

Vector Network Analyzer를 이용한 Py 박막의 강자성공명연구

신용학 · 하승석 · 김덕호 · 유천열*

인하대학교 물리학과, 인천시 남구 용현동 253, 402-751

(2009년 11월 19일 받음, 2009년 12월 16일 최종수정본 받음, 2009년 12월 16일 게재확정)

본 연구에서는 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer; VNA)와 코플라나 전송선(coplanar waveguide; CPW)을 이용한 강자성 공명 측정 방법을 개발하기 위해 두께가 각각 10, 20, 40 nm인 Ni₈₁Fe₁₉(Permalloy; Py) 합금 박막을 증착하여 측정하였다. 유리기판 위에 패터닝 작업을 거쳐 CPW를 형성하고 제작된 CPW 위에 Py 박막을 직접 올려놓아 시료의 반사/투과계수인 S-파라미터를 측정하였다. 외부자기장을 0 Oe에서 490 Oe까지 변화 시키며 측정해본 결과 Py 박막의 공명주파수는 2.5 GHz에서 7 GHz 범위 내에서 나타났으며 외부자기장의 세기가 커짐에 따라 공명주파수도 증가함을 확인하였다. S-파라미터를 분석하여 나온 공명주파수와 반치폭을 이용하여 포화자화량과 길버트 감쇠 상수를 구한 결과 Py 박막 40 nm에서 길버트 감쇠 상수 값 0.0124(± 0.0008)를 구했고 이는 선행 연구되었던 일반적인 강자성 공명 측정값과 일치함을 볼 수 있었다. 또한 두께별 의존도를 조사해본 결과 두께가 작아질수록 S-파라미터의 세기가 작아지는 것을 확인 할 수 있었으며, 강자성공명 분석 결과에서 Py 박막의 두께가 10 nm에서 40 nm까지 증가할 때 유효 포화 자화가 7.205(± 0.013) kOe에서 7.840(± 0.014) kOe로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

주제어 : 강자성공명, 벡터 네트워크 분석기, 코플라나 전송선, 길버트 감쇠상수

I. 서 론

현재, 전자공학을 기반으로 무어의 법칙을 따르며 발달되어 온 컴퓨터 산업이 한계를 맞이하면서 그 해결책으로 많은 아이디어들이 제시되고 있다. 그중 전자의 고유 물리량 중 하나인 스핀의 물리적 특성을 이용하는 스핀트로닉스가 활발히 연구되고 있다. 기존의 반도체 기반 전자소자 기술은 전자의 두 가지 특성인 전하와 스핀 중 에서 양자 역학적 특성인 스핀을 고려하지 않고 전하만을 제어하는데 반해 스핀트로닉스 기술은 전하와 스핀을 동시에 제어하는 기술로서 전자소자의 기술적 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 스핀트로닉스 기술을 구현하기 위해 제작되는 많은 자성 소자들은 박막 증착 기술과 더불어 다양한 공정을 거쳐 생산되며 이렇게 만들어진 자성 소자를 구동하기 위해 자성 박막의 자화방향을 제어하여 동작하는 방식을 지향하고 있다. 이에 스핀 동역학을 측정하여 우리가 원하는 방식으로의 자화 방향 제어 가능성을 타진해야 한다. 나노 크기의 자성 박막에서 스핀 동역학을 연구하는 것은 매우 국소적인 영역과 짧은 시간 영역을 다룬다. 즉 자화 방향이 역전되는 범위는 10⁴~10⁷개 정도의 스핀이 움직이며 10 psec~10 nsec 정도의 빠른 시간에 일어난다. 자화현상을 관찰할 수 있는 방법으로는 inductive magneto-meter, SQUID, spin-polarized STM, magneto-optical effect, 강자성 공명 등이 있지만, 스핀 동역학을 측정

하기에는 강자성 공명 측정 방법이 민감도와 속도 측면에서 많은 장점을 가진 측정 방법으로 고려되고 있다[1-3].

강자성 공명은 강자성체가 서로 수직한 배열을 한 정자기장과 마이크로파 사이에 놓여 질 때 정자기장에 의해 세차운동 하는 스핀의 세차 진동수와 마이크로파의 진동수가 서로 일치할 때 큰 흡수를 보이는 공명 현상을 이용하는 실험 방법이다. 강자성 공명은 스핀들의 투자율에 대한 정보를 제공하기 때문에 강자성체의 자기적 특성 평가에 매우 중요한 측정 방법으로 1946년 J. H. E. Griffiths에 의해 Fe, Co, Ni 박막에 대해 최초로 관측되었고[4], 1947년 W. A. Yager 및 R. M. Bozorth에 의해 그 실험 사실이 입증되었으며[5], C. Kittel에 의해 반자장을 고려한 이론적 기반이 마련되었다[6]. 강자성 공명 실험으로 스핀 동역학의 중요한 인자들인 포화 자화, 자기 이방성 및 길버트 감쇠 상수 등을 구할 수 있다. 또한 강자성 공명은 자성 박막의 고주파 특성을 평가하는데 매우 중요하고 널리 쓰이는 방법으로 활발히 연구되고 있다[7].

