

CoFeHfO 박막 재료의 두께에 따른 마이크로파 투자율 특성

이영석 · 김철기 *

충남대학교 신소재공학부, 대전시 유성구 궁동 220, 305-764

김동영 **

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2010년 10월 22일 받음, 2010년 11월 11일 최종수정본 받음, 2010년 11월 16일 게재확정)

본 연구에서는 비정질 CoFeHfO 박막 재료의 두께 변화에 따른 고주파 손실 특성을 분석하기 위하여 57~1368 nm 두께의 CoFeHfO 박막 재료에 대해 마이크로파 투자율 특성을 분석하였다. 두께가 405 nm 이하에서 허수부 투자율은 2.95 GHz에서 하나의 공진주파수를 보이지만, 405 nm 이상에서는 2.97 GHz와 547 MHz에서 두 개의 공진주파수를 보인다. 저자장하에서 측정된 토오크 곡선 결과로부터 547 MHz에서 발생하는 공진주파수는 CoFeHfO 재료의 자화 용이축들의 각도 분포에 기인하는 것으로 자기장의 세기에 따라서 급격하게 감소하는 특성을 보인다. 따라서 두께가 400 nm 이상의 CoFeHfO 박막 재료를 2 GHz 대역에서 작동하는 초소형 마이크로파 부품에 적용하기 위해서는 자화 용이축의 분포각도를 최소화시켜야 한다.

주제어 : 마이크로파 투자율, 공진주파수, 포화자화량, 이방성자기장

I. 서 론

마이크로파 대역의 주파수를 사용하는 차세대 이동통신 기기는 소형화, 고성능화, 저전력화 등을 요구하고 있다. 이러한 기기에 사용되는 마이크로파 부품들 중에서 자기적인 성질을 이용하는 인덕터 또는 전력 변환기들의 성능을 향상시키기 위하여 자성재료를 이용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 차세대 마이크로파 부품에 사용될 자성재료는 고성능화를 위하여 실수부 투자율이 커야 하고, 저손실 특성을 확보하기 위하여 마이크로파 대역의 허수부 투자율은 작아야 한다. 이러한 조건을 모두 만족하기 위해서는 포화자화량이 큰 강자성 재료를 선택하여야 하며, 허수부 투자율이 최고점을 보이는 강자성 공명주파수가 마이크로파 부품의 운용주파수 보다 훨씬 높아야 부품의 손실특성을 최소화시킬 수 있다. 따라서 마이크로파 투자율 특성이 우수한 강자성 재료의 개발 및 투자율 특성 분석은 차세대 마이크로파 부품의 소형화 및 성능향상을 위하여 매우 중요하다[1-4].

한편 포화자화량이 큰 강자성 재료는 대부분 Fe, Ni 및 Co를 포함하는 합금 재료로 금속 특성을 보인다. 그 경우 와전류에 의한 손실 특성이 추가적으로 증가하게 된다. 이러한 와전류에 의한 손실을 감소시키기 위해서는 강자성 재료의 비저항이 커야 한다. 최근에 개발된 비정질 CoFeHfO 재료는

포화자화량이 큰 금속성 CoFeHf 재료에 산소를 결합시켜 비저항을 2000 $\mu\Omega\text{cm}$ 이상으로 증가시켰다[5-7]. 이러한 CoFeHfO 재료는 금속성 강자성 재료에 비하여 비저항이 약 100배 이상 크므로 와전류에 의한 손실을 금속에 비하여 10 배 이상 감소시킬 수 있다. 또한 전자기 유도법칙을 따르는 인덕터의 유도계수($L \propto \mu A$)는 강자성 재료의 투자율뿐만 아니라 단면적(두께 \times 너비)에 비례한다. 이러한 소형의 마이크로파 부품에서는 너비는 좁고 두께가 두꺼운 강자성재료를 사용하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 포화자화량이 크고, 고저항 특성을 갖는 비정질 CoFeHfO 박막 재료의 두께에 따른 마이크로파 투자율 특성을 분석하였다.

