

거대자기저항 스핀밸브 삼층박막의 자기저항 거동 해석에 관한 연구

김형준 · 이병일 · 주승기

서울대학교 공과대학 재료공학부
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1, 151-742
서울대학교 신소재공동연구소 전자재료실험실

(1998년 7월 13일 접수, 1998년 8월 17일 수정본 받음)

보자력의 차이를 나타내는 두 자성층으로 구성된 거대자기저항 스핀밸브 삼층박막의 자기저항곡선과 자기이력곡선을 단층박막으로 형성한 자성층의 자기이력곡선을 이용하여 용이하게 해석하는 방법을 제시하고, 삼층박막의 자기저항 특성과 삼층박막을 이루는 각 자성층의 자기적 특성과의 관계를 고찰하였다. 4° 기울어진 Si(111) 기판과 유리 기판 위에 NiFe/Cu/Co 삼층박막을 형성하여 일축자기이방성의 존재 유무에 따른 2 가지 경우에 대해, 스핀밸브 삼층박막의 측정된 자기이력 및 자기저항곡선을 단층박막으로 형성한 NiFe, Co의 자기이력곡선으로부터 계산된 곡선과 비교하였다. 거대자기저항을 나타내는 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 자기이력곡선은 동일한 기판 위에 형성된 NiFe, Co 단층박막의 자기이력곡선을 합성한 곡선과 일치하였으며, 자기저항곡선 또한 각 단층박막의 자기이력곡선에 단자구 모델과 다자구 모델을 적용하여 모사된 곡선으로 이해될 수 있었다. 이는 스핀밸브 삼층박막을 다양한 응용 분야에 적용시 각 응용에 필요한 자기저항 특성을 얻는데 유용한 것으로 사료된다.

I. 서 론

자기저항 현상은 외부 자장의 인가에 의해 재료의 전기저항이 변하는 현상으로서, 특히 거대자기저항 현상의 경우 전기저항의 변화율이 수십 % 정도이므로 응용적, 학문적 측면에서 활발한 연구가 진행되어 왔다. 현재까지 거대자기저항 현상은 금속 인공초격자, 과립상, 준과립상, 스핀밸브 박막 등의 다양한 구조의 박막 재료에서 보고된 바 있으며[1-5], 특히 스핀밸브 구조의 박막은 낮은 외부 자장 내에서 높은 자기저항 효과 및 높은 자기저항민감도 등의 우수한 자기저항 특성이 보고된 바 있어 자기저항 센서 및 헤드, 메모리 소자로서 응용이 유력시되고 있다. 또한, 스핀밸브 박막은 간단한 구조로서 거대자기저항 현상에 대한 학문적 연구가 용이한 장점이 있다.

최근 들어 다양한 분야로 응용 가능성이 확대되고 있는 스핀밸브 박막의 특성 향상과 더욱 체계적인 학문적 연구를 위해서는 스핀밸브 다층박막의 자기저항 특성에 대한 용이한 해석 방법이 필요하다. 최근 Y. U. Idzera 등은 Fe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막을 Element-Specific Magnetic Hysteresis (ESMH) 방법으로 각 자성층의 자기이력곡선을 측정한 후, 이를 통해 삼층박

막의 자기이력 및 자기저항 거동을 해석한 바 있다[6]. 그러나, 삼층박막을 구성하는 각 자성층의 자기적 특성과 삼층박막의 자기저항 특성의 연관성에 대한 고찰이 부족하여 삼층박막의 자기저항 특성 향상에 대한 제시가 미흡하며, 실제 실험적인 측면에서 ESMH 측정이 용이하지 않으므로 더욱 간편하면서 체계적인 해석 및 고찰이 필요하다고 사료된다.

본 연구에서는 이미 주승기 등에 의해 자기저항 특성이 보고된 바 있는 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막을 이용하여[7], 거대자기저항 현상을 나타내는 스핀밸브 삼층박막의 자기저항 거동을 삼층박막을 구성하는 각 자성층의 자기적 특성과 체계적으로 연관짓고, 기존의 연구보다 용이하게 자기저항 거동을 해석하는 방법을 제안함으로써, 각 응용 분야에 적합하고 우수한 거대 자기저항 특성을 나타내는 스핀밸브 박막의 요건을 제시하고자 하였다.

