

Ta/NiFe/Cu/NiFe/FeMn/Ta계 스피넬브 제조시 Ta/NiFe 계면원자섞임이 스피넬브의 자기저항과 자기적 특성에 미치는 영향

오세충 · 이택동

한국과학기술원 재료공학과
대전광역시 유성구 구성동 373-1

(1998년 8월 24일 접수, 1998년 10월 7일 최종수정본 받음)

기판 Ta/NiFe/Cu/NiFe/FeMn/Ta 스피넬브에서 Ta 성막 후에 자유층 NiFe 스퍼터 증착시 가해진 기판 바이어스 전압에 의해 야기된 Ta/NiFe 계면에서의 원자섞임이 자기저항에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 최대 자기저항비(MR ratio)를 나타내는 자유층의 적정두께는 바이어스 전압이 증가함에 따라 증가하였다. 이러한 현상의 원인은 바이어스 전압이 증가함에 따라 Ta과 NiFe의 원자섞임으로 계면에 있는 NiFe층 일부가 약한 강자성 또는 상자성화되어 스피넬 비의존 산란을 하는 원자섞임층의 두께가 증가하였기 때문이다. 원자섞임층의 존재는 전기저항 변화와 자화량 변화로부터 증명하였다. 또 본 실험에서 비록 NiFe 증착시 기판 바이어스 전압이 변화더라도 최대 자기저항비를 갖는 최적 “유효” 자유층 두께는 기판 바이어스 전압에 무관하게 일정하였다.

I. 서 론

거대자기저항 현상은 1988년 Baibich 등의 프랑스 연구자들에 의해 분자선속 에피택시(molecular beam epitaxy, MBE)법으로 제조된 Fe/Cr 인공초격자 구조에서 처음으로 발견되었다[1]. 그 후에 스퍼터링법으로 제조된 다수의 인공초격자 구조 이외에[2, 3] 교환이방성결합형 스피넬브 구조(이 후 스피넬브로 명칭)[4], 합금박막 구조[5], 터널링 접합 구조[6] 등에서도 거대자기저항 현상이 발견되었다. 이 중에서 스피넬브 구조는 포화자장이 10 Oe 이하에서 수 % 정도의 자기저항을 가지기 때문에 기존의 이방성 자기저항 헤드(AMR head)를 대체할 차세대 헤드로 일부 실용화되었고 또 연구되고 있다. 스피넬브에서의 자기저항 및 자기적 특성은 각 구성물질의 두께 및 결정방위 그리고 계면의 특성(계면거칠기, 계면원자섞임)에 크게 의존한다. 계면에서의 결합은 특히 스퍼터링법으로 제조된 박막의 경우 본질적으로 존재하며 또한 공정변수 등에 영향을 받는다. 따라서 스퍼터링법에 의해 거대자기저항 현상을 보이는 스피넬브를 제조하는데 있어서 이들 계면에서의 결합에 대한 연구는 매우 중요하다. 공정변수중에서 스퍼터링 전력, 스퍼터링 압력, 스퍼터링 가스에 의한 계면거칠기 변화가 자기저항과 자기적 특성에 미치는 영향[7, 8]과 NiFe/Cu 계면에서의 원자섞임이 자기저항과 자기적 특성에 미치는 영향[9]에 관해서는 여러

연구자들에 의해 연구되어 왔으나 Ta/NiFe 계면원자섞임이 자기저항에 미치는 영향에 대한 연구는 부재한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 Ta/NiFe/Cu/NiFe/FeMn/Ta의 스피넬브 구조 제조시 Ta/NiFe 계면원자섞임이 자기저항에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

II. 실험방법

4개의 타겟이 장착된 DC 마그네트론 스퍼터(DC magnetron sputter)를 이용하여 기판 표면에 기판면과 평행하게 300 Oe 자장을 가한 상태에서 박막을 제조하였다. 스피넬브를 형성하기 위한 기판으로는 자연산화막이 존재하는 (100)실리콘 단결정 웨이퍼와 Corning glass 2948을 사용하였다. 스피넬브가 (111)우선방위를 갖도록 하지층 증착 물질로는 Ta를 사용하였고 자성층으로는 순도 99.95 %인 NiFe(81:19 wt%) 합금타겟을 사용하였다. 반강자성층으로는 FeMn(50:50 at%) 합금타겟을, 사잇층으로는 99.99 %인 Cu를 사용하였다. 하지층과 스피넬브의 각 층은 5 mtorr 아르곤 기체 압력 하에서 타겟물질을 스퍼터링하여 증착하였으며 1~2 Å/sec 범위의 증착속도를 얻을 수 있도록 전력을 선택하여 인가하였다. 기판 바이어스 전압이 커짐에 따라서 Ta/NiFe 계면에서의 원자섞임이 자기저항에 미치는 영향을 살펴보기 위해 NiFe 증착시 기판에 DC 바이어스 전압을 0, -200, -300 V로 가하였고 각

