

교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막의 마이크로파 투자율 특성

김동영* · 김종오 · 김철기

충남대학교 고기능성자성재료연구센터, 대전시 유성구 궁동 220, 305-764

M. Tsunoda · M. Takahashi

동북대학교 전자공학과, 미야기현 센다이시, 980-8579, 일본

(2006년 10월 10일 받음, 2006년 10월 24일 최종수정본 받음)

교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막 시료에서 100 MHz~9 GHz의 주파수 범위에서 마이크로파 투자율을 측정하였으며, 이들 결과는 Landau-Lifshitz-Gilbert 이론을 사용하여 분석 하였다. 초기투자율 및 강자성 공명주파수는 CoFe의 두께 및 일방이방성 에너지(unidirectional anisotropy)에 따라서 조절이 가능하며, 특히 공명주파수는 최대 20 GHz까지 조절이 가능하다. 따라서 마이크로파 대역에서 고투자율 및 저손실 특성을 갖는 CoFe/MnIr 재료는 수 GHz 대역에서 작동하는 마이크로파 부품에 적용 가능하다.

주제어 : 교환결합세기, 강자성공명, 투자율, 일방이방성 에너지

I. 서 론

최근 정보통신 기기는 급속히 발달하고 있다. 특히 휴대전화, 위성 DMB, 부루투스, 무선랜 등등 마이크로파를 이용한 모바일용 정보통신 기기의 보급은 현저하게 늘어나고 있다. 이들 기기들은 정보처리 속도의 고속화 및 초소형화로 발전되어 가고 있다. 따라서 이들 기기에 사용되는 각종 부품들 또한 고속화 및 초소형화를 요구하고 있다. 현재 마이크로파 부품에는 주로 유전체 재료가 사용하고 있다. 그러나 마이크로파 부품의 초소형화를 위해 투자율이 크고, 마이크로파 주파수 특성이 우수한 자성재료의 사용이 고려되고 있다. 기존에 EMI 필터 또는 전자파 흡수체에 사용되고 있는 고주파수용 자성재료로는 페라이트가 주로 사용하고 있다. 그러나 페라이트 재료는 약 수 100 MHz 이하의 주파수 범위에서만 사용이 가능하고, 수 GHz 대역에서는 사용이 불가능하다. 따라서 마이크로파 부품에 자성 재료를 적용하기 위해서는 고투자율을 가지며, 보다 우수한 마이크로파 투자율 특성을 갖는 재료의 개발이 요구된다. 고투자율을 갖기 위해서는 자성 재료의 자기이방성에너지가 낮고 포화 자화량이 커야 하며, CoFe계 합금이 주로 연구되고 있다[1]. 또한 마이크로파 자성재료의 고주파수 특성은 강자성 공명 주파수를 부품에서 사용하는 동작 주파수 보다 큰 주파수로 이동시켜야만 투자율 특성을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 에너지 손실을 최소화 할 수 있다. 이러한 강자성 공명주파수는 자기 이방성 에너지에 비례한다[2]. 그러나 연자성 재료들은 포화 자화량은

크나 자기 이방성 에너지가 작다. 따라서 강자성 공명주파수를 향상시키는 데는 한계가 있다. 자기 이방성에너지를 향상시키기 위한 방법으로는 모양에 따른 형상 자기이방성에너지를 이용하는 방법이 있다. 그러나 이 경우 이방성에너지는 자유로이 조절할 수 있으나, 마이크로 부품에 적용 시 동작 주파수에 합당한 자성특성을 갖는 마이크로파 부품을 디자인 하기에는 한계가 있다. 한편 교환 결합력을 갖는 강자성/반강자성 재료는 표면효과에 의한 일방이방성에너지(unidirectional anisotropy, J_k)를 생성하며[3], 이때 강자성층과 상호작용을 일으키는 일방이방성에너지는 강자성층의 두께에 따라서 조절이 가능하다는 이점이 있다. 최근에는 이러한 교환 결합력을 갖는 강자성/반강자성 재료를 마이크로파 부품에 적용을 하기 위하여 마이크로파 투자율 및 인덕터 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-10].