II. 실험 방법

고주파 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막 및 NiFe, Co 단층박막을 4° tilt-cut Si(111) 및 유리 기판 위에 기판 가열 없이 증착

하였다. 증착 전 4° tilt-cut Si(111) 기판은 회석된 불산과 이온교환수를 이용하여 표면의 자연산화막을 제거하였으며, 유리 기판은 회석된 황산과 이온교환수로 세척하였다. 50 Å 두께의 Cu 를 바닥층으로 사용하였으며, 증착 중 외부 자장은 인가하지 않았다. 형성된 박막의 자기이력곡선은 시편진동자력계를 이용하여 측정하였으며, NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 자기저항 특성은 시편진동자력계의 전자석과 4탐침법을 이용하여 상온에서 측정하였다. NiFe 및 Co 단층박막 각각의 자기이력곡선을 합성한 곡선과 NiFe/Cu/Co 삼층박막의 자기이력곡선을 비교하여, 삼층박막을 구성하는 NiFe, Co 층의 자화 상태와 NiFe, Co 단층박막 각각의 자화 상태를 연관지었다. 각 단층박막의 자기이력곡선에 단자구 및 다자구 모델을 적용하여 자화 상태를 추정하였으며 이를 NiFe/Cu/Co 삼층박막을 구성하는 NiFe 및 Co 층의 자화 상태와 동일한 것으로 가정하고 간단한 계산을 통해 4° tilt-cut Si(111) 및 유리 기판 위에 형성한 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 자기저항곡선을 모사하여 실제 측정된 자기저항곡선과 비교하였다.

1) 단자구 모델을 이용한 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 자기저항곡선 모사

스핀밸브 삼층박막을 구성하는 각 자성층 (NiFe, Co) 과 각 자성층에 해당하는 단층박막을 단자구로 가정하고, 임의의 외부 자장에서 삼층박막 내의 각 자성층의 자화 방향을 단층박막의 자화 방향과 동일한 것으로 간주한다. 각 단층박막의 자기이력곡선을 (1) 식에 적용하여 삼층박막을 구성하는 각 자성층의 자화 방향이 외부 자장과 이루는 각, θ_1 , θ_2 를 계산하고, 이를 (2) 식에 대입하여 삼층박막의 자기저항 곡선을 모사할 수 있다[6, 8, 9].

$$M_{1,2} = M_{s,1,2} \times \cos \theta_{1,2} \quad (1)$$

$$Relative\ GMR\ ratio \propto \sin^2 \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \quad (2)$$

(단, θ_1 , θ_2 : 삼층박막을 구성하는 각각 NiFe, Co 자성층의 자화 방향이 인가하는 외부 자장의 방향과 이루는 각)

2) 다자구 모델을 이용한 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 자기저항곡선 모사

삼층박막을 이루는 각 자성층(NiFe, Co)과 이에 해당하는 단층박막이 다자구로 이루어져 있으며, 이들을

크게 외부에서 인가하는 자장 방향으로 정렬된 자구와 인가 자장에 반대 방향으로 정렬된 두 가지 자구로 구분한다. 단자구 모델에서와 마찬가지로 단층박막의 자화 상태와 삼층박막의 각 자성층의 자화 상태를 동일한 것으로 간주하여, 단층박막의 자기이력곡선에 (3), (4), (5) 및 (6) 식을 적용함으로써 삼층박막의 각 자성층 내의 외부 자장 방향으로 정렬된 자구의 분율과 반대 방향으로 정렬된 자구의 분율을 구할 수 있으며, (7) 식을 이용하여 자기저항 곡선을 모사할 수 있다[6].

$$M_1 = M_{s,1} \times (f_1 - f_2) \quad (3)$$

$$M_2 = M_{s,2} \times (f_3 - f_4) \quad (4)$$

$$f_1 + f_2 = 1 \quad (5)$$

$$f_3 + f_4 = 1 \quad (6)$$

$$Relative\ GMR\ ratio \propto f_1 f_3 + f_2 f_4 \quad (7)$$

(단, f_1, f_3 : 각각 NiFe, Co 자성층의 외부 인가자장 방향으로 정렬된 자구의 부피 분율, f_2, f_4 : 각각 NiFe, Co 자성층의 외부 인가자장의 반대 방향으로 정렬된 자구의 부피 분율)

III. 실험 결과 및 고찰

4° tilt-cut Si(111) 기판과 유리 기판 위에 Cu(50Å) 바닥층을 사용하여 형성한 NiFe(60Å) 및 Co(30Å) 단층박막의 자기이력곡선을 그림 1에 나타내었다. 이미 보고된 바와 같이[7], 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에서 각각의 단층박막은 일축자기이방성을 나타내었으며, NiFe 단층박막의 자화용이축은 Si<110> 방향, Co 단층박막의 자화용이축은 면내에서 이와 수직인 4° tilt Si<112> 방향으로 정렬되었다. 또한, 각 단층박막의 자화용이축 방향으로 측정된 자기이력곡선에서 NiFe 단층박막의 경우 약 10 Oe의 보자력을 나타내었고, Co 박막은 약 170 Oe의 보자력을 나타내었다. 이와는 대조적으로, 유리 기판 위에 증착된 각 단층박막은 주목할만한 자기이방성이 관찰되지 않았으며, 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에 증착된 경우와 비교할 때 각 단층박막의 보자력의 차이가 현저히 감소하였다.