II. 실험방법

CoFeHfO 박막은 2.0×10^{-7} Torr 이하의 진공도를 갖는 스퍼터링 장치를 사용하여 Ar + O₂ 분위기를 조성하여 Si(100) 기판 위에 반응성 rf-스퍼터법으로 상온에서 증착하였다. 두께에 따른 마이크로파 투자율 특성을 분석하기 위하여 박막의 두께는 57~1368 nm로 조절하였으며, 박막 증착시 수평면에서의 일축이방성을 유지하기 위하여 100 Oe의 자기장을 인가하였다. CoFeHfO 박막의 성분은 포화자화량이 매우 큰 Co₃₀Fe₇₀ 타겟 위에 Hf침의 개수와 산소 분압을 조절하여 변화시켰다. 활성도가 강한 Hf는 산소와의 결합력을 강화시키며, CoFe 나노 결정립들 사이에 분포함으로써 CoFeHfO 재료가 비정질 특성을 갖게 만들며, 특히 주입한 산소는 재료

*Tel: (042) 821-6632, E-mail: cgkim@cnu.ac.kr

**Tel: (054) 820-5445, E-mail: dykim@andong.ac.kr

의 비저항을 증가 시키는 역할을 한다. 이때 포화자화량이 최대이고 보자력이 최소가 되는 비정질 CoFeHfO 박막 재료의 성분비는 $\text{Co}_{19}\text{Fe}_{53}\text{Hf}_8\text{O}_2$ 이었다[6, 7]. CoFeHfO 박막 재료의 마이크로파 투자율은 단일코일을 사용한 마이크로파 투자율 측정기(PMM-9G1)을 사용하여 100 MHz~9 GHz의 주파수범위에서 자화 용이축으로 0, 40, 80 및 160 Oe의 자기장을 인가한 상태에서 측정하였다[8]. 측정된 마이크로파 투자율은 교류자기장을 자화곤란축으로 인가한 종방향 투자율이다. CoFeHfO 박막 재료의 자성특성은 자화곡선 및 토오크(Torque) 곡선을 측정하여 분석하였다. 자화곡선은 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 사용하여 측정하였다. CoFeHfO 박막재료의 자화용이축의 분포 특성 분석을 위하여 영점보정방법(null method)을 채택하여 민감도가 10^{-3} dyne/cm인 토오크 측정기를 사용하여 자기장의 방향에 따른 토오크 곡선을 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

마이크로파 대역에서 운용되는 인덕터 또는 전력 변환기 등 마이크로파 부품들은 제품의 소형화 및 성능 향상에 대한 요구사항에 부응코자 부품의 코어 소재로 사용되는 고투자율 강자성재료 개발 및 투자율 특성 분석에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다. 이때 마이크로파 대역에서 측정된 강자성 재료의 복소투자율(μ^*)은 실수부 투자율(μ')과 허수부 투자율(μ'')로 구분되며, 고투자율은 실수부 투자율을 의미한다. 허수부 투자율은 입력 신호와 출력신호간에 위상차를 발생시켜 신호 특성을 변경시키거나, 신호를 흡수하여 전력 손실을 증가시키는 즉, 성능을 저하시키는 역할을 한다. 따라서 마이크로파 부품의 운용대역인 GHz 대역에서 실수부 투자율은 크고, 허수부 투자율은 작아야 하며, 두꺼운 강자성 재료에서 이들 특성을 모두 충족하여야 한다. 그러나 칩두께에 의존하는 와전류 손실은 강자성재료의 두께 및 주파수에 따라 증가한다. 그러므로 GHz 대역의 마이크로파 부품에 적용하기 위한 두꺼운 강자성 재료는 와전류 손실을 최소화하기 위하여 고저항 특성을 보유하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 고투자율 특성과 고저항 특성을 갖는 비정질 CoFeHfO 박막 재료의 두께에 따른 마이크로파 투자율 특성을 분석하였다.

