

Development of Ferromagnetic Resonance System for Ultra-Low Temperature

Jungmin Park and Younghun Jo*

Center for Scientific Instrumentation, Korea Basic Science Institute (KBSI), Daejeon 34133, Korea

Ah-Yeon Lee

Center for Research Equipment, Korea Basic Science Institute (KBSI), Daejeon 34133, Korea

(Received 20 April 2021, Received in final form 28 April 2021, Accepted 29 April 2021)

The ferromagnetic resonance (FMR) including inverse spin hall effect (ISHE) by spin pumping is a useful method to analyze the spin dynamics of ferromagnetic material and the spin-charge conversion of ferromagnet/normal metal heterostructure. For localization of the ISHE-FMR system, we have developed a customizable ISHE-FMR system. The developed ISHE-FMR system can simultaneously measure the ISHE voltage and FMR signal in the various range of temperature (4~300 K). From this ISHE-FMR system, we measured the FMR derivative absorption signals and ISHE voltage of molecule-based ferromagnetic insulator (Cr-PBA, $T_c = 220$ K) and Co thin film. And we show the design and manufacture process of ISHE-FMR system briefly, and discuss the Gilbert damping constant of all the test samples compared with reference value.

Keywords : development of equipment, ferromagnetic resonance, inverse spin Hall effect, low temperature, damping constant

극저온용 강자성 공명 측정 시스템 개발

박정민 · 조영훈*

한국기초과학지원연구원 연구장비 개발부, 대전시 유성구 과학로 169-148, 34133

이아연

한국기초과학지원연구원 연구장비 운영부, 대전시 유성구 과학로 169-148, 34133

(2021년 4월 20일 받음, 2021년 4월 28일 최종수정본 받음, 2021년 4월 29일 게재확정)

강자성 물질의 자화(magnetization)는 외부 자기장을 중심으로 세차운동을 하고, 외부에서 전자기파를 인가하면 물질이 외부 전자기파를 흡수하는 강자성 공명 현상(ferromagnetic resonance, FMR)이 일어난다. 강자성 공명은 강자성 물질의 스핀 동역학을 분석할 수 있는 아주 유용한 기술이다. 또한 스핀 펌핑(spin pumping)에 의한 역 스핀 홀 효과(ISHE)는 강자성체의 인접한 전도체에 스핀 전류를 주입할 수 있다. 본 논문에서 현재 대부분 외산 장비에 의존해서 사용하고 있는 극저온용 ISHE-FMR 측정 장비의 국산화를 위해 장비 개발 과정을 간략하게 소개한다. 개발된 장비는 ISHE-FMR을 동시에 측정이 가능 하며 다양한 온도 범위(4~300 K)에서 사용할 수 있다. 끝으로, 장비 테스트를 위해 상전이 온도가 220 K인 분자기반 강자성 절연체 Cr-PBA와 Co 박막의 FMR 신호 및 ISHE 전압을 측정하고 각 시료의 감쇠상수 값을 참고 문헌의 결과와 비교한다.

주제어 : 장비개발, 강자성 공명, 역 스핀 홀 효과, 극저온, 감쇠상수

I. 강자성 공명 현상

자성 공명 현상(magnetic resonance)에는 핵자기 공명(nuclear magnetic resonance, NMR), 전자 상자성 공명(electron

paramagnetic resonance, EPR), 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 등이 있다. 이 중에서 강자성 공명 현상은 강자성체 자구(magnetic domain)의 자기 모멘트가 외부 자기장에 의해 세차운동을 하고 이때 발생하는 주파수(Larmor frequency)와 외부에서 인가한 전자기파의 주파수가 일치할 때 공명이 일어나고 인가한 주파수의 에너지($h\nu$)를 흡수한다(Fig. 1(a, b)). 에너지가 흡수되는 외부 자기장을 공명 자기장

