

IrMn 스핀밸브 박막소자의 폭 크기에 의존하는 자장감응도

최종구¹ · 이상석^{1,2*}

¹상지대학교 대학원 동서의료공학과, 강원 원주시 우산동, 220-702

²상지대학교 보건과학대학 한방의료공학과, 강원 원주시 우산동, 220-702

(2010년 2월 5일 받음, 2010년 2월 19일 최종수정본 받음, 2010년 2월 19일 게재확정)

NiFe/Cu/NiFe/IrMn 스핀밸브 박막에 대해 Cu의 두께에 의존하는 자장감응도를 조사하였다. Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.5 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) 다층박막 구조에 대해 측정된 Minor 자기저항 곡선에서 자기저항비, 자장감응도, 보자력, 층간 상호교환결합력은 각각 1.46 %, 2.0 %/Oe, 2.6 Oe, 0.1 Oe 이었다. 광 리소그래피 공정으로 제작한 10가지 다른 폭 크기와 4.45 μm 의 길이를 갖는 GMR-SV 소자의 자장감응도는 폭 크기가 10 μm 에서 1 μm 까지 작아짐에 따라 0.3 %/Oe에서 0.06 %/Oe로 감소하였다.

주제어 : NiFe/Cu/NiFe/IrMn 스핀밸브 박막, 폭 크기, 자장감응도, 상호교환결합세기, 자화 용이축

I. 서 론

고밀도 하드디스크 드라이브의 신호 재생헤드로 사용되는 반강자성체/강자성체/비자성체/강자성체 다층박막 구조를 갖는 거대자기저항(Giant Magnetoresistance; GMR)-스핀밸브(Spin Valve; SV) 센서는 최근 소형 노트북에 대한 수요시장의 증대로 인해 보다 향상된 자장감응도를 얻기 위한 연구와 헤드용 센서의 개발이 지속적으로 이루어지고 있다[1]. 한편, 녹색성장 동력에 발맞추어 활용되는 온라인 전기자동차에서 20 kHz와 50 μT 의 유도인가 자기장과 소형 전동기를 구동하는 영구자석 및 전자석의 미세 자기장의 크기를 측정하는데 사용되는 자기저항 센서 등이 각광을 받고 있다. 자기장 센서는 선형 및 회전 부호 매김, 근접검출기, 속도 및 위치센서, 지자기장 자력계 등에서 폭넓게 상용화되고 있다[2-4]. 특히 GMR-SV를 이용한 바이오 센서는 분자수준 크기의 물질을 선택함에 있어 자성신호를 이용한 생화학적 분자의 운동을 관찰하는데 용이하게 사용할 수 있다. 현재 자성비드(bead)를 분자 및 세포 셀(cell)에 흡착하여 생체 입자들의 반응과 활동성을 상세히 규명하는 것이 생명분야와 의학분야에서 매우 중요하다[5, 6]. 나노기술과 생명공학기술을 융합하는 연구의 발전으로 인해 최근 수년간 바이오 센서에 대해 GMR-SV 소자의 이용이 높아지고 있으며, 다양한 응용분야 중 생체의 자기장을 측정하는 의료용 센서에 대해 많은 관심을 불러 일으키고 있다[7, 8]. 따라서 보다 향상된 자장감응도를 갖는 다층박막 구조를 설계하고 의도하는 형태로 제작하여 GMR-SV 소자를 개발하는 기술이 필요하다.

본 연구는 바이오 센서로 활용할 반강자성체를 기반으로 두 강자성체 사이에 비자성체를 삽입한 3층 구조의 고감도 GMR-SV 다층박막 구조를 제작하였다. 박막의 연자성 특성을 고려하여 향상된 자장감응도를 얻기 위해 비자성체 Cu의 두께를 최적화시켰다. 그리고 광 리소그래피(lithography) 공정을 이용하여 GMR-SV 소자의 자장감응도에 대한 폭 크기의 의존성을 고찰하였다. 3층 구조에서 상부의 고정층은 폭 방향을 자화 용이축으로, 하부의 자유층은 길이 방향으로 형성상기 이방성을 갖도록 유도하였다. 제작한 소자에 대한 자기저항 특성의 변화를 관찰하여 바이오 센서의 활용 가능성을 확인하였다.

