

Co/Cu/Co/FeMn 스핀밸브의 자기저항 특성 향상 연구

김홍진 · 배준수 · 노은선 · 이택동 · 이혁모*

한국과학기술원 재료공학과

(2001년 1월 3일 받음, 2002년 2월 18일 최종수정본 받음)

반강자성 FeMn과 강자성 Co를 이용한 기판/Co/Cu/Co/FeMn 구조의 스핀밸브를 제조하여 자기저항 특성을 조사하였다. Cu를 하지층으로 하여 FeMn 반강자성층을 형성시킨 결과 γ -FeMn과 고착층 Co와의 교환이방성 결합이 향상되었다. FeMn 증착시 Ar 압력과 power를 달리해가며 최적의 FeMn 증착조건을 고찰하였다. 이로부터 FeMn과 Co 간의 계면이 평탄해질수록 교환결합의 세기가 증가함을 알 수 있었다. AES 분석으로부터 열처리에 의해 Co와 Cu 간 계면고용층이 소멸됨을 확인하였다. 기판/Co/Cu/Co/FeMn 스핀밸브를 열처리함으로써 교환이방성 결합과 자기저항비를 각각 3배와 1.4배 이상 향상시켰다.

주제어 : 스핀밸브, 자기저항, 교환이방성결합, 열처리, γ -FeMn

I. 서 론

앞으로 다가올 고밀도 자기기록과 기억매체의 실용화에 대비하여 자기저항 Read head 및 센서의 개발이나 MRAM (Magnetic Random Access Memory) 소자 개발에 대한 관심과 노력은 거대자기저항(GMR) 현상과 낮은 자기장에서 고 감도의 자기저항 변화를 보이는 스핀밸브 박막구조의 연구에 많은 진전을 가져왔다[1-3]. 특히 기판/ $Ni_{81}Fe_{19}$ /Cu/ $Ni_{81}Fe_{19}$ /FeMn 구조는 대표적인 스핀밸브로서 4~5%의 자기저항비와 2~15 Oe 정도의 낮은 자기장에서 step 모양의 자기저항 곡선을 보이며 1~2%/Oe의 높은 자장감응도(field sensitivity)를 가짐으로써 실질적인 응용에 가장 유리한 박막구조로 알려져 있다[4, 5].

그러나 FeMn은 상온에서 γ -phase의 준안정 상태가 존재하여 그 형성이 어려울 뿐 아니라 형성되었다 할지라도 소자 개발의 공정온도 영역인 150~200°C에서 열적 안정성이 급격히 저하되어 초기의 자기저항 특성이 사라지는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 FeMn과 결정구조가 같고 격자 상수가 비슷한 NiFe나 Cu를 하지층으로 하여 그 위에서 FeMn을 형성시키는 방법이 주로 이용되고 있다[6-8]. 이에 따라 본 연구에서는 Cu를 하지층으로 택하여 γ -FeMn을 용이하게 형성시킬 수 있는 증착조건에 대해 고찰해 보았다. 또한 Cu를 하지층으로 하여 제조된 스핀밸브의 자기저항 특성을 보다 향상시키기 위해 최적의 FeMn 증착조건에 대해 조사하였다. Ar 압력과 dc power를 달리해가며 이에 대해 고찰하였다.

NiFe는 200 °C 이상에서 열처리 할 경우에 Cu 층과 계면 원자 섞임에 의한 열적 고용도가 커져서 일반적으로 자기저

항 특성이 급격히 떨어지는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 NiFe 대신 Co를 강자성층으로 택하여 열적 안정성 및 자기저항 특성을 고찰하였다. Co는 Cu와 상온고용도가 없어서 계면 원자 섞임이 일어나지 않을 것으로 기대되었다. 또한 실온에서의 증착조건 특성상 어느 정도 계면원자 섞임이 있게 되는데 열처리를 수행함으로써 이러한 공정상 결점을 개선하고자 하였다.

