

합성형 반강자성체인 CoFe/Ru/CoFe/FeMn에서 고정층의 두께 차이에 따른 스핀 밸브 구조의 자기저항 특성

김광윤

한국과학기술연구원 나노소자연구센터, 서울시 성북구 하월곡동 39-1

(2001년 9월 20일 받음, 2001년 10월 16일 최종수정본 받음)

합성형 반강자성체(synthetic antiferromagnet)인 CoFe/Ru/CoFe/FeMn을 사용하고 자유층으로 NiFe/CoFe 이중 층을 사용한 탑 스핀밸브 구조를 직류 마그네트론 방식으로 제조하여, 구속층의 두께변화에 따른 자기적 특성과 층간교환자계(interlayer coupling field)의 변화를 조사하였다. Si/Ta(50 Å)/NiFe(34 Å)/CoFe(16 Å)/Cu (26 Å)/CoFe(P1 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(P2 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(50 Å) 합성형 탑 스핀 밸브 시료에서 고정층의 두께 변화에 따른 자기저항 특성을 조사한 결과 자기저항비가 P1-P2가 +25 Å에서 -25 Å으로 변화시 자기저항비는 완만하게 감소하나, P1-P2가 영 근처에서는 자화방향의 큰 이탈(canting)에 의하여 자기저항비가 급격히 감소함을 알 수 있다. 합성형 탑 스핀 밸브의 고정층의 두께에 따른 층간교환자계의 변화에 관한 모델을 제시하였으며, 이 모델과 실험에서 구한 결과가 일치함을 확인 할 수 있었다. 단지 P1-P2 근처 영역에서는 스핀 플립 혹은 스핀의 큰 이탈에 의하여 모델의 결과에서 벗어남을 확인하였다.

주제어 : 합성형 스핀밸브, 정자기에너지, 층간교환결합

I. 서 론

20 Gbit/in² 이상의 고밀도를 구현하기 위해서는 기존의 스핀밸브 구조는 낮은 교환자기이방성, 열적안정성, 그리고 소자의 크기를 줄임에 따라서 구속층의 반자장에 의한 재생시 출력의 비대칭이 증가하는 것이 문제점으로 지적되고 있다. 최근에 이러한 문제점을 개선하기 위하여 기존 스핀밸브에서 구속층(pinning layer)을 대신하여 강자성층/비자성층/강자성층의 인공 초격자 삼층막 구조인 합성형 반강자성체를 갖는 스핀밸브구조가 제안되었다[1]. 기존의 스핀밸브 구조가 반강자성/강자성의 계면에서 교환이방성을 이용하는 반면에 인공 반강자성체는 구속층으로 다층박막에서 사용되는 1차 반강자성 교환결합을 사용함으로써 교환이방성에너지를 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 재생전용 거대자기저항 다층박막에서 자유층의 두께를 줄여 감도를 증가시키는 것이 필수적인 요소이다. 그러나 자유층의 두께를 감소시킴으로써 앞에서 언급한 구속층의 반자장에 의하여 자유층의 바이어스에 영향을 미치며, 감도가 변하는 것으로

보고되고 있다. 그러므로 자유층의 두께 감소에 의한 이들의 효과를 감소시키기 위해서는 자유층의 두께 감소에 의해 가장 민감하게 변하는 층간결합에 대해서 체계적인 이해를 할 필요가 있다.