II. 실험방법

Ta(bottom)/NiFe/Cu/NiFe/IrMn/Ta(top) 다층박막을 3×10^{-6} Torr인 고진공 증착 시스템을 이용하여 유리(Corning 7059) 기판 위에 마그네트론 스퍼터링 방법으로 상온에서 증착하였다. 증착시 인가된 일축방향 이방성 자기장의 크기는 영구자석을 이용하여 350 Oe 이었다. Ta, NiFe, Cu, IrMn의 독립적인 3인치 타겟들을 증착시 플라즈마의 상호간섭이나 타겟 성분들 간의 혼재를 막기 위해 분리막을 사용하였다. Ta, NiFe, Cu, IrMn의 박막에 대한 증착률은 각각 0.1nm/sec, 0.15nm/sec, 0.12 nm/sec, 0.1 nm/sec이었다. 이번 다층박막 구조에서 바닥층 Ta, 자유층 NiFe, 고정층 NiFe, 반강자성층 IrMn, 보호층 Ta의 두께를 각각 5 nm, 8 nm, 4 nm, 8 nm, 2.5 nm으로 설정하였으며, 고정층과 자유층 간의 상호교환결합력을 최소화하여 자장감응도를 높이기 위해 시트층 Cu의 두께를 2.3 nm에서 3.7nm까지 변화시켰다. 이에 따라 시료의

*Tel: (033) 738-7961, E-mail: ssllee@sangji.ac.kr

자기적 특성은 박막 면에 수평 방향으로 외부 자기장을 인가하여 4단자법으로 전류와 전압을 측정하여 얻은 자기저항 곡선을 통해 조사하였다. 자화 용이축으로 얻은 자기저항 곡선은 증착시 인가한 일축 이방성 자기장과 일치한 폭 방향으로 정하였다[9].

광 리소그래피 공정으로 GMR-SV 소자에 1~10 μm 의 폭 크기와 20 μm 의 길이를 갖는 PR(Photoresistance) 영역을 남기도록 하였으며, 전자 사이클로트론 공명장치(Electron Cyclotron Resonance; ECR)를 이용한 Ar^+ 이온 밀링으로 식각을 하였다[10]. 여기서 증착시 인가한 자기장의 자화 용이축 방향을 소자의 폭 방향으로 하여 형상자기 이방성 효과가 나타나도록 하였다. 이 소자의 제조공정에서 밀링 후 아세톤으로 PR을 제거하였으며, 2차 광 리소그래피 공정으로 폭 크기는 변하지 않고 길이는 4.5 μm 로 실제 영역만 남기도록 하였다. 그 위에 Cr(50 nm)와 Cu(50 nm)를 차례로 증착한 후 lift-off 방법으로 전극을 형성하였다. 이 소자의 공정과정에서 생긴 산화막 및 표면오염으로 인한 자기저항 특성의 변화를 최소화하기 위해 표면처리과정을 거친 후 in-situ 방법으로 바로 전극을 형성시켰다. 이 소자의 자기저항 특성은 상온에서 2단자 자기저항 측정 시스템으로 얻은 값의 자기저항 곡선으로부터 각각 결정하였다.