4° tilt-cut Si(111) 기판과 유리 기판 위에 증착한 NiFe(60Å) 및 Co(30Å) 단층박막의 자기이력곡선을 측정 방향을 고려하여 합성하고, 동일한 기판 위에 형성된 NiFe(60Å)/Cu(100Å)/Co(30Å) 스핀밸브 삼층박막

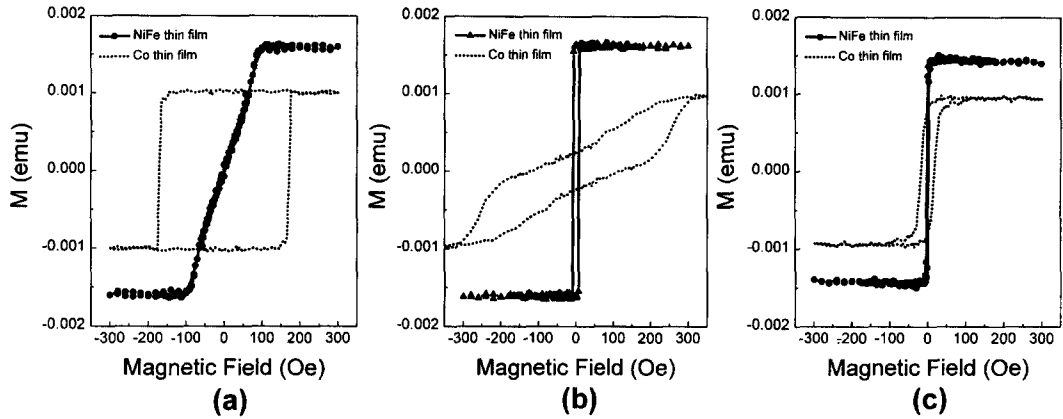


Fig. 1. M-H curves of NiFe(60 Å) and Co(30 Å) thin films grown on Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut) and Cu(50 Å)/glass templates. (a) M-H curves along 4° tilt Si<112> direction on Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut), (b) M-H curves along Si<110> direction on Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut), (c) M-H curves on Cu(50 Å)/glass.

의 자기이력곡선과 비교하여 그림 2에 나타내었다. Cu 사이트층 두께가 100 Å 정도로서 매우 두꺼워 삼층박막에서 두 자성층 간의 결합력은 무시할 수 있을 것이므로, 각 단층박막의 자기이력곡선으로부터 합성된 자기이력곡선과 실제 삼층박막에서 측정된 자기이력곡선은 매우 유사할 것으로 추정하였다. 그림 2(a)에서 보이는 바와 같이 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에 증착한 NiFe, Co 단층박막에서 4° tilt Si<112> 방향으로 측정된 자기이력곡선을 합성한 곡선은 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막에서 동일한 방향으로 측정된 자기이력곡선과 대체적으로 일치하고 있다. 그러나, 삼층박막을 구성하는 Co 층의 보자력이 Co 단층박막의 보자력에

비해 약 30 Oe 정도 증가하였으며, 삼층박막 내의 NiFe 층의 경우 약 ±50 Oe의 외부 자장 주변에서 단층박막과는 다소 다른 자화반전 거동을 나타내고 있다. 이는 삼층박막을 구성하는 NiFe 층의 성장이 NiFe 단층박막의 성장과 다소 차이를 보임으로써 자기이력 특성이 변화된 것으로 생각될 수 있으며, 아직 명확하지는 않고 더욱 연구가 진행되어야 할 부분으로 사료된다. Si<110> 방향으로 측정된 자기이력곡선은 합성된 자기이력곡선과 비교할 때 NiFe 층의 보자력이 약 10 Oe 증가하는 양상을 나타내었으며, 그 이외의 다른 자기이력 특성은 합성된 자기이력곡선과 대체로 일치하였다. 또한, 유리 기판 위에서 합성된 자기이력곡선