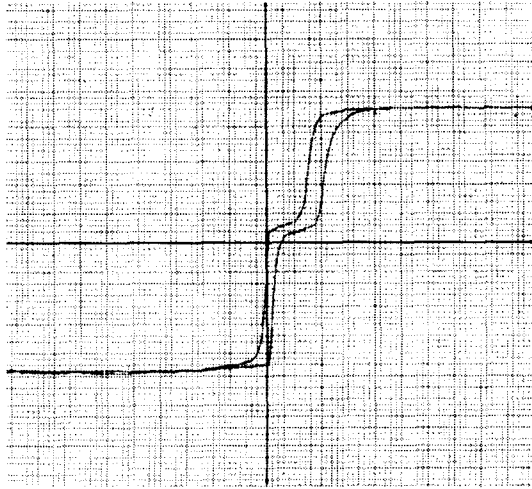


Fig. 1. Typical M-H hysteresis curve of the spin valve (H_{full} : 2.5 KOe).

바이어스별로 자유층의 두께를 10, 30, 50, 80, 100, 110, 120, 140, 200, 400 Å으로 변화시키면서 자기저항을 측정하였다. 표면 조도 변화는 원자력현미경 (atomic force microscope, AFM)을 이용하여 조사하였고, 스핀밸브 시편의 거대자기저항 효과를 측정하기 위해서 bipolar current source(Keithley 220)로 Helmholtz coil에 전류를 인가하여 자장을 변화를 시키면서 gaussmeter(Lakeshore 450 Gaussmeter)로 자장의 세기를 측정하면서 정밀직류전원(Keithley 228)과 정밀전압계(Keithley 182)를 이용하여 직선배열 4-탐침법으로 상온에서 자기저항을 측정하였다. 컴퓨터에 의해 자장을 변화시키고 시편의 저항변화를 계측하는 방법으로 자기저항-자장 곡선 혹은 비저항-자장 곡선을 얻을 수 있었다. 박막의 자성 특성은 분석 시료진동 자력계(vibrating sample magnetometer, VSM)을 이용하여 자화-자장 이력곡선(M-H hysteresis curve)을 얻었다. Fig. 1에 본 연구에서 얻은 스핀밸브의 전형적인 M-H 이력곡선을 나타내었다. 두개의 자기이력곡선을 나타내는데 하나는 자유층의 자기이력곡선이고 나머지 하나는 고착층의 자기이력곡선이다. 고착층의 자기이력곡선이 원점에서 이동하는 현상으로부터 교환결합 바이어스 자계(Hex)를 구하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 자유층 증착시 바이어스 전압을 가하지 않

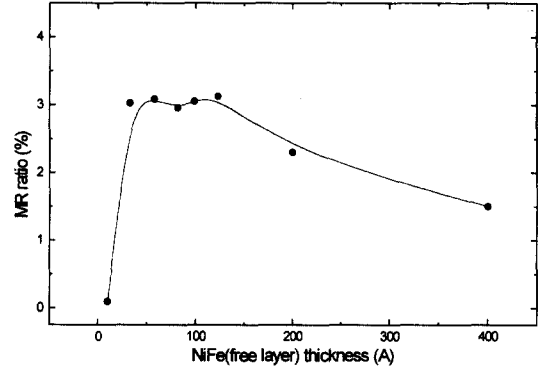


Fig. 2. Change of MR ratio with increasing free layer thickness in Si/Ta(43Å)/NiFe(XÅ)/Cu(29Å)/NiFe(33Å)/FeMn(82)/Ta(43Å).

은 상태에서 자유층의 두께 변화에 따른 자기저항비 변화를 보여준다. 교환결합 바이어스 자계의 크기는 실험한 자유층의 모든 두께에서 300 Oe 이상으로 고착층을 피닝시키기에 충분하였다. 그러나 자유층의 두께가 10 Å일 때 자기저항비가 거의 0을 나타내었다. 이는 ↑스핀전도 전자와 ↓스핀전도 전자의 평균자유행로($\lambda \uparrow, \lambda \downarrow$)는 각각 46 ± 3 Å, 6 Å정도[10]로 자유층의 두께가 30 Å이하로 얇을 경우 ↑스핀전도 전자와 ↓스핀전도 전자의 산란정도의 차이가 작게되어 MR비가 감소하는 현상을 보였으며 이는 다른 연구자들에 의해 이미 발표된 결과와 동일하다[11]. 자유층의 두께가 30~120 Å일 경우, 자기저항비는 3 %정도로 높은 자기저항비를 나타내었으나 자유층의 두께가 더 증가하면 자기저항비가 감소함을 관찰할 수 있었다. 자기저항비가 감소하는 원인은 두꺼운 자성층으로 전류새어흐름(shunt current)