II. 실험방법

γ -FeMn의 형성 및 교환이방성 결합 세기에 미치는 Cu 하지층 두께의 영향에 대해 알아보기 위해 Cu 하지층 두께를 10 Å에서 50 Å으로 변화시키면서 기판/Cu(x)/FeMn(100 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) 다층박막을 제조하였다. 6-gun 마그네트론 스퍼터링 방법으로 Si(100) 기판 위에서 1~2 Å/sec의 증착율로 제조되었으며 기본 진공도는 1×10^{-6} Torr 였고 Ar 압력은 5 mTorr 였으며 dc power는 40 W 였다. 기판 온도는 실온이며 타겟과 기판 사이의 거리는 65 mm를 유지하였다. 또한 스핀밸브의 자기이방성을 유도하기 위해 증착시 페라이트 영구자석으로 기판에 평행하게 200 G 정도의 자기장을 인가하였다.

최적의 FeMn 증착조건을 결정하기 위해 기판/Ta(50 Å)/Cu(50 Å)/FeMn(50 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) 다층박막구조에서 FeMn 증착시 Ar 압력을 1 mTorr에서 10 mTorr로 변화시켰고 dc power를 30 W에서 100 W로 변화시켰다. 마지막으로 Co의 열적 안정성 및 교환이방성 결합세기에 미치는 열처리 효과를 조사하기 위해 기판/Ta(50 Å)/Cu(50 Å)/FeMn(100 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) 다층박막을 제조하고 100 °C, 150 °C, 200 °C에서 각각 30분간 열처리를 실시하였으며, 자기저항비에 미치는 열처리 효과를 조사하기 위해 기판/Ta(50 Å)/

*Tel: (042)869-3334, E-mail: hmlee@kaist.ac.kr

Co(30 Å)/Cu(30 Å)/Co(30 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(50 Å) 스핀밸브를 제조하고 100 °C, 150 °C, 200 °C, 300 °C에서 각각 30분간 열처리를 실시하였다.

γ -FeMn의 형성여부는 XRD(X-ray diffraction)로 확인하였고 교환이방성 결합세기는 VSM(vibrating sample magnetometer)으로 측정하였으며 자기저항비는 4-point probe method로 측정하였다. 계면거칠기(interface roughness)는 AFM(atomic force microscope)을 이용하여 분석하였고 Co/Cu 간 계면취입에 대해서는 기판/Co(500 Å)/Cu(500 Å) 다층박막을 제조하여 실온과 200 °C에서 각각 30분간 열처리 한 후 AES(Auger electron spectroscopy) depth profile을 통하여 관찰하였다.

III. 실험결과 및 토의

Fig. 1에 기판/Cu(x)/FeMn(100 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) 다층박막의 Cu 하지층 두께에 따른 XRD 결과가 나타나 있고 Fig. 2는 교환이방성 결합 세기를 보여주고 있다. Fig. 1에서 Cu를 각각 10 Å, 20 Å, 30 Å의 두께로 증착했을 때, γ -FeMn (111) peak이 전혀 없다가 40 Å와 50 Å에서 (111) peak이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 40 Å 보다는 50 Å에서 peak이 더 강한 것을 알 수 있다. Fig. 1의 γ -FeMn (111) peak의 변화양상이 교환이방성 결합강도에 영향을 미치게 되는데, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 즉, 20 Å과 30 Å에서는 교환이방성 결합이 없다가 40Å과 50 Å에서는 교환이방성 결합이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 교환이방성 결합세기는 40 Å와 50 Å에서 약 100 Oe로 나타났다. 이로부터 Cu 하지층이 두꺼울수록 (111) 배향의 γ -FeMn이 용이하게 형성되며 교환이방성 결합세기가 크게 나타난다고 할 수 있다. Cu 하지층이 얇을 때는 Cu 층 자체에서 (111)