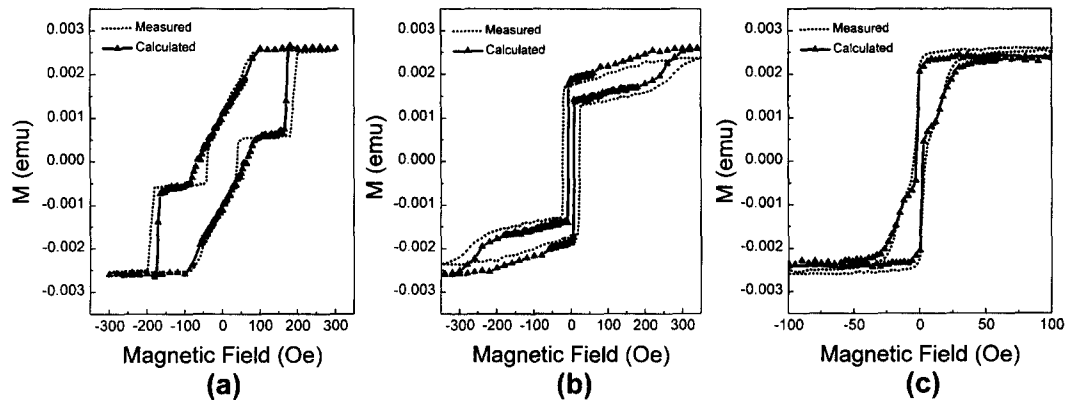


Fig. 2. Comparison of measured and calculated M-H curves of NiFe(60 Å)/Cu(100 Å)/Co(30 Å) spin valve trilayer films. Calculated M-H curves were obtained from the summation of measured M-H curves of NiFe(60 Å) and Co(30 Å) thin films. (a) M-H curves along 4° tilt Si<112> direction on Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut), (b) M-H curves along Si<110> direction on Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut), (c) M-H curves on Cu(50 Å)/glass.

은 다른 경우와 마찬가지로 측정된 자기이력곡선과 매우 유사하였다. 이와 같이 4° tilt-cut Si(111) 기판과 유리 기판 위에서 각 방향에 따라 측정된 NiFe/Cu/Co 삼층박막의 자기이력곡선을 동일한 기판 위에 증착한 NiFe, Co 단층박막의 자기이력곡선의 합성 곡선과 비교할 때 대체적으로 일치하는 양상을 관찰할 수 있었으며, 이는 삼층박막을 구성하는 두 자성층간의 결합력을 무시한 가정이 합리적이며 동일한 기판 위에 증착된 NiFe, Co 단층박막의 자기적 특성이 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 각 자성층에서도 대체적으로 그대로 유지됨을 나타낸다고 할 수 있다.

그림 2에서 보인 바와 같이 4° tilt-cut Si(111) 기판 또는 유리 기판 위에 형성된 NiFe 또는 Co 단층박막의 자기적 특성은 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 각 자성층에서도 대체적으로 유지되는 것을 알 수 있으므로, 각 단층박막의 자기이력곡선에 단자구 및 다자구 모델을 적용하여 임의의 외부 자장을 인가할 때의 박막 내의 자화 상태를 추정하고, 이를 삼층박막의 각 자성층의 자화 상태와 동일한 것으로 가정하여 삼층박막의 자기저항곡선을 모사하여 그림 3에 나타내었다. 단자구 및 다자구 모델을 적용하여 모사한 자기저항곡선은 상호간의 큰 차이를 나타내지 않았으며, 모사된 곡선은 모델에 상관없이 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막에서 실제 측정된 자기저항곡선과 대체적으로 일치하였다. 이는 두 자성층 간의 보자력 차이를 이용한 스핀밸브 삼층박막을 구성하는 각 자성층을 단층박막으로 형성하여 단층박막의 자기이력곡선에 간단한 모델을

적용함으로써, 삼층박막의 자기저항 거동의 예측과 해석이 가능함을 나타낸다는 점에서 스핀밸브 삼층박막에서의 거대자기저항 현상 연구에 매우 유용할 것으로 사료된다. 또한, 위의 경우는 스핀밸브 삼층박막을 구성하는 비자성층의 두께가 두꺼워 인접한 두 자성층간의 결합력을 무시하였으나, 상대적으로 비자성층의 두께가 얇아 두 자성층 간의 결합력을 무시할 수 없는 경우는 측정된 자기이력 및 자기저항 곡선을 결합력이 무시되어 계산된 자기이력 및 자기저항 곡선과 비교하여 차이를 고찰함으로써 결합력의 종류 및 크기를 정량화할 수 있을 것으로 기대된다.