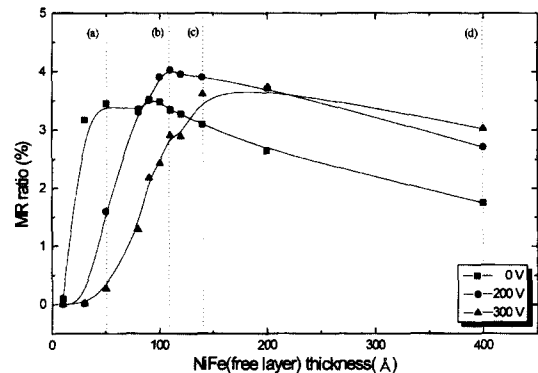


Fig. 3. Dependence of MR ratio on the free layer thickness for the different substrate bias voltages in Ta(50Å)/NiFe(XÅ)/Cu(25Å)/NiFe(40Å)/FeMn(96Å)/Ta(50Å).

효과가 크기 때문에 생기는 현상이다.

Fig. 3은 Si/Ta(50Å)/NiFe(XÅ)/Cu(25Å)/NiFe(40Å)/FeMn(96Å)/Ta(50Å) 스핀밸브 구조에서 3가지 바이어스 전압에서 각각 자유층의 두께를 변화시키면서 자기저항 거동을 살펴본 결과이다. 여기서 기판 바이어스는 자유층을 증착시에만 가하였고 다른 구성층은 기판 바이어스를 가하지 않은 상태에서 성막하였다. Fig. 2에서와 마찬가지로 자유층 두께에 따른 자기저항비의 변화 곡선은 모든 바이어스 전압에 대해 유사한 경향을 보여주고 있다. 다만 각 바이어스별로 최대 자기저항비를 나타내는 자유층의 적정두께가 0 V일 때 50 Å에서, -200 V일 때 110 Å, -300 V일 때 140 Å으로 증가하였으며 특히 바이어스 전압이 -200 V였을 때 자기저항비가 4.1 %정도로 최대값을 나타냈다. Fig. 3에서 자유층 두께가 각각 50, 110, 140, 400 Å일 때

바이어스 전압에 따른 자기저항비의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(d)는 각각 자유층의 두께가 50 Å일 때와 400 Å일 때의 바이어스 전압에 따른 자기저항비의 변화를 보여준다. Fig. 4(a)는 바이어스 전압이 증가함에 따라 자기저항비가 감소함을 보여주고, 반대로 Fig. 4(d)는 바이어스 전압이 증가함에 따라 자기저항비가 증가함을 보여준다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 이들 양극단의 중간 단계로 Fig. 4(a)와 Fig. 4(d)로 설명하면 이들의 설명이 자명하기 때문에 여기서는 이들에 대한 설명은 생략한다.

이러한 현상들을 이해하기 위해 교환결합 바이어스 자계의 크기, 계면거칠기의 변화, Ta/NiFe 계면원자섞임을 조사하였다. 교환결합 바이어스 자계는 Fig. 5에 나타난 것처럼 모든 시편에서 260 Oe 이상이었으므로 자기저항 거동에 거의 영향을 주지 않을 것으로 생각

