

자기저항 헤드용 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 다층박막의 자기적 성질에 관한 연구

배성태* · 신경호 · 김진영*

한국과학기술연구원 금속연구부, *광운대학교 전자재료공학과
(1995년 2월 21일 접수)

A Study on the Magnetic Properties in Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn Multilayered Thin Films for Magnetoresistive Head

S. T. Bae*, K. H. Shin and J. Y. Kim*

Division of Metals, Korea Institute of Science and Technology
**Department of Electronic Materials Eng., Kwangwoon University*
(Received February 21, 1995)

요 약 - 자기저항헤드용 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 다층박막에서 자기적 성질과 전기적 성질에 관하여 조사하였다. 저 포화자계에서 고 자기저항을 나타내는 스핀 밸브형 다층박막을 제작하기 위하여 Boron이 도핑된 p-type Si(100) 기판위에 Ni-Fe-Co 단층박막과 Si/Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co, Si/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 구조의 다층박막을 제작하여 자기적 특성을 조사하였다. Ni-Fe-Co 단층박막의 자기적 특성은 고정된 아르곤 분압에서 박막의 두께 등에 의존성이 있는 것으로 나타났으며, Cu 비자성층을 통한 두 자성층의 결합상태는 비자성층의 두께에 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 Si/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn 구조에서 Ni-Fe-Co와 Fe-Mn 계면에서의 두 자성층의 이방성 차이에 의해서 발생되어지는 교환자기이방성이 존재하였으며, 교환자기이방성자계값은 Fe-Mn 두께가 150 Å 일 때 가장 큰 값을 나타내었다. Ni-Fe-Co texture와 교환자기이방성자계값의 의존성을 알아보기 위하여 Ti, Cu를 바닥층으로 사용하였다. Ti를 바닥층으로 사용하였을 경우, 교환자기이방성자계값은 23.5 Oe 정도의 가장 큰 값을 나타내었다. XRD 분석결과, Ti 바닥층이 Cu 바닥층이나, 바닥층이 없는 경우와 비교하여 성장된 Ni-Fe-Co 자성층의 강한 fcc(111) texture를 형성하는 것으로 나타났다. 각각의 단층박막과 다층박막에서의 자기적 특성을 측정 한 후, Si/Ti(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu(23 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn(150 Å)/Cu(50 Å)의 스핀밸브구조를 갖는 다층박막을 제작하였으며, 11 Oe의 낮은 포화자계값에서 4.1%의 고 자기저항값을 얻을 수 있었다.

Abstract - The magnetic and electrical properties in Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn multilayered thin films for magnetoresistive head have been studied. To obtain a spin valve type multilayered thin films with high magnetoresistance and low saturation field, we investigated the magnetic properties of Ni-Fe-Co soft magnetic single layered thin films and Si/Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co and Si/Ni-Fe-Co/Fe-Mn multilayered films. The magnetic properties of Ni-Fe-Co films depended upon the film thickness. The coupling between two ferromagnetic layers through Cu interlayer were affected by the Cu interlayer thickness. The exchange anisotropy existed in Si/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn multilayered thin films. The exchange anisotropy field showed the largest value at Fe-Mn = 150 Å. Ti(hcp) or Cu(fcc) was also tried as a buffer layer in this structure. The exchange anisotropy field had the largest value of around 23.5 Oe in Si/Ti(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn(150 Å) structure. The result of XRD patterns showed that fcc(111) texture of Ni-Fe-Co magnetic layer were strongly developed in the films having Ti buffer layer. After measured the magnetic properties of soft magnetic single layered thin films and the multilayered thin films, we prepared the Si/Ti(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu(23 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn(150 Å)/Cu(50 Å) spin valved structure. The magnetoresistance change ratio showed 4.1% in the saturation field as low as 11 Oe in this structure.

1. 서 론

1988년에, $(\text{Fe/Cr})_n$ 다층박막에서의 거대자기저항효과(Giant Magnetoresistance effect)[1]가 발견된 이후로, 수많은 다층박막에서 자기저항현상에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 특히 기술적 응용분야를 고려할때 저 포화자계에서 고 자기저항을 얻을 수 있는 계에 대한 연구로 그 관심이 귀추되고 있다. 저 포화자계에서 고 자기저항을 얻고자 하는 연구는 1990년에 이르러 T. Shinjo 등[2]이 $[\text{Ni-Fe/Cu/Co/Cu}]_n$ 다층박막에서 약 500 Oe의 저 포화자계에서 9% 정도의 자기저항값을 얻었으며, 1991년 B. Speriouis 등은 약 10 Oe의 낮은 포화자계값과 1 KOe의 sweeping field를 갖는 스핀 밸브형 Ni-Fe/Cu/Ni-Fe/Fe-Mn 다층박막에서 약 4%의 자기저항값을 얻었다고 보고되면서[3, 4] 1994년 현재까지 자기저항소자가 가져야할 열적 안정성, 부식 저항성, 고주파수 대역에서의 저 전력손실등의 여러요소들에 대한 실험과 MR element에 대한 구조분석 등을 통하여 스핀밸브형 자기저항헤드로의 응용을 가능하게 하였다[5, 6, 7]. 초기의 자기저항현상에 대한 연구는 순수단일물질에서 시작되었으며, 최근에는 동일한 스핀 모멘텀을 갖는 단층막에 대한 자기저항현상 보다는 서로 다른 두 스핀 모멘텀을 갖는 전자산란효과에 의한 자기저항변화율의 증대를 위하여[8] $(\text{Fe/Cr})_n$ 혹은 $(\text{Co/Cu})_n$, $(\text{Ni-Fe/Cu})_n$ 등의 구조를 가짐으로써 전자의 자유행정 경로보다 짧은 주기를 갖는 자성층과 비자성층의 다층박막으로 이루어진 계에 대한 연구가 이루어졌다. 이러한 계에서의 자기저항현상은 외부자장에 따라 비자성층을 통과하는 분극된 전도전자들의 격자산란과 함께 일어나는 스핀 의존적 산란이 지배적으로 발생하면서 전기적 저항의 변화를 가져 온다고 한다[9, 10]. 그러나 이러한 계에서의 자기저항은 비자성층으로 분리된 두 자성층의 반강자성적 상호결합(Antiferromagnetic Coupling)을 극복하는데 필요한 외부자장이 수 KOe라는 단점을 가지고 있어서 고밀도화된 자기기록매체로부터 발생하는 자장의 세기가 100 Oe 미만이라는 제약때문에 자기저항헤드로의 응용은 많은 문제점을 가지고 있는 것이다.