위에서 제시된 바와 같이 스핀밸브 삼층박막의 거대 자기저항 현상을 이해 및 해석하기 위해 삼층박막을 구성하는 두 자성층을 동일한 기판과 바닥층 위에 단층박막으로 형성하고 자기이력곡선을 측정함으로써 삼층박막의 자기이력 및 자기저항 거동을 예측하는 방법은 스핀밸브 삼층박막의 응용적 측면에서 중요한 두 가지 측면, 즉 최대 자기저항비와 자기저항민감도에 대한 정보를 제공할 수 있다. 먼저 임의의 스핀밸브 삼층박막에서 얻을 수 있는 이론적 최대 자기저항비를 간단히 추정하자면 다음과 같다. 다른 요인들은 일정한 상태에서 삼층박막에서 얻을 수 있는 자기저항비가 인접한 두 자성층 간의 자화 상태에 의존한다면, 모사된 자기저항곡선과 측정된 자기저항곡선을 비교함으로써 이론적 최대 자기저항비를 구할 수 있으며, 이는 이미 기술한 바와 같이 삼층박막의 각 자성층의 자기이력 거동을 단층박막의 자기이력 거동과 동일하다고

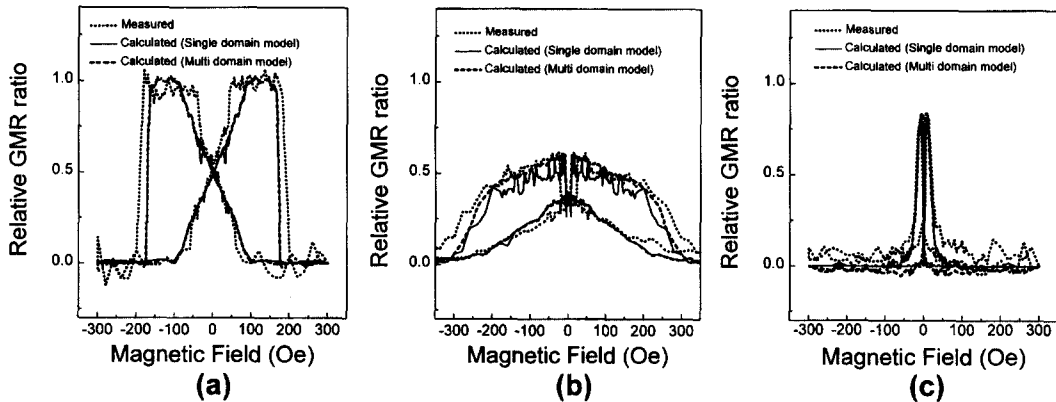


Fig. 3. Comparison of measured and calculated R-H curves in NiFe/Cu/Co spin valve trilayer films. Calculated R-H curves were obtained from the simple models using the measured M-H curves of NiFe(60 Å) and Co(30 Å) thin films. (a) R-H curves along 4° tilt Si<112> direction on Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut), (b) R-H curves along Si<110> direction on Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut), (c) R-H curves on Cu(50 Å)/glass.

간주하고 (1) 식에 단층박막의 자기이력곡선을 적용하여, 임의의 외부 자장 방향에 대한 삼층박막 내의 각 자성층의 자화 방향을 결정한 후, 이를 (2) 식에 적용하면 이론적 상대 자기저항비를 구할 수 있다. 인접한 두 자성층이 반평행 자화 상태를 이룰 때 Sine 항은 최대값, 즉 1을 나타내며, 평행 자화 상태를 이룰 때 Sine 항은 최소값, 즉 0 이 된다. 따라서, 임의의 스핀밸브 삼층박막과 임의의 자장 범위에서 얻을 수 있는 이론적 상대 자기저항비를 위의 방법으로 구하고, 실제 동일한 조건에서 측정된 자기저항비를 비교하면 동일한 삼층박막에서 얻을 수 있는 이론적 최대 자기저항비를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 예를 들어 본 NiFe/Cu/Co 삼층박막의 경우, 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에 형성한 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 4° tilt Si<112> 방향에서는 인접한 NiFe, Co 두 자성층이 완전한 반평행 자화 상태를 형성할 수 있으므로 (2) 식의 Sine 항의 최대값은 1이 되어 이론적 상대 자기저항비는 1이 되고, 따라서 측정된 자기저항비 1.1 %가 본 삼층박막의 4° tilt Si<112> 방향에서 얻을 수 있는 이론적 최대 자기저항비와 동일하다고 생각할 수 있다. 마찬가지로 유리 기판 위에 증착된 NiFe/Cu/Co 삼층박막의 경우는 Sine 항의 최대값이 0.84 이므로 이론적 상대 자기저항비는 0.84 가 되고, 측정된 자기저항비는 0.72 % 이다. 따라서, 측정된 자기저항비는 유리 기판 위에 증착된 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막에서 얻을 수 있는 이론적 최대 자기저항비의 약 84 % 정도일 것이므로, 유리 기판 위에서의 이론적 최대 자기저항비는 0.86 %로 추정된다.