CoFeHfO 박막 재료는 일축 이방성자기장(H_k , anisotropy field)이 포화자화량($4\pi M_s$, saturation magnetization)에 비하여 매우 작고 ($H_k \ll 4\pi M_s$), 감쇠상수가 매우 작으며($\alpha \ll 1$)[5]. 마이크로파 대역에서 와전류 특성을 무시할 수 있다. 이러한 재료의 주파수에 따른 복소투자율(μ^*)은 다음과 같이 표현될 수 있다[9].

$$\mu^* = \frac{4\pi\gamma M_s}{\gamma H_k + i\alpha\omega} \left[\frac{\omega^2}{(\gamma H_k + i\alpha\omega)(\gamma H_k + 4\pi\gamma M_s + i\alpha\omega) - \omega^2} + 1 \right] \quad (1)$$

여기서 γ 는 자기 스핀의 자이로 계수이고, ω 는 각주파수 ($\omega = 2\pi f$) 이며, α 는 허수를 의미한다. 식(1)으로부터 실수부 투자율을 특성화하는 초기 투자율(μ') 및 허수부 투자율이 최대가 되는 강자성 공명주파수인 공진 주파수(f_r)은 다음과 같이 표현된다.

$$\mu'_i = 1 + \frac{4\pi M_s}{H_k} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{H_k(H_k + 4\pi M_s)} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)으로부터 초기 투자율은 포화자화량에 비례하고 H_k 에 따라서 감소하는 특성을 보이며, 공진주파수는 포화자화량과 H_k 에 비례하는 특성을 보인다. 따라서 GHz 대역에서 작동하는 마이크로파 부품에 적용되는 강자성재료는 고투자율 특성을 갖기 위하여 포화자화량이 커야 하며, 저손실 특성을 갖기 위하여 이방성 자기장이 커야 한다.

Fig. 1은 CoFeHfO 박막 재료의 두께에 따른 포화자화량과 이방성자기장의 변화 특성을 보인다. 포화 자화량은 두께에 따라서 증가하다가 $4\pi M_s = 1.9$ T로 근접한다. 그러나 이방성 자기장 H_k 는 두께에 따라서 감소하는 경향을 보인다. 이러한 자성 변화를 식(2)와 (3)에 적용하면 CoFeHfO 박막 재료의 초기투자율은 두께에 따라서 증가하고, 공진주파수는 감소하는 특성을 보일 것을 단순히 예측할 수 있다. 이러한 특성을 확인하기 위하여 100 MHz~9 GHz 주파수 범위에서 두께가

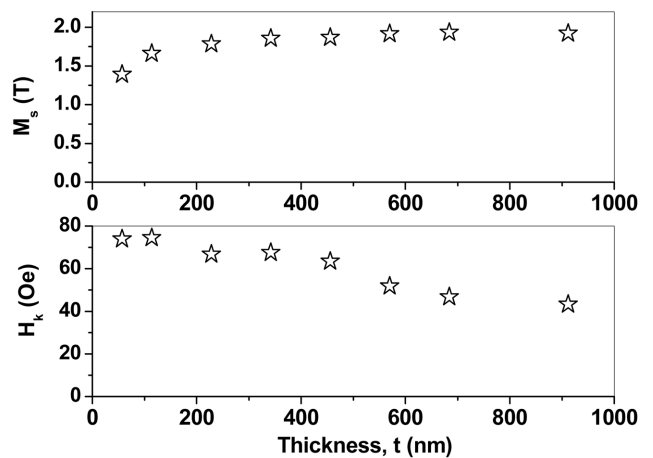


Fig. 1. Thickness dependence of (a) saturation magnetization ($4\pi M_s$) and (b) anisotropy field (H_k) in CoFeHfO thin films.