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-2-6943-4126,

Fax: +82-42-868-3610, e-mail: younghun@kbsi.re.kr

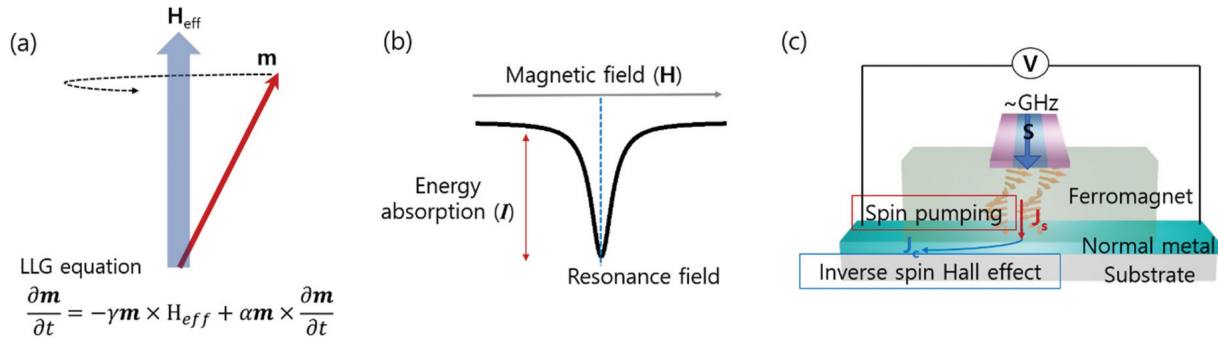


Fig. 1. (Color online) (a) Magnetic dynamics of the magnetization precesses about effective field (H_{eff}). This precession is described by LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert) equation. Here, g is gyromagnetic ratio and a indicates Gilbert damping constant. (b) An energy spectrum of the ferromagnetic resonance with applied magnetic field. Energy absorption occurs around resonance field. (c) Schematic of ferromagnet/normal metal heterostructure for FMR measurement and ISHE. S indicates RF signal line (GHz).

(resonance field)이라고 하며 그때 주파수를 공명 주파수 (resonance frequency)라고 부른다. 강자성 공명은 약 1 GHz~100 GHz(radio frequency, RF)영역안에서 공명 주파수를 가지며 공명 자기장은 약 100 Oe~10000 Oe 범위안에 있다[1-3]. 이러한 강자성 공명 현상으로는 강자성체의 감쇠상수 (damping constant), 유효 자화(effective magnetization), 자기 회전비(gyromagnetic ratio) 등을 분석할 수 있어 1946년 처음으로 강자성 공명 실험을 진행한 이후, 강자성체의 자기 이방성, 미세 자기 구조, 다층 박막의 계면 효과 등 지금까지 강자성체 뿐만 아니라 페리자성(ferrimagnetic materials) 물질 까지 많은 자성 특성을 분석하는 데 이용하고 있다[4-6]. 또한 강자성 공명으로 강자성체에 인접한 금속 혹은 반도체에 스핀 전류를 주입시킬 수 있다. 이 현상을 스핀 펌핑 (spin pumping)이라고 한다[7-10]. Fig. 1(c)에서처럼 스핀 펌핑에 의해 비자성 금속에 주입된 스핀 전류는 역 스핀 홀 효과 (inverse spin hall effect, ISHE) 혹은 계면에서의 Rashba-Edelstein 효과 등으로 인해 스핀-전하 전류의 변환 (spin-charge conversion)이 일어난다. 스핀 펌핑은 일반금속, 2차원 물질 및 위상학적 절연체의 스핀 홀 효과, 스핀-전하 변환 효율 등을 분석하는데 많이 이용되고 있다[11-13]. 또한 강자성체/일반전도체 (ferromagnet/normal metal) 이중 접합 구조에서 일반적인 FMR 뿐만 아니라 교류 전류를 이용한 ST-FMR (spin torque-ferromagnetic resonance) 방식으로 이중 접합의 계면 및 강자성체의 스핀 동역학 (spin dynamics)을 분석할 수 있으며, 차세대 자성 메모리 소자인 SOT-MRAM (spin orbit torque-magnetic random access memory)의 SOT 효율을 분석하기 위해 많이 이용하고 있다[14-16].

II. 강자성 공명 측정 시스템 개발

현재 강자성 공명 현상을 측정하는 시스템은 상온에서 개

인 실험실 규모의 전자석 기반으로 자체 제작을 하거나 해외 제품을 사서 사용하는 경우가 많다. 해외 제품의 경우 가격이 고가이며 시스템에 문제가 발생했을 때 즉각적인 대처가 어렵다. 그리고 최근 상전이 온도 (Curie temperature, T_c)가 낮은 새로운 자성 물질의 합성 및 개발, 2차원 물질 및 위상학적 절연체의 스핀 전류 연구 등 극저온의 환경에서 FMR 및 ISHE 실험을 진행하고 있다[17,18]. 하지만 국내에서 사용되는 극저온 관련 FMR 장비는 대부분 외산 장비인 NanOsc 회사 장비를 사용하며 이 측정 시스템은 해외에서 양산되는 특정 저온 챔버 장비에 맞춰 제작되기 때문에 국내에서 극저온 FMR 측정 시스템을 구축하는 일은 예상보다 어렵다.