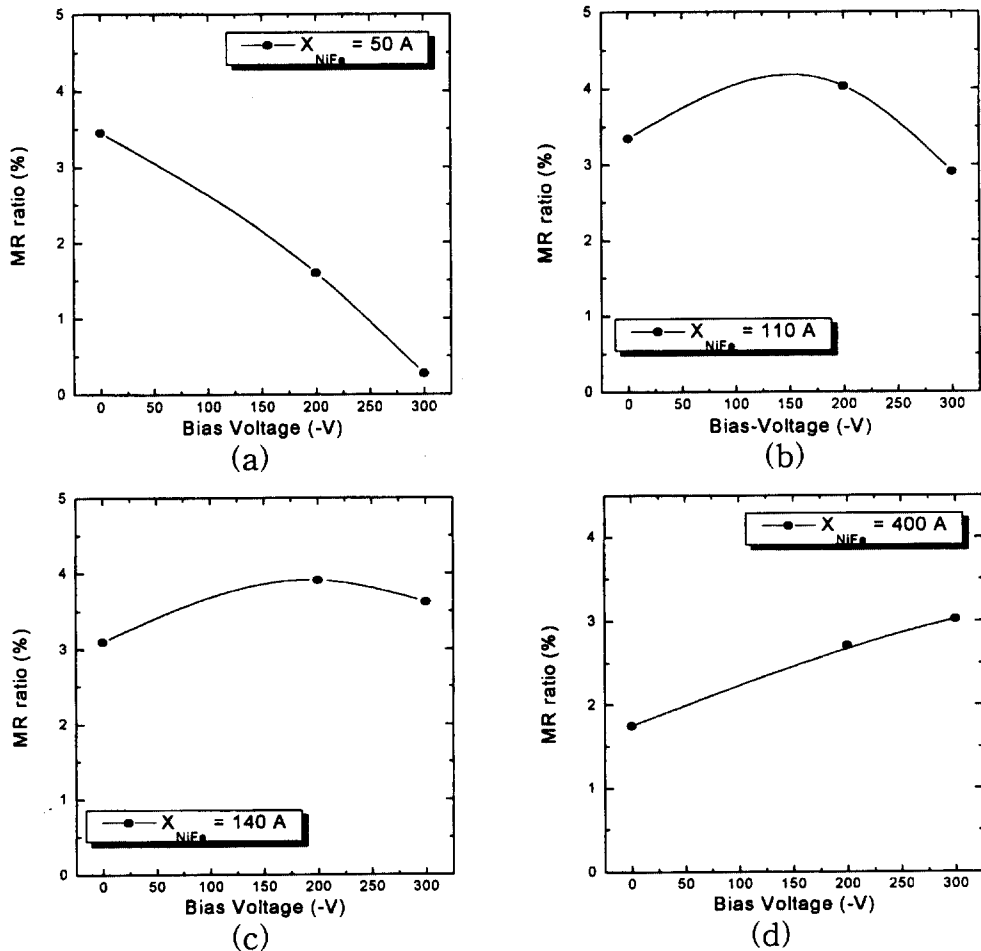


Fig. 4. Change of MR ratio with increasing substrate bias voltage for the four different free layer thickness.

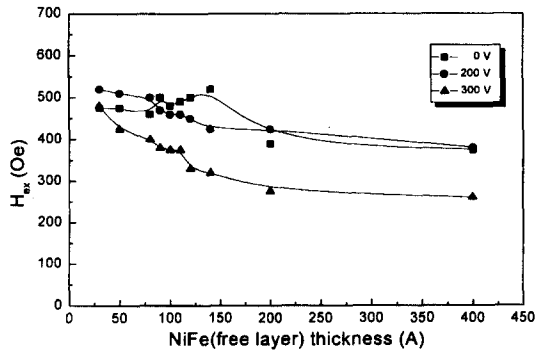


Fig. 5. Change of exchange bias field with increasing free layer thickness for the different substrate bias voltages in Ta(50Å)/NiFe(XÅ)/Cu(25Å)/NiFe(40Å)/FeMn(96Å)/Ta(50Å).

된다. 또한 바이어스 전압에 따른 Si/Ta(50Å)/NiFe(100Å)/Cu(28Å)/NiFe(40Å)/FeMn(96Å)/Ta(50Å) 구조의 계면거칠기 변화를 측정된 결과 바이어스 전압이 0, -200, -300 V로 증가함에 따라 다층박막의 자유표면의 Rrms는 2.4 Å에서 2.8 Å, 3.0 Å으로 다소 증가하였으나 이 정도 차이는 오차 범위 내에 있고 자기저항 거동에 영향을 줄 정도로 변화량도 크지 않았다.

마지막으로 계면원자섞임의 영향을 조사하였다. NiFe/Cu 계면에서의 원자섞임이 자기저항에 미치는 영향에 대해서는 V. S. Sperious의 다수의 연구자들에 의해 조사되었다. V. S. Sperious는 스핀밸브에서 NiFe/Cu 계면원자섞임층의 두께가 300 °C 어닐링 처리 후 6.8 Å에서 24.3 Å으로 증가하였고 이러한 계면원자섞임층의 존재가 자기저항비를 크게 감소시키는 것으로 보고하고 있다[12]. 기판 바이어스 전압에 의한 계면원자섞임은 바이어스 전압에 의해 가속된 Ar⁺이온이나 다른 양이온들이 기판과 충돌하여 이들의 운동에너지를 잃을 때 방출하는 열로 인해 기판온도가 상승하여 상호확산 촉진으로 생기는 원자섞임과 Ta/NiFe 계면에서 NiFe 층이 형성될 때 가속된 양이온들과의 운동량전이(momentum transfer)에 의한 collisional mixing 있는데 전자는 열적인 활성화에 의해서 형성되기 때문에 시간이 긴 경우에 유효하다. 따라서 본 실험에서는 후자인 collisional mixing에 의해 계면원자섞임이 주로 일어나는 것으로 해석된다. 어떤 경우든지 원자섞임이 계면에서 일어나 계면에 상자성층이 형성되면 스핀 의존 산란에 기여하지 못한다. 일반적으로 벌크 Ni내에 35 % Cu 혹은 20 % Ta가 존재하는 경우에

