 자기저항 메모리 방식 가운데 D. D. Tang 등이 제안한 방식에 의하면 [2], sense line 과 word line 에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자장을 조합하여 일정한 방향으로 포화된 NiFeCo/Cu/Co 삼층막에 인가함으로써 삼층막 내부의 NiFeCo 층만의 자화 방향을 변화시켜 두 자성층의 자화 상태를 평행 또는 반평행 상태로 설정한다. 이를 통해

NiFeCo/Cu/Co 삼층막으로 예시된 자기저항 메모리 셀에 1 bit 의 정보를 저장한다. 셀에 저장된 정보를 해독하기 위해서는 셀의 저항 상태를 측정함으로써 이루어질 수 있다. 그러나, 위에 설명한 자기저항 메모리가 성공적으로 작동하기 위해서는 메모리 셀을 구성하는 스핀밸브 거대자기저항 재료 내에 강한 일축자기이방성이 형성되어야 하며, 본 연구는 강한 일축자기이방성을 증착 중 외부 자장을 인가하지 않고 재료 내에 유도함으로써 응용적 측면에서 유리하다고 사료된다.

일반적으로 두 자성층의 보자력의 차이를 이용한 스핀밸브 삼층막에서도 사잇층 두께에 대해 자기저항 특성이 민감하게 변화하며, 본 연구에서 제시한 NiFeCo/Cu/Co 삼층막은 두 자성층 간의 보자력 차이가 뚜렷하므로, 최적화된 스핀밸브 재료를 얻기 위해 Cu 사잇층 두께에 따른 자기저항 메모리 특성의 변화를 고찰하였다. Fig. 4에 보이는 바와 같이 Cu 사잇층 두께가 30 Å 이상으로 증가함에 따라  $\Delta R/R_{min}$ 와  $H_{sw}$ 는 감소하는 경향을 보이며, 특히 Cu 사잇층 두께가 20 Å 주위에서는  $\Delta R/R_{min}$ 와  $H_{sw}$ 를 포함하는 자기저항 특성이 사잇층 두께에 민감하게 변화한다.

NiFeCo/Cu와 Co/Cu 인공초격자는 Cu 사잇층 두께에 민감한 자기저항 특성을 나타내며, 이는 Cu 사잇층 두께에 따라 인접한 자성층 간의 결합력이 민감하게 변화 또는 진동하기 때문으로 알려져 있다 [7, 8]. NiFeCo(60 Å)/Cu/Co(30 Å) 삼층막에서도 자기저항 특성이 Cu 사잇층 두께에 민감하게 변화함이 관찰되었고, 이는 Co/Cu, NiFeCo/Cu 인공초격자와 마찬가지로 두 자성층 간의 결합력에 의한 것으로 사료된다. Cu 사잇층 두께가 18 Å 이하에서는 두 자성층 간의 강한 강자성 결합력에 의해 두 자성층의 자화반전이 동시에 일어나 자기저항 특성이 관찰되지 않았으며, Cu 두께가 18 Å 이상으로 증가할수록 두 자성층 간의 결합력은 약해지므로 두 자성층의 독립적인 자화반전이 가능하게 되어 자기저항 특성이 관찰되는 것으로 생각된다.

$\Delta R/R_{min}$ 는 두 자성층 각각의 독립적인 자화반전을 막을 수 없는 약한 강자성 및 반강자성 결합력에 의존하지 않고 결과적인 평행 및 반평행 자화 상태에 의존하므로, 18 Å 이상의 Cu 사잇층 두께에서 관찰되고 있으며, 사잇층 두께가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 일반적으로 스핀밸브 또는 인공초격자 거대자기저항 재료에서 보고되는 바와 일치하며, 사잇층 두께가 증가함에 의해 자성층과 비자성층의 계면에서 발생하는 전도전자의 스핀의존산란 효과의 감소때문인 것으로 생각된다. 이에 반해  $H_{sw}$ 는 삼층막 내부의 NiFeCo

층의 자화반전이 일어나는 자장이며 약한 강자성 및 반강자성 결합력에 의해 변화될 수 있으므로, 18 Å 이상의 Cu 사잇층 두께에서 민감하게 변화된 것으로 생각된다.

