

Synthetic antiferromagnet CoFe/Ru/CoFe/FeMn을 이용한 스핀 밸브 구조의 자기저항 특성

장성호* · 강 탁

서울대학교 재료공학부
서울시 관악구 신림동 산 56-1

김민정 · 김희중 · 김광윤

한국과학기술연구원 박막기술연구센터
서울시 성북구 하월곡동 39-1

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

FeMn에 의해 교환 바이어스된 Synthetic antiferromagnet(CoFe/Ru/CoFe)을 가진 Top Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe/Ru/CoFe/FeMn/Ta 스핀밸브 구조를 마그네트론 스퍼터링 법으로 제조하여 유효 교환이방성 및 자기저항 특성을 조사하였다. FeMn의 반강자성층의 두께가 100 Å 정도일 때 자기저항비와 유효 교환 바이어스 자장이 최대값을 나타내었으며, 100 Å 이상 두께 증가시 FeMn 층을 통한 셉팅 전류에 의한 자기저항 효율의 저하로 자기저항이 점점 감소하였다. 자유층의 두께가 40 Å일 때 7.5 % 이상의 최대 자기저항비가 얻어졌으며, 자유층의 두께 감소에 따라 자기저항비는 감소하였다. Synthetic antiferromagnet 구조에서 Cu층에 인접한 CoFe(P1)층의 두께를 증가시키고 FeMn층에 인접한 CoFe(P2)층의 두께를 감소시켜 그 두께 차이가 증가할수록 자기저항비는 증가하였고 반면 유효 교환 바이어스 자장은 감소하였다. 자기저항특성의 증가는 P1층 두께 증가로 인한 스핀의존산란 효율의 증가로 이해되었으며, 유효 교환 바이어스 자장의 감소는 최소에너지 모델의 이론적 계산을 통해 감소 경향을 검증할 수 있었다.

I. 서 론

반강자성층을 사용한 교환 바이어스형 스핀밸브(Spin valve) 다층박막은 거대자기저항 특성에서 낮은 포화 자장 값과 높은 민감도[1]를 가지고 있으므로 고밀도의 자기기록매체의 재생헤드로서 널리 응용이 되고 있다. 스핀밸브는 그 구조가 Cu 비자성층 사이로 두 개의 강자성층으로 구성되어 있으며, 이 중 한 강자성층은 반강자성층과의 교환 바이어스 자장에 의해 고정되어 있다. 20 Gbit/in² 이상의 고기록 밀도를 실현하기 위해서는 기존의 스핀밸브 구조에서 자유층(반강자성층에 의해 고정되지 않은 강자성층)의 두께를 감소시켜야 하며 전체 헤드 크기를 줄여야 한다. 이와 같이 스핀밸브 구조에서 자유층의 두께를 감소시킬 경우 반강자성층에 의해 고정된 고정층의 누설 자장에 의해 자유층이 영향을 받으므로 재생 진폭 비대칭(Readback Amplitude Asymmetry)이 발생하며, 또한 헤드의 크기를 서브 마이크로 이하로 감소시 고정층의 반자장이 증가하여 교환 바이어스 자장에 의해서는 완벽하게 고정층을 구속할 수 없는 것이 문제점이다[3]. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 한 층의 강자성층만을 가진 고정

층을 대신하여 강자성층/비자성층/강자성층(Co/Ru/Co) 구조를 가진 인공초격자 삼층막 Synthetic antiferromagnet (SAF)를 사용한 스핀밸브 구조가 제안되었다[2]. SAF를 사용할 경우 강자성층 두 층의 자화방향이 서로 반대이므로 누설 자장이 거의 없어져서 고정층의 누설 자장에 의한 영향을 감소시키고 동시에 Ru를 사이로 한 두 강자성층의 반강자성 상호결합으로 교환 바이어스 자장에 의한 상호결합보다 더 큰 고정 효과를 볼 수 있으며, 열적 안정성이 기존의 스핀밸브보다 우수한 것으로 보고되고 있다 [3, 4].

본 연구에서는 SAF CoFe/Ru/CoFe를 사용하고 이 위에 일방향 자기이방성을 주기 위해 FeMn 반강자성층을 사용한 top 스핀밸브 구조를 스퍼터링으로 제조하고 다층박막의 각 층들의 두께를 변화시켰을 때 자기적 특성 및 자기저항 특성을 조사하였다.