본 연구에서는 교환 결합력 특성이 우수한 CoFe/MnIr 재료의 CoFe 두께 및 일방이방성 에너지의 크기에 따른 마이크로파 투자율의 강자성공명 주파수 특성을 측정하였으며, 이들 결과는 Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG) 이론을 사용하여 분석 하였다.

II. 실험 방법

마이크로파 투자율 측정을 위한 강자성/반강자성 재료로 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}/\text{Mn}_{75}\text{Ir}_{25}$ 구조를 갖는 시료를 사용하였다. 시료들은 열산화막이 있는 Si기판 위에 seed층으로 Ta(5 nm)/Cu(20 nm)를 사용하였으며, capping층으로는 Ta(5 nm)로 하였다. 마이크로파 투자율 변화를 관측하기 위하여 다양한 시료들을 준

*Tel: (02) 795-7044, E-mail: dykim30@hanmail.net

비하였다. CoFe 두께 의존성을 관측하기 위하여 MnIr의 두께를 10 nm로 고정하고, CoFe의 두께를 40, 50, 60, 80, 100, 및 150 nm의 시료를 준비하였다. MnIr 두께에 따른 교환 결합특성을 관측하기 위하여 CoFe의 두께가 50 nm 및 100 nm로 고정한 시료에 대하여 MnIr의 두께를 0에서 20 nm까지 변화 시켰다. 또한 실제 마이크로파 부품에 강자성/반강자성 재료의 응용 시에는 부품에서 요구하는 magnetic flux density에 따라서 다층막의 구조가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 적층수가 10인 [Cu(10 nm)/CoFe(20 nm)/MnIr(4, 및 10 nm)]₁₀의 다층막을 제조하였다. 모든 시료는 DC 마그네트론 스퍼터 법을 사용하여 증착 하였으며, 1 kOe의 자기장을 인가하면서 Ta = 200~400 °C의 온도 하에서 1시간 동안 진공 열처리(10⁻⁶ torr)를 수행하였다. 제조된 시편의 교환결합 세기와 (exchange bias field; H_{ex}) 및 보자력(coercivity; H_c)는 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)를 사용하여 측정된 자화 곡선으로부터 결정하였다. 일방이방성에너지(unidirectional anisotropy; J_k)는 VSM으로 측정된 H_{ex} 와 측정된 자화값($M_s t_F$)으로부터 구하였다[11].

$$J_k = H_{ex} M_s t_F \quad (1)$$

여기서 t_F 는 강자성층의 두께이다. 마이크로파 투자율은 Microwave Permeameter(PMM-9G1)을 사용하여 100 MHz~9 GHz의 주파수범위에서 dc 자기장은 인가하지 않고 작은 ac 자기장 만 자화 공란축으로 인가한 상태에서 측정하였다. 따라서 측정된 투자율은 횡방향 투자율(transverse permeability)을 의미한다.

III. 실험 결과 및 고찰

강자성/반강자성 재료의 교환 결합력 특성은 교환결합세기(H_{ex}) 또는 교환결합에너지를 의미하는 일방이방성에너지를 통하여 분석된다. 따라서 본 연구에서는 마이크로파 측정을 위한 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합 특성인 일방이방성에너지를 먼저 분석하였다. Fig. 1(a)는 300 °C에서 열처리한 CoFe(50 nm)/MnIr(x nm) 시편에서 MnIr 두께에 따른 J_k 의 변화 특성을 보인다. 이때 J_k 의 값은 MnIr의 두께가 약 3 nm 이상에서 나타나기 시작하며, 약 7 nm에서 최대 0.62 erg/cm²의 값을 보인다. 식 (1)에서 보였듯이 CoFe 두께를 일정하게 유지한 경우 MnIr 두께에 따른 J_k 의 변화는 H_{ex} 의 변화를 의미한다. 본 연구에서는 H_{ex} 가 큰 값을 보이는 즉 MnIr 두께가 5 nm 이상의 시료에 대하여 마이크로파 투자율 특성을 분석하였다. 또한 Fig. 1(b)는 CoFe 두께에 따른 J_k 의 변화를 보이며, J_k 는 CoFe 두께에 무관하게 거의 일정한 값을 보인다. Fig. 1(b)에 삽입된 그림에서는 CoFe의 두께에 따른 H_{ex} 의 변화를