동일한 NiFe/Cu/Co 삼층박막임에도 불구하고 4° tilt-cut Si(111) 기판과 유리 기판을 비교할 때 4° tilt-cut Si(111) 기판에서 더 높은 이론적 최대 자기저항비가 구해지는 것은 인접한 두 자성층의 자화 상태 이외의 요인, 즉 예를 들어 결정성, 계면거칠기 등의 차이 때문인 것으로 생각된다. 또한, 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에서는 NiFe/Cu/Co 삼층박막에서 얻을 수 있는 이론적 최대 자기저항비를 얻을 수 있는 반면, 유리 기판 위

서는 이론적 최대 자기저항비의 약 84 % 밖에 얻을 수 없는 것은 유리 기판 위에 형성한 NiFe/Cu/Co 삼층박막의 경우 자기이방성이 유도되지 않았기 때문에 다양한 방향의 자화 상태를 나타내는 자구로 나뉘어 있어 막 전체적인 반평행 자화 상태를 얻을 수 없으나, 4° tilt-cut Si(111) 기판 위에 형성한 삼층박막은 자화용이축 방향으로 자기저항 특성을 측정할 경우, 유도된 자기이방성으로 인해 막 전체적인 반평행 자화 상태를 얻을 수 있기 때문에 생기는 효과로 사료된다. 따라서, 높은 자기저항비를 얻기 위해서는 스핀밸브 삼층박막 내에 자기이방성을 유도하는 것이 유리하며, 이는 NiFe 층과 Co 층의 막 전체적인 반평행 자화 상태를 얻을 수 있기 때문인 것으로 생각된다.

또한, 본 연구에서 제시된 방법을 이용하여 스핀밸브 삼층박막의 응용적 측면에서 중요한 요소인 자기저항민감도를 이해하고자 다음의 수식을 전개하였다. 이미 설명한 바와 같이 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막을 구성하는 NiFe, Co 각 자성층의 자기적 특성은 NiFe, Co 단층박막의 자기적 특성으로 대체해도 큰 오차가 없으므로, 삼층박막을 구성하는 각 자성층의 자기적 특성을 단층박막의 자기이력곡선과 동일한 것으로 가정하고, 삼층박막의 각 자성층을 단자구로 가정하면 (1), (2) 식에서 제시된 바와 같이 삼층박막의 저항과 각 자성층의 자화값 및 자화 방향 사이의 관계를 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$M_{1,2} = M_{s,1,2} \times \cos \theta_{1,2} \tag{8}$$

$$R = R_{\min} \times G \times \sin^2 \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} + R_{\min} \tag{9}$$

(단, θ_1 : NiFe 층의 자화 방향이 초기 인가 자장과 이루는 각, θ_2 : Co 층의 자화 방향이 초기 인가 자장과 이루는 각, G: 상수, R_{\min} : 삼층박막의 최소 저항)

NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막에 자기이방성이 유도된 그림 4(a)의 경우, (1) 영역에서는 NiFe 층의 자화 반전에 의해 자기저항 변화가 생기므로, $R = f(\theta_1)$, $\theta_2 = 0^\circ$ 이고, 각각 (8), (9) 식을 외부 자장에 대해 미분하면

Table I. Comparison of calculated and measured GMR effects in NiFe / Cu / Co spin valve films

	Maximum value of $\sin^2 \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}$	Calculated GMR ratio	Measured GMR ratio (%)	Calculated maximum GMR ratio (%)
기판 : Cu(50 Å) / Si(111, 4° tilt-cut)	1	1	1.1 %	1.1 %
기판 : Cu(50 Å) / glass	0.84	0.84	0.72 %	0.86 %

(10), (11) 식을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 (12) 식과 같이 삼층박막의 dR/dH 을 NiFe층의 dM/dH 과 연관지을 수 있다.

