

## Synthetic antiferromagnet CoFe/Ru/CoFe/FeMn을 이용한 스핀 밸브 구조의 interlayer coupling field

김광윤 · 신경호 · 김희중

한국과학기술연구원 박막기술연구센터, 서울시 성북구 하월곡동 39-1

장성호 · 강 탁

서울대학교 재료공학부, 서울시 관악구 신림동 산 56-1

(2000년 8월 21일 받음 2000년 10월 6일 최종수정본 받음)

Synthetic antiferromagnet CoFe/Ru/CoFe/FeMn을 사용하고 자유층으로 NiFe/CoFe 이중 층을 사용한 top 스핀밸브 구조를 dc magnetron 방식으로 제조하여, 자유층과 구속층의 두께변화에 따른 자기적 특성과 interlayer coupling field의 변화를 조사하였다. Si/Ta(50 Å)/NiFe(x Å)/CoFe(y Å)/Cu(26 Å)/CoFe(30 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(15 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(50 Å) top synthetic 스핀밸브 시료에서 자유층의 두께 감소에 따른 interlayer coupling field를 조사한 결과 interlayer coupling field가 증가하였으며, 이것은 Néel 모델에 의한 정자기 교환결합에 기인하는 것으로 설명하였다. Top synthetic 스핀 밸브에서 Cu에 인접한 자성층(P1)과 FeMn에 인접한 자성층(P2)의 두께 차이에 따른 interlayer coupling field의 의존성을 조사한 결과  $t_{p1} > t_{p2}$  일 경우 interlayer coupling field(층간 교환 결합력 세기)는 기존 스핀 밸브에서 적용한 Kools이 제시한 modified Néel 모델에 잘 부합되나,  $t_{p1} \leq t_{p2}$  인 경우 모델과 부합되지 않으므로 새로운 모델이 필요함을 확인하였다. Cu 두께에 변화에 따른 층간 교환 결합력 세기 의존성을 조사한 결과 Cu 두께를 32 Å으로 증가시 층간 교환결합력 세기는 10 Oe 이하로 감소하였다.

### I. 서 론

10 Gbit/in<sup>2</sup>의 고밀도 자기 기록에 대응하기 위하여 최근 재생전용 헤드로서 거대자기저항 스핀밸브 다층 박막이 사용되고 있다. 그러나 20 Gbit/in<sup>2</sup> 이상의 고밀도를 구현하기 위해서는 기존의 스핀밸브 구조는 낮은 교환자기 이방성, 열적 안정성, 그리고 소자의 크기를 줄임에 따라서 구속층의 반자장에 의한 자유층의 read back asymmetry가 증가하는 것이 큰 문제점으로 지적되고 있다. 최근에 이러한 문제점을 개선하기 위하여 기존 스핀밸브에서 구속층(pinning layer)을 대신하여 강자성층/비자성층/강자성층의 인공 초격자 삼층막 구조인 synthetic antiferromagnet을 갖는 스핀밸브 구조가 제안되었다[1]. 기존의 스핀밸브 구조가 반강자성/강자성의 계면에서 교환 이방성을 이용하는 반면에 synthetic antiferromagnet은 구속층으로 다층 박막에서 사용되는 first antiferromagnetic 교환결합을 사용함으로써 교환 이방성 에너지를 증가시킬 수 있으며, 반강자성 교환결합으로 인하여 자성층의 자화값을 거의 영으로 줄일 수 있기 때문에 자유층에 반자장의 효과를 줄일 수 있는 등 다양한 장점을 가지는 것으로 보고되고 있다[2].

또한 고밀도 기록을 실현하기 위해서 read element

GMR 다층막에서 자유층의 두께를 줄여 감도를 증가시키는 것이 필수적인 요소이다. 그러나 자유층의 두께를 감소 시킴으로 앞에서 언급한 구속층의 반자장에 의하여 자유층의 bias에 영향을 미치며, 감도가 변하는 것으로 보고되고 있다. 그러므로 자유층의 두께 감소에 의한 이들의 효과를 감소시키기 위해서는 자유층의 두께 감소에 의해 가장 민감하게 변하는 층간 결합에 대해서 체계적인 이해를 할 필요가 있다.