일반적으로 구속층과 자유층사이에는 층간 교환결합력이 작용하며, 이에 근원적으로 교환결합 및 계면 구조에 의한 정자기 교환결합(orange-peel coupling)이 제시되고 있다[3, 4]. 스핀밸브 구조에서 Cu 두께를 고정하면 교환결합 효과(RKKY type)는 고정되므로 대부분 정자기결합력(Neel or Orange peel coupling)의 효과를 조사하고 분석하는 연구결과가 많이 보고되고 있다. 정자기 교환결합 효과를 조사하기 위하여 가장 많이 이루어진 연구는 시드층, Cu 두께, 제조조건 등의 변화에 따른 거칠기를 조사하여 층간 교환결합력 세기에 미치는 영향을 조사한 것들이다[5-9]. 최근에 Kools 등은 스핀 밸브 시료에서 각 자성층의 두께(자유층 및 피구속층)가 Neel coupling에 미치는 연구를 최초로 시도하여 수정 Neel 모델을 제시하였으며, 이 모델과 실험 결과와 잘 일치함을 보고하였다[10]. 합성형 스핀밸브에서 각 자성층 두께가 층간 교환결합력 세기에 미치는 영향에 관하여, 지난 번 학회지 보고에서는 Cu에 인접한 자성층의 두께가 큰 경우만 언급하였으며[11], FeMn에 인접한 자성층의 두께가 큰 경우에 관해서는 언급하지 않았다.

본 연구에서는 합성형 반강자성체 CoFe(P1)/Ru/CoFe

*Tel: (02) 958-5414, E-mail: kykim@kist.re.kr

(P2)/FeMn을 사용하고 자유층으로 NiFe/CoFe 이중 층을 사용한 탑형 스핀밸브 구조를 제조하여, P1과 P2 두께 변화에 따른 자기저항 특성 및 자기 교환결합의 세기를 조사하였다. 또한 Kools 모델의 연장선에서 합성형 탑 스핀밸브의 정자기 에너지 모델을 제시하였으며, 이 모델과 실험 결과를 비교하였다.

II. 실험방법

6개의 2인치 타겟을 가진 직류 마그네트론 스퍼터링 방식으로 Si(100)/SiO₂ 기판 위에 Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/Ru/CoFe/FeMn/Ta 합성형 탑 스핀 밸브 박막을 제조하였다. 스퍼터링 장비의 초기 진공도는 2×10⁻⁸ Torr 정도로 하였으며, 각 물질의 증착속도는 전력을 변화시켜 0.5-2.5 Å/sec로 조절하였으며, 자성층에 유도자기이방성의 형성 및 FeMn에 의한 교환자기이방성을 형성시키기 위하여 영구자석을 이용하여 증착 중에 100 Oe을 자장을 인가하였다. 본 연구에서 설계한 Si/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe(P1)/Ru/CoFe(P2)/FeMn/Ta 합성형스핀 밸브 박막 증착시 스퍼터링 압력은 1 mTorr로 고정하였고 Cu에 인접한 CoFe P1과 FeMn에 인접한 P2의 두께비를 조정하고, 이 때 자기저항비가 최적이 되는 조건에서 자유층의 두께와 FeMn의 두께를 조절하였다. 제조된 스핀밸브 박막의 자기적 특성은 진동 시편 자력계(Vibrating Sample Magnetometer, VSM)을 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, 이로 부터 스핀밸브 박막의 유효 교환 자기이방성(H_{eff-ex})을 최대 자기저항비의 1/2에 해당하는 성분과 만나는 값으로부터 구하였다. 또한 120 Oe의 자장크기를 발생하는 헤름홀츠 코일을 사용하여 R-H 곡선을 측정하였고, R-H 곡선이 원점에서 벗어나는 크기로부터 층간 교환결합력 세기 (H_c or H_{inter})을 구하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 고정층의 두께 변화에 따른 합성형 탑 스핀 밸브의 자기저항 특성

참고 문헌[11]에서 합성형 탑 스핀밸브의 특성에 관해서는 자세히 언급하였으므로 여기서는 단지 Cu 층에 인접한 CoFe와 FeMn 층에 인접한 CoFe 층의 두께 변화에