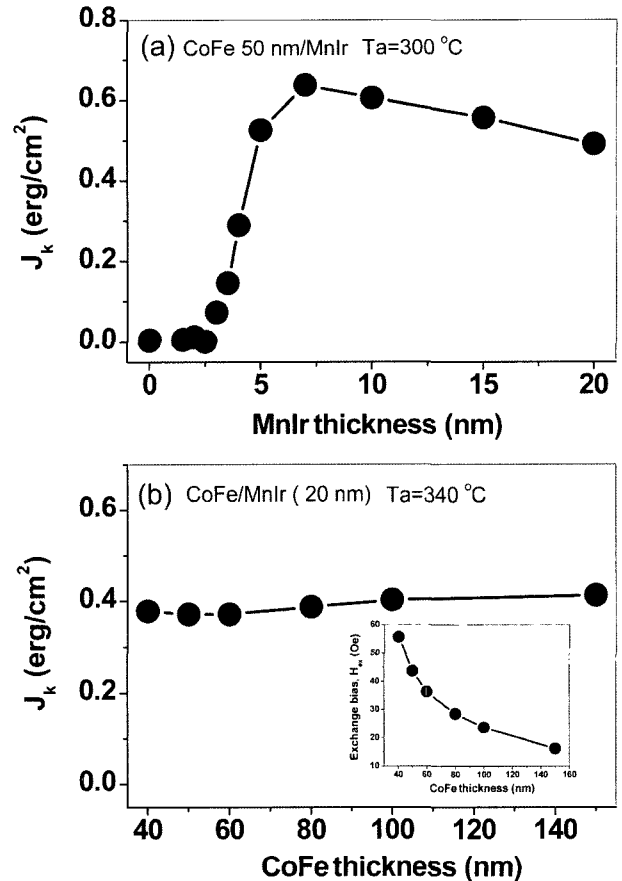


Fig. 1. (a) MnIr layer thickness dependence of unidirectional anisotropy J_k in CoFe(50 nm)/MnIr films annealed at 300 °C. (b) CoFe layer thickness dependence of J_k in CoFe/MnIr (20 nm) films annealed at 340 °C. The insert shows the corresponding exchange bias fields (H_{ex}). The solid lines are guides to the eye.

보인다. 이때 H_{ex} 는 CoFe의 두께에 따라서 감소한다. 즉 $H_{ex} = J_k/M_s t_F$ 로 H_{ex} 는 J_k 가 일정한 경우 강자성층의 두께에 반 비례하여 감소한다. 이렇듯 J_k 는 반강자성층의 두께에 의존할 뿐만 아니라 시료의 열처리 조건(온도 및 시간 등)에도 의존한다[12]. Fig. 1(a)와 (b)에서 MnIr이 20 nm인 시료를 비교하면, 그 차이를 알 수 있다. 즉 300 °C와 340 °C에서 열처리한 경우 J_k 값은 각각 약 0.5 및 0.4 erg/cm²을 보인다. 따라서 본 연구에서는 J_k 값 조절을 위하여 열처리 온도 특성을 달리 하였으며, 또한 H_{ex} 를 조절하기 위하여 CoFe 두께를 변화 시켰다. 이들 시료에 대하여 마이크로파 투자율을 측정하였다.

Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG)식에서 도출한 투자율 수식으로부터 공명 주파수(f_r) 및 초기 투자율(μ_i')은 다음과 같이 표현된다[13].