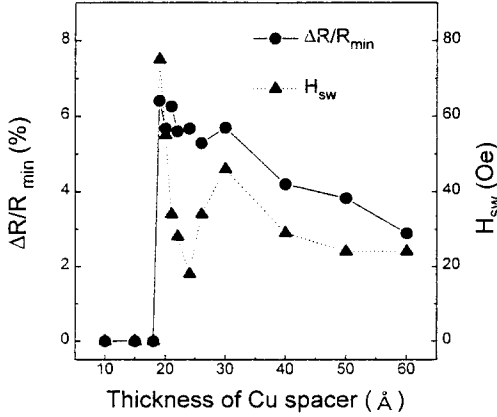


Fig. 4. Variation of  $\Delta R/R_{min}$  and  $H_{sw}$  of NiFeCo(60 Å)/Cu/Co(30 Å) trilayers with respect to the thickness of Cu spacer.

NiFeCo/Cu/Co 삼층막 내의 두 자성층 간의 결합력의 변화 양상을 자세히 살펴보기 위해 Fig. 5에 Cu 사잇층 두께에 따른 자기저항곡선의 변화를 나타내고 결합력을 정량화하기 위한 식을 제시하였다. 두 자성층 간의 결합력이 존재하지 않는다면  $H_{sw}$ 는 삼층막을 구성하는 NiFeCo 층의 보자력과 동일할 것으로 생각되나, 결합력이 존재한다면 결합력에 의해  $H_{sw}$ 가 변화할 것으로 생각된다. 따라서 다음의 (1)과 (2) 식을 자기저항곡선(minor R-H curve)에 적용하여 두 자성층 간의 결합력을 정량화하였다.

$$-H_{sw} = -H_c - H_{coupling} \quad (1)$$

$$H_{sw} = H_c - H_{coupling} \quad (2)$$

(1) 식은 삼층막을 이루는 두 자성층의 자화상태가 평행에서 반평행으로 전이할 때의  $H_{sw}$ 를 나타낸 식으로서, 자기저항곡선(minor R-H curve)에서 자장을 양에서 음으로 변화시킨 경우이며,  $H_{sw}$ 와  $H_c$ 의 부호는 양으로 고정하였다. 두 자성층간의 결합력이 강자성이라면 평행에서 반평행으로 자화상태의 전이를 방해할 것이므로  $H_{coupling}$ 은 양으로 나타날 것이며, 반대로 반강자성

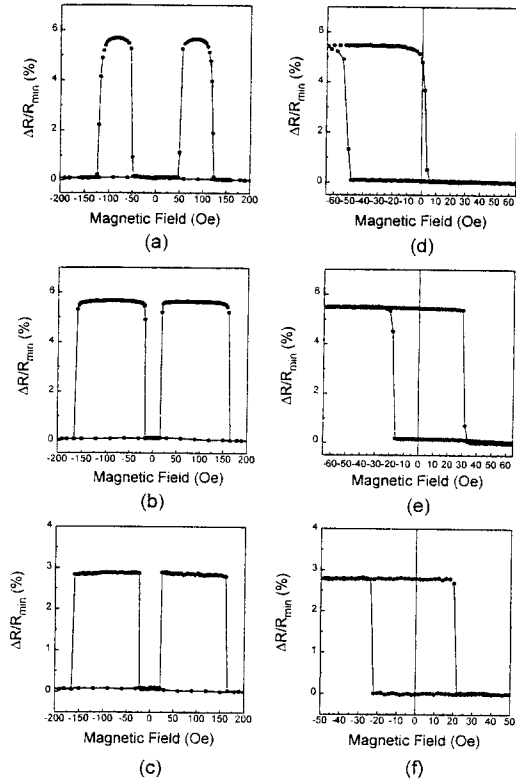


Fig. 5. Major and minor R-H curves of NiFeCo(60 Å)/Cu/Co(30 Å) trilayers with respect to the thickness of Cu spacer.