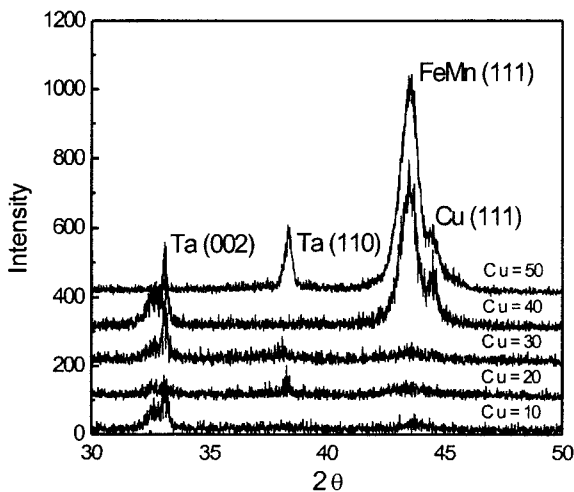


Fig. 1. Variation of XRD intensities of FeMn in Sub/Cu(x)/FeMn(100 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) with Cu thickness.

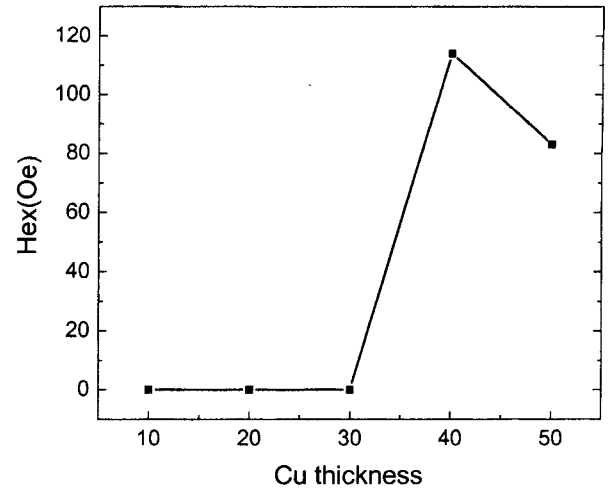


Fig. 2. Variation of exchange field in Sub/Cu(x)/FeMn(100 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) with Cu thickness.

면이 완전하게 형성되지 않아 γ -FeMn의 형성에 영향을 미치지 못하는 것으로 추측된다. 40 Å~50 Å의 일정 두께 이상에서는 Cu 두께 증가에 따른 γ -FeMn (111) 배향성의 향상

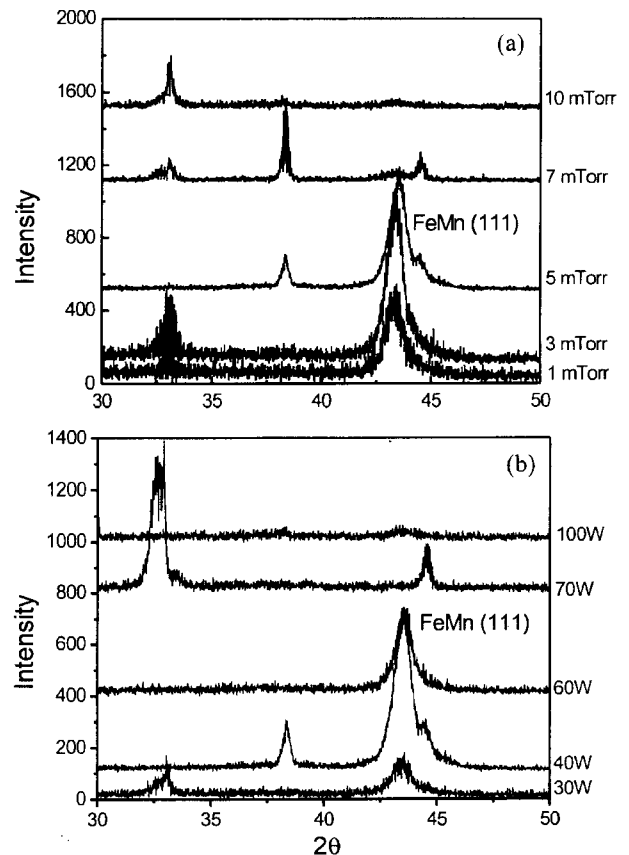


Fig. 3. Variation of XRD intensities of FeMn in Sub/Ta(50 Å)/Cu(50 Å)/FeMn(50 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) with (a) Ar pressure and (b) dc power.