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{H_{eff}(H_{eff} + 4\pi M_s)} \quad (2)$$

$$\mu_i' = 1 + 4\pi M_s / H_{eff} \quad (3)$$

위 식에서 γ 는 자기 스핀의 자이로 계수(gyro magnetic factor)이다. 그리고 H_{eff} 는 효과자기장을(effective field) 의미하며, 외부 인가 자기장 및 시료에 작용하는 모든 종류의 이방성 자기장을 포함한다. 식 (2)와 (3)에서 보인 것과 같이 공명 주파수는 H_{eff} 에 따라 증가하지만 초기투자율은 H_{eff} 에 따라 감소하는 Snoek's 법칙을 따른다[2]. 한편 초기 투자율은 포화 자화량에 비례하며, 고투자율을 갖기 위해서는 포화 자화량이 커야 함을 알 수 있다. 따라서 고투자율을 갖는 자성 재료를 마이크로파 부품에 적용하기 위해서는 H_{eff} 를 증가시켜, 공명주파수를 부품의 작동주파수 이상으로 조절하는 것이 절대적으로 필요하다. 따라서 본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료의 마이크로파 투자율에서 특히 공명 주파수 특성에 초점을 두었다.

한편 교환결합력을 갖는 강자성/반강자성 재료의 H_{eff} 는 강자성층의 이방성자기장(H_k) 및 교환결합세기(H_{ex})를 포함하고 있다. 실제로 교환 결합력을 갖는 재료는 H_c 가 증가하는 경향을 보이며, 이는 또 다른 이방성에너지가 존재하고 있음을 의미한다. 그러나 강자성/반강자성 재료의 H_c 향상은 반강자성 재료에 따라 다른 값을 보이고 있으며, 본 연구에서 사용한 CoFe/MnIr 시료의 경우 H_c 향상의 크기가 매우 작으므로 무시하였다. 따라서 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막의 경우 H_{eff} 는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$H_{eff} = H_k + H_{ex} = \frac{2K_F}{M_s} + \frac{H_k}{M_s t_F} \quad (4)$$

$H_{eff} \ll 4\pi M_s$ 조건이 만족하는 경우, 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 다음과 같이 이방성에너지에 따른 공명주파수의 특성에 관한 관계식을 도출 할 수 있다.

$$f_r = \frac{\gamma}{\sqrt{\pi}} \sqrt{2K_F + \frac{J_k}{t_F}} \quad (5)$$

즉 공명 주파수는 시료의 이방성 에너지에 전적으로 의존하며, 교환 결합력을 갖는 시료의 경우 일방이방성에너지 J_k 및 강자성층의 두께 t_F 를 달리함으로써 공명주파수를 손쉽게 조절할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 2는 200 °C에서 열처리한 CoFe(100 nm)/MnIr(10 nm) 시료의 복소 투자율에 대한 측정 결과를 보인다. 여기서 허수부 투자율의 첨두 주파수를 공명주파수 f_r 로 정의한다. Fig. 2에서 측정된 복소 투자율은 LLG수식[13]을 이용하여 계산한 복소 투자율과 비교 분석하였다. 복소 투자율 계산시 사용한 파라미터로는 $M_s = 1680 \text{ emu/cm}^3$, 자이로 계수 $\gamma = 1.92 \times 10^7 \text{ rad/sec-Oe}$ [14], CoFe의 일축이방성에너지 $K_F = 3.0 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$ [15] 및 $J_k = 0.4 \text{ erg/cm}^2$ 이었다. 이때 M_s 및 J_k 는 VSM으로 측정된 값을 사용하였으며, 최적의 허수부 계산을

