

CoB/Ru/CoB 박막 재료의 자화 거동 특성 분석

김동영 · 윤석수 *

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2013년 10월 7일 받음, 2013년 10월 14일 최종수정본 받음, 2013년 10월 14일 게재확정)

자성-금속-자성 삼층구조로 반강자성 결합 특성을 갖는 박막 재료의 자화 곡선은 두 자성박막 각각의 자화량(M_1 , M_2) 변화 특성을 반영한다. 본 연구에서는 반강자성 결합 특성을 갖는 CoB/Ru/CoB 박막 재료의 두 자성 박막의 총자화량($M_{tot} = M_1 + M_2$)과 상부 단일 박막의 자화량(M_1)의 이론적 값을 Stoner-Wohlfarth 모델로 계산하였다. VSM으로 측정된 총자화량은 자기장의 반전에 따라 가역 특성을 보였으며, CoB/Ru/CoB 재료의 플롭자기장(H_F)은 약 50 Oe였다. 한편 MOKE로 측정된 상부 단일 박막의 자화량(M_1)은 $-H_F < H < H_F$ 에서 비가역 자화 반전 특성을 보였다. 이러한 자화 거동 특성은 두 자성 박막에 서로 상호 작용하는 반강자성 결합에 의하여 두 자성 박막 각각의 자화 각도 변화에 기인함을 Stoner-Wohlfarth 모델 계산을 통하여 확인하였다.

주제어 : 반강자성 결합, 자화량, 플롭자기장, Stoner-Wohlfarth 모델

I. 서 론

강자성체에서 자기장의 세기에 따른 자화량 변화는 자구의 이동 또는 회전 에 의한 것이다. 이러한 변화는 재료의 이방성 에너지 및 결합 에너지 특성에 따라 달라진다. 자성-금속-자성의 삼층 박막구조에서 두 자성 박막 사이의 금속막에 의한 결합 작용이 반강자성 특성을 보일 때 이들 재료를 합성형 반강자성(Synthetic Antiferromagnetic: SAF) 재료라고 한다 [1]. SAF재료에서 분리된 두 자성 박막 상호간에 금속막에 의한 반강자성 결합에 의하여 두 자성층 각각은 단일자구 형태를 이루며, 두 개의 단일자구는 반강자성 결합 특성에 의하여 서로 반대방향으로 정렬하려고 한다. 이러한 특성에 의하여 두 개의 자구는 서로 독립적인 자화 거동 특성을 보일 것으로 예상되며, 플롭자기장(H_F) 이하에서는 이들 두 자구가 서로 반대방향으로 정렬하여 총자화량이 최소가 되게 만든다 [2]. 수직자기이방성 레코딩 미디어는 정보를 기록할 때 인가하는 자속의 회귀 경로(return path)를 형성시키기 위하여 SUL(soft under layer)을 사용하고 있다 [3, 4]. 초기에는 단일층 자성 재료를 SUL로 사용하였다. 그러나 정보 기록 시 인가하는 자속에 의하여 SUL에서 발생하는 불연속적인 자화 변화로 인하여 자기 노이즈를 증가시켜 저장하려는 정보의 손실을 야기시켰다. 현재는 자기 노이즈를 제거하기 위하여 플롭자기장(H_F) 이하에서 자화량이 매우 작은 SAF 재료를 SUL 소재로 선택하여 사용하고 있다. 이러한 SAF 재료는

터널링 자기저항 소자의 열적 안정성 확보 및 스핀 토크 전류의 감소를 위해서도 사용되고 있다 [5]. 따라서 SAF 재료의 금속막의 두께에 따른 반강자성 결합 및 자화 특성 분석을 위한 연구도 지속적으로 진행되고 있다. 자화 용이축에서 측정된 자화곡선으로부터 도출한 플롭자기장(H_F)의 세기로부터 SAF 재료의 반강자성 결합 에너지를 분석하고 있으며 [6, 7], 강자성 공명을 이용하여 SAF 재료의 자화 거동 특성을 분석하고 있다 [8].

