

(NiFe/CoFe)/Cu/CoFe Spin-Valve 박막의 자기저항 특성

오미영 · 이선영 · 이정미 · 김미양 · 이장로

숙명여자대학교 물리학과, 서울특별시 용산구 청파동 2가 140-742

(1997년 10월 4일 받음, 1997년 10월 18일 최종수정본 받음)

연자성 자유자성층과 피속박자성층을 각각 2중층 $Ni_{81}Fe_{19}/Co_{90}Fe_{10}$ 와 $Co_{90}Fe_{10}$ 로 하고, 반강자성 속박층을 NiO로 하는 NiFe/CoFe/Cu/CoFe/NiO 구조를 갖는 spin-valve 박막을 sputtering 방법으로 유리기판위에 제작하고, 자기저항비(MR), 자기장감응도(field sensitivity), 반강자성층과 피속박자성층사이의 교환결합 자기장(exchange coupling field), 자유자성층과 피속박자성층사이의 층간결합자기장(interlayer coupling field) 등의 비자성 사이층 Cu 두께, 자유자성층두께, 피속박자성층 두께 및 반강자성층 두께 의존성을 조사하였다. 2중층 자유자성층에 연자성 NiFe가 20 Å 이상 포함됨으로써 10 Oe의 보자력을 가져 연자성특성을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다. Cu의 두께가 30 Å 일 때 극대 MR비를 가졌으며 두께증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 피속박자성층 CoFe의 두께가 35 Å 일 때 극대 MR비 6.3%를 나타내며 두께증가에 따라 감소하며 교환결합자기장도 CoFe 두께가 증가함에 따라 감소하였다. NiO 두께가 800 Å 일 때 극대 MR비를 보이며 교환결합자기장은 두께증가에 따라 50 Oe 정도로 포화되어 NiO가 반강자성특성을 유지하기 위해서는 일정한 두께이상이어야 함을 알 수 있었다. 열처리온도 200 °C 까지는 MR비 5.3%를 유지하다 이보다 높아지면 점점 감소하여 300 °C에서도 약 3% 정도를 유지하여 열적 안정성이 향상되었다. 따라서 CoFe 합금을 사용하여 NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(30 Å)/CoFe(35 Å)/NiO(800 Å) 구조를 갖는 spin-valve 박막은 극대 MR비 6.3%, 유효자기장감응도 약 0.5(%/Oe)를 보여 spin-valve head 재료로 적합함을 알 수 있었다.

I. 서 론

컴퓨터 산업과 정보기록 매체 산업에 중요한 고밀도 자기기술은 급속도로 발전하고 있으며 21세기초에 도입하게 될 10 Gbit/in² 급 이상의 고밀도 자기기록에 대응하는 자기재생기술을 위해 거대자기저항(Giant-Magneto-Resistance : GMR) 재료가 가장 적절한 고감도 자기저항 헤드센서(MR read head sensor)로서 각광받고 있다. [1]-[3]

MR 소자에 관한 연구는 초기의 NiFe 단층박막에서 출발하여 Fe/Cr, Co/Cu, NiFe/Cu 등의 다층박막으로 진행되었으나, 이 구조에서는 20% 이상의 큰 자기저항 변화를 가지나 [4]-[7] 자성층사이의 강한 상호결합으로 인해 1 kOe 이상의 큰 외부자장이 필요하므로써 MR 헤드센서로서 응용하기에는 문제가 있다. 이를 극복하기 위하여 최근 반강자성체를 이용한 교환결합형 spin-valve sandwich 박막이 주목을 받고 있다.

반강자성체를 이용한 spin-valve 박막은 반강자성층과 강자성층의 계면에서의 강한 이방성 교환결합력을 이용하여 [5]-[7], 기존자기저항 박막의 단점이었던 높은 포화자화값과 출력신호의 비선형성등을 극복하고, 저층구

조에서 큰 MR비, $\Delta R/R(\%)$ 와 높은 자기감응도(field sensitivity, $\Delta R/R/\Delta H$), step 형태의 자기저항 변화 등의 특징을 나타내고 있다.

spin-valve 박막은 [강자성층2(F2) / 비자성층(NM) / 강자성층1(F1) / 반강자성층(AF)]의 구조를 가지며 AF 층을 속박층(pinning layer), 인접한 F1을 피속박층(pinned layer), NM 층을 경계로 분리된 또 다른 F2를 자유자성층(free magnetic layer)이라 하는데, 이것이 갖추어야 할 조건은 소자의 출력신호와 밀접한 관계가 있는 [AF/F1] 계면에서 큰 이방성 교환결합과, 높은 MR 현상, 인접한 두 자성층의 독립성(uncoupled type), 강자성층간의 층간결합력과 관련된 선형성, 소자제작시의 높은 온도에서의 안정성 등이다.

spin-valve GMR 효과를 향상시키기 위하여 F2 층으로 $Ni_{81}Fe_{19}$ (이하 NiFe로 표기)와 Co로 구성되는 NiFe/Co, F1 층으로 NiFe/Co 혹은 Co를 이용하는 spin-valve 박막 [8]이 연구되고 있지만 Co박막은 보자력이 크고 자왜(magnetic striction)가 0이 아니어서 낮은 자기장감응도를 갖게된다. 반면, $Co_{90}Fe_{10}$ (이하 CoFe로 표기) 합금은 거의 영자왜를 나타내며 CoFe/Cu 다층박막에서도 Co/Cu 다층박막에서와 같