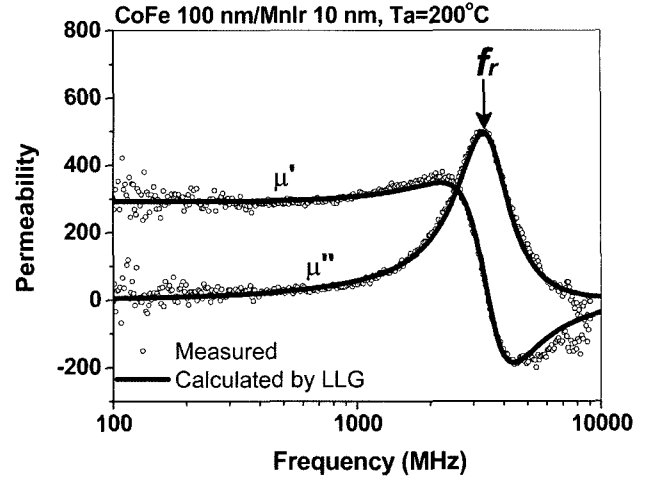


Fig. 2. Measured (circular) and calculated (solid lines) real μ' and imaginary μ'' permeability spectra for CoFe(100 nm)/MnIr(10 nm) films annealed at 200 °C. The ferromagnetic resonance is indicated at the peak frequency of μ'' .

위하여 감쇄계수 α 의 값을 0.035로 조절하였다. 측정된 복소 투자율과 계산된 값은 잘 일치한다. 이들 결과는 CoFe/MnIr 재료에 대한 마이크로파 투자율은 LLG수식을 따르며, 따라서 교환결합세기에 의한 공명 주파수 특성은 식 (2)를 사용하여 분석하는 것이 합당함을 의미한다.

CoFe(x nm)/MnIr(20 nm)재료의 CoFe 두께에 따른 마이크로파 투자율 및 공명 주파수 특성을 분석하기 위하여, CoFe 두께가 40, 60, 80, 100 및 150 nm를 갖는 시편을 제조하였으며, 이들 시편은 340 °C에서 진공 열처리하였다. Fig. 3은 이들 시료의 복소투자율 측정 결과를 나타낸다. 이때 CoFe 두께에 따라서 초기투자율은 증가하는 경향을 보이며, 공명주파수는 낮은 주파수 쪽으로 이동하고 있음을 보인다. 이러한 결과는 식 (2)와 (3)으로 설명된다. 즉 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료에서 J_k 가 일정한 경우 H_{eff} 는 CoFe의 두께가 증가할수록 감소하며, 이러한 감소는 투자율의 증가 및 공명주파수의 이동을 야기 시킨다. CoFe의 두께를 조절함으로써 투자율 및 공명주파수를 조절할 수 있음을 보여준다. 특히 CoFe가 40 nm인 경우 공명주파수는 4.7 GHz에 위치하며, 초기 투자율은 약 110의 값을 가지며, 허수부 투자율은 약 3 GHz까지 거의 0값을 유지한다. 즉 CoFe 40 nm/MnIr 20 nm인 시편을 마이크로파 부품에 적용시 약 3 GHz에서 작동하는 부품에 적용할 수 있음을 의미한다. 또한 투자율 값은 일반적으로 마이크로파 부품에서 사용되고 있는 유전율 값(약 50 이하)보다 월등히 크므로 부품의 소형화에도 기여 할 수 있음을 보인다. 한편 CoFe가 150 nm인 경우에는 투자율이 낮아지고 및 공명주파수 범위가 넓어지는 경향을 보이고 있으며, 이는 CoFe 두께를 두껍게 증착 할 경우 시료 내부의