한편 최근 연구 결과들의 보고에 의하면 SAF 구조에 대한 관심이 집중되어 SAF 구조 변화에 따른 유효 교환 바이어스 자장 변화에 대한 실험적인 결과들이 많이 보고되었으나 유효 교환 바이어스 자장에 대해 해석학적인 이론적 접근이 명확히 이루어지지 있지 않고 있다. 따라서

본 논문에서는 최소 에너지 모델을 이용하여 유효 교환 바이어스 자장 값을 정량화하여 이론적 해석을 시도하였다.

II. 실험 방법

2인치 크기의 6개 타겟들을 가진 직류 마그네트론 스퍼터링 시스템으로 자연 산화막을 가진 Si(100) 기판 위에 Ta/Ni₈₁Fe₁₉/Co₈₄Fe₁₆/Cu/Co₈₄Fe₁₆/Ru/Co₈₄Fe₁₆/Fe₅₀Mn₅₀/Ta 스핀 밸브 다층박막을 제조하였다. 기판 세척은 시편 절단시 남아 있는 왁스를 제거하기 위해 클로로포름으로 먼저 초음파 세척한 이후 아세톤, 알콜계 용매 순서로 초음파 세척을 하였다. 스퍼터링 장비의 초기 진공도는 6×10⁻⁷ torr 정도로 하였다. 각 타겟의 증착속도는 전력을 변화시켜 0.5~3.5 Å/sec로 조절하였고, 아르곤(Ar)의 압력은 1 mTorr로 하였으며, 자성층에 유도자기이방성의 형성 및 FeMn에 의한 교환자기이방성을 형성시키기 위하여 영구자석으로 증착 중에 300 Oe을 자장을 인가하였다. 본 연구에서 설계한 Si/Ta/NiFe/CoFe/Cu/CoFe(P1층)/Ru/CoFe(P2층)/FeMn/Ta 스핀 밸브 박막 증착시 스퍼터링 압력은 1 mTorr로 고정하였고 Cu에 인접한 CoFe P1층과 FeMn에 인접한 P2층의 두께를 조정하고, 이 때 자기저항비가 최적이 되는 조건에서 자유층의 두께와 FeMn의 두께를 조절하였다. Cu층 및 Ta층은 26, 50 Å으로 각각 고정된 두께로 증착하였다. 제조된 스핀밸브 박막의 자기적 특성은 진동 시편 자력계를 사용하여 측정하였고, 박막의 전도성은 직류 4 단자 탐침법으로 상온에서 측정하였으며, 이 때 전류와 자장방향은 서로 평행하게 하였다. 높은 자장에서의 자기저항 특성은 10 kOe 범위에서 VSM에 사용되는 전자석을 사용하여 R-H 곡선을 측정하였으며, 낮은 자장에서의 자기저항 특성은 헬름홀츠 코일로 100 Oe 범위 안에서 자장을 인가하면서 4 단자 탐침법으로 측정하였다. 제조된 스핀밸브 박막의 유효 교환 바이어스 자장 (Heff-ex)은 R-H 곡선에서 최대자기저항비(스핀밸브를 완전히 포화시켰을 때의 최소저항에 대한 자기저항비)의 1/2에 해당하는 성분과 만나는 값으로부터 구하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 Ru의 두께 변화에 따른 자기저항비의 변화를 나타낸 것이다. Ru의 두께가 7 Å일 때 자기저항비가 가장 컸으며, 이 두께에서 R-H 곡선의 포화자장값이 6.3 kOe 정도로 최대였다. 따라서 Ru 7 Å 일 때 SAF 구조가 가

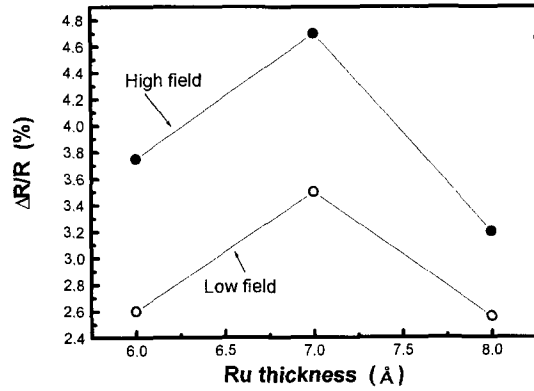


Fig. 1. The change of MR ratio as a function of the thickness of Ru in Ta(50 Å)/NiFe(60 Å)/CoFe(20 Å)/Cu(26 Å)/CoFe(20 Å)/Ru(t Å)/CoFe(20 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(50 Å) spin valve structure.