일반적으로 구속층과 자유층 사이에는 층간 교환 결합력이 작용하며, 이에 근원적으로 교환 결합 및 topographic 정자기 교환 결합(orange-peel coupling)이 제시되고 있다[3,4]. 스핀밸브 구조에서 Cu 두께를 고정하면 교환 결합 효과(RKKY type)는 고정되므로 대부분 magnetostatic coupling(Néel or Orange peel coupling)의 효과를 조사하고 분석하는 연구 결과가 많이 보고되고 있다. 정자기 교환 결합 효과를 조사하기 위하여 가장 많이 이루어진 연구는 seed layer, Cu 두께, 제조 조건 등의 변화에 따른 거칠기를 조사하여 층간 교환 결합력 세기에 미치는 영향을 조사한 것들이다[5-9]. 최근에 Kools 등은 스핀 밸브 시료에서 각 자성층의 두께(free layer 및 pinned layer)가 Néel coupling에 미치는 연구를 최초로 시도하여 modified Néel 모델

을 제시하였으며, 이 모델과 실험 결과와 잘 일치함을 보고하였다[10]. 그러나 최근 고밀도 기록을 위하여 제시된 synthetic 스핀밸브에서의 각 자성층의 두께가 층간 교환 결합력 세기에 미치는 영향은 아직 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 synthetic antiferromagnet CoFe/Ru/CoFe/FeMn을 사용하고 자유층으로 NiFe/CoFe 이중 층을 사용한 top 스핀밸브 구조를 제조하여, 자유층과 구속층의 두께를 변화시켜 정자기 교환 결합 효과가 층간 교환 결합력 세기(H<sub>ex-in</sub>)에 미치는 영향을 조사하였으며, 자유층 두께 감소에 따른 자기적 특성을 조사하였다.

### II. 실험방법

2인치 크기의 6개의 타겟을 가진 직류 마그네트론 스퍼터링 방식으로 자연 산화막을 가진 Si(100) 기판 위에 Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/Ru/CoFe/FeMn/Ta synthetic 스핀밸브 박막을 제조하였다. 스퍼터링 장비의 초기 진공도는 6×10<sup>-7</sup> torr 정도로 하였으며, 각 물질의 증착속도는 전력을 변화시켜 0.5-2.5 Å/sec로 조절하였으며, 자성층에 유도 자기 이방성의 형성 및 FeMn에 의한 교환 자기 이방성을 형성시키기 위하여 영구자석을 이용하여 증착 중에 300 Oe 을 자장을 인가하였다. 본 연구에서 설계한 Si/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe(P1)/Ru/CoFe(P2)/FeMn/Ta synthetic 스핀밸브 박막 증착시 스퍼터링 압력은 1 mTorr로 고정하였고 Cu에 인접한 CoFe P1과 FeMn에 인접한 P2의 두께비를 조정하고, 이 때 자기 저항비가 최적이 되는 조건에서 자유층의 두께와 FeMn의 두께를 조절하였다. 제조된 스핀밸브 박막의 자기적 특성은 진동 시편 자력계(Vibrating Sample Magnetometer)를 사용하여 측정하였고, 박막의 전도성은 직류 4단자 탐침법으로 상온에서 측정하였으며, 이때 전류와 자장방향은 서로 평행하게 하였다. VSM에 사용되는 전자석을 사용하여 10 kOe 자장범위에서 전체적인 R-H 곡선을 측정하였으며, 이로부터 스핀밸브 박막의 유효 교환 자기 이방성(H<sub>eff-ex</sub>)을 최대 자기저항비의 1/2에 해당하는 성분과 만나는 값으로부터 구하였다. 또한 120 Oe의 자장크기를 발생하는 helmholtz 코일을 사용하여 R-H 곡선을 측정하였고, R-H 곡선이 원점에서 벗어나는 크기로부터 층간 교환 결합력 세기(H<sub>ex-in</sub>)을 구하였다.