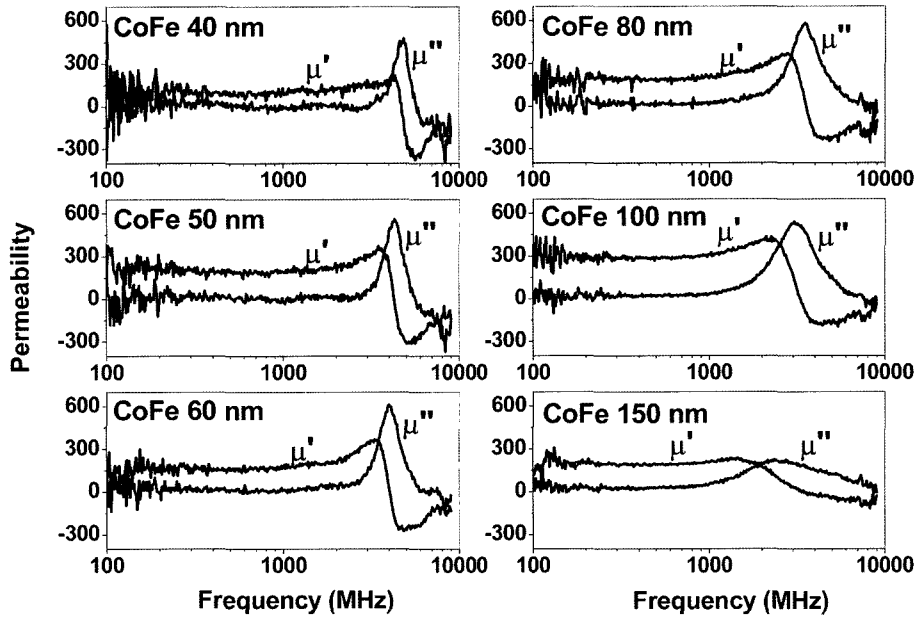


Fig. 3. Measured real μ' and imaginary μ'' permeability spectra for CoFe(x nm)/MnIr(10 nm) bilayers with x = 40, 50, 60, 80, 100 and 150 nm annealed at 340 °C.

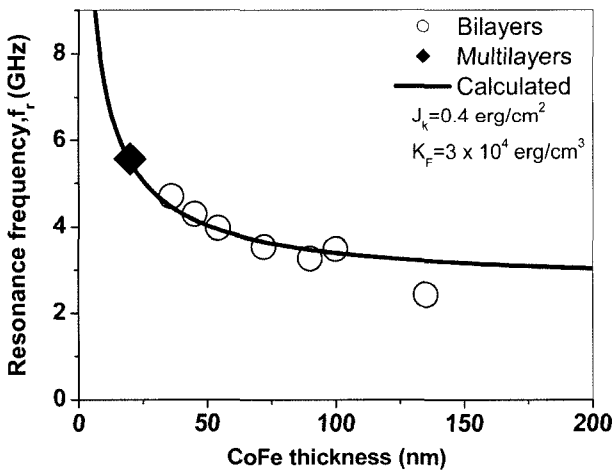


Fig. 4. CoFe thickness dependence of resonance frequency f_r for CoFe(x nm)/MnIr(20 nm) bilayers with x = 40, 50, 60, 80, 100 and 150 nm and for [CoFe 20 nm/MnIr 10 nm]₁₀ multilayers. The solid line is calculated using Eq. (5).

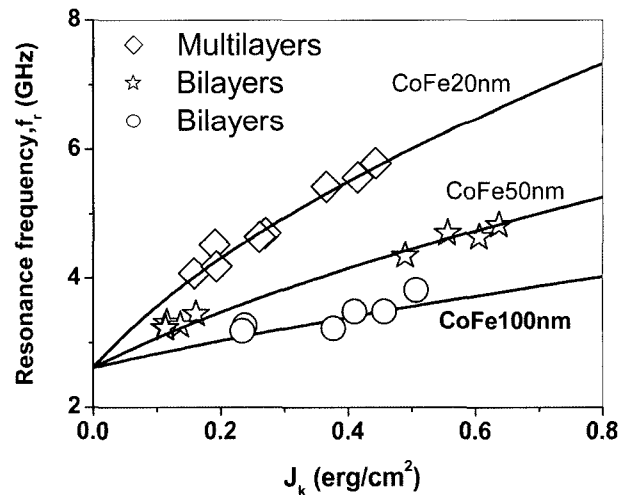


Fig. 5. J_k dependence of resonance frequency f_r for CoFe/MnIr bilayers with CoFe thickness of 50 and 100 nm, and multilayers with CoFe thickness of 20 nm, respectively. The solid lines are calculated using Eq. (5).