은 정도의 GMR를 나타낸다. [9]

반강자성층으로 초기에는 FeMn이 많이 사용되었으나 상온에서의 여러상 (phase)이 존재, 표면부식, 낮은 blocking 온도 (T_B , 반자성층과 자성층사이의 이방성이 깨지는 온도)에 의한 소자공정시 특성약화 등으로 최근에는 NiO, CoO, Fe_2O_3 등을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 연자성 자유자성층(F2)과 피속박자성층(F1)으로 각각 NiFe/CoFe와 CoFe를 사용하고 반강자성 속박층(AF)으로 H. Kanai 등[10]과는 달리 FeMn 대신 NiO를 이용하는 (NiFe/CoFe)/Cu/CoFe/NiO 구조를 갖는 spin-valve 박막을 sputtering 방법으로 제작하고, AF 층과 F1 층사이의 교환결합자기장 H_{bp} (bias field, exchange coupling field), F2 층과 F1 층사이의 층간결합자기장 H_{bf} (interlayer coupling field), 자기저항비, 자기장 감응도의 Cu 두께, 속박층 NiO 두께, 비속박층 CoFe 두께 의존성 등을 조사하고 AF층으로 FeMn을 사용한 H. Kanai 등의 결과와 비교해 보았다.

II. 실험

spin-valve sandwich 박막을 제작하는데 사용한 sputtering system에는 3개의 DC magnetron과 1개의 RF magnetron gun이 장치되었으며, 이들 gun에서 동시에 발생한 플라즈마가 서로 간섭하는 것을 방지하기 위하여 분리막과 셔터를 설치하여 내부를 각각의 영역으로 분할하였다. 기판이 부착된 회전판을 회전시키기 위한 stepping motor와 셔터개폐장치는 프로그램을 통하여 컴퓨터로 제어하였고, 타겟과 기판사이의 거리는 약 8 cm 정도를 유지하도록 하였다. 박막의 증착율은 소각 (small angle) X-선 회전에 의해 결정 가능한 층의 두께에 의해 교정하였다.

sandwich 박막을 제작하기 위한 기판으로는 Corning glass 7059를 사용하였으며 이것을 증류수 속에서 초음파 세척한 후 세척용액 ($K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$)에 담갔다가 건조 후 알코올로 세척하여 오염물질을 제거하였다. 증착 방법으로서 deposition field 50 Oe를 기판에 평행하게 걸어준 상태에서 NiO를 5×10^{-3} torr에서 100 W의 전력으로 RF sputtering하고, 나머지층은 DC sputtering 하였는데 이때의 초기진공도는 1×10^{-6} torr 이하, 증착시 Ar 압력은 5×10^{-3} torr를 유지하였으며 증착전력은 1.5 ~ 2 Å/S 범위의 증착속도를 얻을 수 있도록 하였다. 한편, sandwich 박막 제작시 비자성층 Cu 두께를 달리하면서 NiFe (40 Å) / CoFe (50 Å) / Cu (t Å) / CoFe (40 Å) / NiO (800 Å) / glass, ($t = 10 \sim 60$ Å) 박막을 제작하였

으며, 피속박층 CoFe 두께 및 NiO 두께를 달리하면서 각각 NiFe (40 Å) / CoFe (50 Å) / Cu (30 Å) / CoFe (t Å) / NiO (800 Å) / glass, ($t = 10 \sim 60$ Å) 및 NiFe (40 Å) / CoFe (50 Å) / Cu (30 Å) / CoFe (35 Å) / NiO (t Å) / glass, ($t = 600 \sim 1200$ Å)를 제작하였다.

spin-valve 박막의 자기저항효과를 측정하기 위하여 전자석 (Scientific Walker제) 및 전류의 인가와 저항을 동시에 측정할 수 있는 multimeter (HP 34401)를 이용하여 측정시스템을 구성하였다. 자기저항비는 외부자기장과 deposition field의 방향이 평행이고, 4단자의 전류방향은 이들 방향에 수직이 되게 하여 측정된 자기저항 곡선으로 구하였다. 이때 자기저항측정시료는 얇은 돛쇠판 mask를 사용하여 patterning하였다. 구조해석은 고각 (high angle) XRD를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 속박층으로 반강자성 NiO, 피속박자성층으로 CoFe, 연자성자유자성층은 NiFe와 CoFe의 2중층으로 하는 NiFe (40 Å) / CoFe (50 Å) / Cu (30 Å) / CoFe (35 Å) / NiO (900 Å) spin-valve 박막의 대표적인 major 자기저항 곡선을 나타낸 것이다. 이 곡선에서 zero 자기장근방에서의 급격한 자기저항 변화는 연자화특성을 나타내는 2중층 자유층 (NiFe/CoFe)의 자화반전에 기인한 것이라 생각되며, 높은 자기장에서 완만한 자기저항변화