따라서 본 연구에서는 고밀도, 대용량화에 대응하여 submicron 이하의 track width를 갖는 컴퓨터 하드 디스크에 있어서, 기억된 정보를 재생하는 read

head로 각광을 받고 있는 차세대 컴퓨터 헤드인 자기저항헤드용 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 스핀밸브구조를 갖는 다층박막의 자기적 성질에 관하여 실험하였다. 자기저항헤드용 재료가 가져야 할 중요한 요소중의 하나인 저포화자계에서 고 자기저항을 얻고자하는 방법으로 Ni-Fe-Co 연자성 단층막에 대한 자기적 특성을 조사하였으며, 다층박막에서의 비자성층에 의해서 분리된 두 자성층의 결합상태를 관찰하였다. 또한 스핀밸브구조를 갖는 다층박막에 있어서 자기저항을 일으키는 중요한 메카니즘인 Ni-Fe-Co와 Fe-Mn 계면에서 발생되어지는 교환자기이방성등에 대한 실험을 통하여 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 스핀밸브구조에서 저 포화자계, 고 자기저항을 얻는데 필요한 최적 조건을 제시하는데 그 목적을 두었다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 시편은 R.F.와 D.C. power를 검용으로 쓸 수 있도록 특수하게 고안된 대류진공 7T-PIF 9228 모델을 이용하여 Ni-Fe-Co는 R.F. power, Fe-Mn, Cu, Ti 등은 D.C. power로 마그네트론 스퍼터링하여 제작하였다. R.F. power와 D.C. power의 파동간섭에 의한 D.C. power쪽으로서의 고주파 간섭을 방지하기 위하여 스퍼터링 증착기에 R-L-C filter를 연결하였으며, 증착되는 자성박막에 일축이방성(uniaxial anisotropy)을 주기 위하여 기판 holder에는 SmCo_5 의 영구자석을 부착하였다. 기판으로는 초기치 비저항이 22~38 $\Omega\text{-cm}$ 을 가지며, 두께가 505~545 μm 인 Boron이 도핑된 p-type (100) Si 기판을 사용하였고, 기판의 세척은 비눗물, 아세톤, 에틸알콜, 증류수 순으로 하였다. 시편제작에 사용되어진 타아켓은 미츠이사와 고순도 화학사에서 제작된 것으로 Ni(66 at.%), Fe(16 at.%), Co(18 at.%)조성의 Ni-Fe-Co합금 타아켓과 Fe(50 at.%), Mn(50 at.%)조성의 Fe-Mn합금 타아켓을 사용하였다. 박막은 $\phi 10$ mm의 원형으로 하였다. 증착된 박막의 조성분석을 위하여 정성적인 조성분석은 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 이용하였으며, 정량적인 분석은 EPMA(Electron Probe Micro-Analyser)와 ICP-OES(Inductive Coupled Plasma-Opto Emission Spectroscopy)로 하였다. R.F.와 D.C. power를 이용하여 증착한 Ni-Fe-Co, Fe-Mn, Cu, Ti의 투입전력과 아르곤 분압에 따른

증착율은 각각 $0.6\sim 30 \text{ \AA}/\text{min}$, $48\sim 76 \text{ \AA}/\text{min}$, $51\sim 420 \text{ \AA}/\text{min}$, $40\sim 180 \text{ \AA}/\text{min}$ 로 나타났으며, 기판온도는 두께가 얇은 막이 증착되는 동안에 발생하는 층간의 확산을 방지하기 위해서 실온으로 고정하였다. spin valve 적층구조의 자성층으로 사용되어질 Ni-Fe-Co 연자성 박막의 자기적 특성을 측정하기 위한 시편은 아르곤 분압 3 mTorr, 5 mTorr에서 마그네트론 스퍼터링하여 제작하였다. Si/buffer layer/Ni-Fe-Co 구조에서 자성층의 두께는 $50\sim 200 \text{ \AA}$ 까지 변화시켰으며, 바닥층(buffer layer)이 연자성 박막의 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 상온에서 fcc구조를 갖는 Cu 혹은 hcp구조를 갖는 Ti을 Si 기판위에 50 \AA 의 두께로 증착한 후 자성층을 증착하여 특성을 조사하였다. 증착된 연자성 박막의 자기적 특성평가는 진동형 시료 자력계(Vibrating Sample Magnetometer)를 이용하였으며, 포화자계, 항자계값 등의 자기적 성질을 측정하였다.

uncoupled sandwich 구조를 갖는 spin valve 구조에서 비자성층으로 분리된 두 자성층의 결합(coupling) 상태는 저 포화자계에서 고 자기저항을 얻기 위하여 두 자성층이 외부자장이 인가되지 않는 상태에서 약간의 강자성적 결합(ferromagnetic coupling)을 이루어야 한다. 따라서 비자성층의 두께에 따른 두 자성층의 결합상태를 관찰하기 위하여 Si/Ni-Fe-Co(70 \AA)/Cu/Ni-Fe-Co(70 \AA)의 적층구조를 아르곤 분압 3 mTorr에서 증착하였다. 중간층인 Cu의 두께는 $5\sim 93 \text{ \AA}$ 까지 약 10 \AA 의 주기를 두어 변화시켰으며, 자성층과 비자성층의 sandwich 구조로 이루어진 다층박막에서 두 자성층의 결합상태는 항자계값과 포화자계값 등을 측정하여 관찰하였다.

자기저항센서 등에 Barkhausen noise를 줄이는 방법중의 하나로 사용되어져온 반강자성체인 Fe-Mn과, Ni-Fe에 비해 상대적으로 큰 순수자기이방성(intrinsic anisotropy)를 갖는 Ni-Fe-Co 연자성층과의 경계면에서 형성되는 교환자기이방성(exchange anisotropy)에 대한 실험은 아르곤 분압 3 mTorr에서 Si/Ni-Fe-Co/Fe-Mn의 적층구조를 제작하여 이루어졌다. Ni-Fe-Co 연자성 박막의 두께는 70 \AA 으로 고정하였으며, Fe-Mn의 두께는 $50\sim 200 \text{ \AA}$ 까지 변화시켰다.