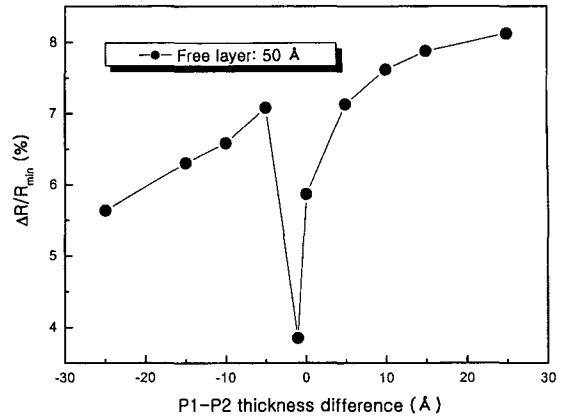


Fig. 1. Thickness difference (P1-P2) dependence of the MR ratio for the top synthetic spin valve with a structure Si/SiO₂/Ta/NiFe(34)/CoFe(16)/Cu(26)/CoFe(P1)/Ru/CoFe(P2)/FeMn(80)/Ta(50), unit is in Å.

따른 자기적 특성만 언급하고자 한다. Fig. 1은 본 연구에서 설계한 합성형 스핀밸브구조에서 자유층의 두께를 NiFe(34)/CoFe(16)으로 고정하고 합성형 구조인 CoFe(P1)/Ru(7 Å)/CoFe(P2)/FeMn(80 Å)에서 P1-P2 변화에 따른 자기저항의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 P1 두께가 두꺼우면 이미 다른 문헌에서 언급한 것처럼 큰 자기저항 값을 갖는다. 즉 자유층과 고정층의 반평행 정도가 증가 한다는 것을 의미한다. 그리고 P1 층의 두께를 감소시키고 P2층의 두께를 증가시키면 그림에서 보는 바와 같이 자기저항비가 급격히 감소하여 P1 및 P2가 동일한 값을 보이거나, 혹은 약간 P2가 P1보다 큰 영역에서 최소 자기저항비를 보인후 P2를 증가시키면 다시 급격히 증가 후 더욱 P2를 증가시키면 자기저항비는 감소하는 경향을 보이고 있다. 여기서 주목하고 싶은 부분은 P1이 두꺼운 영역에서 P1과 P2가 서로 비슷한 두께로 갈 때 자기저항비가 감소한다는 사실로 기 발표[12]와 잘 일치하고 있다. 그러나, 최소 자기저항비가 얻어지는 P1-P2의 위치에 관해서는 기존의 발표와 본 실험에서 얻은 값과 큰 차이를 보이고 있다. 본 그림에서 최소 자기저항비를 보이는 위치는 P2가 P1보다 1 Å 큰 경우이다. 이와 같은 최소저항비의 위치는 최소에너지 계산식으로부터 두 강자성 상의 교환 결합력 J_{ex} , 반강자성 상의 K_{aF} 에 의존하여 민감하게 변하는 것으로 보고되고 있다[13]. 문헌에 의하면 반강자성 층이 없는 경우 P1 두께와 P2의 두께가 동일한 경우 스핀 플립이 발생한다고 보고하고 있다[14]. 그러나, 본 연구에서 선택한 조성에서는 완전한 스