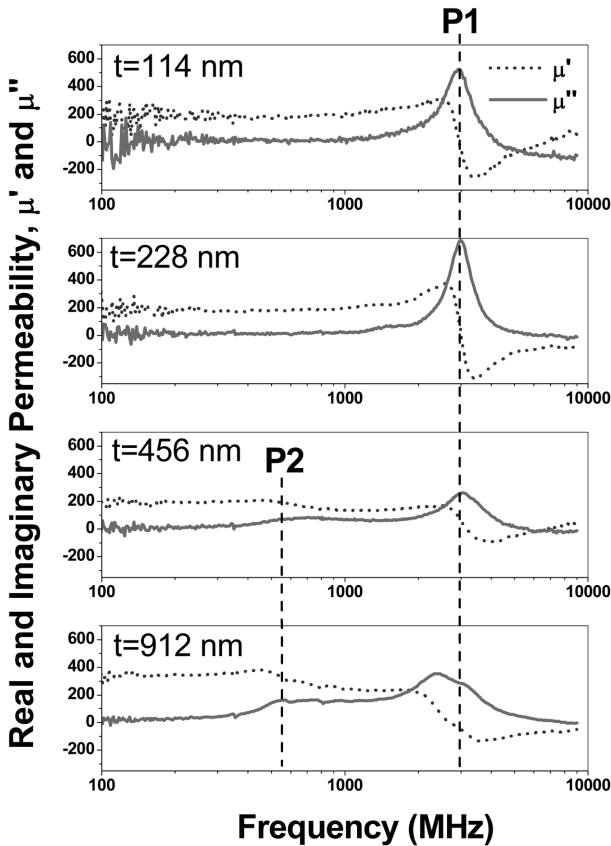


Fig. 2. Measured permeability spectra real μ' (solid lines) and imaginary μ'' (dot lines) in CoFeHfO films with increasing thickness of 114, 228, 456 and 912 nm.

다른 CoFeHfO 박막 재료들의 복소투자율 스펙트럼을 측정하였다.

Fig. 2는 두께가 114, 228, 456 및 912 nm인 CoFeHfO 박막 재료들을 사용하여 측정된 실수부 및 허수부 투자율 스펙트럼을 보인다. 두께가 114 및 228 nm인 재료들의 초기투자율 값은 약 180 정도이고, 공진주파수는 2.95 GHz에서 하나만(P1) 나타난다. 이는 강자성 재료에서 나타나는 전형적인 복소투자율 스펙트럼 특성으로 실수부 투자율은 공진주파수 근처인 2 GHz 대역까지 초기투자율 값인 180이 그대로 유지되며, 허수부 투자율 역시 2 GHz 대역까지 작은 값을 보이다가 단일 공진주파수 P1에서 최대값을 보인다. 이러한 재료는 약 2 GHz 대역 이하에서 운용되는 마이크로 부품에 사용이 가능한 재료이다. 한편 두께가 456 및 912 nm인 재료에서는 초기투자율 값은 두께에 따라서 증가하고, 공진주파수는 2.95 GHz와 547 MHz에서 두 개가(P1 및 P2) 뚜렷하게 나타나고 있음을 보인다. 즉, 저주파수 대역인 547 MHz에서 공진주파수(P2)가 추가적으로 나타나고 있음을 보인다. 두 개의 공진주파수의 영향으로 주파수에 따른 실수부 투자율은 각각의 공진주파수 근처에서 두 단계로 변화하고, 허수부 투자율은 P2