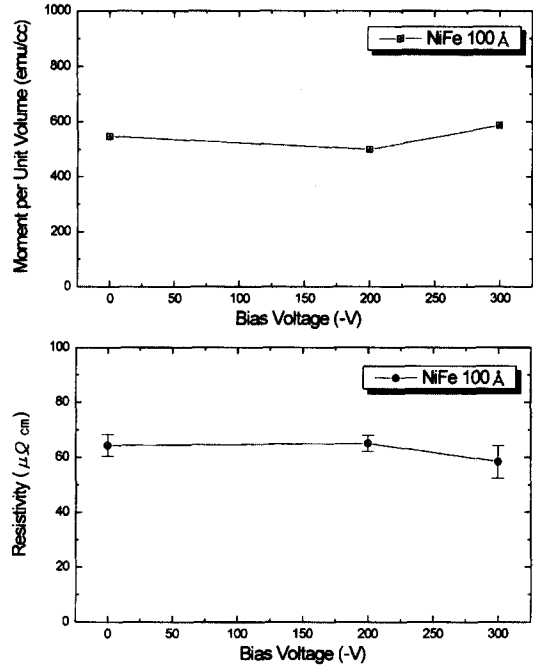


Fig. 6. Changes of Ms and resistivity with increasing substrate bias voltage in NiFe(100Å).

상온에서 상자성이 되는 것으로 알려져 있다[12]. NiFe/Cu 계면원자섞임이 자기저항 거동에 미치는 영향과 마찬가지로 Ta/NiFe 계면원자섞임이 존재하는 경우 계면에 상자성이 형성되어 자기저항에 영향을 주게된다. 따라서 본 연구에서는 Ta/NiFe 계면원자섞임을 확인하기 위해 바이어스 전압에 따라 NiFe 단일층과 Ta/NiFe의 전기적, 자기적 특성의 변화를 비교 분석하였고 이러한 Ta/NiFe 계면원자섞임이 자기저항에 미치는 영향을 간단한 모델로 설명하고자 하였다.

Fig. 6은 기판 바이어스를 가한 상태에서 NiFe(100 Å)층만 성막하여 바이어스 전압에 따른 비저항과 포화자화 변화를 측정된 결과이다. 비저항은 바이어스 전압이 -200 V까지는 거의 변화가 없었으나 -300 V에서는 다소 감소하는 경향을 나타내었고 포화자화는 -200 V까지는 역시 거의 변화가 없다가 -300 V에서 약간 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향을 이해하기 위해 각 바이어스 전압별로 자성층(NiFe)만 1 μm 성막 후 EPMA(electron probe micro analyser)로 각 시편의 조성을 분석하였고 Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 스퍼터링시 기판에 음의 바이어스를 가하면 성막된 막에서 resputtering이 일어나고 sputtering yield

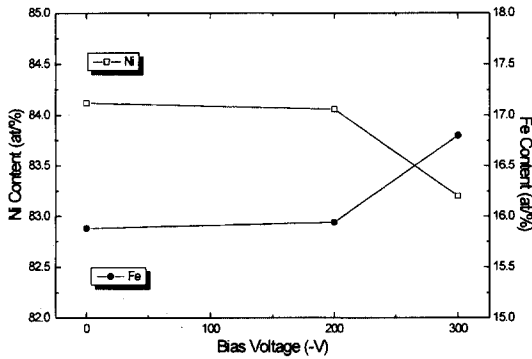


Fig. 7. Changes of Ni and Fe contents with increasing-substrate bias voltage in NiFe (1 μm).

차이로 인해 막의 조성이 변하게 된다. 따라서 결국 이러한 막 조성의 변화로 포화자화가 변하게 된다. sputtering yield는 Ni가 Fe보다 크기 때문에 NiFe 증착시 기판 바이어스 전압이 0~300 V로 증가함에 따라 성막된 박막에서 Ni의 농도는 84.1 at%에서 83.2 at%로 감소하였고 Fe의 농도는 15.9 at%에서 16.8 at%로 증가하였다. 포화자화는 Fe(1714 emu/cc)가 Ni(484.1 emu/cc)보다 크기 때문에 바이어스 전압이 증가함에 따라 이처럼 Fe 농도 증가로 포화자화가 증가하였다. 그러나 그 증가 분은 약 16 emu/cc 정도로 계산된다. 그러나 포화자화의 실제 증가는 50 emu/cc 이상 되기 때문에 그 외에 포화자화 상승효과가 있는데 아마도 바이어스 전압이 증가함에 따라 박막밀도가 조밀화되면서 포화자화가 증가한 것으로 생각된다. 비 규칙적 자에서 용질원자인 Fe가 증가함에 따라 비저항이 증가해야 하지만 Fig. 6에서 나타난 것처럼 비저항이 감소하고 있는데 이것은 바이어스에 의한 박막밀도의 조밀화에 기인한 것으로 생각되며 이것은 앞서의 박막 조밀화에 따른 포화자화 증가의 주장과 일치한다.