자성재료의 자기장의 세기에 따른 자화량 변화는 VSM (Vibrating Sample Magnetometer)을 이용하여 측정한다. 금속막으로 분리된 두 자성 박막의 자화량을 VSM으로 측정하면 두 자성 박막의 자화량의 합인 총자화량을 측정하게 된다. 두 자성 박막 각각의 자화 거동 특성은 측정을 통하여 직접적으로 확인한 경우는 없었다. 금속막으로 분리된 두 자성 박막의 상부 자성 박막의 특성을 측정할 수 있는 방법으로 Kerr 효과를 이용하여 상부 자성 박막의 자성 특성을 분석할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 반강자성 결합 특성을 갖는 CoB/Ru/CoB 재료의 자기장 세기에 따른 자화 곡선을 VSM 및 MOKE(Magneto Optical Kerr Effect)을 이용하여 측정하였으며, S-W 모델(Stoner-Wohlfarth model)을 사용하여 자화 거동 특성을 분석하였다.

II. 실험방법

자화 거동을 측정하기 위한 합성형 반강자성 시료인 $\text{Co}_{88}\text{B}_{12}(30 \text{ nm})/\text{Ru}(0.5 \text{ nm})/\text{Co}_{88}\text{B}_{12}(30 \text{ nm})$ 는 고진공 DC 스퍼터링 챔버에서 glass 기판 위에 상온에서 증착하였다. 비정

질 $\text{Co}_{88}\text{B}_{12}$ 과 Ru 박막은 0.6 Pa의 Ar 분위기에서 2.5 nm/s와 0.15 nm/s의 증착 속도로 각각 증착하였다. 또한 하부층으로 Ta(5 nm)를 사용하였으며, 시편의 산화를 방지하기 위한 상부층으로 Ta(5 nm)를 증착하였다. SAF 박막 재료의 자기장의 세기에 따른 자화 곡선은 VSM 및 MOKE를 사용하여 상온에서 측정하였다. VSM은 두 자성 박막 전체의 자화량을 의미한다. MOKE는 가시광선을 사용하므로 금속 자성체의 투과 깊이가 약 20 nm이므로 30 nm인 CoB를 투과하지 못한다 [9]. 따라서 MOKE에서 나타나는 자화 곡선은 상부 CoB층의 자화 특성을 반영한다. 따라서 VSM과 MOKE를 사용하여 측정된 자화 곡선을 분석함으로써 SAF 재료에서 두 자성 박막 각각의 자화 거동 특성을 분석하는데 이용하였다. VSM과 MOKE로 측정된 자화 곡선은 S-W 모델을 사용하여 계산한 결과와 비교 분석하였다.

III. 실험결과 및 고찰

나노미터 두께의 금속 박막으로 분리된 두 개의 자성 박막은 금속 박막의 전도전자에 의한 간접적인 상호작용으로 두 자성 박막이 서로 결합된 특성을 보인다. 이러한 결합 특성은 금속 박막의 두께에 따라 강자성 결합과 반강자성 결합이 주기적으로 진동하는 현상을 보인다[1]. 이때, 자성/금속/자성 삼층 구조에서 두 자성 박막의 자화 방향을 서로 반대 방향으로 정렬 하려고 하는 반강자성 결합 특성을 갖는 재료를 합성형 반강자성(SAF) 재료라고 한다. 이러한 SAF 재료는 두 자성 박막 상호간에 작용하는 반강자성 결합 에너지에 의하여 각각의 자성 박막은 단일 자구를 형성하게 되며, 두 개의 단일자구가 반강자성 결합에너지로 결합되어 있는 형상으로 도식화할 수 있다. 따라서 단일자구의 자화곡선을 잘 설명하는 S-W 모델에 반강자성 교환 결합 에너지를 추가하여 SAF 재료의 자화 특성 분석이 가능하다[10].