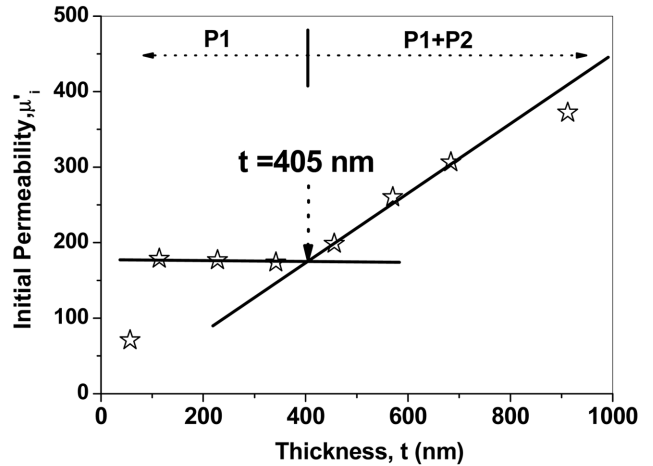


Fig. 3. Thickness dependence of initial permeability (μ') in CoFeHfO thin films.

근처인 500 MHz에서 증가한 후 거의 일정하게 유지되다가 P1에서 최대값을 보인다. 이러한 재료는 P2의 영향으로 실수부 투자율이 크고 허수부 투자율이 작은 400 MHz 대역 이하에서 운용되는 마이크로 부품에 사용이 가능한 재료이다.

먼저 마이크로 부품의 성능향상에 기여하는 실수부 투자율 특성을 분석하기 위하여 CoFeHfO 박막 재료의 두께에 따른 초기 투자율 특성을 투자율 스펙트럼 측정결과로부터 추출하였다(Fig. 3). 두께가 57 nm의 재료는 Fig. 1에서 보인 것과 같이 포화자화량이 작아 초기투자율 값이 작게 나타나고 있으며, 114~342 nm의 두께를 갖는 재료들은 하나의 공진주파수 P1을 보였으며, 초기 투자율은 약 180으로 거의 일정한 값을 보였다. 그러나 두께가 456 nm 이상의 재료에서는 두 개의 공진주파수 P1 및 P2를 보였으며, 초기투자율이 두께에 따라서 증가하였다. 이들 초기투자율의 측정 결과를 외삽하여 실선으로 나타내면 허수부 투자율이 하나의 공진주파수 P1에서 두 개의 공진 주파수 P1 + P2로 변화되는 두께는 Fig. 3에 표시한 것과 같이 405 nm이다. 이러한 실험 결과로부터 405 nm 이하의 두께를 갖는 CoFeHfO 박막 재료는 약 2 GHz 대역 이하에서 운용되는 마이크로 부품에 사용이 가능하며, 405 nm이상의 두께를 갖는 CoFeHfO 박막 재료는 약 400 MHz 대역 이하에서 운용되는 마이크로 부품에 사용이 가능하다는 제약조건이 따른다. 이러한 제약 조건에 영향을 미치는 P2의 원인을 규명하기 위하여 자기장의 세기에 따른 P2의 변화 특성 및 토오크 곡선을 분석하였다.

Fig. 2에서 보인 것과 같이 P2 신호는 두께에 따라 그 특성이 증가하는 경향을 보이므로 본 연구에서는 P1과 P2 특성이 뚜렷이 구분되는 1368 nm 두께의 시편을 준비하였다. Fig. 4는 두께가 1368 nm인 시편에 자화용이축 방향으로 $H=0, 40, 80$ 및 160 Oe의 외부자기장을 인가한 상태에서

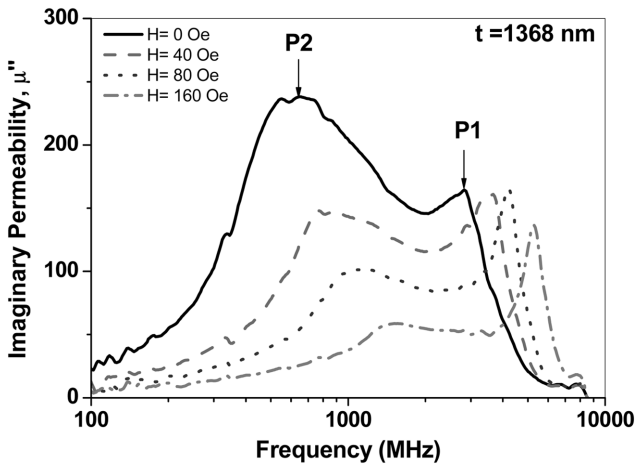


Fig. 4. Applied field dependence of permeability spectra μ'' (imaginary) in CoFeHfO film with thickness of 1368 nm.