한국 기초 과학 지원연구원에서는 외산 장비에 의존되어 있는 극저온 ISHE-FMR 시스템을 국산화하고 FMR 관련 실험 연구자들을 지원하기 위해 FMR 장비의 핵심이 되는 웨이브 가이드 (wave guide)와 저온 챔버 (cryo-chamber)에 사용할 지지대 및 구조물 (인서트, insert)을 직접 설계 및 제작했다. 그리고 몇 가지 테스트 샘플을 통해 FMR 특성 및 ISHE 전압을 측정하고 분석하였다.

1. Wave guide 설계

ISHE-FMR 측정 시스템의 핵심은 부분은 에너지 손실을 최대한 줄이면서 RF 신호가 지나갈 수 있게 하는 웨이브 가이드 (wave guide)에 있다[19-21]. Fig. 2에서 보는 것처럼 제작된 웨이브 가이드 형태는 coplanar waveguide (CPW) 형태이며 설계를 할 때 고려해야 할 사항들은 웨이브 가이드 기판 (유전체)의 유전율, 기판의 두께, 소스 라인의 두께, 비아 홀 (via hole)의 위치 및 크기 등이 있다. 여기서 제작한 웨이브 가이드는 임피던스가 50Ω 이 되게 다른 조건들을 맞췄다. 웨이브 가이드 설계를 위해 대중적으로 쓰이는 프로그램은 AutoCAD CPW 계산기, 웨이브 가이드 설계용 콤솔

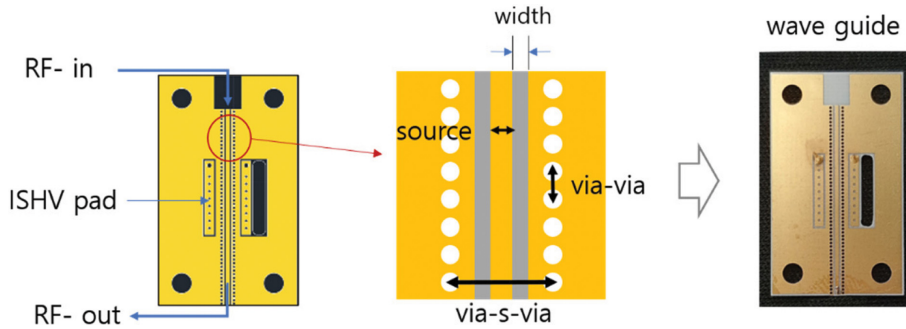


Fig. 2. (Color online) The design drawing of wave guide. It is considered to the width, via-via, via-s-via, thickness of insulator (substrate) for minimum energy loss of RF signal. The right picture shows manufactured wave guide with gold coating.

(COMSOL) 등이 있으며 이를 잘 활용하면 원하는 CPW 형태를 설계할 수 있다. 여기에 한계 주파수(cut-off frequency) 까지 고려하면 설계된 웨이브 가이드의 사용 주파수(GHz) 범위를 이론적으로 결정할 수 있다. 한계 주파수는 다음 식(1)에 의해서 결정된다[21].

$$f_c = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}(dx - d)} \quad (1)$$

여기서 c 는 광속을 나타내며, ϵ_r 은 기판의 유전상수, dx 는 Via-S-Via의 거리, d 는 비아(via)의 직경을 나타낸다. 본 연구원에서 제작한 CPW의 한계 주파수는 약 40 GHz이다. 한편 앞서 설명했듯이 강자성 공명이 일어나면 스핀 펌핑에 의해 강자성체에 접합된 전도체에 ISHE 전압을 발생시킨다. 이 전기적 신호를 FMR 실험과 동시에 측정하기 위해서 Fig. 2에 서처럼 웨이브 가이드 양 옆에 ISHE 전압을 측정할 수 있는 전극 패드(pad)를 만들었으며 게이트 전압에 따른 FMR 및 ISHE 실험을 할 수 있도록 ISHE 전압 패드 옆에 구멍을 뚫어 전선을 연결할 수 있게 했다. 최종 단계로 웨이브 가이드

의 신호 선(source)과 접지(ground) 부분은 금으로 도금하였다(Fig. 2 노란색 부분).