Fig. 8은 Ta 50 Å을 성장한 후 100 Å의 NiFe층을 증착할 때 기판 바이어스 전압을 가하여 포화자화와 비저항의 변화를 조사한 결과이다. 바이어스 전압이 증가함에 따라 Fig. 6에서와는 달리 포화자화는 감소하며 비저항은 증가하는 경향을 나타내었다. NiFe와 Ta/NiFe의 전기적, 자기적 특성이 이처럼 반대의 경향을 갖는 이유는 Ta/NiFe 계면에 원자섞임층이 존재하기 때문이다. 벌크 Ni내에 Ta이 첨가되면 Ms가 급격히 감소하여 20 %정도의 Ta이 존재할 경우 Ni는 상자성이 된다. 마찬가지로 NiFe내에 Ta이 섞이게 되면 Ms가 낮은 NiFeTa합금막이 계면에 존재하게 되고 이로 인해

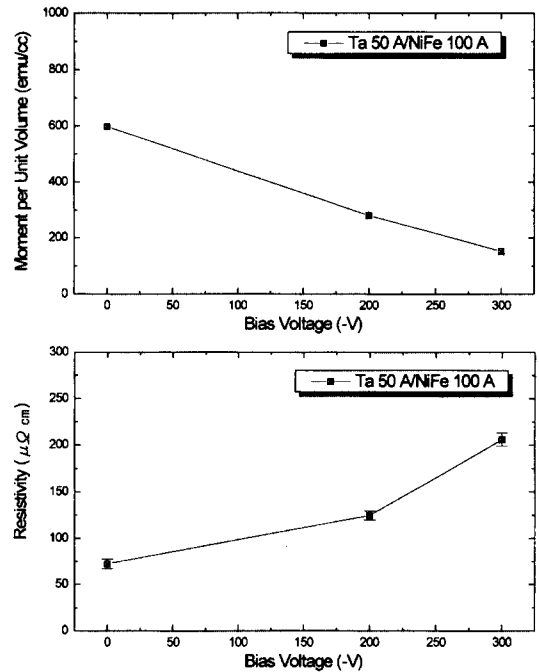


Fig. 8. Changes of Ms and resistivity with increasing substrate bias voltage in Ta(50Å) / NiFe(100Å).

포화자화가 감소하게 된다. 뿐만 아니라 NiFe내에 Ta이 불순물로 존재하므로 비저항이 증가하게 된다. 위 두 결과로부터 기판 바이어스시 Ta/NiFe 계면에서의 원자섞임을 확인할 수 있었고 이러한 Ta/NiFe 계면원자섞임이 자기저항 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 B. Dieny가 제안한 벌크 스핀 의존 산란과 관련된 간단한 모델[13]를 이용하여 해석하고자 하였다.

Fig. 9는 벌크 스핀 의존 산란의 관점에서 스핀밸브의 자유층 두께에 따른 자기저항 거동을 설명하기 위한 개략도이다. 스핀 의존 산란에 기여하는 active part와 스핀 의존 산란에 기여하지 못하는 inactive part로 나누었고 inactive part는 자화방향에 관계없이 저항은 Ri이며 active part의 저항 Ra와 병렬로 연결된 것으로 가정하였고 자기저항비를 다음과 같이 간단히 표현하였다.

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_{measured} = \frac{R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}}$$

여기서

$$R_{\uparrow\uparrow} = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i}$$

$$R_{\uparrow\downarrow} = \frac{(R_a + \Delta R_a) R_i}{R_a + R_i + \Delta R_a}$$

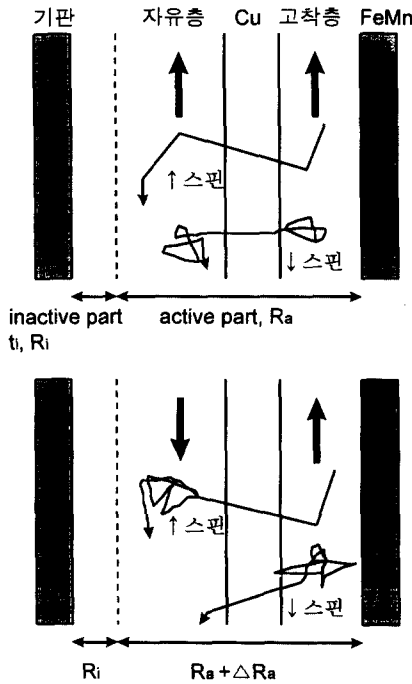


Fig. 9. Schematic of spin dependent scattering mode in the spin valve structure.