본 연구에서는 동일한 두께를 갖는 두 자성 박막이 반강자성 결합에너지 J_1 과 나노 두께의 금속 박막 제조 시 생성되는 편홀이나 거칠기에 기인하는 결합 에너지 J_2 를 S-W 모델에 도입하였다. 이 모델을 사용하여 두 자성 박막의 에너지 밀도가 최소가 되는 평형 조건으로부터 두 자성 박막 각각의 단일자구의 방향을 구하여 두 자성 박막 각각의 자화 거동 분석에 이용할 수 있다. SAF 재료의 단위면적당 에너지 밀도(E_T)는 다음과 같이 표현된다[4].

$$E_T = -HM_s t \{ \cos(\phi_1 - \theta_H) + \cos(\phi_2 - \theta_H) \} + K_u t \{ \sin^2 \phi_1 + \sin^2 \phi_2 \} + J_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) + J_2 \cos^2(\phi_1 - \phi_2) \quad (1)$$

여기서 M_s 및 K_u 는 자성층의 포화자화량 및 일축이방성 상수이며, θ_H 는 자화 용이축으로부터 고려한 외부 자기장의 방

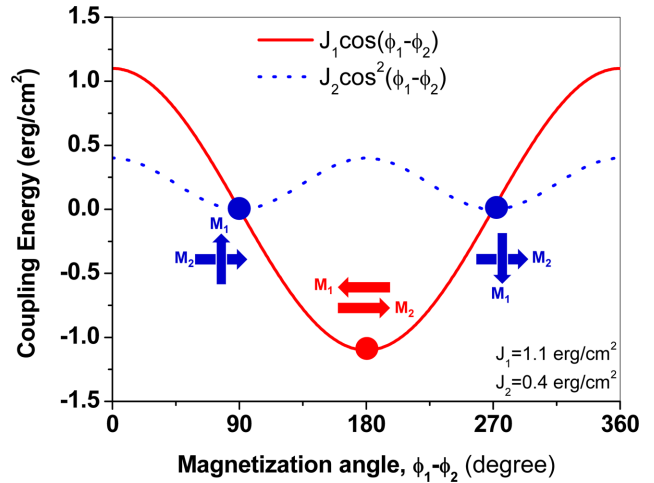


Fig. 1. (Color online) Angular dependence of J_1 and J_2 effect.

향을 나타낸다. ϕ_1 및 ϕ_2 는 두 자성박막의 자화 방향을 각각 나타낸다.

SAF 재료의 자화 특성에 영향을 미치는 J_1 과 J_2 에 대한 특성은 식(1)의 다섯 번째 및 여섯 번째 항으로 표현된다. 이들 특성을 두 자성 박막 사이의 자화 각도 $\phi_1-\phi_2$ 로 나타내면 Fig. 1과 같으며, J_1 과 J_2 에 대한 단위 면적당 에너지는 1.1 erg/cm²과 0.4 erg/cm²을 각각 사용하였다. 이들 J_1 과 J_2 에 대한 에너지 값들은 실험에서 사용한 CoB/Ru/CoB의 VSM 측정 결과와 S-W 모델로 계산한 결과를 비교하여 가장 일치하는 조건으로부터 추출한 결합력 에너지 값이다. Fig. 1에서 실선으로 표시한 J_1 에 의한 에너지 특성 보면, 두 자성 박막 사이의 자화 각도가 $\phi_1-\phi_2=180^\circ$ 에서 에너지가 최소가 된다. 즉, 두 자성 박막의 자화 방향이 서로 반대 방향으로 정렬하려는 경향을 보이며, 자성재료의 스핀들이 서로 반대방향으로 정렬되어 자화량이 상쇄되는 반강자성 재료의 특성과 유사하다. 따라서 J_1 은 금속막으로 분리된 두 자성 박막의 자화 방향이 서로 반대 방향으로 정렬되어 자화량을 상쇄 시키도록 하는 역할을 하며, 이러한 특성을 갖는 재료를 반강자성 재료와 구분하기 위하여 합성형 반강자성(SAF) 재료라고 한다. SAF 재료에 J_1 의 면적당 에너지 값은 두 자성 박막을 분리시키는 금속막의 두께가 얇을수록 커지며, 현재 제조되는 SAF 재료는 J_1 특성을 향상시키기 위하여 nm 이하의 두께를 갖는 금속막을 사용한다. 스퍼터링 방법으로 nm 이하의 두께를 갖는 금속막을 실리콘 웨이퍼 크기의 넓은 면적 전체를 균일하게 증착시키는 것이 현재의 기술로는 불가능하다. 금속막을 증착하는 하부 CoB 재료의 표면 거칠기가 균일하지 않으므로 증착된 금속막의 두께는 위치에 따라서 변화되며, 특정 위치에서는 작은 구멍(pinhole)이 형성되기도 한다. 이러한 작은 구멍이 있는 위치에서는 두 자성 박막이 접촉한 상태가