2. 극저온 ISHE-FMR 측정 시스템

극저온과 높은 자기장 안에서 사용할 수 있는 ISHE-FMR 시스템을 구축하기 위해 RF 신호 범위 등을 고려한 케이블 종류, 연결 부품, 인서트의 재질 등을 선정하여 최종 ISHE-FMR 인서트를 조립하였다. 본 연구원에서 개발한 극저온 ISHE-FMR 인서트 형태는 Quantum design 사의 PPMS (physical property measurement system) 장비의 챔버 규격에 맞춰 제작되었다.

FMR 신호를 측정하는 방식에는 크게 두 가지가 있다. 하나는 VNA-FMR 방식으로 VNA(vector network analysis)장비를 이용하여 공명 주파수와 공명 자기장에서 에너지가 흡수되는 양을 직접적으로 측정하는 방식이다[22,23]. 일반적으로 흡수되는 형태는 자기장에 따라 Lorentzian 함수로 그래프가 그려진다. 또 다른 하나는 공명이 일어나는 샘플 주위에 헬름홀츠(Helmholtz) 코일을 설치하여 외부 인가 자기장에 코

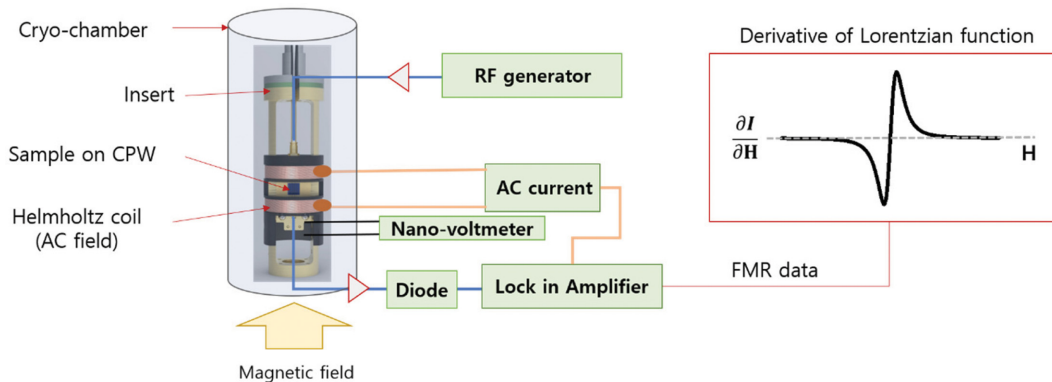


Fig. 3. (Color online) The illustration of ISHE-FMR measurement system. The manufactured insert with wave guide is in cryo-chamber. The FMR signal and ISHE voltage can be obtained, simultaneously. The AC field of Helmholtz coil acts as the modulation to applied magnetic field. Then, the FMR data is obtained as the differential form of Lorentzian function.