그러므로

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right]_{\text{measured}} = \left[\frac{\Delta R_a}{R_a} \right] \frac{1}{1 + (R_a + \Delta R_a)/R_i}$$

으로 표현된다. 여기서 자유층 NiFe의 총 두께를 t_f 정의하였고, 자유층을 inactive part 두께, t_i 와 active part 두께, t_a 로 분리하였다. 그리고 최대 자기저항비를 나타내는 자유층 두께(이하 적정두께로 표현)를 t_f^M 라고 정의하였다. 만일 $t_f < t_f^M$ 인 경우, 즉 스핀 의존 산란을 하는 구역이 좁을 경우 ↓스핀전도 전자는 자유층에서 산란을 충분히 하지 못하기 때문에 자기저항이 작아지며 바이어스 전압이 가해지는 경우에는 계면원자섞임에 의해 스핀 의존 산란에 기여하는 지역 t_a 는 더욱 좁아져서 $t_f = 50 \text{ \AA}$ 일 때 자기저항비는 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 바이어스 전압이 증가함에 따라 감소하게 된다. $t_f > t_f^M$ 인 경우는 두꺼운 자유층으로 전류새어흐름(shunt current)에 의해 자기저항비가 감소한다. 그러나 바이어스 전압이 증가함에 따라 계면원자섞임에 의해 inactive part 두께 t_i 의 저항(R_i)이 증가함으로써 위의 마지막 식에서 보인 것처럼 자기저항비가 증가하게 된다. Fig. 4(d)에서 $t_f = 400 \text{ \AA}$ 일 경우에는 바이어스 전

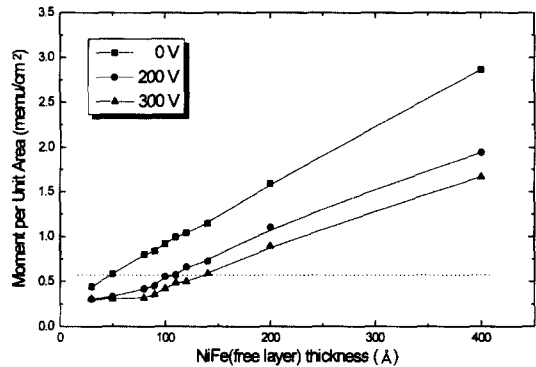


Fig. 10. Dependence of moment per unit area on the free layer thickness with the different substrate bias voltages in Ta(50Å) / NiFe(XÅ) / Cu(25Å) / NiFe(40Å) / FeMn(96Å) / Ta(50Å).

압이 증가함에 따라 자기저항비가 증가함을 볼 수 있다. 최대 자기저항비를 나타내는 자유층 두께는 바이어스 전압이 0, -200, -300 V였을 때 각각 50 Å, 110 Å, 140 Å으로 $t_f = 400 \text{ \AA}$ 일 때는 자유층의 두께가 모든 바이어스 조건에서 적정두께보다 두껍기 때문에 전류새어흐름에 의해 자기저항비가 감소하게 되는데 기판 바이어스 전압이 가해지는 경우에는 계면원자섞임층이 더 두꺼워지고, 또한 원자섞임으로 저항, R_i 가 증가함으로써 전류새어흐름이 적어지게 되어 자기저항비가 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 4(b) 및 (c)는 Fig. 4(a)와 (d)의 중간단계로 설명은 자명하다. 각 바이어스 전압별로 최대 자기저항비를 나타내는 적정두께는 50 Å, 110 Å, 140 Å으로 달랐으나 그 때의 스핀밸브 막 전체의 포화자화는 대략 0.59(emu/cm²) 정도로 같았다. 이는 매우 흥미있는 결과이다. 이것을 Fig. 10에 나타내었고, 이것으로 미루어 보아 만일 원자섞임이 균일하게 되어서 active part인 100% NiFe와 inactive part인 100% (NiFe)₈₀Ta₂₀의 영역으로만 구분한다면, 스핀전도 전자의 평균자유행로가 막 제조시에 기판 바이어스 조건에 따라 변화가 없다는 가정에서, -200 V에서는 0 V에서보다 약 60 Å정도, -300 V에서는 약 90 Å정도의 원자섞임층이 더 존재하는 것으로 생각된다.