기존의 일반적인 FMR 측정 같은 경우는 진동수를 고정하고 외부자기장을 변화시키면서 고정된 마이크로파 공동 내에서 공명 자기장을 측정한다. 이에 비해서 CPW 위에서 측정을 하는 벡터 네트워크 분석기 강자성 공명(vector network analyzer ferromagnetic resonance; VNA-FMR) 측정의 경우는 진동수와 외부자기장 모두를 변화 시킬 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 특히 코플라나 전송선(coplanar waveguide; CPW)는 특성 임피던스의 커다란 변화 없이 수십 GHz까지 광대역 주파수 특성을 가지고 있도록 설계되었기 때문에 자

*Tel: (032) 860-7667, E-mail: cyyou@inha.ac.kr

성 박막의 특성을 평가하기에 적합하다[8].

본 연구에서는 VNA-FMR 측정을 위하여 Py 박막을 두께 별(10, 20, 40 nm)로 제작하였으며 CPW를 패터닝 작업을 통하여 제작한 후, CPW 위에서 놓인 시료에 대해서 마이크로 파에 대한 시료의 반사/투과를 측정 하였다[9]. 이렇게 벡터 네트워크 분석기(vector network analyzer; VNA)에서 측정된 S-파라미터를 분석하여 공명 주파수와 반치폭을 얻었으며 이를 계산하여 길버트 감쇠상수를 구했다. 또한 시료의 두께에 대한 공명 주파수의 의존도를 조사하였고 Kittel 공식에 의해 Py 박막의 두께별 유효 포화 자화와 그 경향성을 조사하였다.

II. 실험 방법

본 실험에서는 Si 기판 위에 Py 박막을 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 각각 10, 20, 40 nm 두께로 증착하였다. 또한 VNA-FMR을 측정하기 위하여 50 Ω의 특성임피던스를 갖는 CPW를 설계하여 corning eagle 2000 glass 위에 Ti(10 nm)/Cu(150 nm)/Ti(10 nm) 삼층 박막 구조를 스퍼터링 방법으로 챔버 내부 진공도가 9.5×10^{-9} torr하에서 Ar 가스 분압은 1.5×10^{-3} torr 상태에서 증착하였으며 Cu의 증착률은 0.628 Å/s, Ti의 증착률은 0.560 Å/s으로 각각 30분 49초, 2분 59초 증착 하였다. 다음 공정으로 Fig. 1(a), (b)와 같은 구조를 사진 식각법을 이용하여 감광제로 구조를 형성 한 후 Ar 가스를 이용한 이온 밀링에 의해 패턴을 형성하였다. 유리 기판과 CPW의 접착력을 증가시키기 위하여 Ti 씨앗 층을 10 nm 두께로 증착하였고 Ti 보호 층을 10 nm 두께로 증착하였다. Fig. 1(a)는 CPW의 개략도를 나타낸 것으로 벡터 네트워크 분석기와의 임피던스 매칭을 위하여 CPW의 특성 임피던스를 50 Ω으로 설정하여 설계하였다. CPW의 특성 임피던스는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \frac{30\pi K(\kappa')}{\sqrt{\epsilon_{eff}} K(\kappa)} \quad (1)$$

식 (1)의 ϵ_{eff} 는 웨이퍼의 유효유전율로 Hilberg's equation에 의해 식 (2)로 주어진다[10].

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{2}(\epsilon_r + 1)\tanh[1.785 \log(h/s) + 1.75] + (ks/h)[0.04 - 0.7k + 0.01(1 - 0.1\epsilon_r)(0.25 + k)] \quad (2)$$

또한, 식 (1)의 $(K(\kappa')/K(\kappa))$ 는 CPW의 개략도에서 볼 수 있는 인자들로 구성되어있는 함수이다.

$$K(\kappa) = \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-\kappa^2 t^2)}} \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{a}{b} = \frac{w/2}{w/2 + s} = \frac{w}{w + 2s}, \quad \kappa' = \sqrt{1 - \kappa^2} \quad (4)$$