### III. 실험 결과

고밀도 기록에 대응하기 위해서 재생전용 헤드의 센서

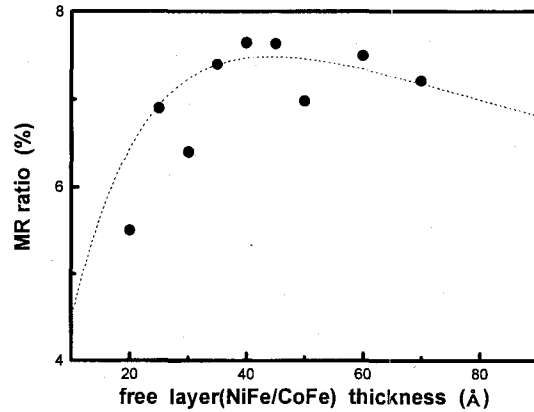


Fig. 1. Free layer(NiFe/CoFe) thickness dependence of MR ratio for the top synthetic spin valve Si/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CiFe/Ru/CoFe/FeMn/Ta.

부위를 차지하는 스핀밸브 구조의 각층의 두께를 감소시키는 것이 제시되고 있다. 그 중 자유층의 두께를 감소시켜 감도를 증가시키는 것이 필수적인 요소이다. 그러나 자유층의 두께를 감소시킬 수 있는 한계는 각 설계된 스핀밸브 구조에 매우 의존적이다. 왜냐하면 자유층의 두께를 감소시키면 자기저항비는 감소하고 H<sub>ex-in</sub>는 증가하는 것으로 알려져 있기 때문이다.

Fig. 1은 본 연구에서 설계한 top synthetic 스핀밸브 구조에서 자유층의 두께 변화에 따른 자기 저항의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서 설계한 Si/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/Ru/CoFe/FeMn/Ta의 top synthetic 스핀밸브 구조와 관련한 최적의 자기적 특성은 다른 논문[11]에 제시하였으므로 본 논문에서는 언급하지 않을 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 현재 설계된 스핀밸브 구조에서는 자유층을 구성하는 NiFe+CoFe의 두께가 40 Å 일 때 7.5%의 자기 저항비를 가지며 그 전후로는 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 주목하여 할 점은 자유층의 두께가 40 Å 이하로 감소하면 자기 저항비가 급격히 감소하여 25 Å의 경우 약 7%이며, 자유층의 두께가 20 Å의 경우 약 5.5%의 자기 저항비가 얻어지고 있다. 이와 같은 자기 저항비의 감소는 자성층의 두께가 전도전자의 평균자유행로 보다 작을 경우 전도전자의 스핀산란이 감소하기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 2는 자유층의 두께를 40 Å으로 한 synthetic 스핀밸브 구조의 M-H 곡선 및 자기저항 곡선을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 전형적인 synthetic 스핀밸브 구조의 M-H 곡선이며, 그 결과로부터 synthetic 스핀밸브 구조를 완전히 포화시키기 위해서는 5 kOe 이상

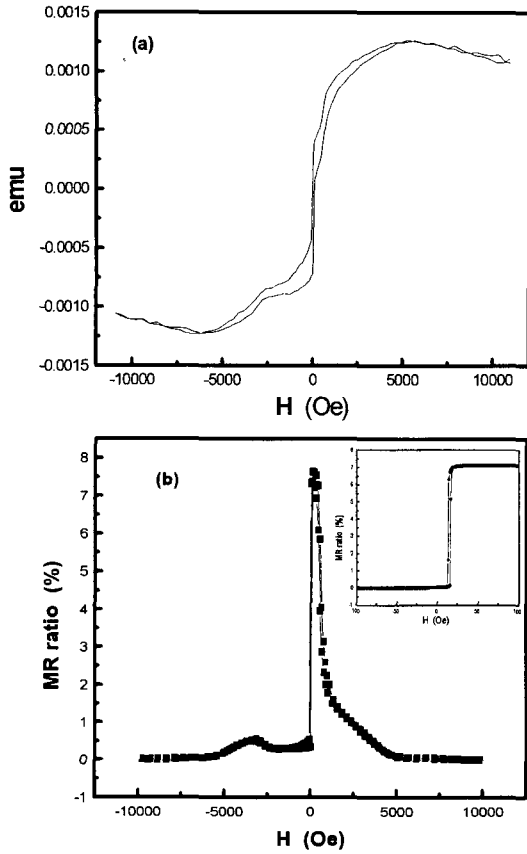


Fig. 2. M-H(a) and R-H(b) curves at high field for the top synthetic spin valve Si/Ta(50 Å)/NiFe(27 Å)/CoFe(13 Å)/Cu(26 Å)/CoFe(30 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(15 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(50 Å), (inset): R-H curve measured at low field.