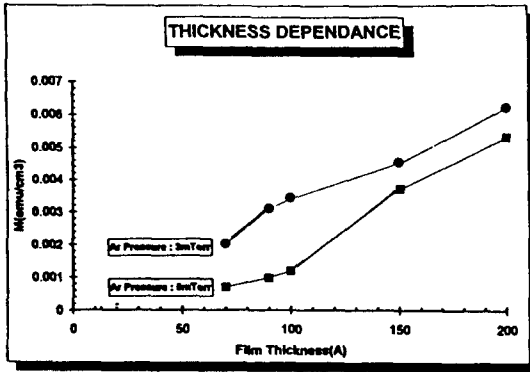
또한, 성막된 자성막의 texture가 교환자기이방성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Si/buffer layer(50 \AA)/Ni-Fe-Co(70 \AA)/Fe-Mn(150 \AA)구조를 제작하였다. 상

온에서 hcp구조를 갖는 Ti과 fcc구조를 갖는 Cu를 buffer layer로 사용하였으며, 교환자기이방성자계 값은 진동형 시료 자력계로부터 얻어진 자기이력곡선에서 원점으로부터 이동되어진 크기로써 측정하였다. 성막된 Si/buffer layer/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 다층박막에서의 film texture는 박막용 X-ray high-angle diffractometer로 조사하였다.

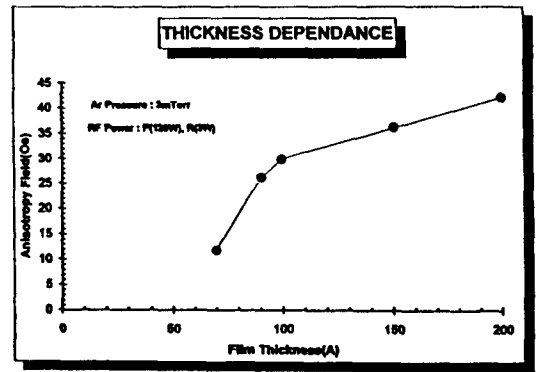
다층박막의 자기저항 측정은 computer controlling되는 four-point probe system을 이용하였는데 시료의 면방향을 따라 Helmholtz coil을 이용하여 D. C. magnetic field를 인가하고 이와 수직인 방향으로 Keithley 220 constant current source로 직류전류를 인가함으로써 외부에서 인가되는 자장에 따른 저항변화를 실온에서 측정하였다. 본 실험에서 측정된 자기저항변화율은 두 자성층이 포화되었을 때의 저항값에 대한 포화저항값과 외부자장에 따른 저항변화값의 차이값으로써 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

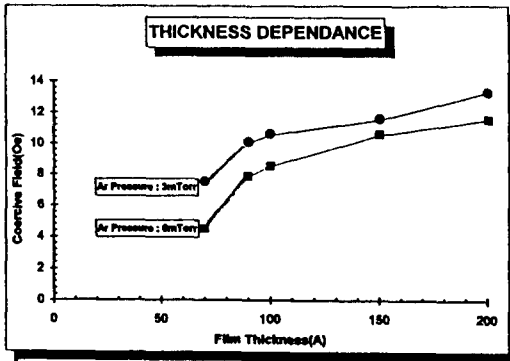
아르곤 분압을 3 mTorr, 5 mTorr로 고정하고 박막의 두께를 $70\sim 200 \text{ \AA}$ 까지 변화시켜가며 증착한 Ni-Fe-Co 연자성 박막의 자기적 성질에 관한 그래프를 그림 1에 보이고 있다. 자기적 성질을 측정된 자성합금박막 시편에 대한 조성은 EPMA와 ICP-OES로써 분석하였다. 분석결과로부터 증착된 자성합금박막의 조성은 실험에 사용된 타야겟의 조성과 각각 $\pm 0.1\sim 1\%$ 내의 오차를 가져 거의 일치함을 알 수 있었다. 그림 1-(a)에서 Ni-Fe-Co 연자성 박막의 포화자화(saturation magnetization)값은 아르곤 분압 3 mTorr에서 0.006 emu에서 0.002 emu로, 5 mTorr에서는 0.0048 emu에서 0.0006 emu로 두께가 $200\sim 70 \text{ \AA}$ 으로 감소하면서 비례적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 아르곤 분압 3 mTorr에서는 두께가 약 30%로 감소할 때 포화자화값은 약 30%로 줄어 단순한 두께감소에 따른 포화자화값의 감소라고 볼 수 있으나, 5 mTorr의 경우에는 두께가 약 30%로 감소할 때 포화자화값이 13%로 줄어 단순한 두께 감소에 따른 포화자화값의 감소보다 훨씬 급격한 감소를 보였다. 그림 1-(b)에는 아르곤 분압 3 mTorr에서 Ni-Fe-Co 연자성층의 두께를 $200\sim 70 \text{ \AA}$ 으로 감소시켰을 때의 자성층 두께에 따른 이방성자계(anisotropy field)값의 두께 의존성을



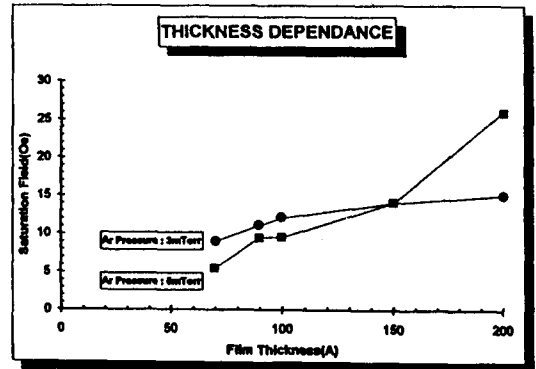
(a) Magnetization.



(b) Anisotropy field.



(c) Coercive field.



(d) Saturation field.

그림 1. Ni-Fe-Co연자성 박막의 두께에 따른 자기적 성질의 의존성.