$$\frac{dR}{dH} = \frac{1}{2} R_{\min} \times G \times \sin \theta_1 \times \frac{d\theta_1}{dH} \quad (10)$$

$$\frac{dM_1}{dH} = -M_{s1} \times \sin \theta_1 \times \frac{d\theta_1}{dH} = \chi_1 \quad (11)$$

$$\therefore \frac{dR}{dH} = -\frac{1}{2} R_{\min} \times G \times \frac{1}{M_{s1}} \times \chi_1 = A \times \chi_1 \quad (12)$$

(단, χ_1 : NiFe층의 susceptibility, A, G: 상수)

따라서, NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 ① 영역에서의 dR/dH 는 NiFe 층의 dM/dH 와 비례하며, 마찬가지로 ② 영역에서의 dR/dH 도 Co 층의 dM/dH 에 비례한다고 할 수 있다. 삼층박막에 자기이방성이 유도되지 않은 그림 4(b)에서도 자기저항 변화는 $R = f(\theta_1, \theta_2)$ 이므로, 다음과 같이 각 자성층의 자기이력 특성과 연관지을 수 있다. (9) 식을 미분하면,

$$\frac{dR}{dH} = \frac{dR}{d\theta_1} \times \frac{d\theta_1}{dH} + \frac{dR}{d\theta_2} \times \frac{d\theta_2}{dH} \quad (13)$$

$$\frac{dR}{dH} = \frac{1}{2} R_{\min} \times G \times \sin(\theta_1 - \theta_2) \times \left(\frac{d\theta_1}{dH} - \frac{d\theta_2}{dH} \right) \quad (14)$$

(8), (11) 식을 이용하여 (14) 식에 대입하면,

$$\frac{dR}{dH} = \frac{1}{2} R_{\min} \times G \times \sin(\theta_1 - \theta_2) \times \left(\frac{\chi_2}{M_{s2} \sin \theta_2} - \frac{\chi_1}{M_{s1} \sin \theta_1} \right) \quad (15)$$

$$\therefore \frac{dR}{dH} = B \times \sin(\theta_1 - \theta_2) \times \left(\frac{\chi_2}{M_{s2} \sin \theta_2} - \frac{\chi_1}{M_{s1} \sin \theta_1} \right) \quad (16)$$

(단, χ_1 : NiFe층의 susceptibility, χ_2 : Co층의 susceptibility, B: 상수)

그러므로, NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막에 자기이방성이 유도되지 않은 경우 dR/dH 는 (16) 식에서와 같이 각 자성층의 susceptibility의 차이 뿐 아니라, 포화자화값과 각 자성층의 자화 방향에 의해 복합적으로 표현될 수 있다.

위에 제시된 (12)와 (16) 식은 보자력 차이를 이용한 스핀밸브 삼층박막 시스템에 일반적으로 적용될 수 있으며, 자기저항민감도를 증가시키기 위해 그림 4(a) 형태의 경우는 NiFe 층으로 대표되는 연자성층의 susceptibility를 증가시켜야 하며, 그림 4(b)의 경우는 인접한 두 자성층 간의 susceptibility의 차이가 커야 함을 암시한다고 할 수 있다. 위에서 제시된 바와 같이 스핀밸브 삼층박막을 구성하는 각 자성층을 단층박막으로 형성한 후 얻은 자기이력 특성으로부터 스핀밸브 삼층박막의 자기이력 및 자기저항 특성을 해석 및 예측하는 방법은 다양한 거대자기저항 소자에 적용이 가능한 스핀밸브 박막을 개발하는데 매우 유용할 것으로 생각되며, 학문적으로 거대자기저항 현상을 이해하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

4. 결 론

보자력 차이를 이용한 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막의 자기이력 및 자기저항곡선을 각 자성층의 자기이

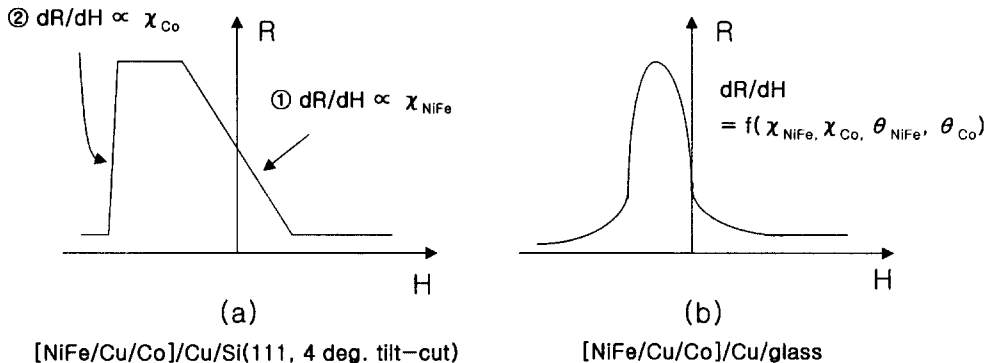


Fig. 4. Schematic diagram of relationships between the measured R-H curve and magnetic properties of each magnetic layer in NiFe / Cu / Co spin valve trilayer films.