이 둔화된다는 점과 Cu로 인한 전류새어흐름(shunting current)의 가능성을 고려할 때 Cu 하층의 두께는 40 Å에서 50 Å 정도가 적당하다고 할 수 있다.

Fig. 3(a)에 기판/Ta(50 Å)/Cu(50 Å)/FeMn(50 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) 다층박막구조에서 FeMn 증착시 Ar 압력을 1 mTorr에서 10 mTorr로 변화시킬 때의 γ -FeMn 형성에 대한 XRD 결과를 나타내었다. γ -FeMn (111) peak은 Ar 압력이 3 mTorr일 때 가장 높게 나타났다. 3 mTorr 이상의 Ar 압력에서 γ -FeMn (111) peak이 감소하는 것은 플라즈마 내 Ar 원자들이 너무 많아서 이미 증착된 FeMn 표면과의 잦은 충돌로 인해 안정한 (111) 배향의 γ -FeMn의 성장을 방해하기 때문인 것으로 추측된다. Fig. 3(b)는 power에 따른 XRD 결과이며 40 W에서 가장 큰 intensity를 보이고 있다. Fig. 4는 Ar 압력과 power에 따른 교환이방성 결합세기변화를 보여준다. Fig. 3의 결과와는 달리 3 mTorr의 Ar 압력과 60 W의 power에서 교환이방성 결합세기가 가장 크게 나타났다.

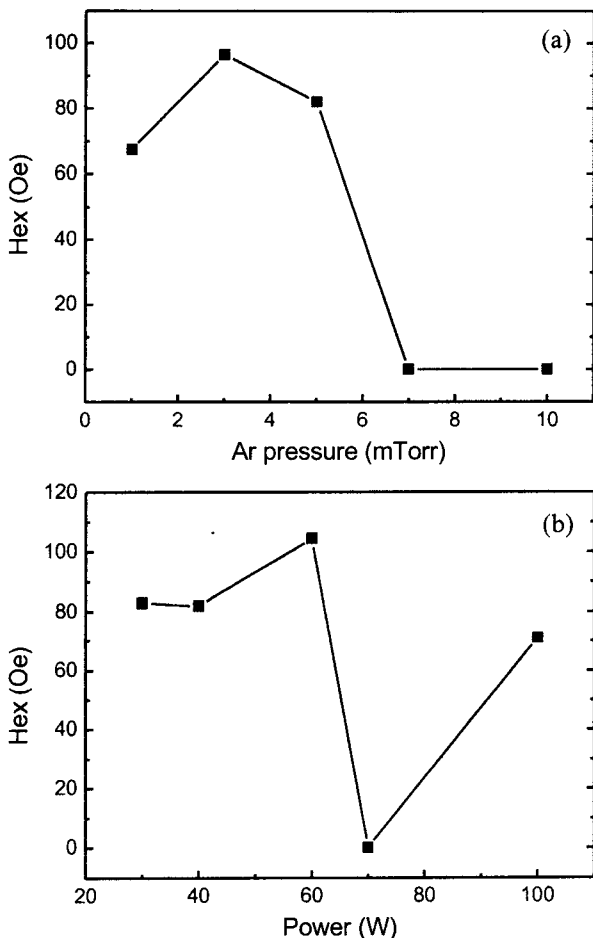


Fig. 4. Variation of exchange field in Sub/Ta(50 Å)/Cu(50 Å)/FeMn(50 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) in the deposition of FeMn with (a) Ar pressure and (b) dc power.

이로부터 교환이방성 결합에 γ -FeMn의 (111) 배향성만이 영향을 미치는 것이 아니며 계면 거칠기 등의 다른 원인이 있음을 유추할 수 있다. Fig. 5에 Ar 압력과 power에 따른 RMS 거칠기(root mean square roughness)와 평균 거칠기(average roughness)를 나타내었다.