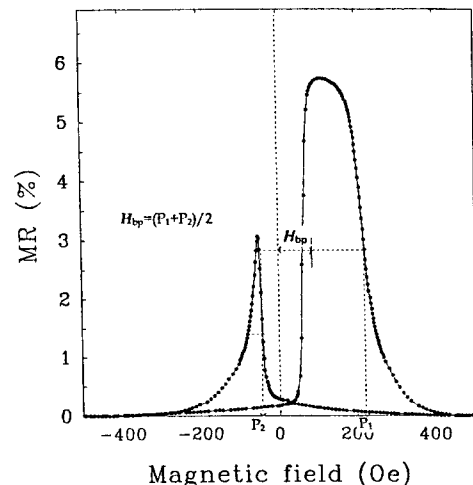


Fig. 1. The major magnetoresistance curve in NiFe (40 Å) / CoFe (50 Å) / Cu (30 Å) / CoFe (35 Å) / NiO (900 Å) / glass spin-valve film.

는 이보다 높은 보자력을 갖게되는 CoFe층의 자화반전에 대응하여 나타나는 것이라고 생각된다.

여기에서 반자성속박층 NiO에 의한 피속박층 CoFe의 bias 결합자기장, H_{bp} 는 $(P_1 + P_2) / 2$ 로 결정된다. NiO와 CoFe 사이에 결합자기장이 없다면 자기저항곡선은 $H = 0$ 장을 중심으로 대칭적인 곡선이 될 것이다. Fig. 2는 위의 시료에 대하여 -500 Oe의 자기장을 인가한 후 ± 100 Oe의 자기장을 인가했을 때의 minor 자기저항 곡선으로 히스테리시스성을 보인다. 여기에서 연자성특성을 나타내는 자유층 (NiFe/CoFe)이 Cu층을 사이에 두고, 이 보다는 경질성인 CoFe층과 강자성적으로 결합한 것에 기인하여 이 곡선의 중심이 $H = 0$ 의 축에서 양(+)의 자기장 쪽으로 이동하여 나타나 있다. 만약 (NiFe/CoFe)층과 CoFe층의 자기적 결합이 전혀 없었다면 이 곡선의 중심은 $H = 0$ 의 축과 일치하였을 것이다. 따라서 이 곡선의 중심과 $H = 0$ 와의 어긋난 정도를 층간결합자기장 또는 자유층의 interlayer coupling field, H_{bf} 라고 생각할 수 있다. 또한 minor 자기저항곡선의 반가폭의 $1/2$, H_{cf} 는 자유층 (NiFe/CoFe)의 실효적인 보자력이라고 생각할 수 있으며 이 곡선의 좌측하단이 완전히 닫혀져 있지 아니한 이유는 연자성 (NiFe/CoFe)층의 자화반전과 더불어 고보자력을 갖는 CoFe층의 부분적인 자화반전이 일어나 CoFe층의 반전자기장의 분포에 기인한 것이라고 생각된다.

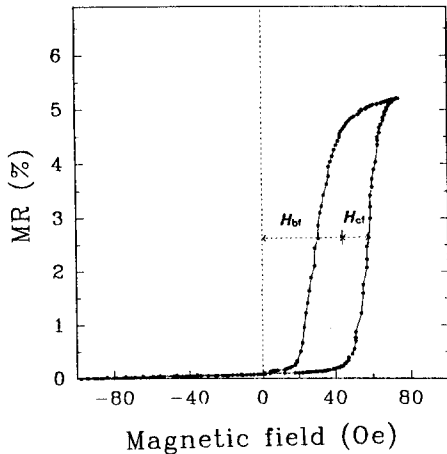


Fig. 2. The minor magnetoresistance curve of the same sample as Fig. 1.

Fig. 3은 [NiFe/CoFe](90 Å)/Cu(30 Å)/CoFe(35 Å)/NiO(800 Å) spin-valve 박막에 대하여 자유자성층

의 보자력 H_{cf} 을 연자성 자유 2중층 (NiFe/CoFe)의 CoFe 두께의 함수로서 나타낸 측정결과이다. 자유 2중층 (NiFe/CoFe)의 총 두께를 90 Å로 고정하였을 때 90 Å 두께인 CoFe층의 보자력은 40 Oe을 상회하고 (NiFe/CoFe) 2중층의 NiFe 층 두께가 20 Å보다 두꺼워지면 보자력은 약 17 Oe을 보이다가 점점 감소하여 10 Oe 정도가 되었다. 즉 NiFe 층은 2중층 (NiFe/CoFe)의 자성특성을 향상시키는 것을 알 수 있다. NiFe 층의 효과를 확인하기 위하여 NiFe 층을 가진 경우와 그렇지 않은 경우에 측정된 CoFe의 X선 회절 pattern이 Fig. 4에 나타나 있다. (111) fcc CoFe의 회절이 약 44° 주위에 관측된다. CoFe층만의 회절 peak는 매우 작으나 NiFe 층을 갖는 CoFe 즉 (NiFe/CoFe) 2중층의 회절 Peak는 증가하여 나타나 있다. 즉 CoFe 층의 결정구조는 (111)구조를 가진다. 이와 같은 향상된 결정구조로하여금 (NiFe/CoFe) 2중층내의 연자성특성을 만들어낸 것으로 생각한다.