이 필요함을 알 수 있다. 한편 그림에서 5 kOe 이상의 자계에서 자화값이 감소하는 것은 기관으로 사용된 Si의 diamagnetic 효과가 완전히 보상되지 않았기 때문인 것으로 판단되고 있다. Fig. 2(b)도 전형적인 synthetic 스핀밸브 구조의 자기저항곡선을 나타내고 있으며, 그림에서 보는 바와 같이 synthetic anti 강자성 교환결합에 의해서 0.5%의 자기 저항비가 얻어지고 있다. -100 Oe에서 100 Oe 까지 그런 GMR 곡선으로부터 본 연구에서 설계한 스핀밸브 구조의 감도가 매우 우수함을 알 수 있으며, 자기저항비도 7% 까지 얻어짐을 관찰할 수 있다.

Fig. 3은 synthetic 스핀밸브 구조에서 자유층의 두께 변화에 따른  $H_{ex-in}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 자유층의 두께가 70 Å에서 20 Å까지 감소하면서  $H_{ex-in}$ 는 증가하는 경향을 보이고 있다. 본 연구에서 설계한 synthetic 스핀밸브 구조에서 Cu의 두께는 26 Å으로 고정하였으므로 Cu 두

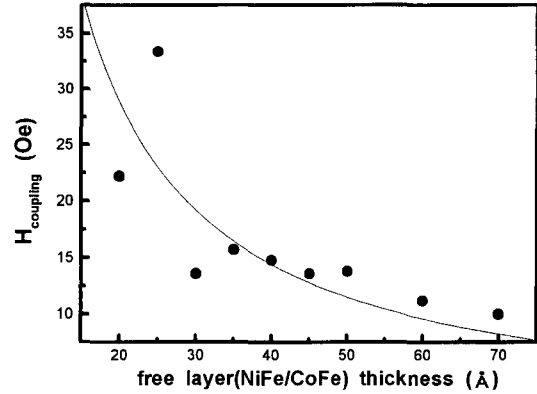


Fig. 3. Free layer thickness dependence of interlayer coupling field for the top synthetic spin valve Si/Ta(50 Å)/NiFe(x Å)/CoFe(y Å)/Cu(26 Å)/CoFe(30 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(15 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(50 Å).

께에 의존하는 교환결합은 동일한 상태임을 알 수 있다. 또한 모든 제조 조건은 동일하므로 그림에서 제시한  $H_{ex-in}$ 는 자유층의 두께 변화에만 의존하는 정자기 교환결합 효과임을 알 수 있다.

synthetic 스핀밸브 구조는 기존의 스핀밸브 구조가 한 층의 pinned layer(피구속층)을 가지는 것과는 달리 피구속층으로서 ferro/nonmagnetic layer/ferro의 반강자성 결합구조를 사용하게 되므로 Cu에 근접한 층과 반강자성 재료에 근접한 층에 동시에 영향을 받을 것으로 생각된다. synthetic 스핀밸브 구조에서 자기저항비와 교환자기장이 비자성층을 사이에 둔 두 강자성의 두께에 매우 의존적임이 보고되고 있으므로,  $H_{ex-in}$  또한 Cu에 직접 결합

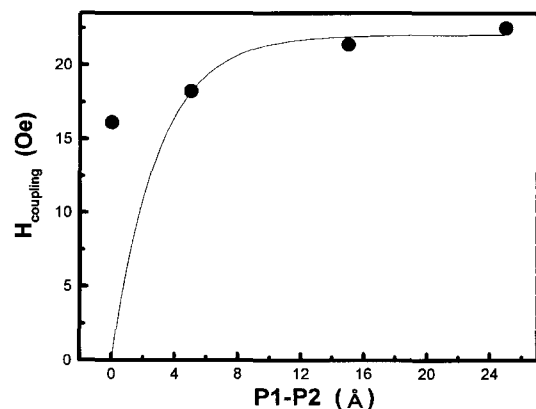


Fig. 4. Thickness difference (P1-P2) dependence of interlayer coupling field for the top synthetic spin valve Si/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe(P1)/Ru/CoFe(P2)/FeMn/Ta.