장 강한 반강자성 상호결합을 이루고 있을 것으로 판단하여 이후의 실험에서는 Ru의 두께를 7 Å으로 고정하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 제조된 스핀밸브 구조의 대표적인 R-H 곡선으로 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)구조를 가졌다. 그림에서 보는 바와 같이 포화자계 구간에서의 자기저항비는 7.5%이며, 저자장 구간에서 7.2%의 자기저항비를 보이며, 최대자기저항 유지 구간(H₀)이 약 400 Oe 정도였다. 그리고 영(0) 자장 근처에서의 자유층과 P1층 사이의 자기저항 변화 항(약 7.2%)과 음(-)의 자장(-5000 ~ -2500 Oe)범위에서 P1층과 P2층 사이의 자기저항 변화 항(약 0.5%)이 함께 존재한다.

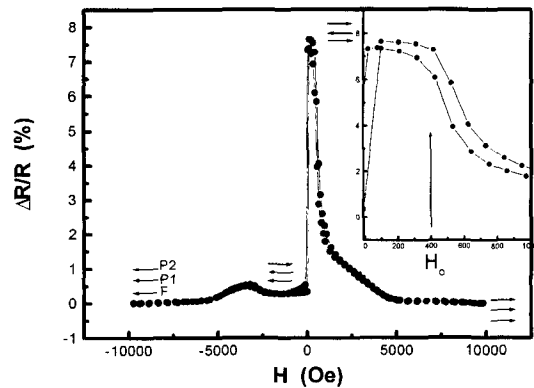


Fig. 2. Representative magnetoresistance vs. applied field for spin valve with the structure Ta(50 Å)/NiFe(27 Å)/CoFe(13 Å)/Cu(26 Å)/CoFe(30 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(15 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(50 Å).

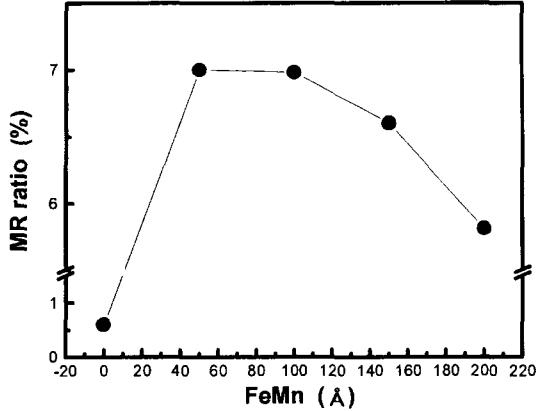


Fig. 3. The change of MR ratio as a function of the FeMn thickness in Ta(50 Å)/NiFe(34 Å)/CoFe(16 Å)/Cu(26 Å)/CoFe(30 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(15 Å)/FeMn(x Å)/Ta(50 Å) spin valve structure.

Fig. 3은 FeMn의 두께에 따른 자기저항비의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 SAF의 구조는 아래 부분에서 언급될 SAF 구조 변화에 따른 자기저항 특성에 있어서 가장 우수했던 구조로 유지하였다. 반강자성 FeMn층이 없을 때는 자기저항비가 1% 미만으로 높은 자기저항 특성이 나타나지 않았다. 이러한 원인은 교환이방성(A_{ex})이 존재하지 않아서 SAF 성분에서 고정 방향 성분이 존재하지 않기 때문으로 판단된다. 그러나 FeMn층이 존재하여 교환이방성(A_{ex})이 존재하면 Fig. 2와 같은 R-H 곡선을 얻을 수 있었으며, 자기 저항비가 7% 이상의 특성을 보였다. 반면 FeMn의 두께가 더욱 증가하여 150 Å 이상이 되면 자기저항비가 오히려 서서히 감소하였다. 한편 H_{eff-ex} 값은 FeMn의 두께가 100 Å 이상으로 증가하면 거의 변화가 없었다. 따라서 FeMn의 두께가 100 Å 일 때 높은 자기저항 특성 및 큰 유효 자기이방성을 위한 최적의 조건임을 확인하였다. 자기저항비가 FeMn의 두께가 두꺼워질 때 감소하는 이유는 FeMn 층을 통한 셉팅 전류(shunting current)[6]가 집중되어 자기저항 효율이 감소하기 때문으로 여겨진다. 그 이유는 FeMn에 의한 교환이방성이 존재할 때, FeMn 두께가 증가함에 따라 시편의 전체 저항(R)은 감소하지만 저항 변화(ΔR)는 저항 감소보다 더 급격히 감소하여 자기저항($\Delta R/R$)값은 점점 저하되는 경향을 보였다는 근거에서 셉팅 전류의 영향에 의해 자기저항효율이 감소하였다고 생각할 수 있었다.