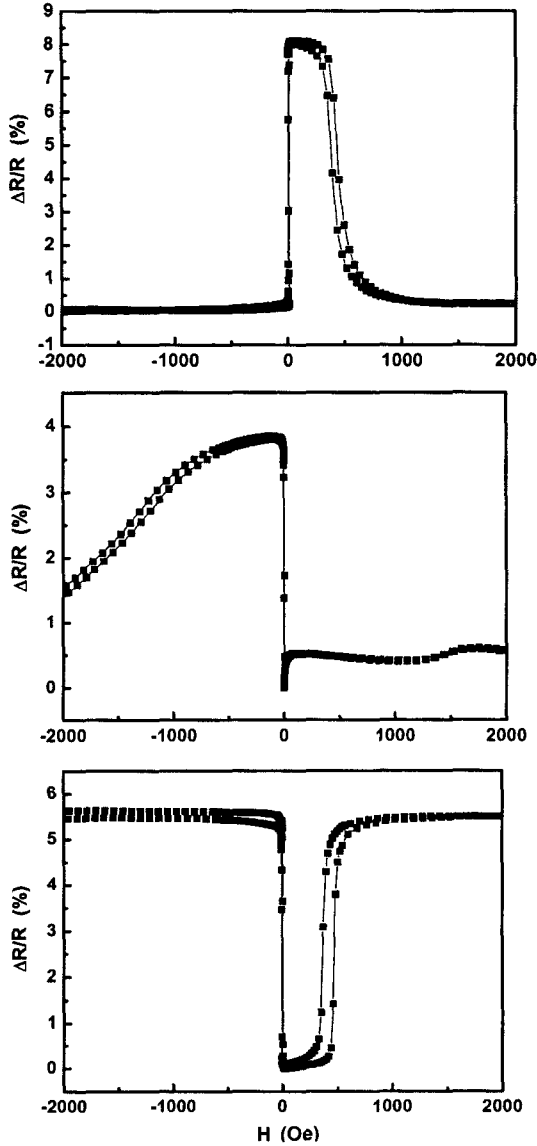


Fig. 2. R-H curves for the synthetic spin valve with a structure Si/SiO₂/Ta/NiFe(34)/CoFe(16)/Cu(26)/CoFe(P1)/Ru/CoFe(P2)/FeMn(80)/Ta(50), unit is in Å.: (a) P1-P2 = 25 Å (b) P1-P2 = 1 Å (c) P1-P2 = -25 Å.

핀 플롭이 일어나는 P1-P2를 찾을 수 없었다. 한편 자기 저항비가 계속적으로 감소한다는 것은 정확한 위치는 실험으로 찾을 수 없지만 계속해서 자화 방향이 변하고 있다는 것을 보여주고 있다. 즉 두 층의 자화 방향이 자화 용이 방향에서 크게 벗어나고 있다는 것을 의미한다.

Fig. 2에는 자유층(CoFe+NiFe)의 두께가 50 Å시료에서 각 위치에서 특징적인 R-H 곡선을 나타내었다. Fig.

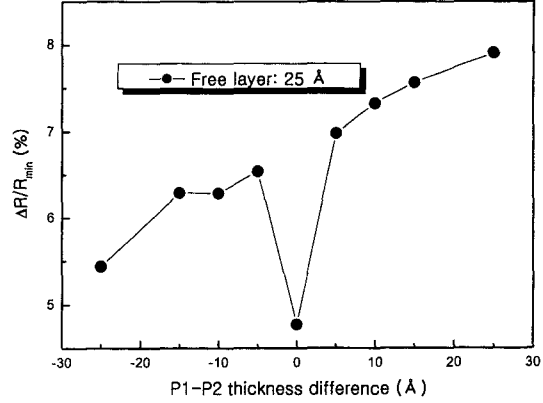


Fig. 3. Thickness difference (P1-P2) dependence of the MR ratio for the top synthetic spin valve with a structure Si/SiO₂/Ta/NiFe(17)/CoFe(8)/Cu(26)/CoFe(P1)/Ru/CoFe(P2)/FeMn(80)/Ta(50), unit is Å.