보이고 있다. Ni-Fe-Co연자성층의 두께가 감소하면서 이방성자계값은 42 Oe에서 11 Oe로 감소하였다. 자성층과 반강자성층의 경계면에서 형성되는 교환자기이방성은 두 자성층의 이방성 자계값 H_K 의 차이에 의해서 형성된다. 작은 자기변형(magnetostriction)과 Ni-Fe에 비해 자기저항값의 증대 등을 위한 방법으로 스핀밸브구조의 자성층으로 선택되어졌던 Ni-Fe-Co는 Ni-Fe에 비해 상대적으로 큰 순수자기이방성(intrinsic anisotropy)을 갖는다. 따라서 실온에서 큰 이방성 자계값을 가지는 Fe-Mn과 이웃한 Ni-Fe-Co경계면에서의 큰 교환자기이방성자계값(exchange bias field)을 얻기 위해 자성층인 pinned layer로 사용되어질 Ni-Fe-Co는 가능한 작은 값의 이방성자계값을 가져야 한다. 자성층의 두께를 200~70 Å까지 변화시켜가며 측정된 이방성자계값의 결과로부터, pinned layer로 사용되어질 연자성층의 두께는 가장 작은 이방성자

계값을 보였던 70 Å의 두께가 적당하다는 것을 알 수 있었다. 그림 1-(c)와 (d)에는 Ni-Fe-Co연자성층의 두께에 따른 포화자계값(saturation field)과 항자계값(coercive field)의 두께 의존성을 보이고 있다. 항자계값은 자성박막의 두께가 70 Å으로 감소하면서 아르곤 분압 3 mTorr인 경우에는 12.5 Oe에서 6.4 Oe로 감소하였고, 아르곤 분압 5 mTorr에서는 10 Oe에서 4 Oe로 감소하는 경향을 나타내었다. 항자계값은 자성막의 두께를 t 라고 하면 수 백 혹은 수 천 Å 이상의 두꺼운 두께범위를 갖는 자성박막에서는 $1/t$ 에 비례 관계를 가지고 있다고 알려져 있다. 그러나, 본 실험에서 스퍼터 증착된 Ni-Fe-Co자성박막의 경우에는 200 Å 이하의 두께에서 오히려 항자계 값이 두께 t 에 비례하여 감소한다는 것을 알 수 있었다. 그림 1-(d)에 보이고 있는 자성층의 두께변화에 따른 포화자계값에서도 자성층의 두께가 200 Å에서 70 Å으로 감소하

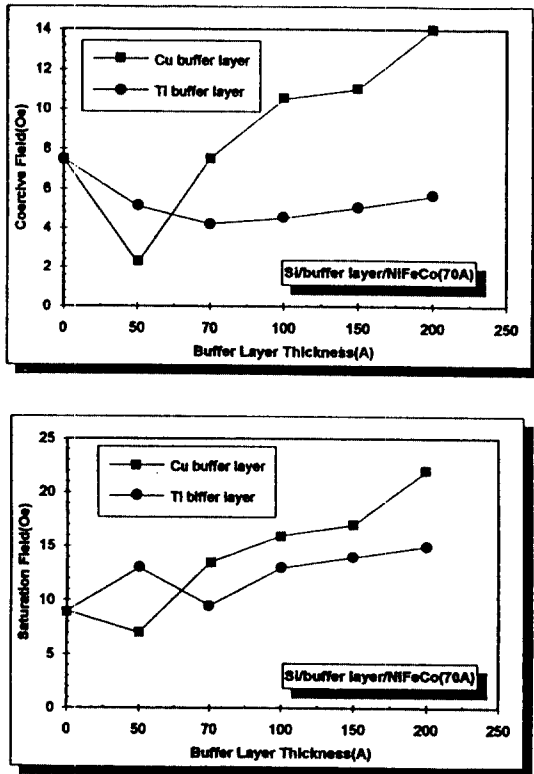


그림 2. Si/buffer layer/Ni-Fe-Co(70 Å) 구조에서 Ni-Fe-Co 연자성 박막의 자기적 성질에 미치는 바닥층의 효과.

면서 포화자계 값은 아르곤 분압 3 mTorr, 5 mTorr에서 각각 12 Oe에서 8 Oe로, 23.5 Oe에서 5 Oe로 감소하는 경향을 나타내었다. 200 Å 이하의 두께를 갖는 Ni-Fe-Co 연자성박막의 항자계값과 포화자계값이 두께에 따라서 비례적으로 감소하는 것은 Ni-Fe-Co 연자성 박막의 미세입자직경 D 에 따른 고유항자계 값의 변화를 고려하여 설명되어질 수 있을 것이다. 200 Å 이하의 두께범위를 갖는 Ni-Fe-Co 연자성 박막의 미세입자가 단자구 입계직경 이하로 형성되어 있다고 가정하면, 박막의 두께 감소에 따른 미세입자의 입자 직경의 감소는 열적효과등에 의해 고유항자계 값과 함께 두께 감소에 따른 단순 감소량보다 급격한 포화자계 값의 감소를 가져오는 것이다. 그림 2에 나타난 Ni-Fe-Co 연자성 박막의 자기적 특성에 대한 실험적 결과로부터 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 스핀밸브 구조의 free layer와 pinned layer로 사용되어질 Ni-

Fe-Co 연자성층의 두께는 교환자기이방성에 의한 자기저항 메커니즘의 측면과 저 포화자계에서 고 자기저항을 얻어야 한다는 자기저항의 기술적 측면을 고려할때 가능한 70 Å 이하의 범위를 갖는 두께에서 증착되어야 한다는 것을 보여준다.

Ni-Fe-Co 연자성 박막의 결정배향성이 자기적 성질에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 본 실험에서는 상온에서 fcc 구조를 갖는 Cu 혹은 hcp 구조를 갖는 Ti를 바닥층으로 사용하여 Si/buffer layer/Ni-Fe-Co 구조의 다층박막을 제작하였다. 아르곤 분압은 3 mTorr로 고정하였고, 바닥층의 두께는 200~50 Å까지 변화시켰다. 그림 2에는 Cu, Ti를 바닥층으로 사용하고 그 두께를 50~200 Å까지 변화시켰을 때의 항자계값과 포화자계값의 두께 의존성에 대한 그래프를 보이고 있다. Ti, Cu 바닥층의 두께를 50 Å로 하였을 때의 항자계값은 바닥층이 없는 경우의 항자계값 7.5 Oe와 비교하여 Ti일 경우에는 5.2 Oe로, Cu의 경우에는 2 Oe로 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 바닥층의 두께가 증가하면서 Cu를 바닥층으로 사용하였을 경우에는 바닥층의 두께가 70 Å 이상일 때부터 급격히 항자계값이 증가하여 200 Å에서는 14 Oe까지 증가하는 경향을 나타내었지만 Ti일 경우에는 200 Å까지의 두께변화에서 4~5 O 정도의 항자계값에서 7.5 Oe 정도의 편차를 나타내었다. 따라서 Ti의 경우가 Cu의 경우에 비해 넓은 범위의 두께에서 안정한 값의 항자계값을 가질 수 있어서 Ni-Fe-Co 연자성 박막의 바닥층으로 사용하기에 유리하다. 그림 2에 보이고 있는 바닥층의 두께에 따른 Ni-Fe-Co 연자성층의 포화자계값에 대한 그래프에서도 50 Å으로부터 200 Å까지 변화시킨 두께범위에서 Ti를 바닥층으로 사용하였을 경우에는 Ti 두께의 증가에 따라 바닥층이 없는 경우에서 나타난 9 Oe의 포화자계값과 비교하여 13 Oe까지의 약간의 증, 감소를 보였으나, Cu를 바닥층으로 사용한 경우에는 50 Å의 바닥층 두께에서 포화자계값이 8 Oe로 약간의 감소를 보였을 뿐, 200 Å까지 22 Oe로 포화자계값이 증가하였다. 바닥층 두께에 따른 포화자계값의 변화에서도 Ti이 Cu보다 작아서 바닥층 물질로 유리한 것으로 나타났다. 따라서 이러한 실험적 결과로부터 고정된 두께 70 Å을 갖는 Ni-Fe-Co 연자성 박막에 있어서 자기적 성질의 개선을 위한 바닥층의 두께는 50~70 Å의 범위가 적절하다는 것을 알 수 있으며, Cu보다는 Ti이 바닥층으로 사용될