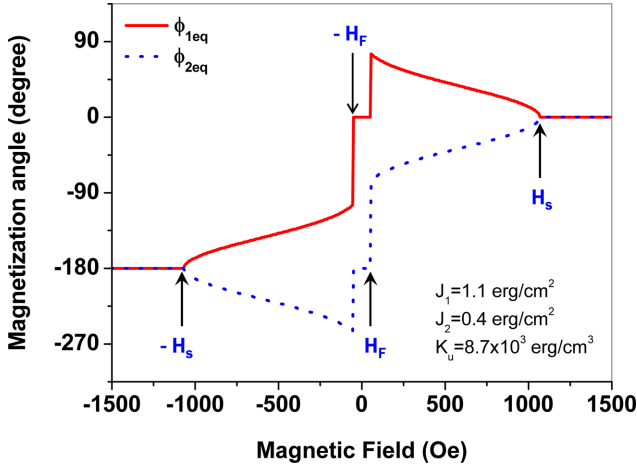


Fig. 2. (Color online) Magnetic field dependence of ϕ_{1eq} and ϕ_{2eq} in SAF sample, which are calculated by S-W model.

되어 두 자성 박막의 자화 각도를 동일한 방향으로 정렬하려는 강자성 결합특성을 보일 것으로 예상되며, 작은 구멍 주위의 반강자성 결합 특성을 감소시키는 역할을 하게 된다. 따라서 식(1)의 J_2 는 작은 구멍들에 의한 강자성 특성과 주위의 반강자성 특성이 나타나는 biquadratic 결합 특성으로 설명한다. Fig. 2에서 점선으로 표시한 J_2 에 의한 에너지 특성의 경우, 두 자성 박막 사이의 자화 각도가 $\phi_1 - \phi_2 = 90^\circ$ 또는 -90° 에서 에너지가 최소가 된다. 즉, 두 자성 박막의 자화 방향이 서로 직각 방향으로 정렬하려는 경향을 보이며, 이를 통해 J_1 특성을 감소시키는 역할을 하게 된다. 따라서 식(1)에서 기술한 J_1 은 반강자성 결합에너지(bilinear)이며, J_2 는 반강자성 결합특성을 방해하는 결합 에너지(biquadratic)이다[7].

J_1 과 J_2 의 결합에너지 특성을 갖는 SAF 재료에 자기장을 인가한 경우, 두 자성 박막의 자화방향은 에너지가 최소가 되는 평형 조건으로부터 구할 수 있다. 따라서 식(1)의 에너지 밀도가 최소가 되는 조건은 ϕ_1 및 ϕ_2 에 대한 E_T 의 일차 미분값이 영이 되어야 한다. 즉, $\partial E_T / \partial \phi_1 = 0$ 과 $\partial E_T / \partial \phi_2 = 0$ 을 모두 만족하는 조건으로부터 두 자성 박막의 평형 자화 각도 ϕ_{1eq} 및 ϕ_{2eq} 를 구할 수 있다.