측정한 허수부 투자율 스펙트럼을 보인다. P1 및 P2는 외부 인가 자기장의 세기에 따라 고주파수 쪽으로 이동하는 경향을 보인다. 식(3)에서 보인 공진 주파수는 일반적으로 이방성 자기장의 세기 보다 유효자기장의 세기(H_{eff})에 비례한다. 인가 자기장이 없는 경우는 식(3)과 같이 이방성 자기장의 세기에 비례하며($H_{eff} = H_k$), 외부에서 자화용이축으로 자기장을 인가한 경우 공진주파수는 이방성 자기장의 세기와 인가 자기장의 세기에 비례하는($H_{eff} = H_k + H$) 특성이 있다. 따라서 P1과 P2는 외부에서 자화용이축으로 자기장을 인가한 경우 고주파수 쪽으로 이동하게 된다. 이때 P1에서 허수부 투자율의 최대값은 외부 인가 자기장의 세기에 따라 거의 일정한 값을 보이고 있으나, P2에서의 허수부 투자율은 외부 인가 자기장의 세기에 따라서 급격히 감소하는 경향을 보인다. Fig. 1에서 보인 것과 같이 단일 공진주파수 P1을 보이는 342 nm 재료와 두 개의 공진주파수 P1 + P2를 보이는 913 nm 재료의 포화자화량은 거의 동일한 값을 갖는다. 그러므로 동일한 포화자화량을 갖는 자성 재료가 P1과 P2의 투자율 특성에 기여하고 있으며, 이는 P1과 P2가 이방성 자기장의 특성 변화에 기인함을 알 수 있다. 외부 자기장의 세기에 따른 투자율 변화는 식(2)와 (3)에서 보인 것과 같이 재료의 포화자화량이 같을 경우 이방성 자기장의 세기에 의존한다. 따라서 자기장의 세기에 따른 P2의 급격한 변화는 재료 내부의 이방성 자기장의 특성 변화와 관련이 있다. 결국 외부 인가 자기장의 세기에 의하여 감소한 P2의 이방성 자성 특성은 P1의 이방성 자성 특성에 반영되어 P1의 허수부 투자율이 외부 인가 자기장의 세기에 따라 감소하지 않고 거의 일정한 값을 보이고 있음을 의미한다.

이러한 P2 변화 특성을 검증하기 위하여 토오크 측정기를 사용하여 토오크 곡선을 측정하였다. 일반적으로 토오크 측정

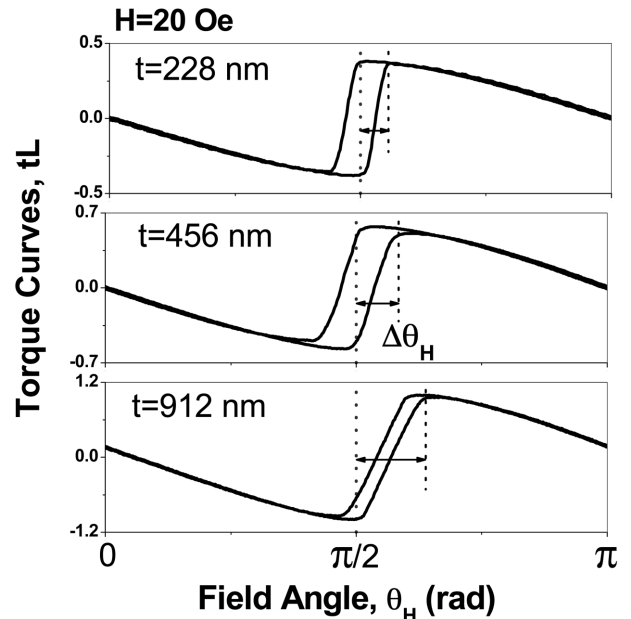


Fig. 5. Torque curves with varying field angle under magnetic field of 20 Oe in CoFeHfO films with thickness of 228, 456 and 912 nm.