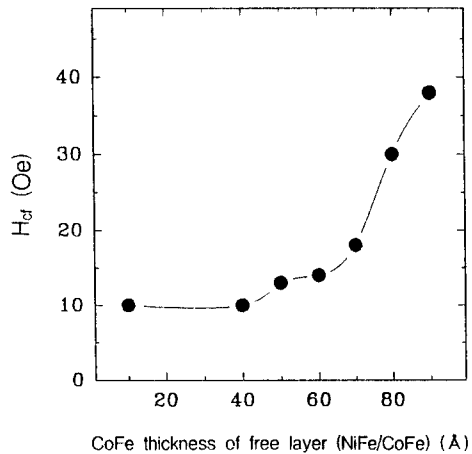


Fig. 3. Dependence of free layer coercivity H_{cf} on CoFe thickness of free layer [NiFe/CoFe] in [NiFe/CoFe] (90 Å)/Cu(30 Å)/CoFe(35 Å)/NiO(800 Å)/glass.

Fig. 5는 NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(t Å)/CoFe(40 Å)/NiO(800 Å) spin-valve 박막에 대하여 Cu 두께를 20 Å에서 50 Å까지 변화시키면서 측정된 MR 곡선들을 나타낸다. 극대 MR비는 Cu 두께가 30 Å 일 때 약 4.7%이며, Cu 두께가 증가함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보인다. Cu 두께가 30 Å 이하일 때는 자유자성층과 피속박자성층사이의 자기적 분리가 불충분하여 두자성층이 함께 자화반전을 일으키게 되어 그 자화과정에서 반평행한 자화상태를 이루지 못하다가 30 Å가 되

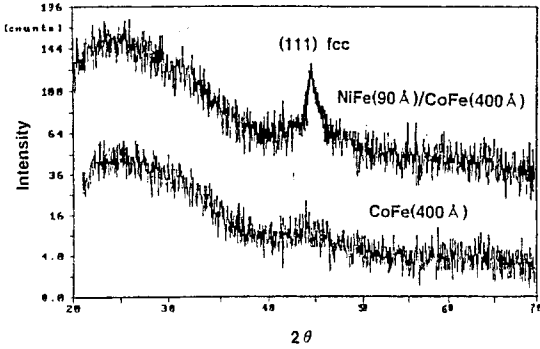


Fig. 4. X-Ray diffraction patterns for CoFe with and without a NiFe layer.

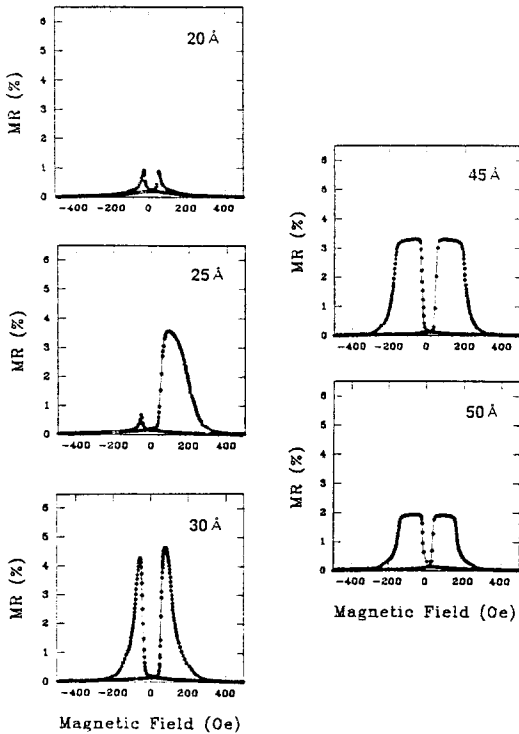


Fig. 5. MR curves of NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(*t* Å)/CoFe(40 Å)/NiO(800 Å)/glass, spin-valve films, (*t*=20~50 Å).

면 두자성층이 양호한 자기적 분리가 이루어져 독립적으로 자화반전을 일으켜 반평행자화배열을 이뤄 극대 MR비를 나타낸 것으로 생각된다. 45 Å 이상이 되면 이 두께가 전도전자의 평균자유행로의 크기 즉 sputter 된 Cu의

경우 약 50 Å [11]와 비슷하여 자화배열의 변화에 따라 산란효과가 달라지는 2자성층을 모두 통과하는 전자가 30 Å의 Cu층보다 상대적으로 감소하여 MR비가 감소하는 것으로 생각된다. 이 시료들에 대한 MR비의 Cu 두께의 의존성을 나타낸 그래프가 Fig. 6이다. Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9는 각각 이들 시료에 대하여 피속박층의 결합자기장, 자유자성층의 층간 결합자기장 및 보자력의 Cu 두께의 의존성을 나타낸다.

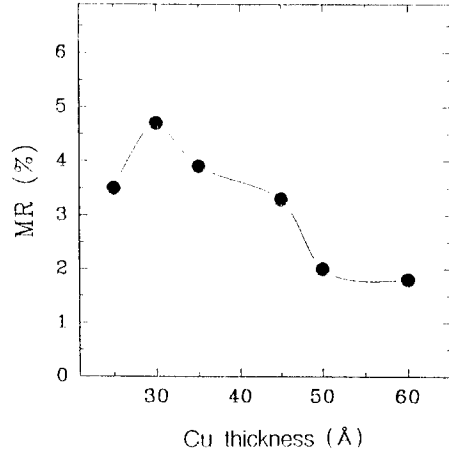


Fig. 6. Dependence of MR ratios on the Cu thickness in NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(*t* Å)/CoFe(40 Å)/NiO(800 Å)/glass.