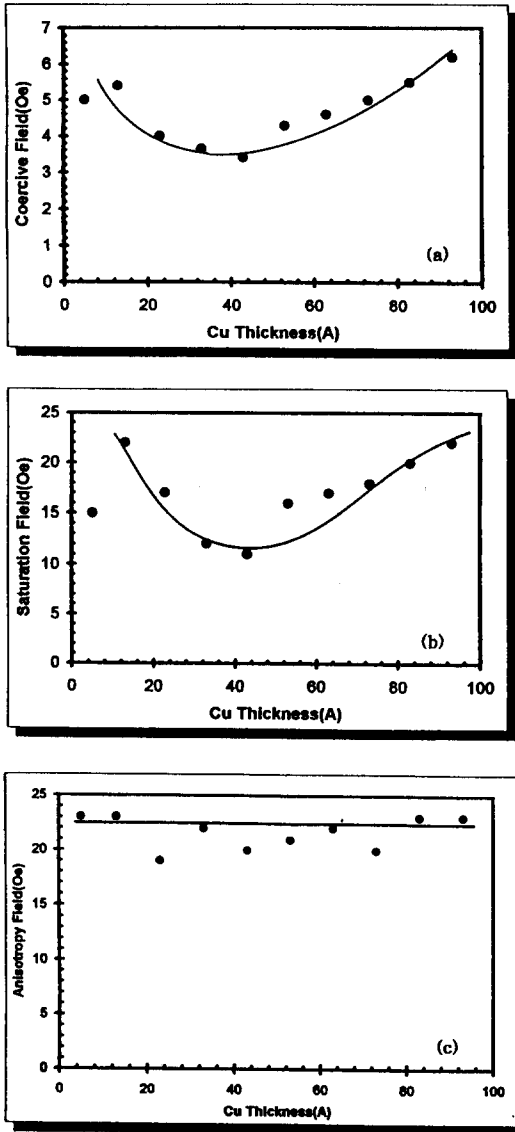


그림 3. Si/Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu/Ni-Fe-Co(70 Å)구조에서의 Cu 중간층의 두께변화에 따른 자기적 성질. (a) 항자계값 (b) 포화자계값 (c) 이방성자계값.

경우가 바닥층의 효과가 더 우월하다는 것을 알 수 있다.

그림 3의 (a), (b), (c)에는 Si/Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu(tx)/Ni-Fe-Co(70 Å)구조에서 중간층인 Cu의 두께를 5 Å부터 93 Å까지 변화시켰을 때의 자기적 성질에 관한 결과 그래프를 보이고 있다. 중간층을 통한 두

자성층의 결합상태를 알아보기 위하여 두 자성층이 나타내는 항자계값과 포화자계값, 이방성자계값을 진동형 시료 자력계로 측정하였다. Ni-Fe-Co/Fe-Mn 계면에서 형성되는 교환자기이방성은 비자성층으로 분리된 두 자성층의 자화배열을 외부에서 인가되는 자장에 따라 평행상태(parallel state)에서 반평행상태(antiparallel state)로 유도하고 이때 비자성층을 통과하는 분극된 전도전자들은 산란을 일으키면서 자기저항을 발생시킨다. 따라서 스핀밸브구조의 다층박막으로 자기저항효과를 크게하기 위해서는 외부자장이 인가되지 않은 상태에서 두 자성층의 자화배열을 평행으로 하기 위하여 약간의 강자성적인 결합을 형성하여야 한다. 그림 3-(a), (b)에 나타난 실험적 결과에서 Cu 중간층의 두께가 43 Å에서 두 강자성층은 가장 작은 포화자계값 10.5 Oe와 항자계값 3.4 Oe를 나타내었다. 그러나, 43 Å의 Cu의 두께를 중심으로 해서 Cu의 두께가 증가하거나, 감소하는 경우에는 항자계값과 포화자계값이 점차로 증가하는 경향을 나타내고 있다. Feldtkeller[11]와 Slonczewski 등[12]은 비자성층으로 분리된 두 자성층의 결합상태는 비자성층의 두께에 따른 두 자성층이 나타내는 결합계수와 자벽에너지에 영향을 받는다고 하였다. 즉, 비자성층의 두께가 임계두께 이하에서 자성층의 결합상태는 자성층의 두께보다는 결합계수에 지배적으로 영향을 받고, 임계두께 이상에서는 두께증가에 따른 자벽에너지의 증가에 영향을 받는다는 것이다. 비자성층의 임계두께 이하에서, 두께감소에 따른 두 자성층이 나타내는 항자계값의 감소는 두 자성층의 결합계수가 "positive(+)"에서 "negative(-)"로 감소하고 이에 따라 반자장(demagnetizing field)이 감소하면서 두 자성체가 강자성적인 결합에서 반강자성적인 결합을 형성하려는 것이고, 이와는 반대로 임계두께 이상에서의 비자성층 두께증가에 따른 항자계값의 증가는 결합계수보다는 자벽에너지 증가에 따라 두 자성층이 강자성적인 결합을 형성하기 때문이다. 따라서 본 실험의 결과로부터 두 자성층의 결합상태를 결정하는 비자성층의 임계두께는 43 Å이라는 것을 알 수 있으며, 이로부터 고정된 두께 70 Å을 갖는 비자성층으로 분리된 Ni-Fe-Co 두 연자성층은 Cu중간층의 두께가 43 Å 이하나 이상에서는 약간의 강자성적인 결합을 형성하지만 임계두께인 43 Å에서는 반강자성