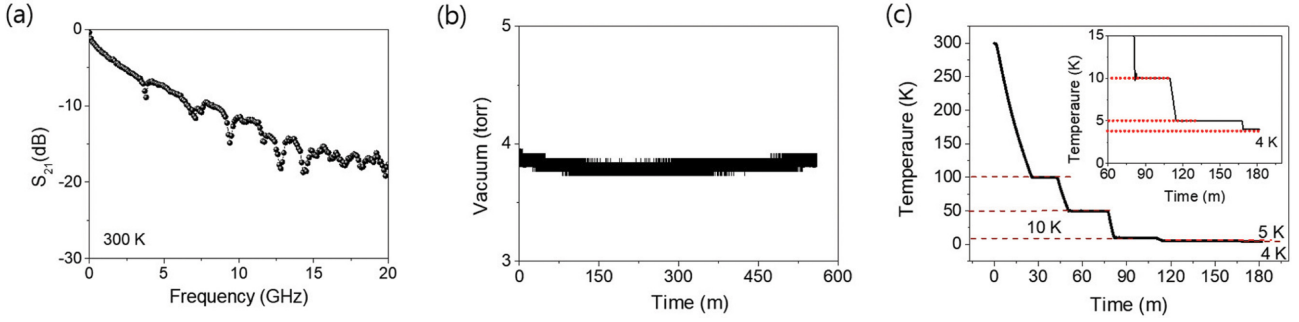


Fig. 4. (Color online) (a) The S_{21} data of ISHE-FMR system as function of frequency. The S_{21} means the energy loss of RF signal. And, we have conducted the vacuum (b) and temperature (c) test of ISHE-FMR system installed in cryo-chamber. (b) The initial vacuum (about 3.9 torr) was maintained for 9 h. (c) The system temperature has stably reached at the 4 K.

일에 의한 교류 자기장으로 변조(modulation)을 만들어내는 방식이다[24]. 변조된 신호는 Lock in amplifier 장비를 통해 RF 신호를 전압 신호로 변환되어 측정되고 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 측정된 신호는 Lorentzian 함수의 미분 형태로 나타나게 된다. 헬름홀츠 코일을 사용하면 VNR-FMR 측정 방식보다 신호대 잡음 비(signal-to-noise-ratio)를 향상시킬 수 있어 자기모멘트 값에서도 측정이 용이하다. Fig. 3과 같이 본 연구원에서는 후자의 측정 방식에 따라 FMR 신호를 분석했으며 동시에 ISHE 전압을 측정하였다.

Fig. 4(a)는 개발된 ISHE-FMR 장비의 주파수에 따른 S_{21} 값을 보여준다. 여기서 S_{21} 값은 만들어진 웨이브 가이드의 에너지 손실을 의미한다. 웨이브 가이드의 한계 주파수는 40 GHz 정도지만 사용한 RF 케이블 및 연결 소자들은 20 GHz까지 사용가능한 부품들이며 이 부품들은 주파수가 증가할수록 에너지 손실이 커지는 특성을 가진다. 또한 ISHE-FMR 시스템을 극저온에서 사용하기 위해서는 안정적으로 진공상태와 온도를 유지해야 한다. Fig. 4(b, c)에서 보는 바와 같이 9시간 동안 초기 진공상태를 잘 유지하는 것을 알 수 있었으며 안정적으로 4 K에 도달하는 것을 테스트를 통해 확인하였다.

III. 테스트 샘플 측정 결과

1. Pt/Co/Ta/SiO₂의 FMR

개발된 장비의 ISHE 전압과 FMR 신호를 테스트하기 위해 강자성체인 Co를 이용하였으며 10 nm 두께의 Co 박막을 SiO₂ 기판 위에 RF-sputter를 사용하여 증착했다. Co/SiO₂의 계면을 매끄럽게 하기 위해 Ta(3 nm)를 삽입했다[25]. 또한 Co 표면의 산화를 막고 ISHE 전압을 측정 위해 전도체 Pt를 5 nm 덮어 Pt(5 nm)/Co(10 nm)/Ta(3 nm)/SiO₂ 구조의 시료를 제작했다. Fig. 5는 상온에서 Co 10 nm 박막의 FMR과 ISHE 데이터이다.

우선 각 주파수 별로 자기장에 따른 RF 신호의 에너지 변

화를 측정했다. Fig. 5(a)의 데이터는 앞서 설명한 Lorentzian 함수의 미분 형태로, 전형적인 FMR 신호가 측정되었다. 빨간 실선은 함수(2)의 피팅(fitting)을 보여준다[12].

$$\frac{dI}{dH} = K_1 \frac{4\Delta H(H - H_{res})}{[4(H - H_{res})^2 + \Delta H^2]^2} - K_2 \frac{\Delta H^2 - 4(H - H_{res})^2}{[4(H - H_{res})^2 + \Delta H^2]} + K_3 H \quad (2)$$

여기서 K_1 은 대칭성, K_2 은 비대칭성, K_3 은 기울기를 나타내는 상수이며, H_{res} 은 공명 자기장, ΔH 는 반치폭(full width at half maximum, FWHM)을 나타낸다. Fig. 5(a)에서처럼 FMR 데이터를 미분된 Lorentzian 함수(2)로 피팅하여 각각의 주파수에 대한 공명 자기장 및 반치폭을 얻을 수 있다. 한편 공명 주파수와 공명 자기장의 관계(Kittel equation(3))를 이용하면 자기회전비(gyromagnetic ratio, γ)를 얻을 수 있고[12],