위 식 (2), (3), (4)에서 ϵ_r 은 기판의 유전율, h 는 CPW의 두께, w 는 신호선의 폭이며, s 는 GSG(Ground-Signal-Ground) 선 사이의 선폭이다. 또한 κ 는 w 와 s 의 함수이다. 위의 관계식들을 이용하여 CPW는 50 Ω으로 설정하기 위하여 기판의 유전율($\epsilon_r = 5.181$)과 두께($h = 635 \mu\text{m}$), CPW에서 GSG(Ground-Signal-Ground) 선 사이의 선폭($s = 16 \mu\text{m}$)과 신호 선의 폭($w = 100 \mu\text{m}$) 등으로 설계되어 VNA와 임피던스를 50 Ω으로 매칭을 이루었다[10].

CPW 위에 Py 박막을 올려놓고 VNA-FMR 측정할 때에 Fig. 1(b)과 같이 외부자기장(H_{ext})과 마이크로파에 의한 자기장(H_{rf})이 수직한 상태에서 세차운동 하는 스핀의 세차 진동수와 마이크로파의 진동수가 서로 일치하면 에너지의 강한 흡수가 일어나기 때문에 공명 현상이 일어난다. 이러한 공명 현상을 측정하기 위해 헬름홀츠 코일을 마이크로파에 의한 자기장(H_{rf})에 수직방향으로 가해지도록 설치하였다. VNA-FMR 측정에서 시료의 마이크로파에 대한 반사/투과의 측정을 위해 2-포트로 S-파라미터를 측정하였으며, 이를 위해 Fig. 1(c)와 같

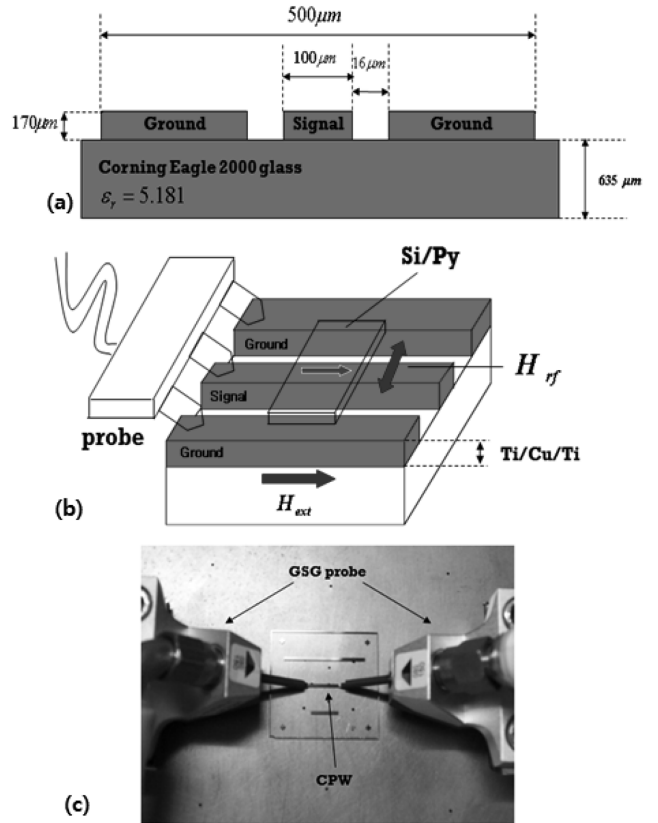


Fig. 1. (a) Schematic of CPW, (b) Schematic of a sample on a CPW. Direction of the external magnetic field and RF field. (c) The network analyzer 2-port probes are connected to the CPW.

이 CPW microwave GSG wafer probe(Cascade Microtech Microprobes, 150 μm pitch and matched to 50 Ω)를 사용하였다. VNA(8510C, Agilent)의 2-포트 동축선 연결 포트를 이용하여 GSG 웨이퍼 프루브를 CPW 양단에 접촉시켜 공명 주파수를 측정하였다. 사용된 GSG 웨이퍼 프루브의 측정범위는 45 MHz에서 40 GHz까지이며 VNA의 측정 주파수 범위는 45 MHz에서 50 GHz까지이다. 오실로스코프(Oscilloscope)가 시간 영역의 과도 응답을 표시하고, 스펙트럼 분석기가 주파수 영역의 신호 분포를 확인한다면, VNA는 하나의 기계 안에 주파수 소스와 스펙트럼 분석기가 들어있어 입력과 출력의 주파수 신호에 대한 분포 결과를 서로 나눔으로써 S-파라미터를 측정하는 장비이다. 스칼라 네트워크 분석기에서 위상까지 측정 가능한 벡터 네트워크 분석기는 S-파라미터의 크기와 상, 반사와 투과, 입출력 임피던스, 방사현무늬, 시간 지연 등을 측정할 수 있다. 벡터 네트워크 분석기를 마이크로파용 케이블로 연결하였으며 GPIB를 이용하여 WinCal-Xe(Cascade Microtech) 네트워크 분석기 보정 프로그램을 제어하였다. 또한 장비의 보정을 위하여 ISS(Impedance Standard Substrate; Cascade Microtech) 보정 장비를 이용하여 Short-open-Load-Thru(SOLT) 보정 방법을 통해 45 MHz에서 15 GHz 영역에서 보정 후 측정하였고 보정 과정 중 Thru(transmission, 투과)의 경우에는 보정의 정확도를 위하여 CPW 위에서 직접 보정을 실시하였다. 측정을 위해 헬름홀츠 코일을 이용 0 Oe에서 490 Oe까지 변화하며 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