- (a), (d)  $t_{Cu} = 20 \text{ \AA}$
- (b), (e)  $t_{Cu} = 24 \text{ \AA}$
- (c), (f)  $t_{Cu} = 60 \text{ \AA}$

결합력이 작용할 경우에는  $H_{coupling}$ 은 음으로 나타날 것이다. (2) 식은 자장을 음에서 양으로 변화시켜 삼층막의 자화상태를 반평행에서 평행 상태로 전이시킬 경우의  $H_{sw}$ 를 나타낸 식으로서 두 자성층 간의 결합력이 강자성 일때  $H_{coupling}$ 은 양으로 나타나며, 반강자성의 경우에 음으로 나타난다. 위의 두 식을 Fig. 5의 자기저항곡선에 적용하면, Cu 사잇층 두께가 20 Å 일 때  $-H_{sw}$ 가 약 -48 Oe 이고,  $H_{sw}$ 는 약 6 Oe 이므로 두 식에 대입하여 더하면,

$$H_{coupling} = 21 \text{ Oe} (t_{Cu} = 20 \text{ \AA}) \quad (3)$$

이 성립한다. 또한, Cu 사잇층 두께가 24 Å인 경우,  $-H_{sw}$ 는 약 -16 Oe 이고,  $H_{sw}$ 는 약 35 Oe 이므로 마찬가지로 두 식에 대입하여 더하면,

$$H_{coupling} = -9.5 \text{ Oe} (t_{Cu} = 24 \text{ \AA}) \quad (4)$$

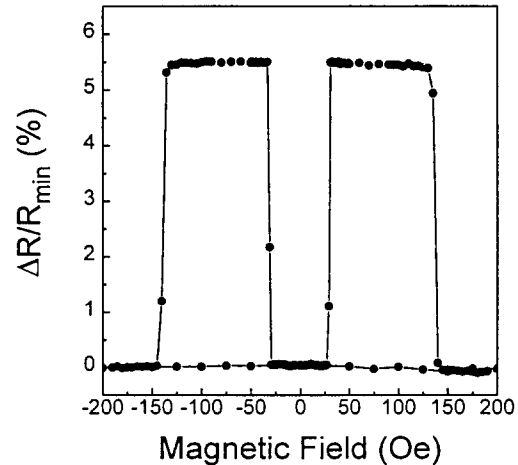
이 성립한다. 따라서, Cu 사잇층 두께가 20 Å일 경우에 약 21 Oe의 반강자성 결합력이 작용하고, 24 Å일 경우에는 약 9.5 Oe의 반강자성 결합력이 작용한다고 할 수 있다. 반면에 Cu 사잇층 두께가 60 Å일 경우에는  $-H_{sw}$ 와  $H_{sw}$  값이 각각  $\pm 30$  Oe 정도로서 절대값이 동일하므로  $H_{coupling}$ 은 거의 무시해도 가능한 것으로 생각된다. 이와 같은 Cu 사잇층 두께 변화에 대한 결합력의 변화 양상은 자기저항곡선에 반영되고 있으며, 위의 (1), (2) 식을 이용하여 정량화된 결합력의 크기는 자기저항곡선 (minor R-H curve)의 양의 자장 또는 음의 자장 방향으로 이동 (shift)에 직접적으로 나타나고 있다.

Cu 사잇층의 두께에 따른 자기저항 특성 변화를 고찰한 결과, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 사잇층 두께가 25 Å일 때 약 30 Oe 자장 범위에서 5.5% 자기저항비의 최적화된 자기저항 특성을 관찰하였으며, 외부 자장을 가하지 않을 때 ( $H = 0$ ) 명확하게 구분되는 두 가지 자기저항 상태가 자기저항곡선에서 관찰되었다. 위와 같은 NiFeCo/Cu/Co 삼층막의 메모리 특성을 소자에 적용하여 응용 가능성을 확인하기 위해, [NiFeCo(60 Å)/Cu(25 Å)/Co(30 Å)]/Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut) 시편을 사진식각 작업하여 거시적 시험 소자를 제작하였다.