Fig. 2는 두께 $t = 30$ nm, 포화자화량 $M_s = 1170$ emu/cm³ 및 일축이방성 상수 $K_u = 8.7 \times 10^3$ erg/cm³을 갖는 CoB 자성 박막의 특성 값들과 Fig. 1에 사용한 J_1 과 J_2 값을 식(1)에 적용하여 초기에 음의 방향으로 포화된 상태에서 자기장을 증가시킬 때 자기장의 세기에 따른 두 자성 박막의 평형 자화 각도 ϕ_{1eq} 및 ϕ_{2eq} 를 계산한 결과를 보인다. Fig. 2에서 두 자성 박막의 자구가 강한 외부 자기장에 의하여 음의 자기장의 방향으로 정렬된 상태(음의 방향으로 포화된 상태)에서 자기장의 세기를 증가시키면 음의 포화 자기장 $-H_s$ 에서 두 자성 박막의 자화 방향이 서로 다른 방향으로 분리되기 시작

한다. 외부 자기장을 더욱 증가시키면 $-H_F$ 에서 두 자구의 평형 자화 방향이 갑자기 변화되어 $\phi_{1eq} - \phi_{2eq} = 180^\circ$ 이 되는 조건을 이룬다. Fig. 2에서 자기장을 증가시키면 $\phi_{2eq} = -180^\circ$ 그리고 $\phi_{1eq} = 0^\circ$ 로 갑자기 두 개의 자화 방향이 폴짝 뛰어 반강자성 특성을 유지한다. 이렇듯 두 개의 자구가 갑자기 폴짝 뛰어 안정한 새로운 상태를 형성하는 자기장을 플롭자기장(flopping field) H_F 로 나타낸다. 식(1)로부터 자성 박막에 대하여 $\phi_{1eq} - \phi_{2eq} = 180^\circ$ 를 만족하는 조건으로부터 H_F 를 구하면 다음과 같이 표현된다[4].

$$H_F = \frac{2}{M_s t} \sqrt{K_u t (J_1 - 2J_2 - K_u t)} \quad (2)$$

식(2)으로부터 H_F 는 반강자성 결합에너지 J_1 에 따라 증가하고, 핀홀이나 표면거칠기에 의한 J_2 에 따라 감소하는 특성을 보인다.

두 자성 박막의 평형 자화 각도 ϕ_{1eq} 및 ϕ_{2eq} 를 이용하여 SAF 재료의 두 자성 박막 각각의 자기장의 세기에 따른 자화 거동 특성을 계산할 수 있다. CoB/Ru/CoB의 경우 상부 자성 박막의 자화량 M_1 과 하부 자화 박막의 자화량 M_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$M_1 = M_s \cos \phi_{1eq} \quad (3)$$

$$M_2 = M_s \cos \phi_{2eq} \quad (4)$$

식(2)와 식(3)으로부터 SAF 재료의 총자화량은 두 자성 박막 각각의 자화량의 합으로 표현된다.

$$M_{tot} = M_1 + M_2 = M_s (\cos \phi_{1eq} + \cos \phi_{2eq}) \quad (5)$$

Fig. 3는 CoB/Ru/CoB의 자화용이축($\theta_H = 0^\circ$)에서 VSM으

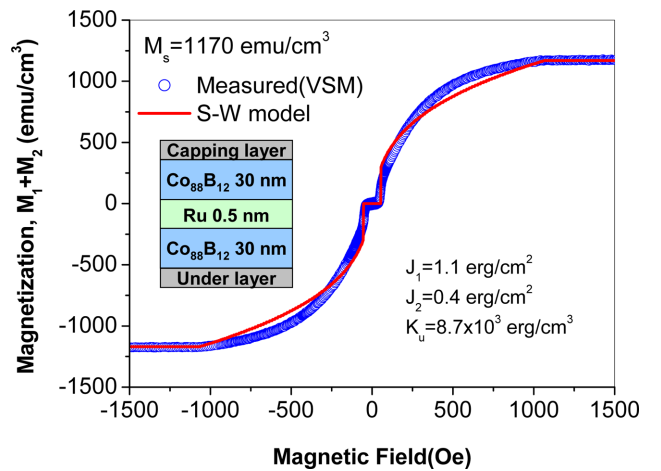


Fig. 3. (Color online) Magnetization curve measured by VSM at easy axis in CoB/Ru/CoB thin film. The solid line is calculated by S-W model.