Fig. 7은 피속박자성층에 관한 교환결합력의 Cu 두께의 의존성을 나타낸 것으로 교환결합력은 Cu 두께 증가에 따라 완만하게 증가하여 약 40 Oe의 값으로 포화됨을 알 수 있다.

Fig. 8에서와 같이 비자성층인 Cu층을 사이에 두고 강자성적인 결합이 있음을 나타내고 있으며 Cu층 두께가 증가함에 따라 이러한 층간 결합은 완만하게 약화되고 있음을 보여주고 있는데 이 감소는 강자성층사이의 거리증가에 따른 정자장 결합력의 감소에 의한 것으로 생각된다. 이와 같이 Cu층 두께의 증가는 자성층사이의 강자성결합을 약화시킨 상태에서 전류새어흐름효과에 기인한 자기저항비의 감소를 초래하는 것으로 생각된다. 따라서 자성 응용소자로 이용하고자 하는 경우에는 결합자기장과 MR비를 함께 고려한 최적의 조건을 찾는 것이 중요하다고 생각한다. 또한 Fig. 9에서처럼 자유자성층의 보자력은 Cu두께에 크게 의존하지 않는 것으로 보인다. 피속박자성층의 교환결합력은 Cu두께 증가에 따라 완만하

계 증가하여 약 40 Oe의 값으로 포화되는 것을 Fig. 7이 보여주고 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 앞의 시료에서 Cu 층의 두께를 30 Å로 고정시키고 피속박자성층 CoFe의 두께를 달리하면서 제작한 NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(30 Å)/CoFe(t Å)/NiO(800 Å)/glass, ($t=20\sim60$ Å) 박막에 대하여 MR비 및 피속박자성층의 교환결합자기장의 피속박자성층 두께의존성을 각각 조사한 것이다. MR비

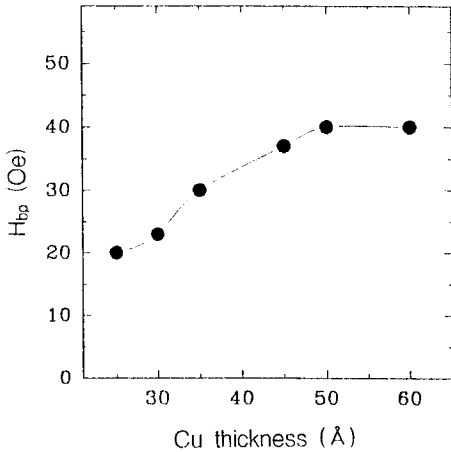


Fig. 7. Dependence of H_{bp} (bias coupling field of pinned layer) on the Cu thickness in NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(t Å)/CoFe(40 Å)/NiO(800 Å)/glass.

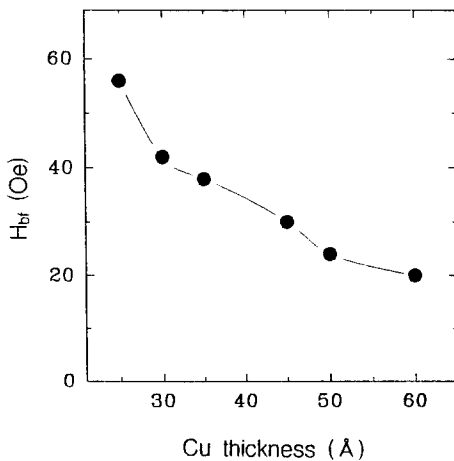


Fig. 8. Dependence of H_{bt} (interlayer coupling field of free layer) on the Cu thicknesses in the same samples as Fig. 7.

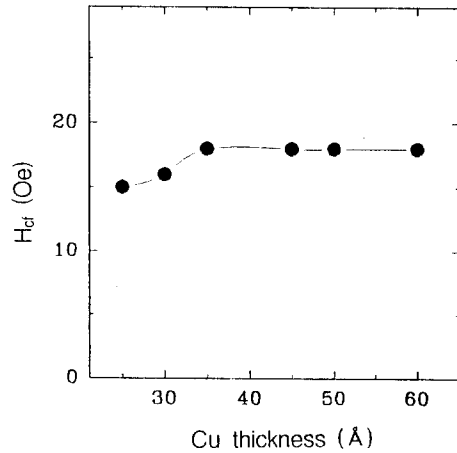


Fig. 9. Dependence of H_{cf} (coercivity of free layer) on the Cu thicknesses in the same samples as Fig. 7.