2(a)는 P1 = 35, P2 = 10 Å인 시료로 전형적인 합성형 스핀밸브의 자기저항곡선을 나타내고 있다. Fig. 2(b)는 P1 = 22, P2 = 23 Å의 시료로 두께차이가 단지 1 Å으로 Fig. 2(a)와는 전혀 다른 자기저항 곡선을 나타내고 있다. 이론에 의하면 이 영역에서는 스핀 플롭이 일어나야 하지만 현재 본 시료는 자기저항 곡선의 비대칭이 뚜렷하게 남아 있으므로 스핀 플롭은 아니지만 자기저항비가 매우 낮은 것으로 보아 P1, P2의 자화 방향이 자화 용이 방향에서 많이 이탈 되어 있음을 알 수 있다. 한편 Fig. 2(c)는 P1 = 10, P2 = 35 Å로 P2가 더 큰 경우이며 자기저항 곡선은 Fig. 2(a)를 180도 회전한 형태를 보여주고 있다. 현재의 측정 자장에서 높은 자장에서는 큰 저항, 낮은 자장에서는 낮은 저항을 보이므로 이것은 반전된 R-H 곡선을 보여주고 있다. 자기저항비는 P1이 큰 시료보다 낮다는 것은 P1의 방향이 P2에 의해 영향을 받는다는 것을 의미한다. 그러므로 상용 조성에서는 고정층의 방향이 변화하지 않는 즉 P1 두께가 P2의 두께보다 큰 쪽에서 사용하는 것이 바람직하다.

Fig. 3은 자유층의 두께를 25 Å으로 고정하고 위 조건과 동일하게 P1-P2에 따른 자기저항비의 변화를 나타낸 것이다. 자유층의 두께가 변화하더라도 변화의 경향은 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 단지 고정층의 자화방향이 자화 용이방향에서 크게 이탈 되는 위치가 P1과 P2가 거의 동일한 두께에서 얻어지며, 역시 이 조건에서도 스핀플롭 거동은 발견되지 않았다. 이와 같은 현상으로 미루어 스핀 플롭이 일어나는 조건은 여러 가지 조건에 의해서 바뀌며, 또한 어떤 경우에는 매우 민감하여 정확한 위치를

찾을 수 없는 반면에 어떤 경우에는 스핀 플롭이 일어나는 구간이 매우 넓어 쉽게 확인할 수가 있다. 그러므로 스핀 플롭이라기 보다는 두 자화층의 자화 방향이 자화 용이축에서 90° 방향으로 크게 이탈되는 현상 즉 큰 이탈 영역(large canting zone)이라고 일컫는 것이 더욱 타당하다고 판단된다.

3.2. 합성형 탑 스핀 밸브의 정자기에너지 모델링

정자기 교환결합 효과의 자성층 두께의존성을 설명하기 위해서는 우선 Neel 모델에 대해서 간략하게 알아볼 필요가 있다. Neel에 의해 제시된 상호 층간결합 에너지 J 는 다음과 같다[15].

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

여기서 h 는 correlated 계면 파형의 진폭이며, λ 는 파장이다. 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 오프셋 자계

$$H_0 = J/(\mu_0 M_f t_F) \quad (2)$$

이다.

Kools 등은[10] 편평한 기판위의 탑형 스핀 밸브 구조에서 중첩된 파형을 갖는 주상정 구조를 가정하여 자성층의 두께가 무한하지 않고 유한할 때 (1)식을 수정하여 아래와 같이 주어진다고 한다.

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

식 (3)을 풀어보면 식 (4)가 된다.

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

여기서 그는 모든 계면에서 결정립은 주상정을 가지는 것을 가정하고 있다. 또한 계면을 이차원 사인파 형태를 가정하며 자유층의 위면 진폭 h_1 , 구속층의 아래면 진폭을 h_2 , 구속층의 위면 진폭을 h_3 로 가정하였다. 이때 두 종류