Fig. 4는 NiFe/CoFe 자유층의 전체 두께에 따른 자기저항비의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 NiFe 두께에 대한 CoFe의 두께 비는 17대 8로 유지하였다. 자유층 두께가

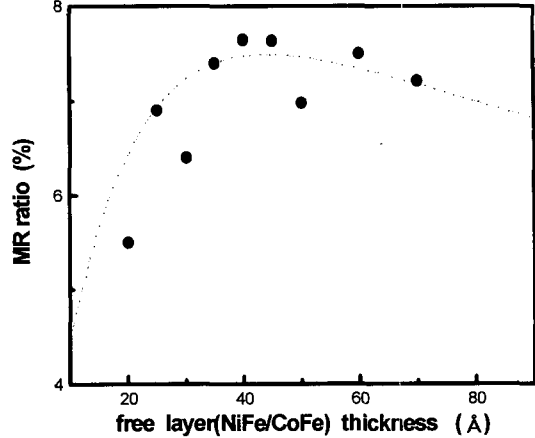


Fig. 4. The change of MR ratio as a function of free layer thickness in Ta(50 Å)/NiFe(a Å)/CoFe(b Å)/Cu(26 Å)/CoFe(30 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(15 Å)/FeMn(100 Å)/Ta(50 Å) spin valve structure. a/b=17/8.

40~45 Å 정도일 때 자기저항비의 최대값을 보여주며, 40 Å 이하의 두께로 감소하면 자기저항비가 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 SAF를 사용하지 않는 기존의 스핀밸브 구조의 경향과 잘 일치하는 것이다[6]. 자유층이 40 Å 일 때의 자기저항비에 대한 자유층이 20 Å 일 때의 자기저항비가 약 28% 정도로 급격히 감소하였는데, 이것은 자유층의 두께가 지나치게 감소하면 거대자기저항의 스핀의존 산란이라는 측면에서 NiFe/CoFe 층의 두께가 ↑스핀 전자 평균자유행로보다 훨씬 작아져서 스핀의 존산란 효율이 감소하기 때문이다. 또한 자유층의 두께가 매우 감소하면 연자성 특성이 저하되어[11] 영자장 근처에서의 자기저항변화에 대한 민감도가 감소하였다.

위의 결과에서 보는 바와 같이 높은 자기저항비를 얻기 위한 반강자성층과 자유층 두께의 최적 조건이 존재함을 알 수 있었다.

SAF를 가진 스핀 밸브 구조에서 자유층, 반강자성층의 두께변화에 따른 자기저항의존성에 관해서는 위에서 언급하였다. 한편 SAF를 가진 스핀 밸브 구조에서 Ru층의 양쪽에 있는 두자성층의 두께변화에 따라서 자기저항 특성이 변화를 조사하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 SAF 구조에서 $P1 + P2 = 45$ Å으로 일정하게 하고, P1층과 P2층간 두께 차이(Δt)를 두었을 때 자기저항비와 H_{eff-ex} 의 변화를 보여주고 있다. 이 때 P1층의 두께를 P2층의 두께보다는 더 두껍게 하였다. Δt 가 증가하는 즉 P1은 증가하고 P2는 감소하는 SAF 구조를 가진 스핀밸브일수록 자기저항비는 증가하였다[7, 8].

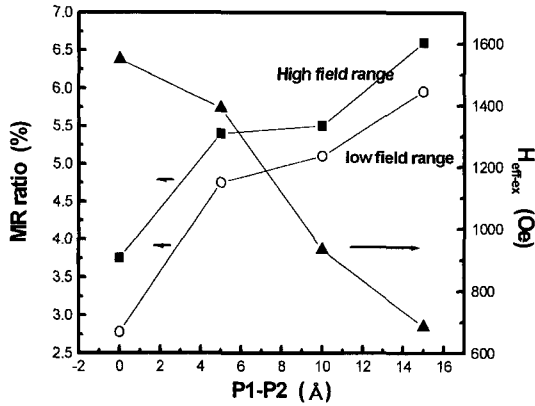


Fig. 5. Magnetoresistance and Heff-ex vs. P1-P2 thickness difference for Ta(50 Å)/NiFe(34 Å)/CoFe(16 Å)/Cu(26 Å)/CoFe(P1 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(P2 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(50 Å) spin valve structure.