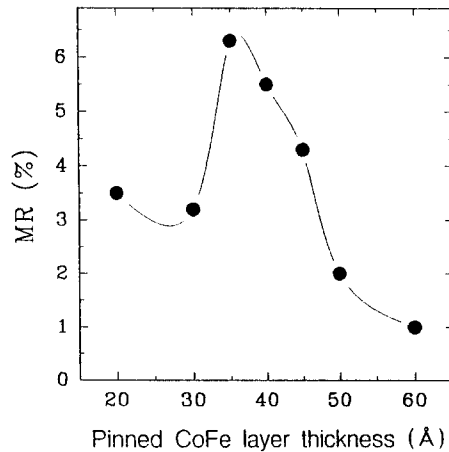


Fig. 10. Dependence of MR ratios on the pinned CoFe thicknesses in NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(30 Å)/CoFe(t Å)/NiO(800 Å)/glass.

는 피속박자성층 CoFe의 두께가 35 Å일 때 극대값 약 6.3 %를 나타낸 후 두께증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이 결과로부터 위의 spin-valve 박막에서 높은 MR비를 얻기 위한 피속박자성층의 두께는 약 35 Å임을 알 수 있고 35 Å보다 얇은 영역에서의 MR비의 감소는 (NiFe/CoFe)층과 CoFe층의 보자력에 큰 차이가 없어 반평행한 스핀배열을 갖지 못하여 생긴 결과라 생각되며 35 Å보다 두꺼운 자성층 영역에서 MR비가 감소하는 것은 전류새어흐름효과가 주된 요인이라 생각된다. 비자성

층 Cu에 비해서 피속박자성층 CoFe의 비저항은 크지만 이것이 두꺼워지면 자성층내를 흐르는 전류를 무시할 수 없기 때문이다. 이러한 효과는 다른 구조의 박막에서도 보고 [12] 된 바 있다. 피속박자성층 CoFe의 두께가 증가함에 따라 속박반강자성층과 피속박자성층 사이의 교환 결합력은 감소하는 결과를 나타낸 것이 Fig. 11이다. 이것은 이들 사이의 반비례관계를 나타내는 Malozmoff [13]의 random model-field로 설명할 수 있는 결과이며 이 교환결합력은 증착조건, 계면의 거칠기 및 grain 크기에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.

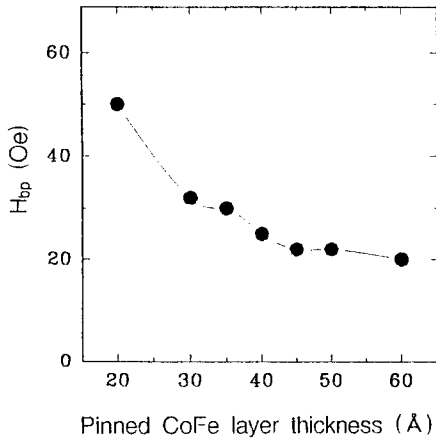


Fig. 11. Dependence of H_{bp} (bias coupling field of pinned layer) on the pinned CoFe thicknesses in the same samples as Fig. 10.

Fig. 12와 Fig. 13은 Cu의 두께를 30 Å, 피속박층 CoFe의 두께를 35 Å도 고정하고 NiO의 두께를 600~1200 Å 까지 변화시키면서 제작한 NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(30 Å)/CoFe(35 Å)/NiO(t Å)/glass, ($t=600\sim 1200$ Å) spin-valve 박막에 대하여 각각 MR비와 피속박층의 교환결합력의 NiO 두께 의존성을 나타낸 것이다. NiO 두께가 800 Å 일 때 극대 MR비 6.3%을 나타내며 교환결합력은 30 Oe이다가 증가하여 두께증가에 따라 50 Oe으로 포화되는 모양을 보이는데 이것은 NiO 박막과 인접한 CoFe층의 강한 교환이방성결합이 두 박막의 계면에서 일어나고 있으므로 NiO박막의 적당한 두께 이상에서는 거의 비슷한 결합에너지를 갖는 것으로 보이며, 이것이 반강자성특성을 유지하기 위해서는 일정한 두께 이상이 되어야 함을 보여주는 결과라 생각한다.

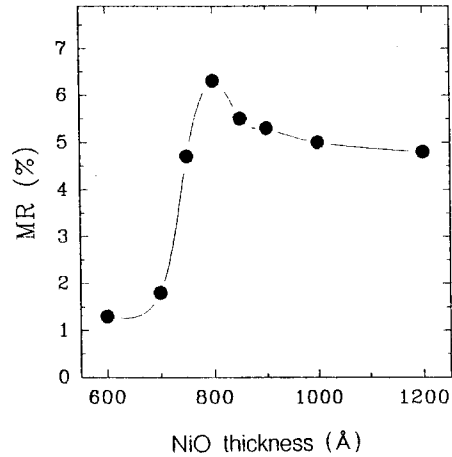


Fig. 12. Dependence of MR ratios on the NiO thicknesses in NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)/Cu(30 Å)/CoFe(35 Å)/NiO(t Å)/glass.

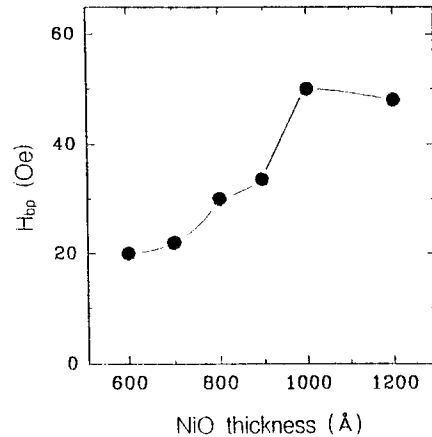


Fig. 13. Dependence of H_{bp} (bias coupling field of pinned layer) on the NiO thicknesses in the same samples as Fig. 11.