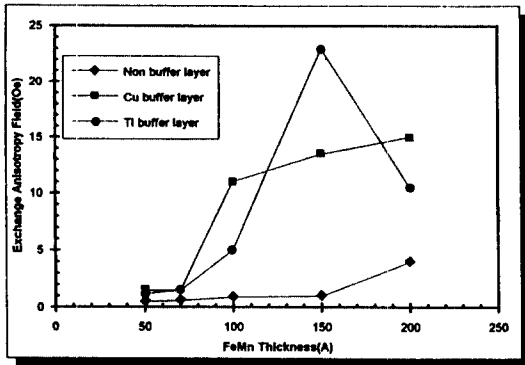
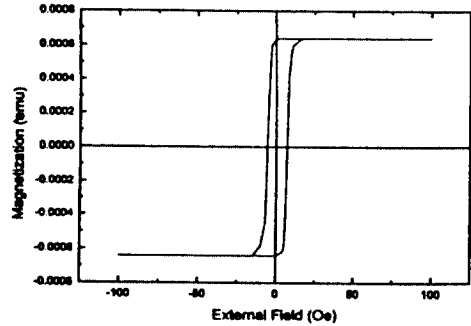


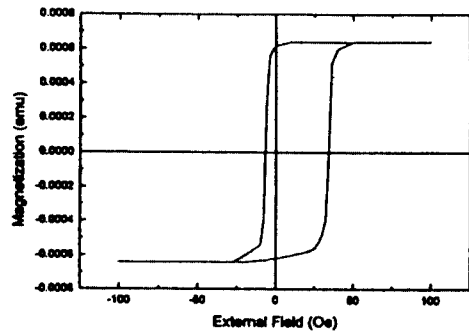
그림 4. Si/buffer layer(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn구조에서 Fe-Mn두께에 따른 exchange anisotropy field의 의존성.

적인 결합이 형성된다는 것을 알 수 있다. 그림 3-(c)에는 비자성층의 두께변화에 따른 두 자성층의 이방성 자기값을 보이고 있다. 비자성층의 두께 변화에 따라서 두 자성층이 형성하는 이방성 자기값 H_K 는 거의 일정한 값을 갖는다는 것을 볼 수 있다.

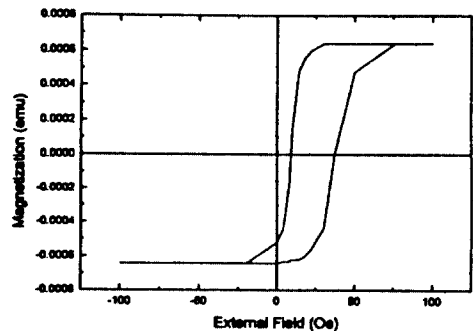
Ni-Fe에 비해 순수자기이방성(intrinsic anisotropy)이 큰 Ni-Fe-Co연자성층에서 반강자성체인 Fe-Mn에 의해서 형성되는 교환자기이방성에 대해서는 아직 보고된 바가 없다. 따라서 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 스페인벨브구조에서의 두 자성층의 상대적인 자화 배열을 반평행상태로 유도하여 자기저항을 일으키는 pinned layer인 Ni-Fe-Co와 Fe-Mn의 계면에서 형성되는 교환자기이방성의 존재 유, 무와 성막된 Ni-Fe-Co연자성층의 texture 등에 따른 exchange bias field크기에 대한 연구를 수행 하였다. 그림 4에는 Si/buffer layer(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn구조에서 반강자성체인 Fe-Mn의 두께를 50~200 Å까지 변화시켰을 때의 exchange bias field의 크기변화에 대한 그래프를 보이고 있다. 바닥층이 없는 상태에서 Fe-Mn두께에 따른 exchange bias field를 측정된 결과, Fe-Mn의 두께가 100 Å까지는 거의 1 Oe 정도의 exchange bias field값을 나타내었지만, 150~200 Å의 두께범위에서는 약 4 Oe까지 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 상온에서 hcp 구조를 갖는 Ti과 fcc구조를 갖는 Cu를 바닥층으로 사용하였을 경우에는 100 Å 이하의 Fe-Mn두께에서 바닥층이 없는 경우와 마찬가지로 1.5~2 Oe 정도의 작은 exchange bias field를 나타내었지만, 150 Å까지 두께를 증



SVNiFeCo(70 Å)/FeMn(150 Å)



S/Cu(50 Å)/NiFeCo(70 Å)/FeMn(150 Å)



S/Ti(50 Å)/NiFeCo(70 Å)/FeMn(150 Å)

그림 5. Ni-Fe-Co/Fe-Mn구조에서 교환자기이방성에 의한 자기이력곡선.

가시켰을 때는 그림 5에 보이는 것과 같이 Ti일 경우에는 23.5 Oe, Cu인 경우에는 13.5 Oe로 큰 exchange bias field 값을 얻을 수 있었다. 반강자성체인 Fe-Mn과 자성층인 Ni-Fe-Co와의 경계면에서 두 자성층의 이방성자기값(anisotropy field)의 차이에 의해서 형성되어지는 교환자기이방성에 의한 exchange bias field값은 위의 실험적 결과로부터, 고정된 자성층의 두께 70 Å에서 임계두께(critical thickness: 100

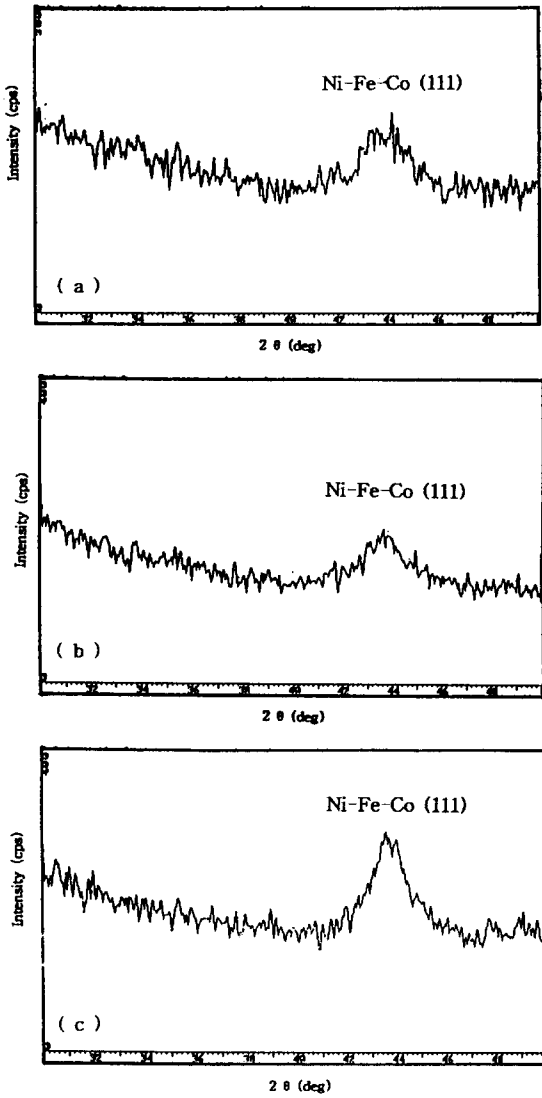


그림 6. Si/Ni-Fe-Co/Fe-Mn구조에 대한 XRD 패턴.