Fig. 5에서 자기저항비가 증가하는 원인은 다음과 같이 설명할 수 있다. 자기저항비를 지배하는 것은 자유층과 P1층(Cu와 인접하면서 스핀밸브 구조에서의 고정층 역할) 사이에서의 전자 스핀의존산란[6]으로 볼 수 있다. 이 때 자유층과 P1층의 두께가 ↑ 스핀 전자의 평균자유행로보다 더 작으면(문헌 [7]에 따르면 Ni₈₁Fe₁₉의 평균자유행로는 70 Å, Co₉₀Fe₁₀는 90 Å 정도이다.) 본 실험의 자유층(50 Å으로 고정)과 P1층(30 Å 이내) 각각의 두께가 ↑ 스핀 전자의 평균자유행로(λ)보다 얇은 범위에 있으므로 P1층의 두께가 증가할수록 스핀의존산란의 효율이 증가하게 된다. 따라서 Fig. 5과 같이 자유층의 두께는 50 Å으로 고정하고 P1층의 두께를 증가시켰을 경우 P1층의 두께가 증가할수록 자기저항비는 증가한다고 판단하였다. 이러한 정성적인 설명은 정량적인 모델 결과에서 제시한 설명과 경향이 일치하고 있다[7]. 이 경우 P2층은 영(0) 자장 근처의 주요한 자기저항 변화의 스핀의존산란에는 그다지 큰 영향을 주지 않고 오직 P1층과의 Ru을 사이로 한 반강자성 상호결합으로 P1층의 자화 방향을 강하게 고정하는 역할을 할 것으로 생각된다.

Fig. 5에서 유효 교환바이어스 자장 값은 자기저항비와는 반대의 경향을 보여주고 있다[4, 7, 9]. 따라서 P1층의 두께가 P2층보다 10 Å 이상일 경우 H_{eff-ex} 는 1000 Oe 이하로 감소하게 된다. 이러한 유효 교환바이어스의 감소 경향은 기존의 스핀 밸브 구조에서의 교환바이어스의 특성 경향과 비슷하다. 즉 반강자성층과 인접한 강자성층의 두께가 증가할수록 교환 바이어스 값이 감소하게 된다[10]. 그러나 이론적으로 접근해보고자 할 때 SAF를 가진 스핀

밸브는 교환바이어스 자장 뿐만 아니라 Ru을 사이로 한 두 강자성층 사이의 상호작용까지 고려해야 한다. 최근 이러한 것에 대한 정량적인 해석이 시도되었으나[7], 유효교환 바이어스에 대한 구체적인 접근은 잘 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 유효교환 바이어스에 초점을 맞추어 정량적으로 해석하고자 하였다.

본 연구에서 정의한 H_{eff-ex} 를 이론적으로 구하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다. 먼저 Ru의 두께는 7 Å으로 이때 SAF 구조가 가장 강한 반강자성 상호결합을 하고 있으며 인가 자장의 방향은 FeMn에 의해 유도된 고정 방향과 같고 임계 자장(H_0)(Fig. 2 참조)이상에서 P1층의 스핀은 coherent rotation[7]을 하여 포화자장(H_{sat}) 이상이 되면 자장방향과 평행하게 정렬하고, P1층이 회전할 때는 P2층이 고정 방향에서 벗어나 약간 동요하는 것[7]은 무시하여 P2층은 거의 고정 방향으로 고정되어 있다고 가정하였다. 그리고 자유층 또한 H_0 이상에서 역시 고정 방향으로 고정되어 있다고 가정하였다. 이러한 조건 하에서 고정 방향으로 자장을 인가하면 H_0 이상의 자장에서는 P2층과 자유층의 스핀들은 자장방향과 평행하고 P1층만 자장 방향과 반평행상태에서 평행상태로 회전하게 된다.