VNA-FMR 측정을 통해 Py 박막의 공명 주파수를 확인하고 이를 분석하여 길버트 감쇠상수를 계산하고 두께별 의존도를 조사하였다. 또한 유효 포화 자화를 구하기 위하여 S-파라미터를 측정하였다. S-파라미터는 각 포트의 입출력 간의 반사/투과에 관한 전압의 상대적인 비를 나타내는 양으로 2-포트 S-파라미터에서는 반사 파라미터 S_{11} , S_{22} 와 투과 파라미터 S_{12} , S_{21} 으로 나타내며 각각의 파라미터는

$$S_{11} = S_{22} = 20\log\Gamma \tag{5}$$

$$S_{12} = S_{21} = 20\log T \tag{6}$$

의 관계로 주어진다. S_{12} 는 2 포트가 입력신호이고 1 포트가 출력신호를 나타내며 식 (5), (6)에서 Γ 와 T 는 각각의 입출력 포트에 대한 반사 계수와 투과 계수를 의미한다[11]. S-파라미터를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \tag{7}$$

위 식에서 a , b 는 각각 입력과 출력신호를 나타내며 1, 2의 첨자는 각각의 포트를 나타낸다. 예를 들어 $S_{12} = (b_1/a_2)(a_1=0)$ 을 의미하며 이는 2 포트에서의 입력신호가 시료를 투과한 이후 1 포트에 출력됨을 의미한다. S-파라미터는 두 개의 복소량(크기와 위상)의 비로 표현되며, dB 값으로 나타내고 그 크기는 실수부와 허수부를 갖는다. Fig. 2와 Fig. 3은 Py 박막의 두께별 S-파라미터를 나타내고 있는데, 이들 중 Fig. 2는 ΔS_{11} 의 허수부를 나타내고 Fig. 3은 ΔS_{11} 의 실수부를 나타내고 있다. ΔS_{11} 은 외부자기장에 의한 효과만 연구하기 위하여 식 (8)에서와 같이 ΔS_{11} 은 외부자기장을 가해 준 상태에서의 ΔS_{11} 에서 외부자기장이 0 일때 ΔS_{11} 을 빼준