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{H_{res}(H_{res} + 4\pi M_{eff})} \quad (3)$$

자기회전비와 길버트 감쇠(Gilbert damping) 상수 α 관계는 다음과 같으므로[12],

$$\Delta H_{FWHM} = \Delta H_0 + \frac{4\alpha f}{\gamma} \quad (4)$$

측정된 Pt(5 nm)/Co(10 nm)/Ta(3 nm)/SiO₂ 박막의 감쇠 상수는 0.0682이다. 기존에 보고된 FMR 실험 논문에서[26] 따르면 본 논문의 Co 두께와 비슷한 시료의 감쇠상수 값은 약 0.05로, 개발된 ISHE-FMR 시스템에서 얻어진 감쇠 상수 값과 비슷하다. 또한 ISHE 전압을 동시에 측정했으며 에너지가 15 dbm 일 때 9 GHz에서 ISHE 전압은 약 650 nV였다(Fig. 5(d)).

한편 개발된 ISHE-FMR 측정 시스템이 매우 작은 자기모멘트를 가지는 박막에서도 FMR 신호가 측정되는지 확인하

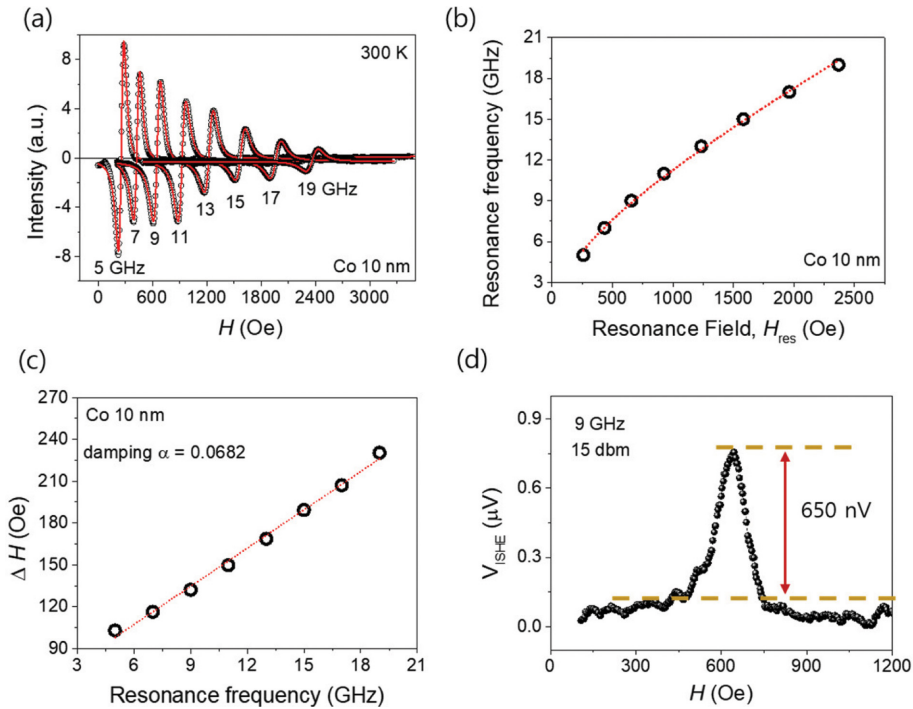


Fig. 5. (Color online) (a) The FMR data of Pt(5 nm)/Co(10 nm)/Ta(3 nm)/SiO₂ heterostructure in the various range of RF frequency at 300 K. Red solid line is fitting curve with eq. (2). The frequency dependence of the resonance field (b) and FMR peak to peak width (c). The dotted line is fit from the Kittel equation (b) and linear fit (c). The slope of linear fit indicates the Gilbert damping constant. (d) The ISHE voltage on Pt at 9 GHz. The spin pumping occurs in Co thin film by ferromagnetic resonance.