SAF(CoFe/Ru/CoFe)구조를 고려할 때 고정 방향으로 자장이 인가되면 이때의 단위 면적당 에너지는 아래 식 (1)과 같다.

$$E = -M_s t_1 H \cos \theta_1 - (M_s t_2 + A_{ex}) \cos \theta_2 + A \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

H 는 인가된 자장 크기이고 A_{ex} 는 P2층과 FeMn 반강자성층 사이의 교환이방성에 의한 단위 면적당 교환에너지이고, A 는 SAF에서 Ru을 사이로 한 단위면적당 반강자성 상호결합 교환에너지이다. 그리고 M_s 는 P1, P2층인 CoFe의 포화자화(erg/cm³)이고 t_1 는 P1층의 두께이고 t_2 는 P2층의 두께이다. θ_1, θ_2 는 인가 자장 방향과 P1층, P2층 각 자기모멘트 방향과의 사이 각도이다(문헌 [7]의 Fig. 1참조).

위 식 (1)에서 θ_1, θ_2 각각에 대한 편미분 즉

$$\frac{\partial E}{\partial \theta_1} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial \theta_2} = 0 \quad \text{와} \quad \frac{\partial^2 E}{\partial \theta_1^2} > 0, \quad \frac{\partial^2 E}{\partial \theta_2^2} > 0$$

임을 만족하는 θ_1, θ_2 에 대해 에너지(E)는 최소가 될 것이다. 이때 일차 편미분된 두 식을 연립방정식으로 풀면 θ_1, θ_2 는 나머지 변수에 대한 식이 된다.(문헌 [7]의 식 (6), 식 (7)) 이 때 임계 자장 이상에서 θ_1 은 아래 식 (2)와 같다.

$$\cos\theta_1 = \frac{A}{2(M_s t_2 H + A_{ex})} - \frac{A(M_s t_2 H + A_{ex})}{2(M_s t_1)^2 H^2} + \frac{(M_s t_2 H + A_{ex})}{2A} \quad (2)$$

그리고 이 때 시편의 저항은 아래 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$R = R_{sat} + (\Delta R)_{F,P} \left[\frac{1 - \cos(\theta_F - \theta_1)}{2} \right] + (\Delta R)_{P_1,P_2} \left[\frac{1 - \cos(\theta_1 - \theta_2)}{2} \right] \quad (3)$$

R_{sat} 는 스핀밸브 시편을 완전히 포화시켰을 때의 시편 저항이고, $(\Delta R)_{F,P}$ 는 자유층과 P1층 사이의 자기저항변화 크기이고 $(\Delta R)_{P_1,P_2}$ 는 P1층과 P2층 사이의 자기저항변화 크기이다. 그리고 θ_F 는 고정 방향과 자유층의 자기모멘트 방향 사이의 각도이다.

식 (3)에서 인가 자장 값(H)이 본 논문에서 정의한 유효 교환 바이어스 자장 값일 때 R 은 가장 높은 저항과 가장 낮은 저항(R_{sat}) 두 합이 1/2배한 값이 되며, 앞에서 한 가정에 의해 $\theta_2 = \theta_F = 0$ 를 식 (3)에 대입하여 위 유효 교환 바이어스 자장 값에 해당하는 성분에 대해 유도 정리해보면 아래의 4차 방정식 식 (4)의 해와 식 (5)로부터 H_{eff-ex} 을 직접 구할 수 있었다. 이 때 $\theta_2 = \theta_F = 0$ 가정에 입각하면 H_{eff-ex} 는 시편 저항이나 자기저항변화 크기에는 무관하게 된다.

$$X^4 - 2aX^3 + (a^2 - b^2 + 1)X^2 - 2aX + a^2 = 0 \quad (4)$$

$$H_{eff-ex} = \frac{A}{M_s t_2} (X - a) \quad (5)$$

이 때 H_{eff-ex} 를 결정하는 변수는 $a = (A_{ex}/A)$, $b = (t_2/t_1)$ 이다. $A = 1 \text{ erg/cm}^2$ [7]이고, FeMn(150 Å)/CoFe(40 Å)/Cu(26 Å)/CoFe(20 Å)/NiFe(60 Å)/Ta(50 Å)의 Top 스핀밸브구조를 제조하여 교환 바이어스 자장값(H_{ex})이 M-H 곡선에서 평균 200 Oe정도 [13]로 측정되어 $A_{ex} = H_{ex} t_F M_s$ [10]로부터 $A_{ex} = 0.12 \text{ erg/cm}^2$ 로 하였다.