기를 이용하여 이방성 상수를 측정하는 경우, 고자장하에서($H \gg H_k$) 토오크 곡선을 측정한 후 이들 곡선으로부터 이방성 상수를 구한다. 그러나 여러 종류의 일축 이방성 상수가 혼재된 재료에서는 고자장하에서 측정한 토오크 곡선으로부터 일축 이방성 상수들 각각의 특성을 구별하여 분석하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 저자장하에서($H \ll H_k$) 토오크 곡선을 측정하여 이방성 상수들의 특성을 분석하였다.

두께에 따른 이방성 상수 특성을 검증하기 위하여 두께가 228, 456 및 912 nm인 CoFeHfO 재료에 대하여 수평면에서 토오크 곡선을 측정하였다. Fig. 5에서 보인 것과 같이 H_k 보다 작은 저자장하에서($H = 20$ Oe) 측정한 토오크 곡선으로부터 CoFeHfO 재료는 일축 이방성 특성을 보임을 알 수 있다. 즉 CoFeHfO 재료는 나노결정립(nano-grain)들로 구성된 비정질 재료이지만 이들 나노결정립들은 미세한 형상이방성 상수를 갖고 있으며, 이들 특성이 비정질 재료의 일축 이방성 특성을 유도하는 원인으로 판단된다.

그러나 저자장하에서 측정된 토오크 곡선이 보이는 자화반전은 $\theta_H = \pi/2$ 근처에서 일어나기 시작하여 $\Delta\theta_H$ 의 각도까지 일정각도 범위 내에서 일어나고 있음을 보인다. 모든 자구가 자화용이축으로 정렬된 경우에 대하여 계산된 토오크 곡선은 자화반전이 특정각도에서 불연속적으로 일어난다[10]. 그러나 CoFeHfO 재료는 $\Delta\theta_H$ 의 범위 내에서 자화반전이 일어나며, 이는 자화용이축이 일정각도 내에 산재하여 분포하고 있는 경우에 해당한다. 890 nm 두께를 갖는 재료에 대하여 터널링 전 자현미경(TEM)으로 나노결정립들을 분석한 경우 두께에 따

른 나노결정립들의 크기 변화를 관측할 수 없었다[6]. 따라서 저자장에서 측정된 토오크 결과로부터 CoFeHfO 재료 내부에 형성된 나노결정립들의 자화용이축들은 일정각도 내에 산재하여 분포하고 있으며, CoFeHfO 재료의 두께에 따른 $\Delta\theta_H$ 의 증가는 재료의 두께가 증가함에 따라 자화용이축들의 분포각도가 증가함을 의미한다. 즉 두께에 따른 P2의 증가는 이러한 $\Delta\theta_H$ 의 증가에 기인하며, 외부 자기장의 세기에 따라 용이축으로부터 이탈한 자구들이 자화용이축 방향으로 정렬함으로써 P2가 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 결국, 시편 내부에 존재는 나노결정립들의 자화용이축의 분포각도를 최소화 함으로써 마이크로파 투자율의 손실을 결정짓는 허수부 투자율을 감소시킬 수 있다. 따라서 열처리[5] 또는 제조공정을 개선하여 P2를 최소화시킬 경우 두께가 400 nm 이상의 CoFeHfO 박막 재료를 2 GHz 대역에서 운용되는 마이크로 부품에 사용이 가능할 것으로 기대한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 비정질 CoFeHfO 재료의 두께에 따른 복소 투자율 특성을 분석하였다. CoFeHfO 재료의 두께가 405 nm 이하에서는 허수부 투자율은 2.95 GHz에서 하나의 공진주파수를 보이지만, 405 nm 이상의 두께에서는 2.95 GHz와 547 MHz에서 두 개의 공진주파수를 보인다. 547 MHz에서 보이는 공진주파수는 0.5 GHz 이하 대역의 허수부 투자율을 증가시켜 GHz 대역에서 작동하는 마이크로파 부품의 손실특성을 증가시키며, 따라서 부품의 성능을 저하시킨다. 이러한 547 MHz에서 발생하는 공진주파수의 영향을 분석하기 위하여 외부인가 자기장의 세기에 따른 허수부 투자율 및 토오크 곡선을 측정하였다. 이들 결과로부터 547 MHz에서 발생하는 공진주파수는 CoFeHfO 재료 내부에 형성된 나노결정립들의