$$R_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (z_n - \bar{z})^2 / (N-1)} \quad (1)$$

$$R_{ave} = \sum_{n=1}^N |z_n - \bar{z}| / N \quad (2)$$

Fig. 5(a)로부터 Ar 압력이 5 mTorr일 때 계면이 가장 평탄함을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 60 W일 때 계면이 가장 평탄함을 나타내며, Fig. 4와 비교해 보았을 때 계면의 거칠기는 orange peel coupling 등에 의해 교환이방성 결합에 영향을 미침을 알 수 있다[9]. γ -FeMn의 (111) 우선배향성과 계면거

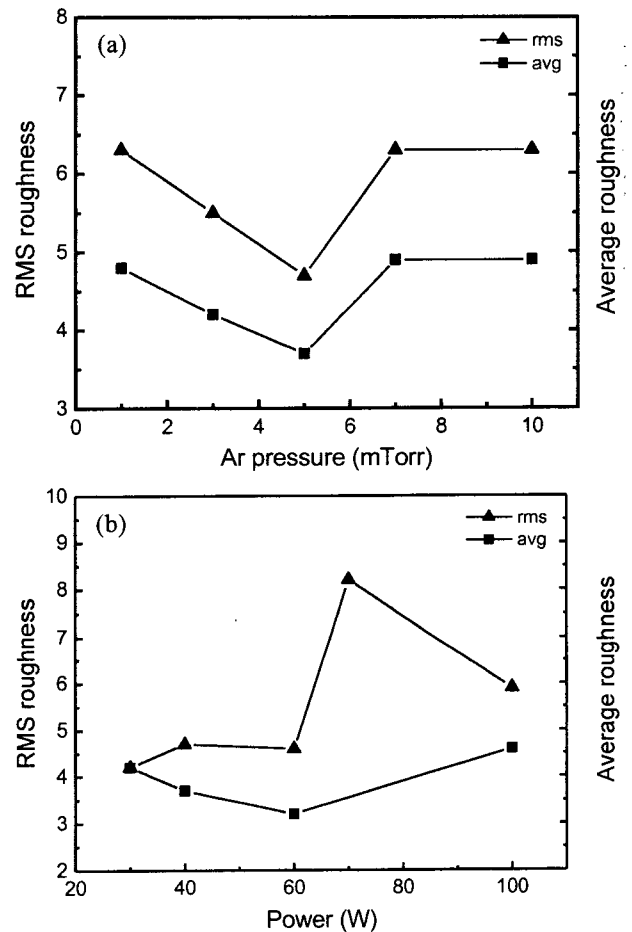


Fig. 5. Variation of root mean square (RMS) roughness and average roughness of the Co layer of Sub/Ta(50 Å)/Cu(50 Å)/FeMn(50 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) in the deposition of FeMn with (a) Ar pressure and (b) dc power.