III. 실험결과 및 토의

Fig. 1은 Glass/Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(2.3 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) 다층박막을 측정하여 얻은 GMR-SV에 대한 Major(Fig. 1(a))와 Minor(Fig. 1(b))의 자기저항 곡선이다. NiFe/Cu/NiFe/IrMn GMR-SV 다층박막 구조에서 IrMn층의 두께가 8 nm일 때, 서로 샌드위치(sandwich) 구조를 이루고 있는 두께가 2.3 nm인 비자성체 Cu층을 사이에 둔 두 강자성체의 NiFe층간 상호교환결합력은 1.2 Oe 이었다. 반강자성체 IrMn층에 고정된 NiFe층의 보자력과 교환결합력 세기는 각각 35 Oe, 230 Oe인 특성을 보였다. 반면에 자유층

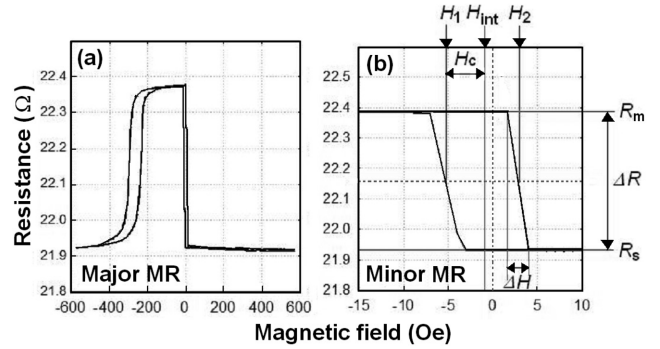


Fig. 1. (a) Major and (b) Minor MR curves of the Glass/Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(2.3 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) GMR-SV film. Here are noted the definitions for surface resistance (R_s), maximum surface resistance (R_m), difference of surface resistance (ΔR), magneto-resistance ratio (MR), magnetic sensitivity (MS), raising coercivity (H_1), dropping coercivity (H_2), coercivity (H_c), and interlayer coupling field (H_{int}).

NiFe의 보자력은 3.7 Oe를 유지하였으며, 4단자에서 표면저항, 자기저항비, 자장감응도는 각각 21.92 Ω , 1.46 %, 0.6 %/Oe 이었다.

Table 1은 Glass/Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(t)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) GMR-SV 다층박막에 대하여 사잇층 Cu의 두께를 2.3 nm부터 3.7 nm까지 측정한 Minor 자기저항 곡선으로부터 얻은 결과로써, Fig. 1(b)에서 정의한 표면저항 (R_s), 최대표면저항(R_m), 표면저항차(ΔR), 자기저항비(MR), 자장감응도(MS), 상승보자력(H_1), 하강보자력(H_2), 보자력(H_c), 상호교환결합력(H_{int})의 값을 나타내었다.

사잇층 Cu의 두께가 증가할수록 표면저항의 값이 감소하고 누설전류(Leakage Current)로 인한 표면저항차의 값이 감소하였으며, 자기저항비도 따라 감소하였다. 특히 사잇층 Cu의 두께가 3.3 nm와 3.5 nm 일 때, 자기저항비가 약간 높고 상호교환력이 낮으며, 자장감응도가 높은 것은 RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 상호작용으로 기인된 효과로 사료된다[11, 12]. GMR-SV 박막일 경우에 나타나는 2.6

Table I. Cu thickness dependence of magnetoresistance properties of free NiFe layer for the Glass/Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(t)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) films.

Cu(t) (nm)	R_s [Ω]	R_m [Ω]	ΔR [Ω]	MR [%]	MS [%/Oe]	H_1 [Oe]	H_2 [Oe]	H_c [Oe]	H_{int} [Oe]
2.3	21.93	22.38	0.45	2.09	0.60	-5.0	+2.6	3.80	-1.20
2.5	21.15	21.53	0.38	1.98	0.66	-5.0	+2.5	3.75	-1.25
2.7	21.15	21.54	0.39	1.90	0.63	-4.4	+2.6	3.50	-0.90
2.8	20.11	20.32	0.21	1.10	1.10	-3.5	+1.8	2.65	-0.85
3.0	18.92	19.12	0.20	1.20	1.20	-3.5	+1.8	2.65	-0.85
3.2	17.79	18.01	0.22	1.25	1.25	-3.4	+1.7	2.55	-0.85
3.3	16.61	16.84	0.23	1.40	1.40	-3.1	+2.5	2.55	-0.30
3.5	15.80	16.01	0.21	1.46	2.00	-2.7	+2.5	2.60	-0.10
3.7	14.37	14.58	0.21	1.30	1.30	-3.3	+2.1	2.70	-0.60