한 층에만 종속적이지 않을 것으로 판단된다. Fig. 4는 synthetic 스핀밸브 구조에서 P1 층과 P2 층의 차이에 따른  $H_{ex-in}$ 의 변화를 나타낸 것이다. P1과 P2 층의 총 두께는 45 Å로 고정하고 P1과 P2의 차이를 0, 5, 15, 25 Å 까지 변화를 주었다. 그 결과  $H_{ex-in}$ 는 P1과 P2의 차이가 없을 때 가장 낮은 16.1 Oe 정도를 나타내며, P1-P2가 25 Å일 때 22.5 Oe 정도로 증가하고 있다. 결과적으로  $H_{ex-in}$ 가 P1과 P2의 상대적인 두께에 종속적임을 확인할 수 있었다.

#### IV. 고찰

위의 결과에서 본 것처럼 정자기 교환결합 효과의 자성층 두께 의존성을 설명하기 위해서는 우선 Néel 모델에 대해서 간략하게 알아볼 필요가 있다. Néel에 의해 제시된 interlayer coupling energy  $J$ 는 다음과 같다[12].

$$J = \frac{\pi^2 h^2 \mu_0 M_F M_P}{2\lambda} \exp(-2\pi\sqrt{2}t_{Cu}/\lambda). \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 correlated interface waviness의 amplitude이며,  $\lambda$ 는 wavelength이다.  $M_F$ ,  $M_P$ 는 무한대 두께를 갖는 자유층과 구속층의 포화자화값을 말하며,  $t_{Cu}$ 는 비자성층의 두께를 의미한다. 이 식으로부터 Cu 두께에 대한  $H_{ex-in}$ 는 잘 설명되고 있다. 또한 자유층의 두께가  $t_F$ 일 때

$$\text{offset field } H_0 = J / (\mu_0 M_F t_F) \quad (2)$$

이다.

Kools 등은[10] flat 한 기판위의 top 스핀 밸브 구조에서 cumulative waviness을 갖는 주상정 구조를 가정하여 자성층의 두께가 무한하지 않고 유한할 때 (1) 식을 수정하여 아래와 같이 주어진다고 한다.

$$H_0 = \frac{\pi^2 h_1 h_2 \mu_0 M_P}{2\lambda t_F} \left[ 1 - \frac{h_3}{h_2} \exp(-2\pi\sqrt{2}t_P/\lambda) \right] \exp(-2\pi\sqrt{2}t_{Cu}/\lambda). \quad (3)$$

(3) 식을 풀어보면 (4) 식이 된다.

$$H_0 = \frac{\pi^2 h_1 h_2 \mu_0 M_P}{2\lambda t_F} \exp(-2\pi\sqrt{2}t_{Cu}/\lambda) - \frac{\pi^2 h_1 h_3 \mu_0 M_P}{2\lambda t_F} \exp(-2\pi\sqrt{2}(t_P + t_{Cu})/\lambda). \quad (4)$$

여기서 그는 모든 계면에서 결정립은 주상정을 가지는 것

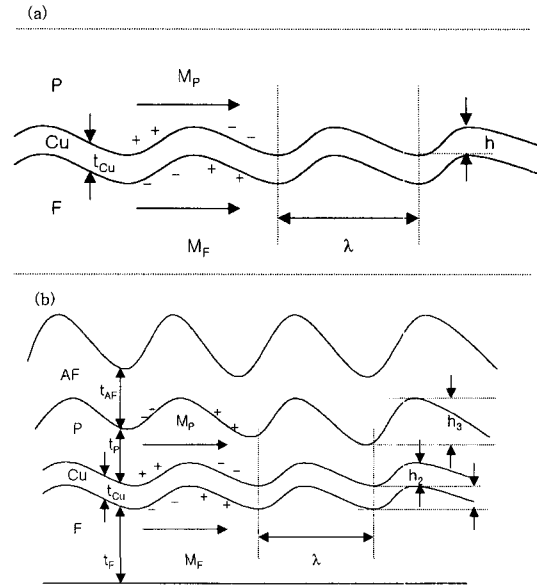


Fig. 5. Schematic view of magnetostatic interaction (a) Neel model, magnetic films with infinite thickness, (b) Columnar structure with accumulative waviness.