Å 이상)이상의 두께범위에서 크게 형성되고 있음을 볼 수 있다. 바닥층에 따른 자성층인 Ni-Fe-Co의 texture가 교환자기이방성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Si/buffer layer/Ni-Fe-Co/Fe-Mn구조에 대한 XRD분석을 하였다. 그림 6에는 가장 큰 exchange bias field값을 나타내었던 Si/buffer layer(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn(150 Å)구조에 대한 박막용 XRD 패턴을 보이고 있다. 바닥층이 없는 경우보다는 Cu 바닥층이 있는 경우, Cu보다는 Ti를 바닥층으로 사

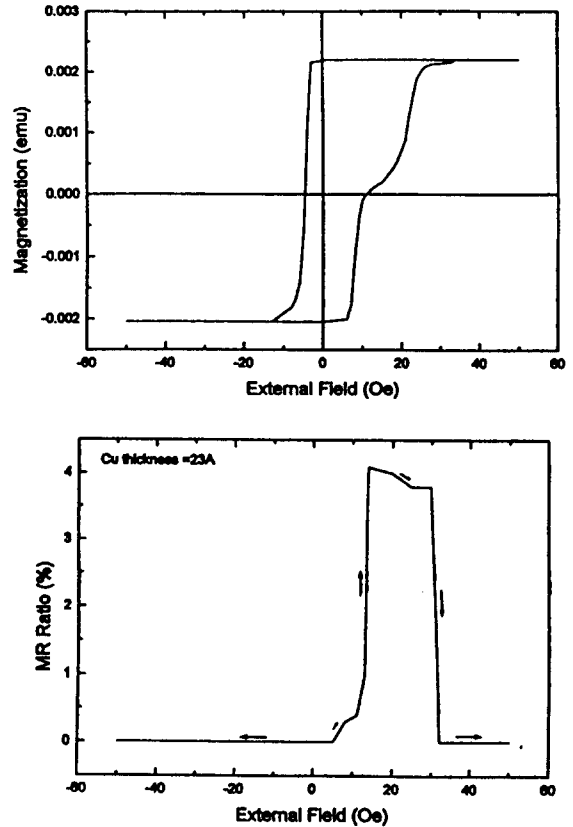
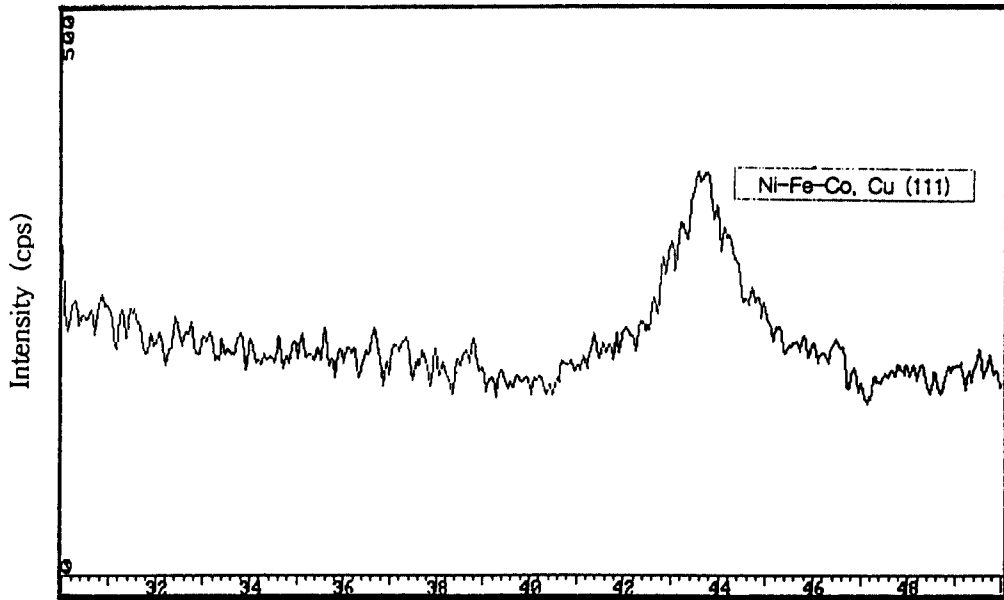


그림 7. Si/Ti(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu(23 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn(150 Å)/Cu(50 Å) 다층박막의 자기 이력곡선과 자기저항곡선.

용한 경우가 Ni-Fe-Co자성층의 fcc(111) peak intensity가 더 강하게 형성된 것을 볼 수 있으며, Ni-Fe-Co fcc(111) peak가 강하게 형성된 Si/Ni-Fe-Co/Fe-Mn구조에서 큰 교환자기이방성자계값을 얻었다. 이러한 실험적 결과로부터 Ni-Fe-Co/Fe-Mn 계면에서 형성되는 교환자기이방성에 의한 exchange bias field는 자성층과 반강자성층의 두께 뿐만이 아니라, 자성층인 Ni-Fe-Co의 film texture에도 깊게 의존하고 있음을 알 수 있다.

그림 7에는 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 스핀밸브구조에 대한 각 층간의 자기적 특성을 조사한 후에 최적조건으로부터 제작된 Si/Ti(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu(23 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn(150 Å)/Cu(50 Å)적층구조에 대한 자기이력곡선과 자기저항곡선을 보이고 있다. 진동형 시료 자력계로 ± 100 Oe까지 외부



2 θ

그림 8. Si/Ti(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu(23 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn(150 Å)/Cu(50 Å) 다층박막의 XRD 패턴.