Oe 근방의 보자력을 보여준 Minor 히스테리시스(hysteresis) 자기저항 곡선은 실제 10 μm 이하의 GMR-SV 소자가 갖는 자장감응도를 저하시킨다고 볼 수 있다. 따라서 보자력을 최소화하는 히스테리시스 특성을 얻기 위해서는 소자를 제작할 때에 형상자기 이방성을 고려하여 자화 용이축 방향을 설정하는 것이 중요하다. 이러한 소자를 제작할 때에 필요한 시료는 중간 상호교환결합력이 0.10 Oe로 가장 낮은 Cu의 두께가 3.5 nm인 NiFe/Cu/NiFe/IrMn GMR-SV 박막으로 정하였다. 소자의 폭 방향을 용이축으로 설정하고 사잇층 Cu의 두께를 정하여 자유층 NiFe(8 nm)에서 형상자기 이방성 효과가 나타나도록 길이축 방향으로 자화 용이축을 설정하였다. 고정층과 자유층의 자화 방향이 서로 박막 면상에서 수직을 유지하여 자장감응도는 비록 낮지만 보자력이 매우 작은 소자의 히스테리시스 특성을 가지게 된다.

Fig. 2(a)는 Glass/Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.5 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) 다층박막을 광 리소그래피 공정으로 제작한 GMR-SV 소자의 실제 사진이다. 증착시 인가한 자기장의 용이축 방향으로 형상자기 이방성 효과가 나타나도록 하였다. 8 mm × 8 mm 크기 안에 있는 전체 소자의 갯수는 모두 66개이며, 공통으로 사용하는 전극을 중앙 부분에 배치하였다. 이 전극의 폭 크기는 모두 50 μm이다. 6개의 그룹 별로 각 소자의 중앙에서 4.45 μm의 길이와 1 μm부터 10 μm까지 1 μm 간격으로 폭 크기가 다른 소자를 제작하였다. Fig. 2(b)는 1.02 μm × 4.45 μm 크기의 소자를 나타낸 실제 사진이다. 여기서 길이 방향으로 수직이고 폭 방향으로 평행인 상태로 자화 용이축 방향을 설정하였다.

Fig. 3(a)는 본 실험의 표준이 되는 Glass/Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.5 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) 다층박막에 대해 4단자법으로 측정된 Minor 자기저항 곡선이다. Fig.

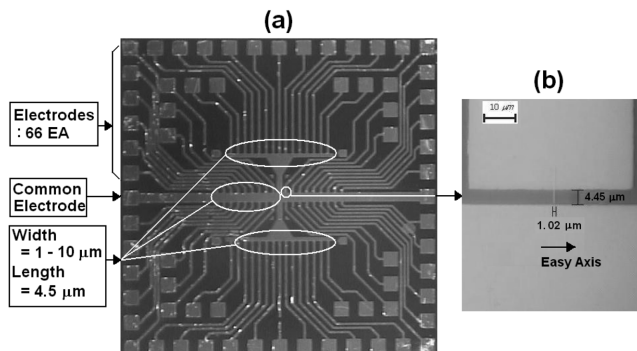


Fig. 2. (a) Total view of real GMR-SV devices with common electrode and two probe electrodes of 64 ea. All devices have ten type different widths of 1~10 μm and the same length of 4.45 μm. (b) Real photo of GMR-SV device for the smallest width of about 1 μm. Here, the easy axis is perpendicular to the longitudinal direction.