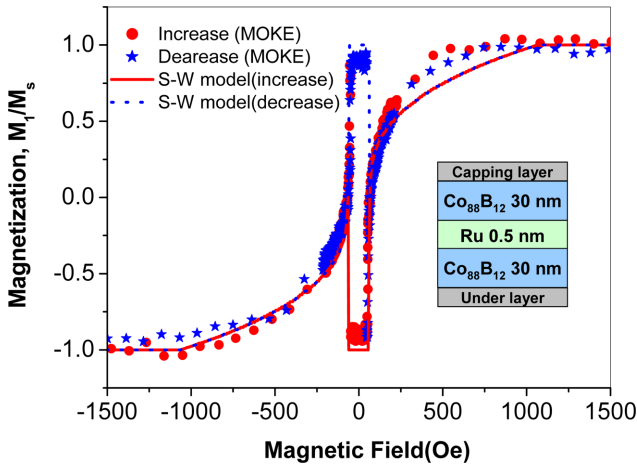


Fig. 4. (Color online) Magnetization curve measured by MOKE at easy axis in CoB/Ru/CoB thin film. The solid lines are calculated by S-W model.

로 측정된 총자화량(M_{tot})의 자화 곡선을 보인다. 자화용이축에서 측정된 자화 곡선은 플롭자기장(H_F : flopping field)까지 총자화량이 $M_{tot}=0$ 으로 일정하게 유지된다. 이는 반강자성 결합에 의하여 두 자성 박막의 자구가 서로 반대방향으로 정렬하여($\phi_{1eq}=0^\circ$, $\phi_{2eq}=180^\circ$) 서로의 자화량을 상쇄하기 때문이다. 따라서, CoB/Ru/CoB의 자화 용이축 방향으로 자기장을 인가하는 경우 반강자성 결합에 의한 총자화량 상쇄는 식(2)에서 보인 플롭자기장인 $H_F=50$ Oe까지 일정하게 유지된 것이다. Fig. 3에서 실선은 식(1)의 S-W 모델로 구한 ϕ_{1eq} 및 ϕ_{2eq} 를 식(5)에 대입하여 계산한 총자화량의 자화 곡선이며, 실험결과와 거의 일치한다. 이때 CoB/Ru/CoB 재료의 자화 곡선을 계산하기 위하여 $t=30$ nm, $M_s=1179$ emu/cm³, $K_u=8.7 \times 10^3$ erg/cm³, $J_1=1.1$ erg/cm² 그리고 $J_2=0.4$ erg/cm²의 변수 값들을 사용하였다. 총자화량의 자화 거동은 자기장의 반전에 따라서 가역적인 변화 특성을 보인다.

Fig. 4는 CoB/Ru/CoB의 자화용이축($\theta_H=0^\circ$)에서 MOKE로 측정된 상부 자성 박막의 자화량(M_1)의 자화 곡선을 보인다. 자화용이축에서 자기장이 증가할 때 및 감소할 때 측정된 자화 곡선은 플롭자기장(H_F)까지 상부 박막의 자화량이 히스테리시스 없이 변화하지만 $-H_F < H < H_F$ 에서는 히스테리시스가 있는 자화 반전이 있음을 확인하였다. 이는 반강자성 결합에 의하여 상부 자성 박막의 자구가 음의 포화상태에서 자기장의 세기가 증가할 때는 $\phi_{1eq}=0^\circ$ 로 정렬되고, 양의 포화상태로부터 자기장의 세기가 감소 할 때는 $\phi_{1eq}=180^\circ$ 정렬되는 것을 확인하였다. Fig. 4에서 실선은 식(1)의 S-W 모델로 구한 ϕ_{1eq} 를 식(3)에 대입하여 계산한 상부 자성 박막의 자화량인 M_1 의 자화 곡선이며, 실험결과와 거의 일치한다. 상부 단일 박막의 자화 거동은 초기의 포화 자화 상태에서 자기장 세기의 증가 또는 감소에 따라서 비가역적인 자화 반전 특성