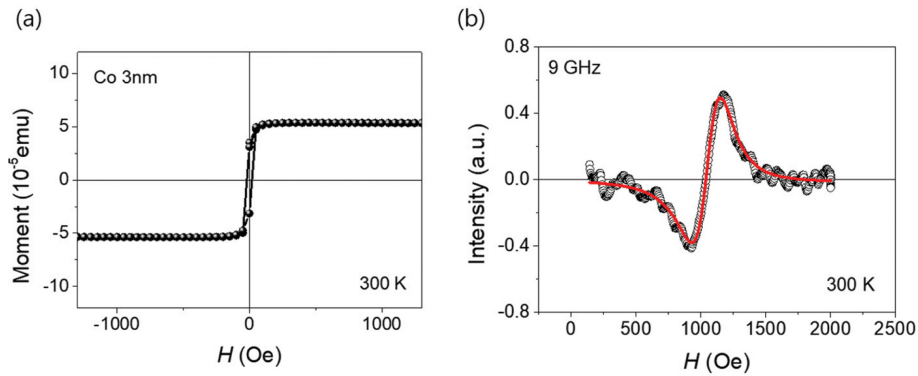


Fig. 6. (Color online) (a) The magnetic moment of Pt(5 nm)/Co(3 nm)/Ta(3 nm)/SiO₂ as function of magnetic field. The saturation magnetic moment is about 5×10^{-5} emu. (b) The FMR data of the sample at 9 GHz. Red line indicates fitting curve with eq. (2).

기 위해 Co 3 nm 두께로 Pt(5 nm)/Co(3 nm)/Ta(3 nm)/SiO₂ 구조의 시료를 제작하여 FMR 신호를 측정하였다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 Co 3 nm 박막의 자기모멘트 크기는 약 5×10^{-5} emu 값을 가지는 것을 SQUID-VSM로 확인했으며 FMR 신호가 식(2)의 형태로 잘 측정되는 것을 알 수 있다(Fig. 6(b)).

2. 분자기반 강자성 절연체 Cr-PBA

한편 개발된 ISHE-FMR 측정 시스템이 저온에서 측정이

되는지를 확인하기 위해 분자기반 강자성 절연체인 Cr-PBA(Cr^{II}[Cr^{III}(CN)₆]_x·nH₂O) 물질을 이용했다. Cr-PBA 물질은 전해도금(electrochemical deposition)의 방식으로 상온에서 합성된 물질로 상전이 온도(Curie temperature, T_c)가 약 220 K으로 알려져 있다[27]. 이 물질을 Cr/Cr-PBA의 이중 접합 구조로 만들어 FMR 및 ISHE 신호를 측정했으며 대구경북과학기술원(DGIST)에 있는 상용화된 PPSM-FMR 장비로 측정된 데이터를 비교했다. 하지만 상용화된 PPMS-FMR 장비에는 ISHE 전압을 측정하는 옵션이 없어 FMR 신호만 비

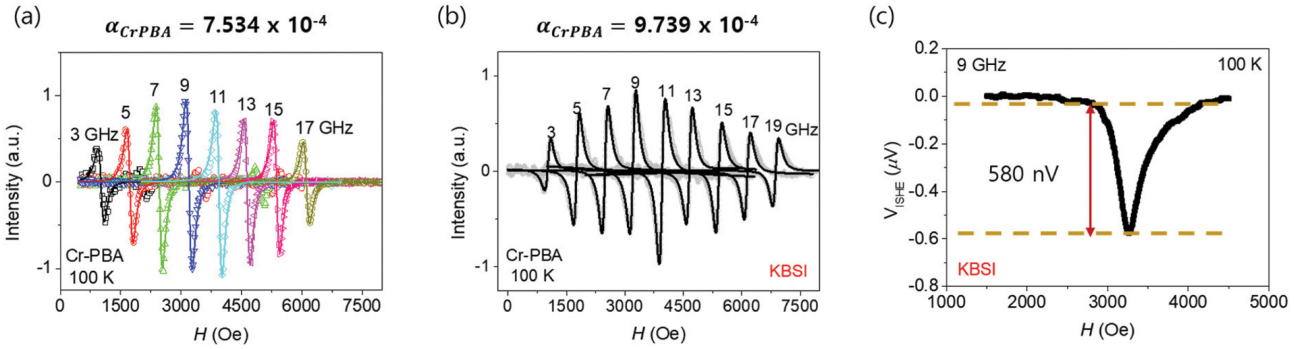


Fig. 7. (Color online) The derivative FMR spectra of the Cr-PBA/Cr heterostructure at 100 K from (a) NanOsc and (b) KBSI FMR system. The recorded dates are fitted by using eq. (2). (c) ISHE voltage was measured for the Cr-PBA/Cr bilayer upon applying 9 GHz at 100 K [27].