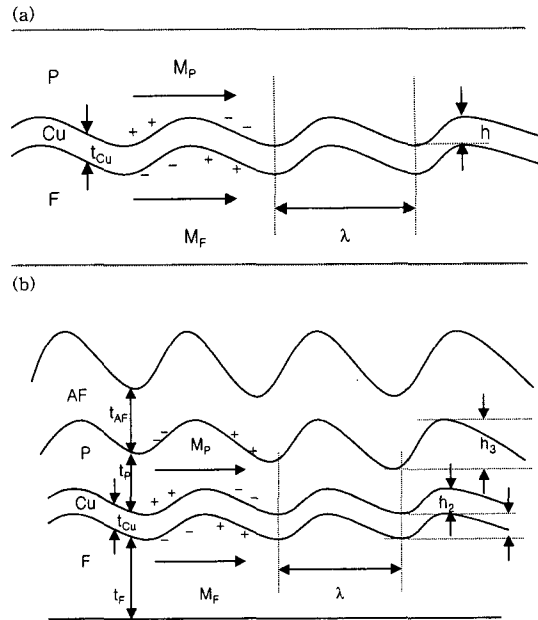


Fig. 4. A schematic view of the magnetostatic coupling for (a) tri-layer (b) top spin valve.

의 교환결합 항이 고려되고 있다. 그 중 첫째는 자유층의 위면 pole과 구속층의 아래면 pole에 의한 강자성 교환결합이며, 둘째는 자유층의 위면 pole과 구속층의 위면 pole에 의한 반강자성 교환결합이다. 위 식 (4)에서 첫 번째 항이 강자성 교환결합에 의한 정자기 교환결합이며, 둘째 항이 반강자성 교환결합에 의한 정자기 교환결합이다. 위 모델의 이해를 돕기 위하여 Neel 모델에 의한 경우와 한정된 자성층의 두께를 가진 탑형 스핀 밸브의 경우를 Fig. 4에 모식적으로 나타내었다. 본 연구에서 선택한 합성형 탑 스핀 밸브의 층간 결합의 세기를 얻기 위하여 위에서 언급한 Kools의 식을 확장하였다. 그리고 그 모식적인 그림을 Fig. 5에 나타내었다. 이때 다섯 개의 층에서 두 강자성 결합과 두 개의 반강자성 결합을 고려하였고, 또한 앞의 (1), (2) 식을 이용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$H_c = \pi^2 h_1 h_2 M_{P1}/(\sqrt{2} \lambda t_F) \exp(-2\pi\sqrt{2} t_{Cu}/\lambda) - \pi^2 h_1 h_3 M_{P1}/(\sqrt{2} \lambda t_F) \exp(-2\pi\sqrt{2} (t_{Cu} + t_{P1})/\lambda) - \pi^2 h_1 h_4 M_{P2}/(\sqrt{2} \lambda t_F) \exp(-2\pi\sqrt{2} (t_{Cu} + t_{P1} + t_{Ru})/\lambda) \quad (5)$$

여기서 H_c 는 층간 교환결합자계이며, 그림에서 보는바와 같이 각층의 두께에 따른 층간교환자계를 Neel 모델에 확

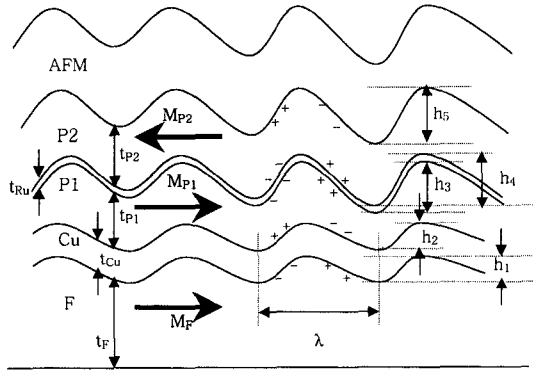


Fig. 5. A schematic view of the magnetostatic coupling for a top synthetic spin valve structure [16].

장한 것을 나타낸 것이다.