을 가정하고 있다. 또한 계면을 이차원 sine 파 형태를 가정하며 자유층의 윗면 amplitude  $h_1$ , 구속층의 아랫면 amplitude를  $h_2$ , 구속층의 윗면 amplitude를  $h_3$ 로 가정하였다. 이때 두 종류의 coupling terms이 고려되고 있다. 그 중 첫째는 자유층의 윗면 pole과 구속층의 아랫면 pole에 의한 강자성 교환결합이며, 둘째는 자유층의 윗면 pole과 구속층의 윗면 pole에 의한 반강자성 교환결합이다. 위 (4) 식에서 첫 번째 항이 강자성 교환결합에 의한 정자기 교환결합이며, 둘째 항이 반강자성 교환결합에 의한 정자기 교환결합이다. 위 모델의 이해를 돕기 위하여 Néel 모델에 의한 경우와 한정된 자성층의 두께를 가진 top 스핀 밸브의 경우를 Fig. 5에 모식적으로 나타내었다.

Kools이 제시한 모델은 top 스핀 밸브에 적용할 수 있고 그의 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 보고하고 있다. 그러나 본 연구에서는 top 스핀 밸브 구조를 사용하고 있지만 conventional 스핀 밸브 구조가 아니라 앞에서 언급한 것처럼 synthetic 스핀 밸브에서 자성층의 두께 변화에 따른 정자기 교환결합을 조사하는 것이다. 그러므로 관심의 초점은 synthetic 스핀 밸브에서도 Kools이 제시한 Néel 모델의 수정된 식이 잘 적용하는지를 조사하는 것이다.

Fig. 6은 Fig. 4에서 제시한 P1-P2의 변화에 따른  $H_{ex-in}$ 를 나타낸 것을 P1의 두께에 따른  $H_{ex-in}$ 를 나타낸 것이

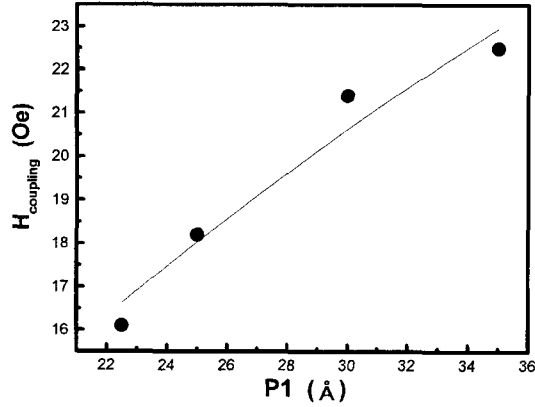


Fig. 6. P1 layer(close Cu layer) thickness dependence of interlayer coupling field for the top synthetic spin valve Si/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe(P1)/Ru/CoFe/FeMn/Ta (P1+P2=45 Å).

다. 그림에서 보는 바와 같이 pinned layer(구속층)의 두께가 증가함에 따라서 (3) 식에서 제시한 거동과 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 synthetic 스핀 밸브에서도 conventional 스핀 밸브에서의 동일한 식을 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 이것은 P1, P2에서 P1의 두께가 P2 두께보다 두껍고, P2의 두께가 P1에 영향을 미치지 않는다는 가정하에서 pinned layer의 두께로서 P1을 사용하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, (3) 식에 P1 대신 P1-P2를 사용하는 경우 즉  $t_p$  대신에  $\Delta t$ 를 사용한다면, P1가 P2의 두께가 같을 때  $\Delta t$ 는 영이 되며 이때  $H_{ex-in}$ 는 (3) 식에서 zero가 되어야 할 것이다. 하지만 Fig. 4에 보는 바와 같이 P1-P2가 zero 일 때  $H_{ex-in}$ 는 zero가 되지 않고 있다. 이것은 synthetic 스핀 밸브에서 P1이 P2 보다 두꺼운 경우 P1을 구속층의 두께로 가정하고 P1을 사용할 수는 있지만 P1과 P2와 동일하거나, 혹은 P2가 P1 보다 큰 경우는 이 식이 성립할 수 없음을 알 수 있다. 이것은 synthetic 스핀 밸브에서  $H_{ex-in}$ 는 P1과 P2에 의하여 동시에 지배를 받고 있음을 알 수 있다. 결국은 synthetic 스핀 밸브에서는 Kools이 제시한 modified Néel 모델 즉 (3) 식이 수정되어야 한다는 것을 의미하고 있다. 현재 synthetic 스핀 밸브에 적합한 식을 준비하고 있는 중이므로 본 논문에서는 언급하지 않고 다른 논문에서 다루고자 한다.