자화용이축들이 일정각도 내에 산재하여 분포함에 기인하며, 분포 각도는 재료의 두께에 따라서 증가함을 알 수 있었다. 따라서 두께가 400 nm 이상의 CoFeHfO 박막 재료를 2 GHz 대역에서 작동하는 초소형 마이크로파 부품에 적용하기 위해서는 자화용이축의 분포각도를 최소화시켜야 한다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청 지정 국방MEMS특화연구센터의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] G. F. Dionne, IEEE Trans. Magn. **39**, 3121 (2003).
- [2] H. Xi, J. Rantschler, S. Mao, M. T. Kief, and R. M. White, J. Phys. D: Appl. Phys. **36**, 1464 (2003).
- [3] B. Viala, G. Visentin, and P. Gaud, IEEE Trans. Magn. **40**, 1996 (2004).
- [4] J. P. Michel, Y. Lamy, A. S. Royet, and B. Viala, IEEE Trans. Magn. **42**, 3368 (2006).
- [5] D. Y. Kim, S. S. Yoon, B. P. Rao, C. G. Kim, K. H. Kim, and M. Takahashi, IEEE Trans. Magn. **44**, 3115 (2008).
- [6] N. D. Ha, M. H. Phan, and C. O. Kim, Nanotechnology **18**, 155705 (2007).
- [7] N. D. Ha, C. G. Kim, C. O. Kim, and M. H. Phan, Solid State Commun. **141**, 502 (2007).
- [8] M. Yamaguchi, K. H. Kim, and S. Ikeda, J. Magn. Mater. **304**, 208, (2006).
- [9] E. van de Riet and F. Roozeboom, J. Appl. Phys. **81**, 350 (1997).
- [10] M. Tsunoda, Y. Tsuchiya, T. Hashimoto, and M. Takahashi, J. Appl. Phys. **87**, 4375 (2000).

Thickness Dependence of Microwave Permeability in CoFeHfO Thin Films

YoungSuk Lee and CheolGi Kim*

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Dong Young Kim**

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

(Received 22 October 2010, Received in final form 11 November 2010, Accepted 16 November 2010)

The microwave permeability was measured in order to analyze the thickness dependence of loss properties in CoFeHfO thin films with varying thickness of $t = 57 \sim 1368$ nm. A single resonance peak (P1) at 2.95 GHz was appeared in the samples with thickness less than 405 nm, while second resonance peak (P2) at 547 MHz was additionally appeared in the samples with thickness greater than 405 nm. The P2 was originated by the angle distribution of the easy axis, which was confirmed from the measured results of the change of imaginary permeability with applied magnetic field in the sample of 1368 nm thickness and low field torque curves. If the second peaks can be reduced by minimizing the angle distribution of the easy axis, the CoFeHfO thin films with thickness greater than 400 nm can be used for the compact microwave devices operated at up to 2 GHz ranges.

Keywords : microwave permeability, resonance frequency, saturation magnetization, anisotropy field