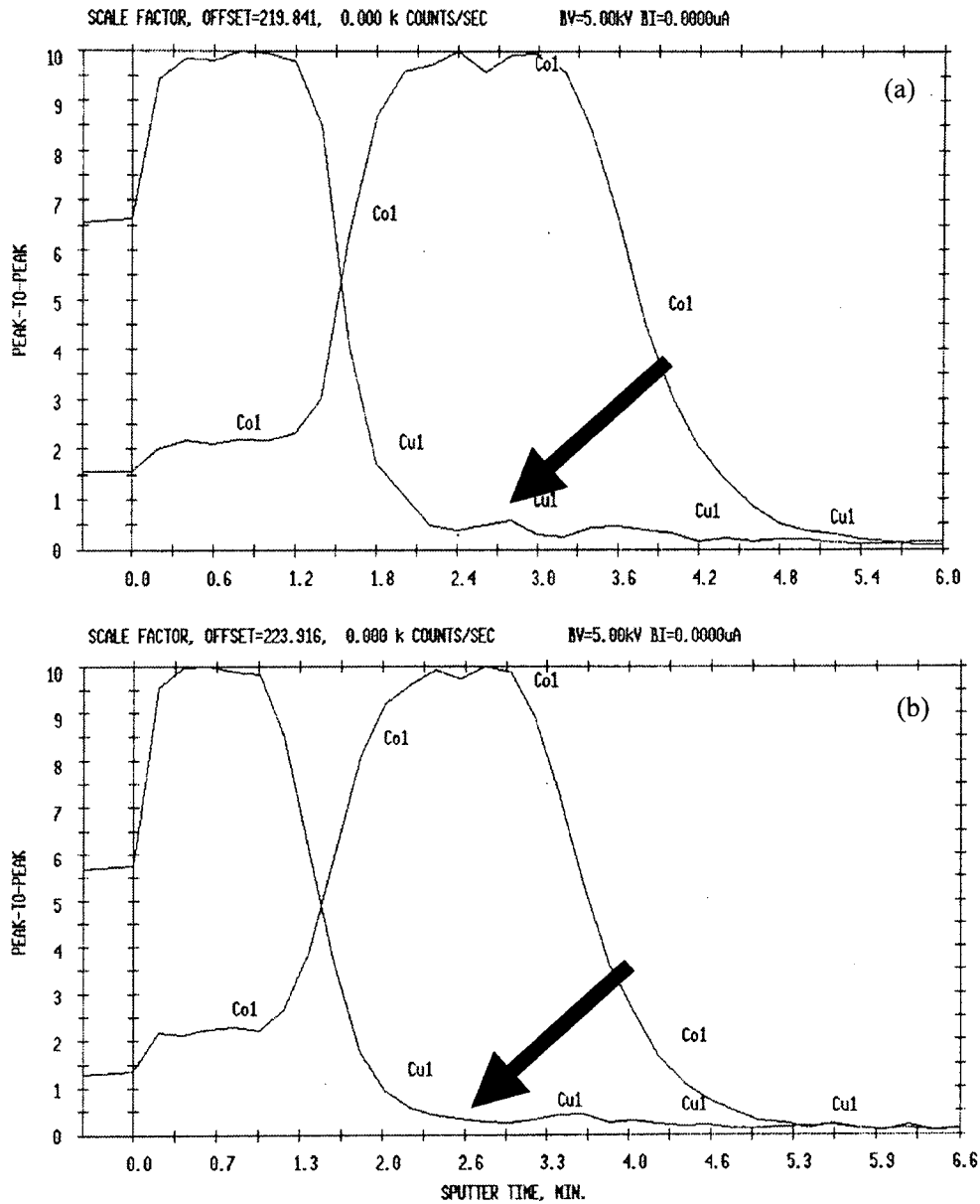


Fig. 6. Depth profiles of Co and Cu measured by AES for the structure of Sub/Co(500 Å)/Cu(500 Å) at (a) 25 °C and (b) 200 °C.

칠기 중 어떠한 인자가 교환이방성 결합에 보다 직접적인 영향을 주는지는 본 실험결과로부터 가늠할 수 없으나, 두 인자들이 각각 향상될 경우 교환이방성 결합에 복합적으로 기여할 것으로 판단할 수 있다. 또한 Fig. 4(b)로부터 70 W의 power일 때 갑자기 교환이방성 결합세기가 크게 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 5(b)의 70 W에서 계면이 거칠어져 이로 인한 orange peel coupling이 유도되어 교환이방성 결합이 저하되는 것으로 보여진다[9]. 요컨대 교환이방성 결합 세기는 (111) γ -FeMn 형성과 계면 거칠기 정도 및 결정립 크기 등에 의해 영향을 받으며 본 연구에서 얻은 최적의 FeMn 증착조건은 3 mTorr의 Ar 압력 및 dc 60 W였다.

Fig. 6은 기판/Co(500 Å)/Cu(500 Å) 다층박막을 제조하여 실온과 200 °C에서 각각 30분간 열처리 한 후의 AES depth profile이다. 전체적으로 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에서 큰 차이를 발견할 수는 없지만, Fig. 6(a)에서 화살표로 표시된 부위에 Cu 조성곡선에 굴곡이 있는데 반해 Fig. 6(b)에서는 화살표로 표시된 Fig. 6(a)와의 동일위치에서 Cu 조성곡선의 굴곡을 관찰할 수 없었고, 이로부터 Co와 Cu 간 계면의 상호고용층이 열처리에 의해 소멸되었다고 판단할 수 있다. Co와 Cu의 2 원계 평형상태도로부터 두 원소는 상온에서 상호고용이 전혀 존재하지 않아 이론적으로는 증착후의 Co와 Cu 간 계면에 상호고용층이 존재하지 않아야 하지만, 실제로는 증착시