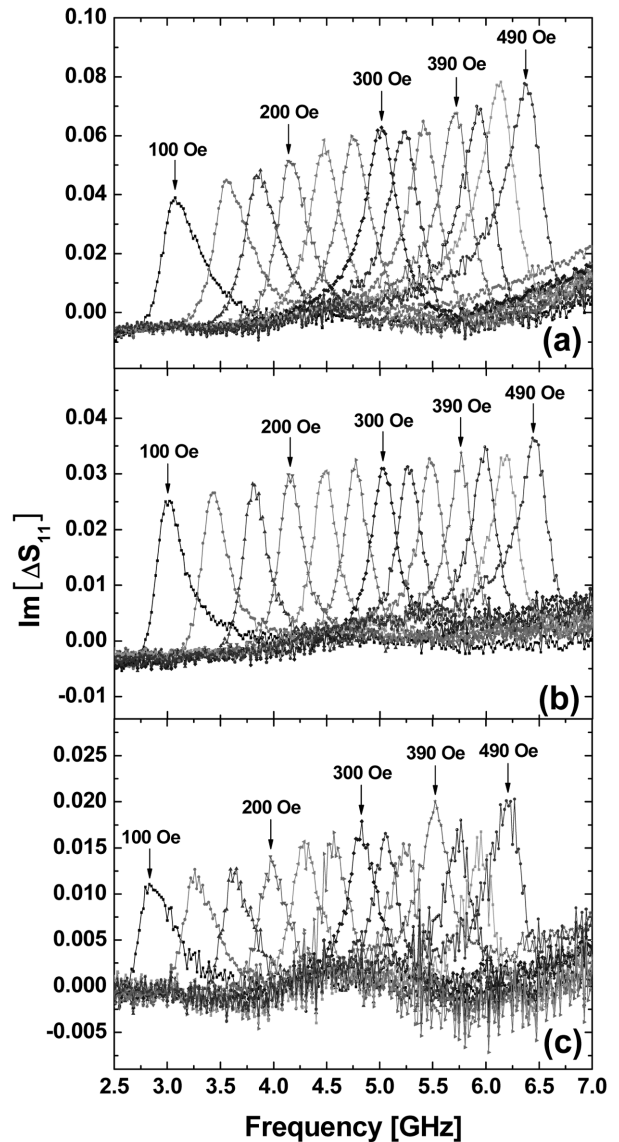


Fig. 2. FMR spectra of $Im[\Delta S_{11}]$ (the imaginary part of ΔS_{11}) of Py film at fixed fields ranging from 100 Oe to 490 Oe (a) 40 nm, (b) 20 nm, (c) 10 nm.

값을 나타낸다.

$$\Delta S_{11} = S_{11}(H \neq 0) - S_{11}(H = 0) \quad (8)$$

주파수 범위는 45 MHz에서 15 GHz까지 801개의 분해능으로 보정 작업 이후에 측정하였고 외부자기장에 의한 공명주파수가 나타난 구간인 2.5 GHz에서 7 GHz까지 그래프 상에 나타내었다. Py 박막의 길이와 폭을 10와 3 mm, 각각의 Py 박막 두께는 Fig. 2와 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 (a)는 40 nm, (b)는 20 nm, (c)는 10 nm로 측정하였다. Fig. 2와 같이 ΔS_{11} 의 허수부에서 Py 박막 두께가 두꺼워짐에 따라 각각의 외부 자기장에 대한 공명주파수가 미세하게 증가하는

것을 볼 수 있다[12]. 또한 Py 박막의 두께가 얇아질수록 ΔS_{11} 의 허수부에서 상대적인 세기가 490 Oe의 경우 0.078 (40 nm), 0.036(20 nm), 0.020(10 nm)로 작아짐을 볼 수 있고 잡음신호가 좀 더 심해지는 것을 볼 수 있다. 그리고 외부 자기장이 커질수록 공명 주파수의 제곱이 선형적으로 증가하여 상대적으로 고주파로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 Fig. 4(a)에서는 170 Oe에서의 두께에 따른 공명주파수의 증가를 나타내었고 y축(한 눈금 간격의 세기는 0.01)의 상대적인 세기가 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig. 3과 같이 ΔS_{11} 의 실수부에서는 신호의 세기가 양에서 음으로 바뀌는 부분이 공명 주파수이며 신호의 위상 변화를 의미한다. Fig. 4(b)는 ΔS_{11} 허수부에서 peak 값과 실수부에서 위상 변화가 있는 부분의 상대적인 세기의 차이를 두께별로 함께 나타낸 것이다. 이 결과로 허수부의 peak 값과 실수부의 위상 변화가 있는 부분이 일치함을 볼 수 있으며 또한 두께가 얇아질