(3) 식에 의하면  $H_{ex-in}$ 는 자유층 두께에 반비례하며 이것을 Fig. 3에 solid line으로 나타내었으며, 그림에서 보는 바와 같이 실험 결과도 대체적으로 두께가 감소하면  $H_{ex-in}$ 가 증가하고 있다. 하지만 얻어진 data을 자세히 분

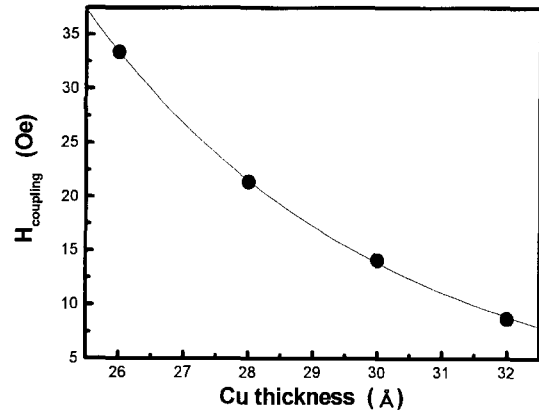


Fig. 7. Cu thickness dependence of interlayer coupling field for the top synthetic spin valve Si/Ta(50 Å)/NiFe(17 Å)/CoFe(8 Å)/Cu(t Å)/CoFe(30 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(15 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(50 Å).

석하여 보면 두께 증가에 따라서 oscillation 거동도 보임을 주장할 수 있다. 현 시점에서 이것을 자세히 설명할 수 없지만 기존 이론의 수정 가능성을 볼 수 있다.

응용적인 측면을 고려할 때 일반적으로 스핀밸브 구조에서 coupling이 전혀 없거나 혹은 있어도 아주 약한 것이 바람직하다. 그러나 고밀도 기록을 위해 스핀밸브 구조의 각 층의 두께를 감소시키면 Néel 모델에 의한 정자기 교환결합이 점점 증가하는 것으로 본 연구 결과 밝혀졌다. 그러므로 고밀도 기록을 위해서는 정자기 교환결합을 감소시키는 것이 중요한 연구의 한 영역이다. 본 연구에서 synthetic 스핀밸브의 자유층을 25 Å 고정할 때 33 Oe 정도의  $H_{ex-in}$ 를 얻었다. 이의 감소를 위해서 자유층과 구속층 사이에 있는 Cu 두께를 26 Å부터 32 Å 까지 증가시켰으며 그때의  $H_{ex-in}$ 의 크기를 조사한 것을 Fig. 7에 나타내었다. 실선은 (3) 식에서 구한 것으로 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 Cu 두께를 32 Å 까지 증가 시  $H_{ex-in}$ 를 10 Oe 이하로 감소시킬 수 있었다.

## V. 결 론

Synthetic antiferromagnet CoFe/Ru/CoFe/FeMn을 사용하고 자유층으로 NiFe/CoFe 이중 층을 사용한 top 스핀 밸브 구조를 dc magnetron 방식으로 제조하여, 자유층과 구속층의 두께변화에 따른  $H_{ex-in}$ 의 변화를 조사하였으며, 또한 자유층의 두께감소에 따른 자기적 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Si/Ta(50 Å)/NiFe(x Å)/CoFe(y Å)/Cu(26 Å)/CoFe

(30 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(15 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(50 Å) top synthetic 스핀밸브에서 자유층(NiFe+CoFe)의 두께를 감소 시킬 시 40 Å 근처에서 최대 저항비를 가지며, 그 이하에서는 자기저항비가 감소함을 알 수 있었다. 자유층의 두께 감소에 따른 자기저항비의 감소는 자성층의 두께가 전도전자의 평균자유행로보다 작을 경우 전도전자의 스핀 의존 산란 효율이 감소하기 때문으로 생각하였다.

2. 위에서 언급한 동일한 시료에서 자유층의 두께 감소에 따른  $H_{ex-in}$ 를 조사한 결과  $H_{ex-in}$ 가 증가하였으며, 이것은 Neel 모델에 의한 정자기 교환결합에 기인하는 것으로 설명하였다.