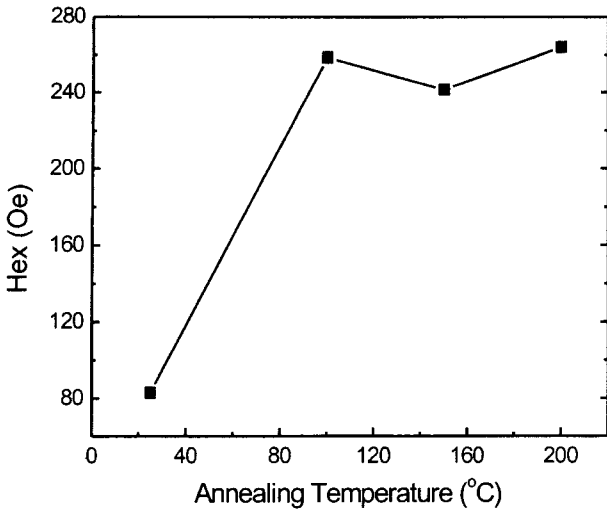


Fig. 7. Variation of exchange field in Sub/Ta(50 Å)/Cu(50 Å)/FeMn(100 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) with annealing temperature.

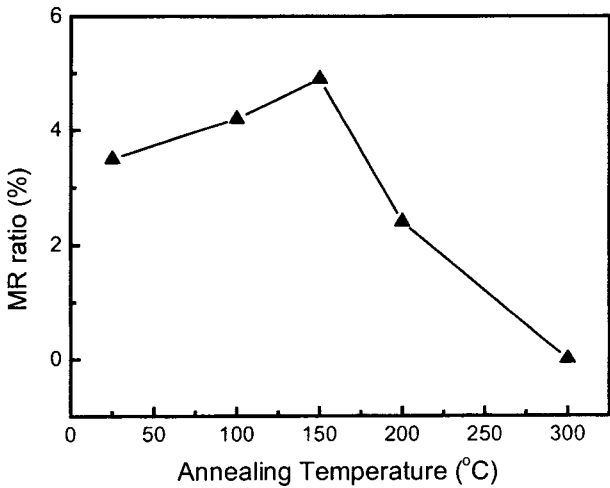


Fig. 8. Variation of MR ratio in Sub/Ta(50 Å)/Co(30 Å)/Cu(30 Å)/Co(30 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(50 Å) with annealing temperature.

원자가 기판에 강하게 부딪치며 증착이 이루어지므로 Co와 Cu 간 계면에 상호고용층이 존재할 것으로 추측된다. 이는 Cu를 사이층으로 하는 스핀밸브에서 Co와 Co 간 결합을 약화시키는 원인으로, 열처리에 의해 uphill diffusion 및 평형상태를 회복하여 Co와 Cu 간 계면 상호고용층이 소멸되는 것으로 보여진다.

기판/Ta(50 Å)/Cu(50 Å)/FeMn(100 Å)/Co(50 Å)/Ta(50 Å) 다층박막을 제조하고 100°C, 150°C, 200°C에서 각각 30분간 열처리를 실시한 후에 VSM 으로 측정한 교환이방성 결합세기변화를 Fig. 7에 나타내었다. 열처리를 함으로써 교환이방성 결합이 3배 이상 향상되었음을 알 수 있다. 이는 하지층으로서 작용하는 Cu의 (111) 배향성에 의해 FeMn 층이 영향을 받아 Co 층과의 교환이방성 결합이 향상되었기 때문인