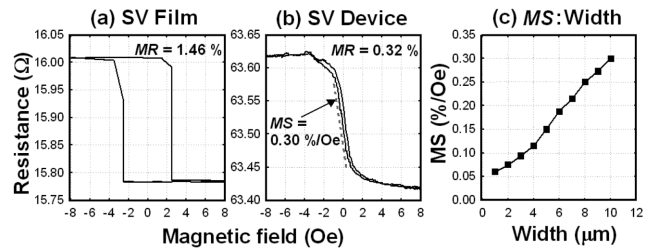


Fig. 3. (a) Minor MR curves of the Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.5 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) GMR-SV film; $MR = 1.46\%$, $MS = 2.0\%/Oe$, $H_c = 2.6 Oe$, and $H_{int} = 0.1 Oe$. (b) Minor MR curves for the GMR-SV device with a width of 1 μm; $MR = 0.32\%$, $MS = 0.3\%/Oe$, $H_c = 0.1 Oe$, and $H_{int} = 0 Oe$. (c) MS dependence as a function of width of GMR-SV device; $MS = 0.06\%/Oe \sim 0.3\%/Oe$, width = 1~10 μm.

1(b)와 비교해 보면 Cu의 두께가 클 때에 상호교환결합세가 매우 작음을 알 수 있다. Table 1의 실험결과를 살펴보면 MR , MS , H_c , H_{int} 은 각각 1.46%, 2.0%/Oe, 2.6 Oe, 0.1 Oe이다. Fig. 3(b)는 Glass/Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.5 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) 다층박막을 소자로 제작한 후 Fig. 2(a)에서 보여준 10.0 μm × 4.45 μm 크기의 소자를 2단자법으로 측정된 Minor 자기저항 곡선으로 MR , MS , H_c , H_{int} 은 각각 0.32%, 0.3%/Oe, 0.1 Oe, 0 Oe이다. 여기서 보자력과 자장감응도의 감소는 소자의 폭 방향을 용이축으로 설정하고 자유층에서 형상자기 이방성 효과가 나타나도록 길이축 방향으로 자화 용이축을 설정함으로써 실제로 GMR-SV 소자가 바이오 센서로 자화 용이축의 특성을 가지게 되기 때문이다. 수 μm의 분자수준 크기를 갖는 물질을 선택함에 있어 자성신호를 이용한 생화학적 분자의 운동을 관찰하려면 소자의 폭 크기를 1 μm 이하로 줄여야 한다. Fig. 3(c)는 폭 크기의 감소에 따른 자장감응도의 의존성을 보여준 결과이다. GMR-SV 소자의 폭 크기가 1 μm 간격으로 10 μm에서 1 μm까지 작아짐에 따라 자장감응도는 0.3%/Oe에서 0.06%/Oe로 5배 정도 감소하였다. 이러한 결과는 NiFe/Cu/NiFe/IrMn 다층박막 구조를 갖는 GMR-SV 소자가 바이오 센서로 활용함에 있어서 반드시 고려해야 할 요소이며, 새로운 연자성 박막을 개발할 필요가 있다.

IV. 결 론

IrMn 스핀밸브 박막에 대해 Cu의 두께에 의존하는 자장감응도를 조사하였다. 두께가 2.3 nm인 비자성체 Cu층을 사이에 둔 자유층 NiFe(8 nm)과 고정층 NiFe(4 nm)에서 형성된 중간 상호교환결합력(H_{int})은 1.2 Oe 이었다. 자유층 NiFe의 보자력은 3.7 Oe를 유지하였으며, 4단자에서 표면저항, 자기저항비, 자장감응도는 각각 21.92 Ω, 1.46%, 0.6%/Oe 이었다.