Fig. 14는 spin-valve 박막구조 [NiFe/CoFe]를 1×10^{-6} torr 진공 속에서 온도를 달리하면서 1시간 열처리하여 MR비의 열처리온도 의존성을 나타낸 것이다. 200 °C 근방에서는 5.3% 정도를 유지하여 열적안정성을 향상시켰으며, 열처리온도가 높아짐에 따라 MR비는 감소하여 300 °C에서는 약 3% 정도를 유지하였다. 200 °C 이상에서 MR비가 감소하는 것은 NiO의 Neel temperature(약 230 °C) 근처에서의 NiO의 연질화에 의한 교환 결합력이 사라져 감소하는 것으로 생각된다.

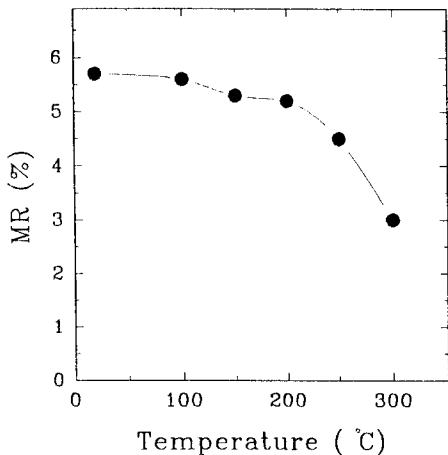


Fig. 14. Dependence of MR ratio on the annealing temperature in NiFe (40 Å) /CoFe (50 Å) /Cu (30 Å) /CoFe (35 Å) /NiO (900 Å) /glass.

이상의 실험결과를 통하여 반강자성 속박층으로 NiO를 사용하는 [NiFe (40 Å) /CoFe (50 Å)] /Cu (30 Å) /CoFe (35 Å) /NiO (800 Å) /glass 구조를 갖는 spin-valve 박막에서 NiO층과 인접한 CoFe층이 교환이방성 결합을 유도하여, 표면 자유2중자성층 (NiFe/CoFe)의 보자력 10 Oe에서 자화배열의 민감한 반전으로 약 0.5 (%/Oe) 정도의 자기장감응도와 극대 MR비 6.3 %를 얻을 수 있었다. 이런 특성을 갖기 위해서는 50 Oe deposition field에서 NiO 두께를 800 Å 이상, 그리고 Cu층 두께를 30 Å 정도로 유지하는 것이 필요함을 알 수 있었다. 이상의 결과를 반강자성속박층으로 FeMn을 사용한 NiFe (45 Å) /CoFe (30 Å) /Cu (32 Å) /CoFe (22 Å) /

FeMn (100 Å) 구조에서의 Kanai 등의 결과[10]인 극대 MR비 7 %, 연자성 자유2중층의 보자력 5 Oe와 비교할만하다 (Table I 참조). 따라서 연자성 자유2중층 (NiFe /CoFe)이 연자성특성을 나타내며 유효자기감응도를 보임으로서 CoFe 합금을 이용한 본 spin-valve 박막은 spin-valve head 재료로 적합함을 알 수 있다.

IV. 결 론

연자성 자유자성층을 2중층 (NiFe /CoFe)로 하고 반강자성 속박층을 NiO로 하는 (NiFe /CoFe) /Cu /CoFe /NiO 구조를 갖는 spin-valve 박막에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 자유자성층 (NiFe /CoFe) (90 Å)의 NiFe층 두께가 0일 때 보자력은 40 Oe를 나타내며 20 Å보다 두께워 지면 약 17 Oe를 보이다가 점점 감소하며 10 Oe 정도를 유지한다. 즉 자유 자성층에 NiFe가 포함됨으로써 연자성특성을 향상시킨다.
2. 사이층 비자성층 Cu의 두께가 30 Å일 때 극대 MR비를 보이며, Cu 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며 피속박자성층 CoFe의 두께가 35 Å일 때 극대 MR비는 약 6.3 %를 나타내며 두께증가에 따라 감소한다. 반강자성 NiO와 피속박자성층사이의 교환결합력 역시 두께증가에 따라 감소하는데 이것은 이들 사이의 반비례를 설명해 준다.
3. 반강자성 NiO 두께가 800 Å일 때 극대 MR비 6.3 %를 보이며 교환결합력은 30 Oe이다가 증가하여 두께증가에 따라 포화되는 경향을 보인다. 이것은 NiO가 반강자성특성을 유지하기 위해서는 일정량 두께이상 이 되어야함을 보여준다.