3. top synthetic 스핀 밸브에서 Cu에 인접한 자성층(P1)과 FeMn에 인접한 자성층(P2)의 두께 차이에 따른  $H_{ex-in}$ 의 의존성을 조사한 결과  $t_{p1} > t_{p2}$ 일 경우  $H_{ex-in}$ 는 기존 스핀밸브에서 적용한 Kools이 제시한 modified Néel 모델에 잘 부합되나,  $t_{p1} \leq t_{p2}$ 인 경우 modified Néel 모델이 성립되지 않음을 확인하였다. 그러므로 synthetic 스핀 밸브에서  $H_{ex-in}$ 를 설명하기 위해서는 다른 모델 작업이 필요하다.

4. Cu 두께 변화에 따른  $H_{ex-in}$  의존성을 조사한 결과 Cu 두께를 32 Å으로 증가시  $H_{ex-in}$ 를 10 Oe 이하로 감소하였다.

### 감사의 글

본 논문은 2000년 한국과학기술연구원의 K-2000

program, 과학기술부의 NRL 및 한영공동연구과제(Korea-UK science and technology joint collaboration program)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 삼성전기 민경익 박사의 조언과 토의에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] D. E. Heim and S. S. P. Parkin, U.S. Patent 5 465, 185 (1995).
- [2] J. L. Leal and M. H. Kryder, J. Appl. Phys. **83**, 3720 (1998).
- [3] Y. Huai, J. Zhang, G. W. Anderson, P. Rana, S. Funda, C.-Y. Hung, M. Zhao and S. Tran, J. Appl. Phys. **85**, 5528 (1999).
- [4] Th. G. S. M. Rijks, R. Coehoorn, J. T. F. Daemen and W. J. M. De Jonge, J. Appl. Phys. **76**, 1092(1994).
- [5] J. Zhang and R. M. White, IEEE Trans. Mag. **32**, 4630(1996).
- [6] J. L. Leal and M. H. Kryder, IEEE Trans. Magn. **32**, 4642(1996).
- [7] J. C. S. Kools, J. Appl. Phys. **77**, 2993(1995).
- [8] C. M. Park, K. I. Min and K. H. Shin, IEEE Trans. Magn. **32**, 3422(1996).
- [9] D. Wei and H. N. Bertram, IEEE Trans. Magn. **32**, 3434(1996).
- [10] J. C. S. Kools, W. Kula, D. Mauri and T. Lin, J. Appl. Phys. **85**, 4466(1999).
- [11] S. H. Jang *et al*, 한국자기학회지 제출, 2000, 8. 18.
- [12] L. Néel, Comptes, Rendus **255**, 1676(1962).

## Interlayer Coupling Field in Spin Valves with CoFe/Ru/CoFe/FeMn Synthetic Antiferromagnet

**K. Y. Kim, K. H. Shin and H. J. Kim**

*Thin Film Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology,  
39-1 Hawolgok-dong Seungbuk-gu, Seoul 136-791, Korea*

**S. H. Jang and T. Kang**

*School of Materials Science and engineering, Seoul National University San 56-1,  
Shilim-dong Kwangak-gu, Seoul 151-742, Korea*

(Received 21 August 2000, in final form 6 10, 2000)

Top synthetic spin valves with structure Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe(P1)/Ru/CoFe(P2)/FeMn/Ta on Si (100) substrate with natural oxide were prepared by dc magnetron sputtering system. We have changed only the thickness in free layers and the thickness difference (P1-P2) in two ferromagnetic layers separated by Ru, and investigated the effect of magnetic film thickness on interlayer coupling field in spin valve with synthetic antiferromagnet. According to the decrease of free layer thickness, interlayer coupling field was increased due to the magnetostatic coupling (orange peel coupling). In case of  $t_{P1} > t_{P2}$ , interlayer coupling field agreed well with the modified Neel model suggested in conventional spin valve structures by Kools *et al.* However, in case of  $t_{P1} \leq t_{P2}$ , it was found that the interlayer coupling field was not explained by the Modified Neel Model and was confirmed the necessity of further remodeling. The dependence of Cu thickness on the interlayer coupling field was investigated and 10 Oe of interlayer coupling field was obtained when the Cu thickness is 32 Å.