한편 Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.5 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) 다층박막 구조에 대해 측정된 Minor 자기저항 곡선에서 자기저항비, 자장감응도, 보자력, 층간 상호교환 결합력은 각각 1.46 %, 2.0 %/Oe, 2.6 Oe, 0.1 Oe 이었다. 광 리소그래피 공정으로 제작한 10가지 다른 폭 크기와 4.45 μm 의 길이를 갖는 GMR-SV 소자의 자장감응도는 폭 크기가 10 μm 에서 1 μm 까지 작아짐에 따라 0.3 %/Oe에서 0.06 %/Oe로 감소하였다. 이러한 결과는 GMR-SV 소자가 바이오 센서로 활용함에 있어서 반드시 고려해야 할 요소이다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2009-0073065)의 결과이며, 상지대학교 2009년도 교내연구비 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

[1] J. M. Daughton, J. Magn. Magn. Maters. **192**, 334 (1999).

[2] D. A. Baker, Nature **405**, 39 (2000).
 [3] G. Li, S. Sun, R. J. Wilson, R. L. White, N. Pourmand, and S. X. Wang, Sens. Acut. A **126**, 98 (2006).
 [4] J. Miyakoshi, Prog. Im Biophysics, Mol. Bio. **87**, 213 (2005).
 [5] B. M. de Boer, J. A. H. M. Kahlman, T. P. G. H. Jansen, H. Duric, and J. Veen, Biosens. Bioelectron. **22**, 2366 (2006).
 [6] D. K. Wood, K. K. Ni, D. R. Schmidt, and A. N. Cleland, Sens. Acut. A **120**, 1 (2005).
 [7] D. W. Kim, J. H. Lee, M. J. Kim, and S. S. Lee, J. Magnetism **14**, 80 (2009).
 [8] S. H. Park, K. S. Soh, D. G. Hwang, J. R. Rhee, and S. S. Lee, J. Magnetism **13**, 30 (2008).
 [9] W. H. Lee, D. G. Hwang, and S. S. Lee, J. Magnetism **14**, 18 (2009).
 [10] J. G. Choi, I. S. Ko, Y. M. Gong, M. H. Kim, Y. S. Park, D. G. Hwang, and S. S. Lee, J. Kor. Magn. Soc. (Korean) **19**, 52 (2009).
 [11] P. Bruno and C. Chappert, "Magnetism and Structure in Systems of Reduced Dimension", p389-p399, Edited by R. F. C. Farrow et al., Plenum Press, New York (1993).
 [12] M. A. Ruderman and C. Kittel, Phys. Rev., **96**, 99 (1954); T. Kasuya, Progr. Theor. Phys. **16**, 45 (1956); K. Yosida, Phys. Rev. **106**, 893 (1957).

Magnetic Sensitivity Depending on Width of IrMn Spin Valve Film Device

Jong-Gu Choi¹ and Sang-Suk Lee^{1,2*}

¹Dept. of Eastern-western Biomedical Engineering, Graduation, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

²Dept. of Oriental Biomedical Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

(Received 5 February 2010, Received in final form 19 February 2010, Accepted 19 February 2010)

The Cu thickness dependence of magnetic sensitivity for the NiFe/Cu/NiFe/IrMn spin valve multilayer was investigated. The magnetic properties measured by minor MR curves for the Ta(5 nm)/NiFe(8 nm)/Cu(3.5 nm)/NiFe(4 nm)/IrMn(8 nm)/Ta(2.5 nm) multilayer is $MR = 1.46\%$, $MS = 2.0\%/Oe$, $H_c = 2.6 Oe$, and $H_{int} = 0.1 Oe$. The magnetic sensitivities of GMR-SV devices with ten different widths and a same length of 4.45 μm by fabricated by photo lithography decreased from 0.3 %/Oe to 0.06 %/Oe as from a width of 10 μm to 1 μm .

Keywords : NiFe/Cu/NiFe/IrMn-spin valve film, width of device, magnetic sensitivity, interlayer exchange coupling field, magnetization easy axis