3.3. 고정층의 두께 변화에 따른 합성형 탑 스핀 밸브의 층간교환자계

저자들은 이미 참고문헌 16에서 위의 모델에 관하여 설명하였고, 또한 위의 모델에 관한 층간 결합력의 세기를 모델과 함께 제시하였다. 그러나 본 논문에서 제시한 시료는 위 논문에서 제조한 것과는 전혀 다른 즉 초고진공 및 증착 중 인가장치가 다른 시료를 제작하여 위의 모델의 유효성 및 시료의 재현성을 검증하고자 하였다. Fig. 6은 자유층의 두께를 50 Å로 고정하고 고정층의 두께 변화에 대한 층간교환자계의 변화를 나타내었다. P1-P2가 25 Å일 때 층간교환자계는 5.5 Oe가 가장 크며, 두께 차이가 감소함에 따라서 층간 결합력 세기는 감소하며, P1-P2가 동일한 두께 일 때 층간교환자계는 1.5 Oe까지 감소한다. P2의 두께가 증가하면 층간 결합력 세기는 오히려 조금 증가함을 보여 주고 있다. 이와 같은 경향은 앞에서 언급한 두께차이에 따른 자기저항비와 거의 같은 경향을 보여주고 있다. 그럼에서 나타난 실선은 앞에서 제시한 모델의 근거하여 얻은 결과로 P1 두께가 감소하면 층간 결합력도 함께 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그러므로 P1과 P2가 비슷한 두께에서, 혹은 P2가 조금 두꺼운 영역에서는 실험결과와 모델 결과가 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. 현재 일치하는 않는 이유는 P1과 P2가 동일한 두께 혹은 P2가 큰 영역에서 스핀의 이탈이 발생하여 자화 방향이 모델에서 가정한 것과는 $\cos\theta$ 만큼 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 설명은 앞에서 언급한 스핀 플롭 혹은 스핀의 큰 이탈에 기인한다는 것과 일치하는 것으로 보인다. 여기서 실선은 계산식으로부터 얻어졌으며, 이 때

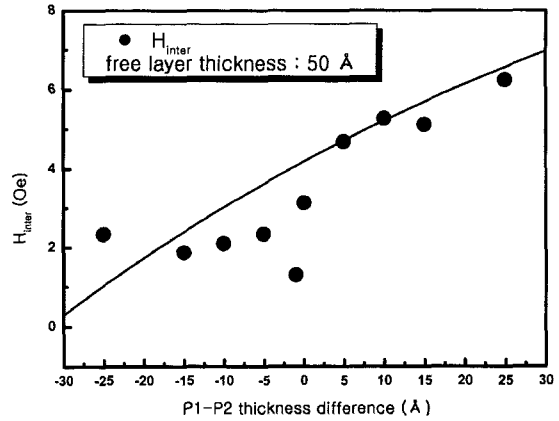


Fig. 6. Thickness difference dependence of the interlayer coupling field with numerical fitting using a modified Neel Model Eq (5): the solid line shows $\lambda = 400$ Å, h (peak to peak) $h_1 = 4.8$ Å, $h_2 = 4.8$ Å, $h_3 = 6.1$ Å, $h_4 = 6.3$ Å, $h_5 = 16.2$ Å (calculated value by fitting line).

결정립의 크기와 관련된 λ 는 400 Å으로 가정하였으며, fitting된 식으로부터 $h_1 = 4.81$, $h_2 = 4.81$, $h_3 = 6.06$, $h_4 = 6.30$, $h_5 = 16.16$ 가 얻어졌다. 한편 λ 를 400 Å으로 가정한 것에 대한 검증으로는 본 시료의 단면 TEM(Tunneling Electron Microscope) 사진이 있다면 더욱 확실할 것으로 판단된다. 저 진공에서 제조한 시료에서는 λ 가 AFM 관찰에서 250 Å인 것으로 고려하고[12] 본 시료가 초고진공에서 제조된 것을 고려한다면 그렇게 무리한 값은 아니라고 판단된다. 그러므로 새롭게 제조된 시료를 사용하여 기 제시된 모델의 유효성을 검증할 수 있었다.

한편 본 연구에서는 탑형 스핀 밸브 및 합성형 탑 스핀 밸브의 자성층의 두께 변화에 따른 자기저항비 및 층간 결합세기를 모델링을 하였지만 바텀형은 하지 않았다. 이에 대한 체계적인 연구가 기대되어진다.