이방성 특성들이 열화 되고 있음을 의미한다.

Fig. 4는 이중층 및 다층막 구조를 갖는 CoFe/MnIr 시료에 대하여 CoFe의 두께에 따른 공명 주파수의 특성 변화를 보이며, 이때 공명 주파수는 Fig. 3에서 보인 것과 같이 CoFe의 두께에 따라서 감소하는 경향을 보인다. 이들 결과는 식 (5)를 이용하여 계산한 결과와 부합하며, CoFe의 두께를 조절함으로써 공명주파수를 손쉽게 조절할 수 있음을 보인다. 즉 CoFe의 두께가 20 nm인 경우 공명주파수를 약 5.6 GHz 까지 이동시킬 수 있음을 알 수 있다. 식 (5)에서 본 바와

같이 공명주파수는 J_k 의 크기에 따라서도 조절이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 열처리 온도를 200 °C에서 400 °C까지 변화시킴으로써 J_k 의 값을 조절하였으며, 이들 재료에 대하여 공명주파수를 측정하였다. Fig. 5는 J_k 의 변화에 따른 공명주파수의 변화 특성을 보인다. 이때 공명 주파수는 J_k 값에 비례하여 증가하며, 이들 공명주파수는 식 (5)를 이용하여 계산한 결과와 일치한다. 즉 공명 주파수는 J_k 따라서 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. CoFe 두께가 얇은 경우 공명주파

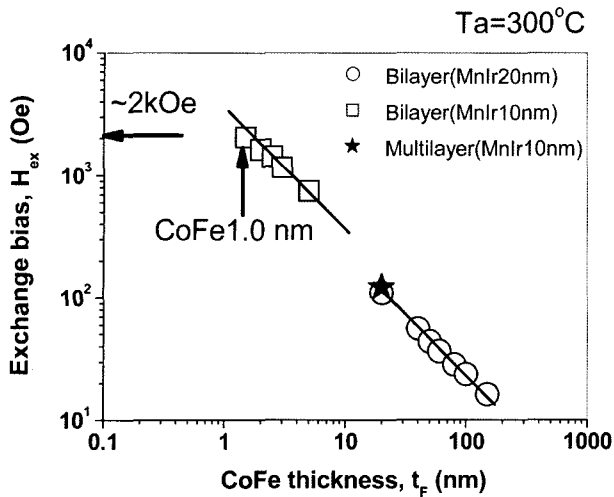


Fig. 6. CoFe thickness dependence of exchange bias field H_{ex} for CoFe/MnIr bilayers and multilayers. The maximum H_{ex} field of about 2 kOe was observed at CoFe thickness of 1.5 nm. The solid lines are guides to the eye.

수가 증가하는 경향은 Fig. 4에서 보인 것과 같이 CoFe 두께에 따른 공명주파수의 증가 특성을 반영하고 있다. 또한 이 층층 뿐만 아니라 다층막 구조에 대한 공명주파수 변화 역시 식 (5)에 의하여 설명되며, 이는 다층막 구조 또한 마이크로파 부품에 이용 가능성함을 의미한다.

결국 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료의 공명주파수는 CoFe의 두께 및 일방 이방성에너지에 따라서 조절될 수 있음을 본 연구를 통하여 확인하였다. 이들 재료의 마이크로파 투자율 특성은 마이크로파 부품에 적용 가능성 하며, 이때 적용 가능한 최대 주파수 범위를 알아보기 위하여, CoFe 두께에 따른 교환결합세기를 측정하였다. Fig. 6은 CoFe/MnIr 재료에 대한 CoFe의 두께에 따른 교환결합세기의 특성을 보인다. 이때 본 시료에 대하여 최대 교환 결합세기는 CoFe의 두께가 1.5 nm인 경우 약 2 kOe의 값을 나타낸다. 이러한 교환 결합력의 세기는 식 (2)로부터 근사적으로 $H_{eff} - H_{ex}$ 로 가정한 경우, 공명 주파수를 약 20 GHz까지 조절 가능하다. 이러한 공명 주파수 특성 변화는 교환 결합력을 갖는 재료를 수 GHz 대역에서 작동하는 마이크로파 부품에 응용 가능성을 의미한다.