Table I

sample	MR (%)	Field Sensitivity (%/Oe)	H_{bp} (Oe)	H_{bf} (Oe)	Remarks
NiFe _{50Å} /Cu _{20Å} /NiFe _{50Å} /NiO _{420Å} /Glass	4.3	0.53	95	5.5	previous work
NiFe _{50Å} /Co _{5Å} /Cu _{20Å} /Co _{20Å} /NiFe _{50Å} /NiO _{420Å} /Glass	8.2	0.37	79	12	
NiFe _{20Å} /CoFe _{35Å} /Cu _{32Å} /Co _{55Å} /FeMn _{150Å} /Glass	6	-	-	-	H. Kanai et al. [10]
NiFe _{20Å} /CoFe _{55Å} /Cu _{32Å} /CoFe _{55Å} /FeMn _{150Å} /Glass	7	-	12~15	-	
NiFe _{40Å} /CoFe _{50Å} /Cu _{30Å} /CoFe _{35Å} /NiO _{800Å} /Glass	6.3	~1	30	~40	present work

Magnetoresistance ratios, field sensitivities, exchange coupling field H_{bp} of pinned CoFe layer, and interlayer coupling fields H_{bf} of free NiFe_{40Å}/CoFe_{50Å} layers.

- 4. 열처리에 따라 MR비는 열처리온도 200 ℃까지는 5.3 %를 유지하다 이 보다 높아지면 점점 감소하여 300 ℃에서 약 3 % 정도를 유지하여 이 spin-valve 박막은 열적안정성이 향상되었음을 알 수 있다.
- 5. [NiFe(40 Å)/CoFe(50 Å)]/Cu(30 Å)/CoFe(35 Å)/NiO(800 Å)]를 갖는 spin-valve 박막구조에서 극대 MR비 6.3 %, 자기장감응도 약 0.5 (%/Oe)를 나타내어 유효 자기장감응도를 보임으로서 CoFe 합금을 이용한 spin-valve head 재료로 적합함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(신소재 분야)의 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Daughton, Thin Solid Films **216**, 162 (1992).
- [2] J. Brown, Sensors, Sept. **42** (1994).
- [3] J. M. Daughton and Y. J. Chen, IEEE Trans. Mag. **Mag-29**, 6 (1993).
- [4] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzert, A.

- Friendrich and J. Chazelas, Phys. Rev. Lett **61**, **2472** (1988).
- [5] J. Q. Xiao, J. S. Jiang, and C. L. Chien, Phys. Rev. Lett **68**, 3749 (1992).
- [6] Proceedings of the "IDEMA MR Head/Technology symposium", IDEMA (1994).
- [7] P. Ciureanu and H. Garrila, Magnetic Heads for Digital Recording EISEVIER, New York 568 (1990).
- [8] T. kawabe, H. Hoshiya, Y. Hamakawa, Y. Suzuki, R. Nakatani, M. Fuyama and Sugita, The Magnetic Recording Conference 1995, paperE4 (1995).
- [9] H. Kanai and R. L. White, IEEE Trans, Mag., **29**, 2729 (1993).
- [10] H. Kanai, K. Yamada, K. Aoshima, Y. Ohtsuka J. Kane, M. Kanamine, J. Joda, and Y. Mizoshita, IEEE Trans. Mag., **30(5)**, 3368 (1996).
- [11] B. Diney, J. Magn. Mater. 138, 335 (1994).
- [12] B. Diney, P. Humbert, V. S. Speriosu, S. Metio, B. A. Gurney, P. Baumgart and H. Lefakis, Phys. Rev. B. **45**, 806 (1992).
- [13] A. P. Malozemoff, J. Appl. Phys. **63**, 3874 (1988).

Magnetoresistive Properties of (NiFe/CoFe)/Cu/CoFe Spin-Valves

M. Y. Oh, S. Y. Lee, J. M. Lee, M. Y. Kim and J. R. Rhee

Physics Department, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742, Korea

(Received 4 October 1997, in final form 18 October 1997)

The MR ratios and the exchange biasing field and interlayer coupling field were investigated in $\text{Ni}_{91}\text{Fe}_{19}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{NiO}$ spin-valve sandwiches grown on antiferromagnetic NiO films as a function of the NiO thickness, the thickness of Cu and pinning layer $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$. The spin-valve sandwiches were deposited on the Corning glass 7059 by means of the 3-gun dc and 1-gun rf magnetron sputtering at a 5 mtorr partial Ar pressure and room temperature. The deposition field was 50 Oe. The MR curve was measured by the four-terminal method with applied magnetic field up to 500 Oe perpendicular to the direction of a current in the plane. The coercivity of magnetic soft bilayer [NiFe/CoFe] (90 Å) decreased dramatically to less than 10 Oe when the NiFe/CoFe bilayer used an NiFe bilayer thicker than 20 Å. So NiFe layer improved the softmagnetic properties in the NiFe/CoFe bilayer. The GMR ratio and the magnetic field sensitivity of the spin-valve film $\text{Ni}_{91}\text{Fe}_{19}$ (40 Å) / $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (50 Å) / Cu (30 Å) / $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ (35 Å) / NiO (800 Å) was 6.3 % and about 0.5 (%/Oe), respectively. The MR ratio had 5.3 % below an annealing temperature of 200 °C which slowly decreased to 3 % above 300 °C. The large blocking temperature of the spin-valve film was taken (as being) due to the good stability of the NiO films. Thus, the spin-valve films with a free NiFe/CoFe layer clearly had a high large GMR output and showed a effective magnetic field sensitivity for a suitable spin-valve head material.