력곡선을 이용하여 해석하고, 삼층박막의 자기저항 특성과 각 자성층의 자기이력 특성의 관계를 수식화하여 제시하였다. 4° tilt-cut Si(111) 기판과 유리 기판 위에 Cu(50Å) 바닥층을 증착한 후 NiFe/Cu/Co 스핀밸브 삼층박막을 형성하여 일축자기이방성의 유무에 따른 자기이력곡선과 자기저항곡선을 측정하고 또한, 동일한 기판 위에 NiFe과 Co 단층박막을 형성하고 자기이력곡선을 측정하여 이에 단자구 및 다자구 모델을 적용하여 삼층박막의 자기저항 및 자기이력곡선을 계산하였다. 계산된 자기저항 및 자기이력곡선을 측정된 곡선과 비교한 결과, 자기이방성 유무에 관계없이 계산된 결과와 측정된 결과가 거의 일치하였으며, 자기저항곡선의 경우 자기저항비의 측면에서 삼층막에 일축자기이방성을 유도한 경우가 더 유리하였다. 자기저항곡선의 자기저항민감도 (dR/dH)는 각 자성층의 susceptibility (dM/dH)와 밀접한 관계가 있었으며, 특히 자기이방성이 유도된 NiFe/Cu/Co 삼층박막의 경우 작은 자장 영역에서 NiFe 층의 susceptibility와 삼층박막의 자기저항민감도가 정비례하는 관계를 알 수 있었다. 위의 결과는 일반적인 거대자기저항 스핀밸브 삼층박막의 자기저항 특성을 해석하는데 적용될 수 있으며, 삼층박막의 자기저항 특성 개선과 해석을 위한 연

구에 유용할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 교육부 신소재분야 연구지원과 과학재단의 우수연구센터인 서울대학교 신소재 박막 가공 및 결정성장 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friedrich, and J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
- [2] S. S. P. Parkin, *Appl. Phys. Lett.* **61**(11), 1358 (1992).
- [3] J. Q. Xiao, J. S. Jiang, and C. L. Chien, *Phys. Rev. Lett.* **68**(25), 3749 (1992).
- [4] T. L. Hylton, K. R. Coffey, M. A. Parker and J. K. Howard, *Science* **261**, 1021 (1993).
- [5] B. Dieny, V. S. Speriosu, S. Metin, S. S. P. Parkin, B. A. Gurney, P. Baumgart, and D. R. Wilhoit, *J. Appl. Phys.* **69**(8) 4774 (1991).
- [6] Y. U. Idzerda, C.-T. Chen, S. F. Cheng, W. Vavra, G. A. Prinz, G. Meigs, H.-J. Lin, and G. H. Ho, *J. Appl. Phys.* **76**, 6527 (1994).
- [7] 김형준, 이병일, 주승기, *한국자기학회지* **7**, 323 (1996).

A Study on the Analysis of Magnetoresistive Behavior in Giant Magnetoresistive Spin Valve Trilayer Films

Hyeong-Jun Kim, Byung-II Lee and Seung-Ki Joo

*Division of Materials Science and Engineering, Seoul Nat'l University
Electronic Materials Laboratory, Center for Advanced Materials Research
San 56-1, Shillim-dong, Kwanak-ku, Seoul 151-742, Korea*

(Received 13 July 1998, in final form 17 August 1998)

The relationships between R-H curves of giant magnetoresistance (GMR) spin valve trilayer films and M-H curves of each magnetic layer consisting of the trilayer films were analyzed and simple formula representing the relations between the curves were suggested for theoretical analysis and study of magnetoresistance (MR) in those films, especially where the MR is from the difference of coercivity. Using two kinds of NiFe/Cu/Co films, which had been deposited on Cu(50 Å)/Si(111, 4° tilt-cut) and Cu(50 Å)/glass, R-H and M-H curves were measured and compared with the calculated ones, which were obtained by applying the M-H curves of single NiFe and Co films, deposited on the same substrates, to the previously reported single-domain and multi-domain models. The calculated ones were well consistent with the measured ones and the suggested simple relationships between R-H and M-H curves are thought to be very useful for the deep understanding of MR behavior and the reasonable approach to improve MR properties in GMR spin valve trilayer films.