IV. 결 론

합성형 반강자성체 CoFe/Ru/CoFe/FeMn을 사용하고 자유층으로 NiFe/CoFe 이중 층을 사용한 탑형 합성형 탑 스핀 밸브 구조를 2×10^{-8} Torr 이하의 초기 입력하에서 직류 마그네트론 방식으로 제조하여, 구속층의 두께변화에 따른 자기저항 특성과 층간교환자계의 변화를 조사하였다.

1. 자유층의 두께가 25, 50 Å인 시료에서 P1-P2의 두께가 +25에서 -25까지 변화함에 따라 자기저항비는 점진

적으로 감소하나, +5에서 -5 범위에서는 자기저항비의 급격한 감소가 일어나며, 이것은 Ru를 사용한 반강자성 결합을 이용한 합성형 탑 스핀밸브의 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

2. 자성층의 두께 변화에 따른 층간교환자계를 Kools 이 제시한 수정 Neel 방정식을 사용하여 합성형 탑 스핀 밸브에 확대 적용하여 새롭게 제시하였다.

3. 새로운 시료를 제작하여 고정층의 두께 변화에 따른 층간교환자계를 조사한 결과 앞에서 본 연구에서 제시한 Neel 모델과 잘 일치하나, 두께 변화에 따른 자기저항비의 변화에서 본 것처럼 스핀의 큰 이탈이 일어나는 영역에서는 모델에서 벗어남을 알 수 있다. 또한 다른 조건으로 제조된 시료를 사용하여 제시된 모델의 유효성을 검증 할 수 있었다.

참 고 문 헌

[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] 김광윤, 신경호, 김희중, 장성호, 강택, *한국자기학회지*, **10**, 203(2000).

[12] C. H. Marrows, F. E. Stanley, and B. J. Hickey, *J. Appl. Phys.* **87**, 5058(2000).

[13] unpublished results.

[14] J. G. Zhu, *IEEE Trans. Magn.* **35**, 655(1999).

[15] L. Neel, *Comptes, Rendus* **255**, 1676(1962).

[16] K. Y. Kim, S. H. Jang, K. H. Shin, H. J. Kim and T. Kang, *J. Appl. Phys.* **89**, 7612(2001).

Magnetoresistance Properties in Synthetic CoFe/Ru/CoFe/FeMn Spin Valves with Different Pinned Layer Thicknesses

K. Y. Kim

Nanodevice Research Center, KIST, 39-1 Hawolgok-dong, Soungbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

(Received 20 September 2001, in final form 16 October 2001)

Top synthetic spin valves with structure Ta/ NiFe/CoFe/Cu/CoFe(P1)/Ru/CoFe(P2)/FeMn/Ta on Si (100) substrate with SiO₂ of 1500 Å were prepared by dc magnetron sputtering system. We have changed only the thickness of the free layer and the thickness difference (P1-P2) in the two ferromagnetic layers separated by Ru, and investigated the effect of magnetic film thickness on the GMR properties and the interlayer coupling field in a spin valve with a synthetic antiferromagnet. As thickness difference of pinned layer was decreased from +25 Å to -25 Å, MR ratio was decreased gradually. However, there was a dip zone indicating a big change of MR ratio around P1 = P2, which can be due to the large canting of pinned layers. The modified Neel model was suggested for the top synthetic spin valve to explain the interlayer coupling field according to the thickness change of ferromagnetic layers. The interlayer coupling field was decreased due to the magnetostatic coupling (orange peel coupling) as suggested by model. However, the interlayer coupling field was not explained at the dip zone by the modified Neel model. The deviation of modified Neel model at the dip zone could be due to the largely canting of the pinned layers as well, which depends on different thickness in synthetic antiferromagnetic structure.

Key words : synthetic spin valve, magnetostatic energy, interlayer coupling field