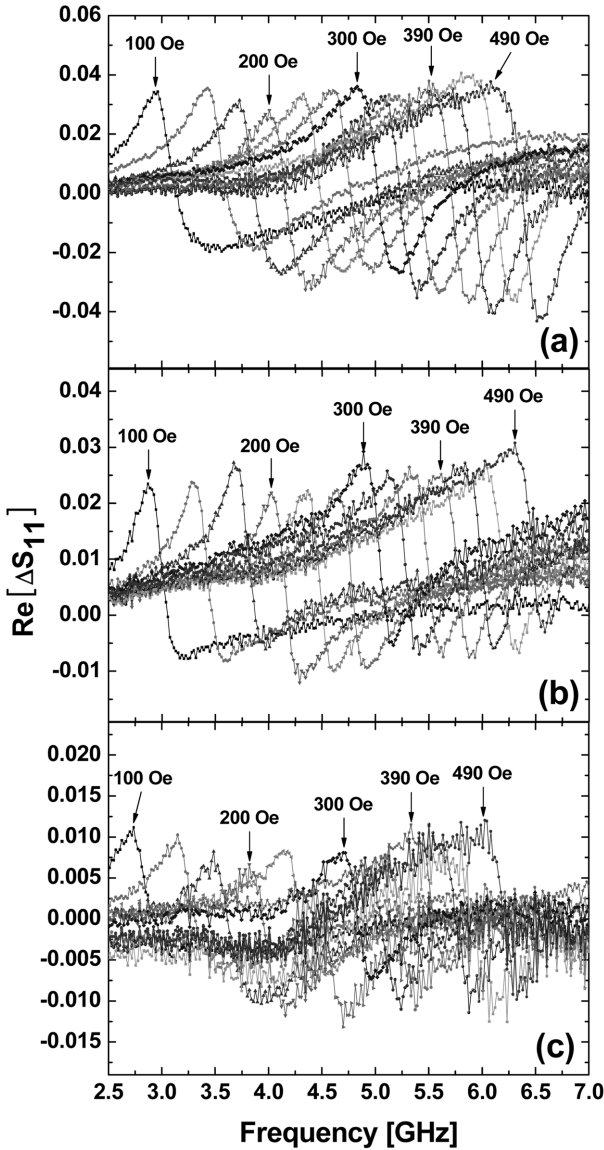


Fig. 3. FMR spectra of $Re[\Delta S_{11}]$ (the Real part of ΔS_{11}) of Py film at fixed fields ranging from 100 Oe to 490 Oe. (a) 40 nm, (b) 20 nm, (c) 10 nm.

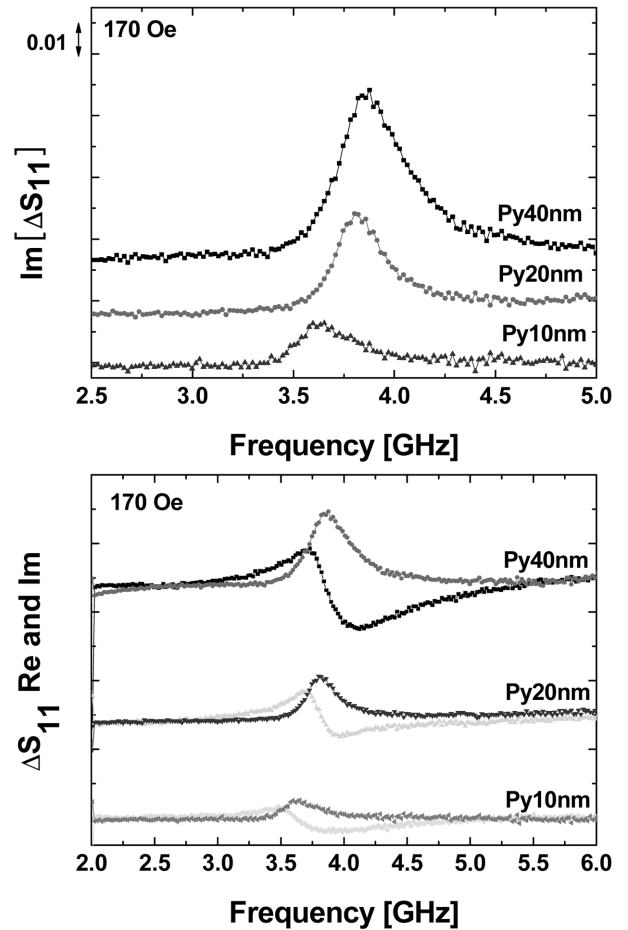


Fig. 4. (a) Sample thickness dependence of the FMR signal intensity. Each spectrum was measured under an external magnetic field of 170 Oe. (b) $Re[\Delta S_{11}]$ and $Im[\Delta S_{11}]$ of the measured ΔS_{11} measured under an external magnetic field of 170 Oe for Py thickness = 40, 20, 10 nm.

수록 상대적인 세기 또한 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Py 박막의 강자성 공명 조건에 대한 수식은 다음과 같이 표현된다[13].

$$w_r = \gamma\mu_0\sqrt{(H_{eff} + (N_y - N_z)M_s)(H_{eff} + (N_x - N_z)M_s)} \quad (9)$$

여기서 w_r , γ , H_{eff} , M_s 는 각각 공명주파수, 자기 회전비, 유효 자기장 그리고 포화 자화를 나타내며 N_x , N_y , N_z 는 반자장 계수로 자성 박막의 형상과 크기에 의해 결정 된다[13].

위 식 (9)는 자기장의 방향을 y축이라 정의하면 얇은 박막에서 $N_x = N_z = 0$ 이고 $N_y = 1$ 이며 H_{eff} 에서 이방성 자기장을 무시하고 외부 자기장에 의한 영향만을 이용하여 $w_r = \gamma\mu_0\sqrt{(H_0 + M_{eff})H_0}$ 로 나타낼 수 있다[11]. M_{eff} 는 유효 포화 자화를 나타낸다.