자장이 인가되면서 측정되어진 자기이력곡선은 두 가지의 이력곡선을 보이고 있다. 첫번째의 이력곡선은 free layer로 사용되어진 Ni-Fe-Co연자성층이 나타내는 이력곡선이고 두번째의 이력곡선은 pinned layer로 사용되어진 Ni-Fe-Co와 이웃한 Fe-Mn에 의해서 형성된 교환자기이방성에 의한 이력곡선이다. free layer에 의한 첫 번째의 자기이력곡선에는 zero field를 중심으로하여 약 5 Oe정도 이동하면서 약 11 Oe에서 포화가 일어나는 이력현상이 나타나고 있다. 이는 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co구조에 대한 실험적 결과에서 나타난바와 같이 중간층인 Cu가 23 Å에서는 두 자성층 사이에 약간의 강자성적인 결합을 형성하고 있음을 보여주고 있는 것이다. 두번째 이력곡선은 약 15 Oe의 항자계값을 가지며 약 13.5 Oe정도의 exchange bias field를 나타내는 이력곡선으로 이로부터 두 자성층의 교환자기이방성에 의한 상대적인 자화배열은 약 8 Oe 미만과 35 Oe 이상에서는 두 자성층의 자화배열이 평행상태를 이루고 11 Oe~35 Oe 사이에서는 반평행상태를 이룬다는 것을 알 수 있다. 그림 7에 보이는 sweeping field ± 60 Oe 사이에서 측정되어진 MR 응답곡선에서 자기저항값은 약 11 Oe의 낮은 포화자계값에서 4.1%의 고 자기저항값을 나타내었다. 자기이

력곡선과 자기저항 응답곡선으로부터 두 자성층의 자화배열이 반평행상태를 형성하는 11~35 Oe 사이에서의 자기저항값은 4.1%에서 서서히 감소하였으며, 외부자장이 더욱 커짐에 따라 두 자성층의 자화배열이 평행상태로 가면서 감소하여 약 40 Oe에 이르러서는 0.01%로 감소하였다. 이로부터 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn구조에서의 자기저항효과에 대한 본 실험의 결과는 교환자기이방성에 의한 두 자성층의 자화배열이 반평행상태로 이루어지고 이에 따른 비자성층인 Cu층을 수직적으로 통과하는 분극된 전도전자의 스핀 의존적 산란효과에 기인한다는 이론을 뒷받침하였다 [3]. 그림 8에는 그림 7에 보이고 있는 11 Oe에서 4.1%의 자기저항값을 나타내었던 시편에 대한 XRD 패턴을 보이고 있다. XRD분석에서 자성층으로 사용하였던 Ni-Fe-Co와 비자성층으로 사용되어졌던 Cu는 강한 fcc(111) peak를 나타내었다. 이러한 XRD를 이용한 구조적 분석결과, 바닥층을 이용한 Ni-Fe-Co자성층과 Cu비자성층의 texture조절은 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn구조에 있어서 강한 exchange bias field를 형성할 수 있고, 이로인한 Ni-Fe-Co/Fe-Mn에서의 강한 exchange bias field는 두 자성층의 자화배열을 반평행상태로 유지시켜 고 자기저항을 얻

는데 있어서 중요한 요소로 작용한다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

마그네트론 스퍼터로 증착한 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co/Fe-Mn 다층박막에서의 저 포화자계에서 고 자기저항을 얻기 위한 Ni-Fe-Co연자성층 단층박막과 Ni-Fe-Co/Cu/Ni-Fe-Co, Ni-Fe-Co/Fe-Mn 다층박막에 대한 자기적 성질과 자기저항현상을 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 아르곤 분압 3, 5 mTorr에서 증착되어진 Ni-Fe-Co연자성층박막의 항자계값, 포화자계값, 이방성자계값 등은 자성층의 두께가 200~70 Å으로 감소하면서 점차로 감소하는 경향을 나타내었으며, 이로부터 저 포화자계에서 고 자기저항을 얻기 위한 free layer와 pinned layer로 사용되어질 연자성층의 두께는 70 Å이하의 얇은 두께범위를 가져야 함을 알 수 있었다.

2. Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu/Ni-Fe-Co(70 Å)구조에서 두 자성층의 결합상태는 Cu중간층의 두께가 43 Å에서 반강자성적인 결합을 형성하였고, 43 Å보다 크거나 작은 두께범위에서는 약한 강자성적 결합을 나타내었다. 이로부터 두 자성층의 강자성적인 결합을 이용하여 자기저항을 일으키는 스핀밸브구조에서의 Cu중간층의 두께는 20~30 Å이 최적조건 이었다.

3. Ni-Fe-Co/Fe-Mn구조에서 두 자성층의 이방성자계값의 차이에 의해서 형성되는 exchange bias field는 자성층의 두께가 70 Å으로 고정될때 100~150 Å사이의 Fe-Mn두께범위에서 가장 크게 형성되었고, 바닥층에 따른 Ni-Fe-Co박막의 fcc(111) texture에 크게 의존하였다. Ti을 바닥층으로 사용하였을 경우,

강한 Ni-Fe-Co박막의 fcc(111) peak를 보였으며, 약 23.5 Oe의 exchange bias field를 얻었다.

4. 단층박막과 각각의 다층박막의 실험적 결과로 얻어진 최적 조건으로부터 제작된 Si/Ti(50 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Cu(23 Å)/Ni-Fe-Co(70 Å)/Fe-Mn(150 Å)/Cu(50 Å)스핀밸브구조에서 약 11 Oe의 저 포화자계에서 4.1%의 고 자기저항을 얻었다.

참고문헌

1. M. N. Baibich, et. al., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 57, 2472, (1988).
2. T. Shinjo, et. al., *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 59, No. 9, 3061, (1990).
3. R. Diény, et. al., *J. Appl. Phys.*, Vol. 69(8), 4774, (1991).
4. B. Diény, et. al., *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 93, 101, (1991).
5. T. C. Huang, et. al., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 62(13), 1478, (1993).
6. T. C. Huang, et. al., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60(13), 1573, (1992).
7. Samuel W. Yuan, et. al., *J. Appl. Phys.*, Vol. 75(10), 6385, (1994).
8. V. L. Moruzzi, et. al., *Calculated Electronic Properties of Metals*, Permgon, (1978).
9. S. S. P. Parkin, et. al., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 58(23), 2710, (1991).
10. S. S. P. Parkin, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60(4), 512, (1992).
11. E. Feldtkeller, et. al., *Z. Angew. Phys.*, Vol. 18, 370, (1964-65).
12. J. C. Slonczewski, *J. Appl. Phys.*, Vol. 37, 1268, (1966).