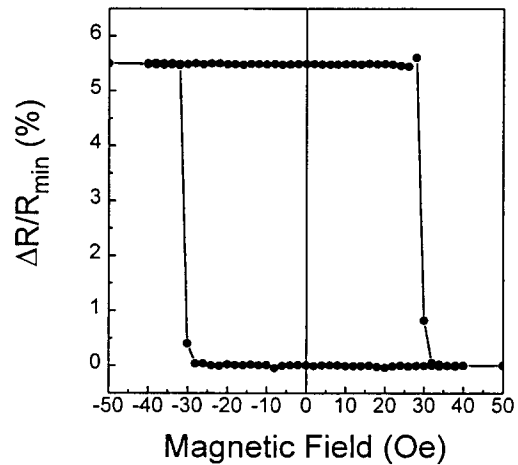
NiFeCo(60 Å)/Cu(25 Å)/Co(30 Å) 삼층막을 사진식각과 희석된 HNO<sub>3</sub> 용액으로 에칭하여 2 × 2 mm<sup>2</sup> 크기의 셀을 정의하였으며, word line 과 sense line 으로 약 1000 Å 두께의 Al 을 열기화증착법을 이용하여 증착하였다. 증착된 Al 을 word line 으로 0.5 mm, sense line 으로 3 mm의 폭으로 패터닝하였으며, 두 line 을 전기적으로 절연하기 위해 약 1.1 μm 두께의 사진감광막을 사용하였다. 제조된 거시적 시험 소자에 10 mA로 고정된 sense 전류에서 word 전류를 가하여 소자의 출력 전압을 관찰하였다. Word 전류에 따른 출력 전압의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

위의 출력 신호를 얻기 위해 삼층막에 약 300 Oe의 자장을 가하여 일정한 방향으로 포화시킨 후, word 전류에 의해 발생하는 자장을 통해 NiFeCo 층의 자화반전을 유도하였으며, 매 5 초마다 출력 전압을 측정하였다. 약 5 × 10<sup>5</sup> A/cm<sup>2</sup>의 word 전류를 시험 소자에 인가했을 때 약 10 mV의 출력 신호의 변화가 관찰되었으며, 이는 NiFeCo 층과 Co 층의 자화 방향이 평행 상태에서부터 반평행 상태로 전이함에 따라 얻어진 것으로 사료된다. 본 시험 소자 제작을 통해 NiFeCo/Cu/Co 삼층막의 자기저

항 메모리 소자 응용 가능성을 확인하였으며, 더 나아가 μm 크기의 미시적 소자 제작 및 특성 관찰의 문제와 소자의 구조 및 재료적 개선에 관한 연구가 앞으로 진행되어야 할 것으로 생각된다.



(a)



(b)

Fig. 6. Optimized magnetoresistive characteristics of NiFeCo(60 Å)/Cu/Co(30 Å) trilayers.

(a) Major R-H curve of [NiFeCo(60 Å)/Cu(25 Å)/Co(30 Å)]/Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut)

(b) Minor R-H curve of [NiFeCo(60 Å)/Cu(25 Å)/Co(30 Å)]/Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut)

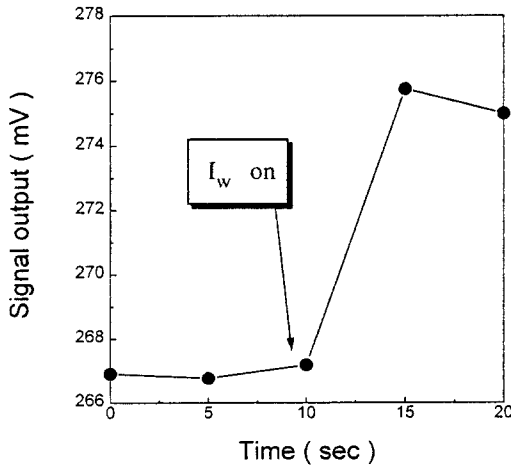


Fig. 7. Signal output of test MRAM cell with respect to word current.