스핀동역학은 Landau-Lifshitz-Gilbert 방정식에 의해 결정되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times \vec{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (10)$$

여기서 γ , α , M_s , \vec{H}_{eff} 는 각각 자기회전비, 길버트 감쇠 상수, 포화 자화, 그리고 외부 자기장을 나타낸다. 위 식에서 우변 첫 번째 항은 스핀의 세차 운동을 나타내는 항이고 두 번째 항은 감쇠에 관련된 항이다. 본 연구에서는 ($H_0 \ll M_{eff}$) 이므로 Kittel 공식에 의해 박막에서의 공명주파수는 식 (11)과 같이 근사될 수 있다.

$$w_r^2 \cong \gamma^2 \mu_0^2 H_0 M_{eff} \quad (H_0 \ll M_{eff}) \quad (11)$$

식 (11)에서 볼 수 있듯 공명 주파수의 제곱이 H_0 에 비례함을 알 수 있다. 그 결과를 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 공명 주파수의 제곱이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 또한 이 결과를 토대로 유효 포화 자화를 식 (11)을 이용하여 계산할 수 있으며 이를 Fig. 5에 첨부하였다. Fig. 5에 삽입된 그래프는 두께별 유효 포화 자화를 나타내며 Py 박막에서 이는 각각 10 nm = 7.205(±0.013) kOe, 20 nm = 7.705(±0.035) kOe, 40 nm = 7.840(±0.014) kOe 임을 확인하였다. 또한 두께가 커질수록 유효 포화 자화가 커지는 경향성을 볼 수 있다. Fig. 2의 실험 측정치 허수 부분인 $Im[\Delta S_{11}]$ 은 최대값이 $w = w_r$ 이고 선평이 Δw 인 로렌츠함수이다. 길버트 감쇠상수와 직접적인 관련이 있는 식,

$$\Delta w = 2\alpha w_M \quad (12)$$

으로 나타낼 수 있다. 식 (12)에서 $w_M = \gamma\mu_0 M_{eff}$ 이다. 식 (11)과 식 (12)를 정리하면 길버트 감쇠상수와 관련된 아래의 식을 얻을 수 있다[14].

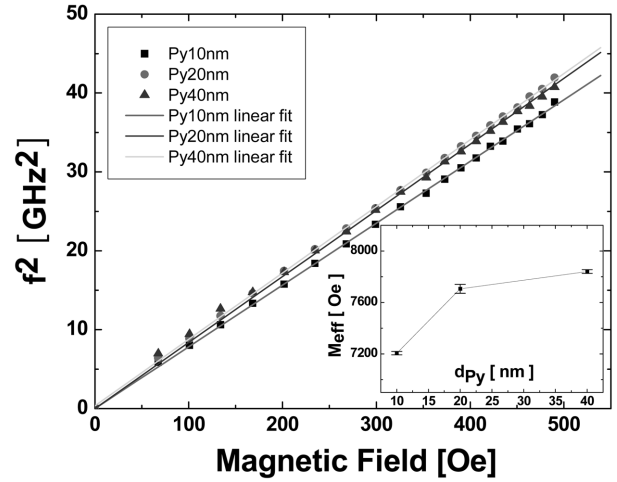


Fig. 5. The square of the measured resonance frequency as a function of applied field. The linear fit is based on Kittel's formula at small fields, $w_r^2 \cong \gamma^2 \mu_0^2 H_0 M_{eff}$. Inset: the effective saturation magnetization M_{eff} obtained by fitting FMR data vs film thickness d_{Py} .

$$\alpha \cong \frac{\Delta w}{\gamma\mu_0 M_{eff}} \quad (13)$$

실험 측정치 ΔS_{11} 의 실수부와 허수부를 통하여 길버트 감쇠 상수를 구했으며, Py 박막 40 nm에서 0.0124(±0.0008)로 조사 되었다. 이는 잘 알려진 Py 박막의 길버트 감쇠 상수와 일치함을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 스퍼터링 방식으로 제작된 Py 박막을 CPW와 VNA를 이용해서 강자성 공명 현상을 측정하고 결과를 분석하여 Py 박막에 대해 다양한 스핀 동역학을 관찰하였다. CPW는 50 Ω의 특성임피던스로 매칭 시키기 위해 설계되었고 사진 식각법과 이온 밀링 방법을 이용하여 Ti/Cu/Ti 삼층 박막 구조로 제작되었다. 일반적인 강자성 공명 측정과는 다르게 CPW 위에 시료를 직접 올려서 VNA를 통해 강자성 공명을 측정하였다. 측정된 강자성 공명 데이터를 분석하여 Py 박막에서 공명 주파수의 자기장에 대한 의존도와 박막 두께에 따른 공명 주파수의 의존도를 알아보았으며, 또한 공명 주파수를 이용하여 길버트 감쇠상수와 유효 포화 자화를 두께별로 구하였고 S-파라미터의 세기가 Py 박막의 두께에 어떠한 연관이 있는지를 연구하였다. 그 결과 Py 박막의 두께가 커짐에 따라 공명주파수가 상대적으로 커졌으며 S-파라미터의 상대적인 세기 또한 증가하였다. Py 박막 40 nm, 20 nm, 10 nm를 100 Oe에서 490 Oe까지 측정한 결과 공명주파수는 2.5 GHz에서 7 GHz까지 나타났으며 외부자기장의 세기가 커짐에 따라 공명 주파수도 선형적으로 증가함을 볼 수