것으로 추측된다. Fig. 8은 기판/Ta(50 Å)/Co(30 Å)/Cu(30 Å)/Co(30 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(50 Å) 스핀밸브를 제조하고 100 °C, 150 °C, 200 °C, 300 °C에서 각각 30분간 열처리를 실시한 후에 나타난 자기저항비이다. 열처리를 함으로써 자기저항비가 1.4배 정도 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 7의 경우와 마찬가지로 열처리에 의해 FeMn의 (111) 배향성이 향상되어 FeMn과 Co 간의 교환이방성 결합이 향상됨과 동시에 Fig. 6에서 살펴보았던 Co와 Cu간 상호고용층이 소멸되었기 때문에 전체적으로 자기저항비가 향상된 것으로 추측된다. 300 °C 열처리 결과에서는 고온으로 인해 각 원소의 확산이 활발해져서 층간 물질이동(mass transport)이 발생하고 그로 인해 다층 박막구조가 무너질 뿐 아니라[9] Co가 FCC에서 HCP로 상변태가 일어나기 때문에[10, 11] 자기저항비가 현저하게 감소하는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

기판/Co/Cu/Co/FeMn 스핀밸브 박막의 교환결합과 자기저항 특성을 향상시키는 방법에 대해 연구하였다. 40 Å~50 Å 두께의 Cu 하지층을 사용함으로써 γ -FeMn 형성이 보다 잘 이루어지게 할 수 있었다. 최적의 FeMn 증착조건은 3 mTorr의 Ar 압력과 dc 60 W였고 이 조건에서 최적의 교환이방성 결합을 얻을 수 있었다. AES depth profile로부터 Co와 Cu는 열처리에 의해 계면 원자섞임이 줄어드는 효과가 나타났다. 열처리로 인해 Co와 Cu 간 계면특성 및 γ -FeMn의 (111) 배향성이 향상되고 각층의 결합밀도가 감소하는 것으로 추측이 되며 이로부터 교환이방성 결합과 자기저항비가 각각 3배, 1.4배까지 향상되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부와 BK21-project의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] B. Dieny, J. Magn. Mater., **138**, 335(1994).
- [2] J. M. Daughton, Thin Solid Film., **216**, 162(1992).
- [3] J. M. Daughton and Y. J. Chen, IEEE Trans. Mag., **29**, 2705(1993).
- [4] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Metin, S. S. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgart and D. R. Wilhoit, J. Appl. Phys., **69**, 4774(1991).
- [5] Th. G. S. M. Rijks, W. J. M. de Jonge, W. Folkerts, J. C. S. Kools and R. Chehoom, Appl. Phys. Lett., **65**, 916(1994).
- [6] H. J. Kim, J. S. Bae, T. D. Lee and H. M. Lee, J. Magn. Mater., accepted (2001).

- [7] E. Yu. Tsymbal and D. G. Pettifor, Phys. Rev. B, **58**, 432(1998).
[8] R. Nakatani, K. Hoshino, S. Noguchi and Y. Sugita, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 133(1994).
[9] J. C. S. Kools, IEEE Trans. Magn., **32**, 3165(1996).
[10] T. B. Massalski, Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd ed., ASM Materials Park, USA, (1991).
[11] S. S. P. Parkin, Phys. Rev. Lett., **71**, 1641(1993).

Study on the Improvement of Exchange Bias and Magnetoresistance in Co/Cu/Co/FeMn Spin Valve by Heat Treatment

Hong Jin Kim, Jun Soo Bae, Eun Sun Noh, Taek Dong Lee and Hyuck Mo Lee*

Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Kusung-Dong 373-1, Yuseong-Gu, Taejeon 305-701, Korea

(Received 3 January 2001, in final form 18 February 2002)

It was observed that exchange bias field was increased with smooth surface and better γ -FeMn formation. Sputtering conditions were varied for the control of the surface roughness and γ -FeMn formation. From the results of Cu deposition as underlayer, it was found that γ -FeMn formation was closely related with the thickness of underlayer. After heat treatment, exchange bias field was increased over three times. This improvement was likely that the crystallites of γ -FeMn were well formed. In Co/Cu/Co/FeMn spin valve structure, magnetoresistance was increased over 1.4 times through the heat treatment. This was due to the disappearance of Co/Cu intermixed dead layer and removal of defect, and this was examined by AES analysis.

Key words : spin value, magnetoresistance, exchange bias field, α -FeMn