#### IV. 결 론

NiFeCo/Cu/Co 삼층막은 Si(111, 4° tilt-cut) 기판과 Cu(50 Å) 바닥층 위에서 자기저항 메모리에 응용 가능한 자기저항 특성을 나타내었으며, Cu 사이층 두께에 대해 최적화된 삼층막을 이용하여 거시적 자기저항 메모리 시험 소자를 제작하였다. NiFeCo/Cu/Co 삼층막의 자기저항 특성은 Cu 사이층 두께에 민감하게 변화하였으며, Cu 사이층의 두께가 20 Å 근처에서 강한 강자성 결합력과 반강자성 결합력이 관찰되었다. 자기저항곡선의 이동과 제안된 식으로부터 자성층 간의 결합력을 정량화할 수 있었으며, Cu 두께가 20 Å일 때 21 Oe의 강자성 결합력과 24 Å일 때 9.5 Oe의 반강자성 결합력을 관찰하였

다. [NiFeCo(60 Å)/Cu(25 Å)/Co(30 Å)]/Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut) 시편으로 2 × 2 mm<sup>2</sup> 크기의 거시적 시험 소자를 제작하여, 10 mA의 고정된 sense 전류와 5 × 10<sup>5</sup> A/cm<sup>2</sup>의 word 전류를 인가해 10 mV의 출력 전압을 얻었으며 이를 통해 NiFeCo/Cu/Co 스핀밸브 삼층막의 자기저항 메모리 소자로의 응용 가능성을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 1996년도 교육부 신소재분야 연구 지원과 과학재단의 우수연구센터인 서울대학교 신소재 박막가공 및 결정성장 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] L. J. Schwee, Proc. INTERMAG Conf. IEEE Trans. on Magn., Kyoto, p. 405 (1972).
- [2] D. D. Tang, P. K. Wang, V. S. Speriosu, S. Le, K. K. Kung, IEEE Trans. on Magn., **31**, 3206 (1995).
- [3] Y. Irie, H. Sakakima, M. Satomi, Y. Kawawake, Jpn. J. Appl. Phys., **34** L415 (1995).
- [4] A. V. Pohm, J. M. Daughton, J. Brown, R. Beech, IEEE Trans. on Magn., **31**, 3200 (1995).
- [5] K. -I. Min, S. -K. Joo, K. -H. Shin, J. Magn. Magn. Mater., **156** 375 (1996).
- [6] H. -J. Kim, B. -I. Lee, S. -K. Joo, J. Appl. Phys., **81**, 3995 (1997).
- [7] S. S. P. Parkin, N. More, K. P. Roche, Phys. Rev. Lett., **64**, 2304 (1990).
- [8] 민 경익, 공학박사학위논문, 서울대학교 (1995).

## A Study on the Magnetoresistive RAM (MRAM) Characteristics of NiFeCo/Cu/Co Trilayers

Hyeong-Jun Kim, Byung-Il Lee and Seung-Ki Joo

*Division of Materials Science and Engineering, Seoul Nat'l University*

*Electronic Materials Laboratory, Center for Advanced Materials Research*

*San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-ku, Seoul 151-742, Korea*

(Received 3 June 1997, in final form 20 June 1997)

NiFeCo/Cu/Co trilayers were formed on  $4^\circ$  tilt-cut Si(111) substrates with a Cu(50 Å) underlayer and large-scaled test magnetoresistive RAM (MRAM) cells were fabricated using a conventional lithographic process. NiFeCo/Cu/Co trilayers deposited on the same templates without any applied magnetic field showed strong in-plane uniaxial magnetic anisotropy and excellent magnetoresistive (MR) properties such as high MR ratio and sensitivity within a low external magnetic field, which are suitable properties for a MRAM application. In order to obtain optimized MR results in NiFeCo/Cu/Co trilayers, the thickness of Cu spacer was varied. Interlayer coupling between two magnetic layers was observed and it was found that the MR properties were strongly dependent on the coupling force, especially near 20 Å of Cu spacer thickness. Test MRAM cells were fabricated using the optimized NiFeCo(60 Å)/Cu(25 Å)/Co(30 Å) trilayer thin films. With a 10 mA of sense current and  $5 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> of word current, 10 mV of signal output was obtained, which implies the strong potentials of NiFeCo/Cu/Co trilayer thin films for a MRAM application.