있었다. 그리고 Py 박막의 유효 포화 자화를 두께별로 구해 본 결과 10 nm = 7.205(± 0.013) kOe, 20 nm = 7.705(± 0.035) kOe, 40 nm = 7.840(± 0.014) kOe 임을 확인 하였고 두께가 커질수록 유효 포화 자화가 커짐을 확인 할 수 있었다. 또한 공명주파수와 선폭을 통하여 Py 박막 40 nm의 길버트 감쇠 상수를 0.0124(± 0.0008)로 구할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단을 통해 과학기술부의 나노기술개발사업으로부터 지원받아 수행 되었습니다(2008-02553).

참고문헌

- [1] W. Dietrich, W. E. Proebster, and P. Wolf, IBM Journal, **189** (1960).
- [2] P. Wolf, J. Appl. Phys., **32**, S95 (1961).
- [3] W. Dietrich and W. E. Proebster, J. Appl. Phys., **31**, S281 (1960).
- [4] J. H. E. Griffiths, Nature, **158**, 670 (1946).
- [5] W. A. Yager and R. M. Bozorth, Phys. Rev., **72**, 80 (1947).
- [6] C. Kittel, Phys. Rev., **73**, 155 (1948).
- [7] B. Heinrich and J. Bland, *Ultrathin Magnetic Structure*, Springer, Berlin (1994) pp. 195~222.
- [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Son, New York (1998) pp. 160~167.
- [9] J. C. Sohn, M. Yamaguchi, S. H. Lim, and S. H. Han, J. Magnetism., **10**(4), 163 (2005).
- [10] T. C. Edwards and M. B. Steer, *Foundations of interconnect and microstrip design*, John Wiley & Son, New York (2000) pp. 161~224.
- [11] S. Yoshida, H. Ono, S. Ohnuma, M. Yamaguchi, and Y. Shimada, Material Japan, **42**, 193 (2003).
- [12] Y. C. Chen, D. S. Hung, Y. D. Yao, S. F. Lee, H. P. Ji, and C. Yu, J. Appl. Phys., **101**, 09C104 (2007).
- [13] J. A. Osborn, Phys. Rev., **67**(11), 351 (1945).
- [14] G. Counil, J.-V. Kim, T. Devolder, C. Chappert, K. Shigeto, and Y. Otani, J. Appl. Phys., **95**, 5646 (2004).

Vector Network Analyzer Ferromagnetic Resonance Study of Py Thin Films

Yong-Hwack Shin, Seung-Seok Ha, Duck-Ho Kim, and Chun-Yeol You*

Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received 19 November 2009, Received in final form 16 December 2009, Accepted 16 December 2009)

Ferromagnetic resonance (FMR) measurement is an important experimental technique for the study of magnetic dynamics. We designed and set up the vector network analyzer ferromagnetic resonance (VNA-FMR) measurement system with home made coplanar waveguides (CPW). We examined 10-, 20-, 40-nm thick Py thin films to test the performance of the VNA-FMR measurement system. We measured S-parameter (transmission/reflection coefficient) of Py thin films on a CPW. Resonance frequency is investigated from 2.5 to 7 GHz for a field range from 0 to 490 Oe. The VNA-FMR data shows the resonance frequency increment when the external magnetic field increases. We also investigated Gilbert damping constant of Py thin film using resonance frequency (ω_r) and linewidth ($\Delta\omega$). After investigating dependence of thickness, we find that an decrease in S-parameter intensity as Py thin film thickness decreases. And the FMR results show that the effective saturation magnetization, M_{eff} , increase from 7.205(± 0.013) kOe to 7.840(± 0.014) kOe, while the film thickness varies from 10 to 40 nm.

Keywords : ferromagnetic resonance, vector network analyzer, coplanar waveguide, gilbert damping constant