이와 같이 계산된 H_{eff-ex} 와 실험적으로 구한 것을 P1층과 P2층 간의 두께 차이에 따라 나타낸 것이 Fig. 6이다. 실험적인 경향과 이론적으로 계산된 경향과 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 P1층과 P2층의 두께 차이에서 P1층의 두께가 두꺼워질수록 유효 교환 바이어스 자장 값은 감소함을 설명할 수 있었다. 그리고 5 Å 이상에서는 이론적인 값과 차이는 있으나 그 기울기는 거의 비슷하였다. 따라서 5 Å 이상에서는 위에서 가정된 P2층의 스핀의 각도

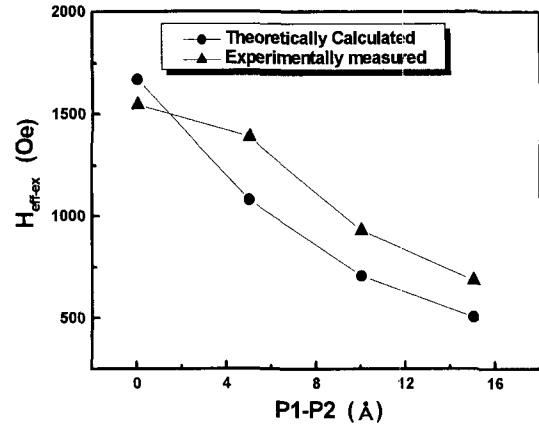


Fig. 6. H_{eff-ex} vs. (P1-P2) thickness difference for Ta(50 Å)/NiFe(34 Å)/CoFe(16 Å)/Cu(26 Å)/CoFe(P1 Å)/Ru(7 Å)/CoFe(P2 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(50 Å) spin valve structure. Circle dot: theoretically calculated, Triangle dot: experimentally measured.

(θ_2)를 무시할 수 없는 것으로 판단된다. 그런데 θ_2 를 무시하지 않을 경우 시편 저항 및 자기저항변화 크기 향이 포함되면서 5차 이상의 방정식이 되므로 해를 구하기가 어렵다.

이와 같은 해석의 물리적인 의미를 설명하자면, P2층의 두께가 P1층 두께보다 얇아지게 될수록 반강자성 물질에 의해 일방향 이방성 결합을 하고 있는 P2층이 P1층보다 자기모멘트 값이 감소하여, P2층과 P1층 사이의 반강자성 결합을 통한 P1층 자기 모멘트를 구속하고자 하는 힘이 낮아지게 되어 유효 교환 바이어스 자장값이 감소함을 의미한다.

Fig. 5에서의 위와 같은 특성 변화 이외에도 문헌에 따르면 SAF를 가진 스핀밸브를 마이크로 패터닝 헤드구조로 제작시 센서 전류에 의한 각 층에 영향을 주는 자장 성분을 고려해야 함을 설명하고 이것을 반고전 이론과 마이크로자기학 모델로 시뮬레이션한 결과 P1층의 두께가 P2층의 두께보다 두꺼우면서 특정 비율(약 1.5에서 2배 사이)일 때 P1층과 P2층 사이의 토크 합이 영(0)이 되고 재생 진폭 비대칭이 0이 된다고 설명하고 있다. 그러므로 SAF의 구조가 자기저항 및 자기적 특성 뿐만 아니라 미세 패터닝 나타나는 현상들에서도 매우 중요한 역할을 할 것으로 보여진다.

IV. 결 론

직류 마그네트론 스퍼터링 방식으로 자연 산화막을 가

진 Si(100) 기판 위에 Ta/Ni₈₁Fe₁₉/Co₈₄Fe₁₆/Cu/Co₈₄Fe₁₆/Ru/Co₈₄Fe₁₆/Fe₅₀Mn₅₀/Ta SAF을 가진 스핀 밸브 다층박막을 제조하여 그 자기저항 특성을 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) Ru의 두께가 7 Å 정도일 때 SAF 구조가 가장 강한 반강자성 상호결합을 이루고 있다고 판단되며, FeMn층이 100 Å일 때 높은 자기저항비 및 높은 유효 교환 바이어스 자장 값이 얻어졌다. 한편 100 Å 이상으로 FeMn 층의 두께가 증가할 경우 선풍 전류 때문에 스핀의존산란 효율이 감소하여 자기저항비가 감소하는 것으로 사료된다.

2) 자유층의 두께를 감소시킬 경우 약 40 Å 근처에서 자기저항비의 최대값이 얻어졌으며, 두께가 40 Å 이하로 감소하면서 자기저항비는 급격히 감소하였다. 이러한 급격한 자기저항비의 감소의 원인은 전자의 평균자유행로보다 자유층 두께가 훨씬 얇아질 경우 스핀의존 산란 효율이 감소하기 때문으로 판단된다.