IV. 결 론

1. 최고 자기저항비를 나타내는 자유층의 적정두께는 바이어스 전압이 증가함에 따라 증가하였다. 이러한 현상은 바이어스 전압이 증가함에 따라 Ta/NiFe의

원자섞임으로 계면에 있는 NiFe층 일부가 상자성화되어 스핀의존 산란에 기여 못하는 원자섞임층의 두께가 증가하였기 때문이다.

2. 적정두께보다 자유층의 두께가 얇을 경우 스핀전도 전자의 스핀 의존 산란의 빈도가 적어져서 자기저항비가 감소하였고 두꺼운 경우에는 전류새어흐름 효과에 의해 자기저항비가 감소하였다.

3. Ta/NiFe 계면원자섞임은 자유층의 두께가 얇을 경우 스핀의존 산란구역이 좁아져 자기저항비에 불리하고 두께가 두꺼운 경우에는 계면원자섞임이 전류새어흐름을 억제하기 때문에 자기저항비가 유리하다. 스핀밸브 제조조건이나 구조에 따라서 다르기는 하지만 본 실험의 경우 바이어스 조건에 무관하게 Ta와 NiFe의 원자섞임으로 (NiFe)₈₀Ta₂₀인 inactive 영역과 100% NiFe인 active 영역의 두 영역으로 존재한다고 가정했을 때 NiFe/Cu 계면으로부터 약 50 Å가 active 영역으로 스핀 의존 산란에 기여하는 최적 “유효” 두께로 측정되었다.

참 고 문 헌

[1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petrott, G. Creutert, A. Friedrich and J.

Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472(1988).
[2] S. S. P. Parkin, Z. G. Li and D. J. Smith, *Appl. Phys. Lett.* **58**(23), 2710(1991).
[3] D. H. Mosca, F. Petroff, A. Fert, P. A. Schroeder, W. P. Pratt. Jr. and R. Laloee, *J. Magn. Mater.* **94**, L 1(1991).
[4] D. Dieny, V. S. Speriosu, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, D. R. Wilhoit and D. Mauri, *Phys. Rev.* **B43**, 1297(1991).
[5] J. Q. Xiu, J. S. Jiang and K. P. Roche, *Phys. Rev. Lett.* **64**(19), 2304(1990).
[6] M. Julliere, *Phys. Lett.* **54A**, 225(1975).
[7] Chang-Min Park, Kyeong-Ik Min and Kyung-Ho Shin, *IEEE. Trans. Magn.* **32**, 3422(1996).
[8] J. C. S. Kools, *J. Appl. Phys.* **77**(3), 2993(1995).
[9] J. P. Nozieres, V. S. Speriosu, B. A. Gurney, H. Lefakis and T. C. Huang, *J. Magn. Mater.* **121**, 386(1993).
[10] D. Dieny, S. Speriosu, S. Metin, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgart, and D. R. Wilhoit, *J. Appl. Phys.* **69**(8), 4774(1991).
[11] Bruce A. Gurney, Virgil S. Speriosu, Jean-Pierre Nozieres, Harry Lefakis, Dennis R. Wilhoit and Omar U. Need, *Phys. Rev. Lett.* **71**(24), 4023(1993).
[12] V. S. Speriosu, J. P. Nozieres, B. M. Gurney, B. Dieny, T. C. Huang and H. Lefakis, *Phys. Rev.* **B47**, 11579(1993).
[13] D. Dieny, P. Humber, S. Speriosu, S. Metin, B. A. Gurney, P. Baumgart, and H. Lefakis, *Phys. Rev.* **B 45**, 806(1992).

Effects of Atomic Intermixing of Ta/NiFe Interface on Magnetoresistance and Magnetic Properties in a Ta/NiFe/Cu/NiFe/FeMn/Ta Spin Valve Structure.

S. C. Oh and T. D. Lee

Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received 24 August 1998, in final form 7 October 1998)

Effect of degree of intermixing at the Ta/NiFe interface induced by varying applied substrate bias voltage during NiFe free layer deposition on change of magnetoresistance in Substrate/Ta/NiFe/Cu/NiFe/FeMn/Ta spin valve multilayers was investigated. It was found that the optimum NiFe free layer thickness showing a maximum MR increases with increasing the bias voltage. The increase of the optimum thickness was due to the increase of the intermixed layer thickness with a bias voltage. The weak ferromagnetic or non ferromagnetic intermixed layer plays as a spin-independent scattering region and does not contribute on spin-dependent scattering. The existence of the intermixed layer was proved by the means of electrical resistivity and magnetization changes. In the present study, the optimum “effective” free layer thickness which gives the highest MR ratio was a constant independent of the magnitude of the bias voltage we have used.