IV. 결 론

교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료의 교환 결합력의 크기에 따른 초고주파수 투자율에 대한 특성에 관한 연구를 수

행하였으며, 이들 결과는 Landau-Lifshitz-Gilbert(LLG) 이론을 사용하여 분석 하였다. 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료의 공명주파수는 CoFe의 두께 및 교환자기 이방성에너지를 조절함으로써 20 GHz 이상까지 조율이 가능하다. 따라서 마이크로파 대역에서 고효율 및 저손실 특성을 갖는 CoFe/MnIr 재료는 마이크로파 부품에 적용시 부품의 소형화에 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 충남대 고기능성자성재료연구센터의 연구지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] I. Kim, J. Kim, K. H. Kim, and M. Yamaguchi, Phys. Stat. Sol. (a), **201**, 1777 (2004).
- [2] G. F. Dionne, IEEE Trans. Magn., **39**(5), 3121 (2003).
- [3] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev., **102**, 1413 (1956).
- [4] S. Queste, S. Dubourg, O. Acher, J. C. Soret, K. U. Barholz, and R. Mattheis, J. Magn. Magn. Mater., **288**, 60 (2005).
- [5] H. Xi, J. Rantschler, S. Mao, M. T. Kief, and R. M. White, J. Phys. D: Appl. Phys., **36**, 1464 (2003).
- [6] B. Viala, G. Visentin, and P. Gaud, IEEE Trans. Magn., **40**, 1996 (2004).
- [7] L. Varge, A. Tanaka, K. Nagasaka, and R. Kondo, J. Appl. Phys., **85**(8), 5852 (1999).
- [8] S. Queste, S. Dubourg, O. Acher, K. U. Barholz, and R. Mattheis, J. Appl. Phys., **95**(11), 6873 (2004).
- [9] O. Acher, S. Queste, K. U. Barholz, and R. Mattheis, J. Appl. Phys., **93**(10), 6668 (2003).
- [10] J. P. Michel, Y. Lamy, A. S. Royet, and B. Viala, IEEE Trans. Magn., **42**(10), 3368 (2006).
- [11] M. Tsunoda, Y. Tsuchiya, T. Hashimoto, and M. Takahashi, J. Appl. Phys., **87**, 7375 (2000).
- [12] M. Tsunoda, T. Sato, T. Hashimoto, and M. Takahashi, Appl. Phys. Lett., **84**(25), 5222 (2004).
- [13] E. van de Riet and Roozeboom, J. Appl. Phys., **81**(1), 350 (1997).
- [14] S. Chikazumi, Physics of Magnetism. New York: Wiley, 51 (1964).
- [15] D. Y. Kim, C. G. Kim, C. O. Kim, M. Tsunoda, and M. Takahashi, J. Magn. Magn. Mater., **304**, 56 (2006).

Exchange Coupling Effect on Microwave Permeability in CoFe/MnIr Bilayers

DongYoung Kim*, Chong-Oh Kim, and CheolGi Kim

ReCAMM, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

M. Tsunoda and M. Takahashi

Department of Electronic Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan

(Received 10 October 2006, in final form 24 October 2006)

We measured the microwave permeability in the frequency range of 100 MHz~9 GHz in the exchange biased CoFe/MnIr films. The results were analyzed based on the Landau-Lifshitz-Gilbert theory. The initial permeability and ferromagnetic resonance frequency was tuned by controlling the CoFe thickness and unidirectional anisotropy. The tunable range of ferromagnetic resonance frequency was up to 20 GHz in the thin CoFe layer of 1.5 nm. The CoFe/MnIr films showed the high permeability and low loss properties in the microwave frequency range. Thus, this material could be applied to the microwave devices.

Key words : exchange bias, ferromagnetic resonance, permeability, and unidirectional anisotropy