3) SAF 구조의 Cu에 인접한 CoFe P1층과 FeMn에 인접한 CoFe P2층의 두께를 변화시킬 경우 즉 P1층의 두께가 증가하고 P2층의 두께가 감소하여 P1층과 P2층의 두께 차이가 증가할수록 자기저항비가 증가하고 H_{eff-ex} 은 감소함을 알 수 있었다. 이와 같이 자기저항비가 증가하는 것은 스핀의존산란의 효율이라는 관점에서 설명할 수 있었으며 H_{eff-ex} 값의 변화는 최소에너지 모델을 이용한 이론적인 계산 값과 실험적으로 얻은 데이터와 비교한 결과 그 경향이 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

4) SAF 스핀 밸브에서 높은 자기저항비를 얻기 위해서는 SAF 구조에서 Cu층에 인접한 CoFe(P1층)의 두께를 증가시켜 P1층이 P2층보다 더 두꺼운 비대칭적인 구조로 유지하여야 하며, 스핀의존산란의 효율을 극대화시킬 수 있는 최적의 두께를 각 층들에서 찾아 그 전체 구조를 최적화시켜야함을 알 수 있었다. 본 연구에서 최적화할 경우 자기저항비를 7.5 % 까지 증가시킬 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2000년 한국과학기술연구원의 K-2000 프로그램, 과학기술부의 NRL 및 한영공동연구과제(Korea-UK science and technology joint collaboration program)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 그리고 삼성전기의 민경익 박사의 조언과 토의에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit, and D. Mauri, Phys. Rev. B **43**, 1297(1991).
- [2] D. E. Heim and S. S. P. Parkin, U.S. Patent n. 5 465 185(1995).
- [3] J. L. Leal and M. H. Kryder, J. Appl. Phys. **83**, 3720 (1998).
- [4] Y. Huai J. Zhang, G. W. Anderson, P. Rana, S. Funada, C.-Y. Hung, M. Zhao, and S. Tran, J. Appl. Phys. **85**, 5528(1999).
- [5] S. S. Parkin, N. More, and K. P. Roch, Phys. Rev. Lett. **64**, 2304(1990).
- [6] B. Dieny, J. Magn. Mater. **136**, 335(1994).
- [7] B. Dieny, M. Li, S. H. Liao, C. Horng, and K. Ju, J. Appl. Phys. **87**, 3415(2000).
- [8] Masayuki Takagishi, Kenji Komaki, Fuminori Hikami, IEEE. Trans. Magn. **35**, 2562(1999).
- [9] H. Kanai, M. Kanamine, A. Hashimoto, K. Aoshima, K. Noma, M. Yamagishi, H. Ueno, Y. Uehara, and Y. Uematsu, IEEE. Trans. Magn. **35**, 2580(1999).
- [10] J. Nogues, Ivan K. Schuller, J. Magn. Mater. **192**, 203(1999).
- [11] M. A. Akhter, D. J. Mapps, and Y. Q. Ma Tan, Amanda Petford-Long, R. Doole, J. Appl. Phys. **81**, 4122(1997).
- [12] Anabela Veloso and Paulo P. Freitas, IEEE. Trans. Magn. **35**, 2568 (1999).
- [13] 김광윤, 장성호, 신경호, 한석희, 임상호, 김희중, 강탁, J. Kor. Magn. Soc. **10**, 67(2000).

The Magnetoresistance Properties of Spin Valves with CoFe/Ru/CoFe/FeMn Synthetic Antiferromagnet

S.H. Jang, T. Kang

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, 56-1 Shillim-Dong Kwanak-gu Seoul

M.J. Kim, H.J. Kim, K.Y. Kim

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

(Received 21 August 2000, in final form 6 October 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, and investigated on the magnetoresistance properties and effective exchange bias field. As the thickness of FeMn increased above 150 Å, MR ratio was decreased due to the current shunting effect. As the thickness of free layer decreased below 40 Å, MR ratio was reduced rapidly. In case of 40 Å thick of free layer, spin valve film with a structure Si(100)/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) exhibited maximum MR ratio of 7.5 % and an effective exchange bias field of 600 Oe, respectively. Thickness difference dependence in this synthetic spin valve structure on effective exchange field was investigated and interpreted by the analytical method. It should be noted that thickness increase of CoFe(P1) and decrease of CoFe(P2) in synthetic antiferromagnet led to the decrease in effective exchange bias field by experimentally and analytically.