을 보임을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 반강자성 결합 특성을 갖는 CoB/Ru/CoB 재료를 제작하였으며, 두 자성 박막의 자화 거동 특성을 분석하기 위하여 VSM 및 MOKE를 사용하였다. 두 자성 박막의 총자화량($M_{tot}=M_1+M_2$)과 상부 단일 박막의 자화량(M_1)을 Stoner-Wohlfarth 모델을 이용하여 계산하였다. 두 자성 박막 각각의 자화 각도는 자기장에 따라서 변화되며, 두 자구를 포화 시키는 포화자기장에서 자화 각도가 서로 분리되기 시작하며, 플롭자기장에서 두 자구의 자화 방향을 서로 반대 방향으로 정렬한다. 자기장의 세기에 따른 두 자구의 자화 방향은 비가역적인 변화 특성을 보인다. 그러나 VSM으로 측정된 총자화량은 자기장의 반전에 따라 가역 특성을 보였으며, 이는 두 자구의 자화 방향이 서로 대칭형으로 변화되는 현상에 기인한다. 한편 MOKE로 측정된 상부 단일 박막의 자화량은 $-H_F < H < H_F$ 에서 비가역 자화 반전 특성을 보였으며, 이러한 특성은 계산 결과와 일치하였다. 따라서 반강자성 결합 특성을 갖는 CoB/Ru/CoB 재료의 자화 거동 특성은 두 자성 박막 각각에 작용하는 J_1 및 J_2 결합 특성에 기인함을 Stoner-Wohlfarth 모델 계산을 통하여 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2013-024914).

참고문헌

- [1] S. S. P. Parkin, Phys. Rev. Lett. **67**, 3598 (1991).
- [2] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Kor. Mag. Soc. **21**, 83 (2011).
- [3] M. Desai, A. Misra, and W. D. Doyle, IEEE Trans. Magn. **41**, 3151 (2005).
- [4] A. Hashimoto, S. Saito, D. Y. Kim, H. Takahashi, T. Ueno, and M. Takahashi, IEEE Trans. Magn. **42**, 2342 (2006).
- [5] S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. Ashizawa, Y. M. Lee, K. Miura, H. Hasegawa, M. Tsunoda, F. Matsukura, and H. Ohno, Appl. Phys. Lett. **93**, 082508 (2008).
- [6] B. Heinrich, J. F. Cochran, M. Kowalewski, J. Kirschner, Z. Celinski, A. S. Arrott, and K. Myrtle, Phys. Rev. B **44**, 9348 (1991).
- [7] J. F. Bobo, H. Kikuchi, O. Redon, E. Snoeck, M. Piecuch, and R. L. White, Phys. Rev. B **60**, 4131 (1999).
- [8] A. Layadi, J. Appl. Phys. **83**, 3735 (1997).
- [9] A. Hashimoto, S. Saito, and M. Takahashi, J. Magn. Magn.

Mater. **287**, 2878 (2005).

599 (1948).

[10] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, Phil. Trans. Roy. Soc. **A240**,

Magnetization Behavior of CoB/Ru/CoB Thin Film

Dong Young Kim and Seok Soo Yoon*

Department of Physics, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received 7 October 2013, Received in final form 14 October 2013, Accepted 14 October 2013)

We have analyzed the magnetization curves measured by using VSM and MOKE in synthetic antiferromagnetic coupled CoB/Ru/CoB thin film. The measured results were compared with calculated ones by Stoner-Wohlfarth model based on the magnetization behavior of two ferromagnetic layers (M_1 , M_2). The calculated total magnetization ($M_{tot} = M_1 + M_2$) and single layer magnetization (M_1) behaviors were compared with measured results by using VSM and MOKE, respectively. The total magnetization curve ($M_{tot} = M_1 + M_2$) showed reversible magnetization behavior with flopping field of about 50 Oe. While single layer magnetization (M_1) behaviors showed irreversible magnetization behavior in the field range of $H_f < H < H_f$. These magnetization behaviors were explained by the angle difference between magnetization directions of two ferromagnetic layers in SAF sample.

Keywords : antiferromagnetic coupling, magnetization, flopping field, Stoner-Wohlfarth model