교할 수 있었다.

Fig. 7(a)는 NanOsc 회사에서 현재 판매 중인 장비로 측정된 FMR 신호이다. 측정 온도는 100 K에서 진행되었으며 3 GHz~17 GHz 범위에서 자기장 변화에 따라 FMR 신호를 측정했다. Fig. 7(b)는 본 연구원(KBSI)에서 개발된 FMR 장비로 측정된 100 K에서의 FMR 신호이다. Fig. 7(a, b)에서 실선은 식(2)의 피팅값을 나타내며 식(3), (4)을 이용하여 감쇠 상수를 얻었다. 상용화된 측정 시스템에서 얻은 감쇠상수는 7.534×10^{-4} 이며 본 연구원에서 개발된 측정 시스템에서 측정된 감쇠상수는 9.739×10^{-4} 로 비슷한 값을 얻을 수 있었다. 여기에 감쇠상수 값이 다소 차이가 나는 것은 측정 시료의 제작 시기가 서로 다른 것이 그 원인일 것이다. Fig. 7(c)는 본 연구원에서 측정된 100 K에서의 ISHE 전압을 나타낸다. Fig. 5(d)에서 Pt/Co와 다르게 ISHE 전압의 신호가 반대인 이유는 Cr의 스핀 홀 각(spín Hall angle)이 Pt와 반대인 음의 값을 가지기 때문이다.

IV. 향후 FMR 측정 시스템 개발 방향

극저온 ISHE-FMR 측정 시스템을 국산화 하기 위해 웨이브 가이드를 시작으로 극저온 챔버에 사용할 수 있는 인서트까지 직접 설계하고 제작하였으며, 개발된 극저온 ISHE-FMR 측정 시스템으로 Co 박막과 Cr-PBA 시료의 감쇠상수를 구하였다. 그리고 상용화 된 극저온 FMR 시스템에 버금가는 측정 성능을 확인하였다. 최근 자성 박막 및 스핀트로닉스(spíntronics) 연구에서는 두께가 1 nm 정도의 매우 얇은 강자성 박막을 이용하며 그 특성 분석에 FMR 실험이 필요하게 되었다. 또한 강자성체의 자기 이방성으로 인해 인가하는 자기장의 방향도 FMR 및 스핀 펌핑 실험에서 고려해야할 변수로 작용하고 있다. 따라서 현재까지 개발된 기술을 바탕으로 Co 1 nm의 두께 즉 자기 모멘트가 $\sim 10^{-6}$ emu를 가지는 박막에서도 FMR 신호의 검출이 가능하게 하고, 외부에서 인

가되는 자기장의 방향을 조절 가능하게 만드는 것이 향후 극저온 ISHE-FMR 측정 시스템이 나아갈 방향이며 계속해서 장비개발을 진행할 계획이다.

감사의 글

극저온용 ISHE-FMR 장비 개발에 큰 도움을 주신 알앤디웨어(RNDWARE Co. Ltd) 엄태운 대표님과 구슬기 사원, 그리고 Co 시료를 제작해 주신 KIST 민병철 박사님, 당현식 학생연구원께 감사의 말씀드립니다. 또한 Cr-PBA 물질로 FMR과 ISHE 테스트를 허락해주신 울산 과학기술원(UNIST) 유정우 교수님, 오인선 박사님께도 감사드립니다. 본 장비개발 및 연구는 한국기초과학지원연구원(연구장비개발부 운영, C140210)과 국가과학기술 연구회(스핀 다이내믹스 계측 및 제어기술 개발, No.CAP-16-01-KIST)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] I. S. Maksymov and M. Kostylev, *Physica E Low Dimens. Syst. Nanostruct.* **69**, 253 (2015).
- [2] H. J. von Bardeleben, J. L. Cantin, and F. Gendron, *Electron paramagnetic resonance spectroscopy*, Springer Nature (2020), pp. 351-359.
- [3] K. Baberschke, *J. Phys. Conf. Ser.* **324**, 012011 (2011).
- [4] K. Lenz, H. Wende, W. Kuch, K. Baberschke, K. Nagy, and A. Jánossy, *Phys. Rev. B* **73**, 144424 (2006).
- [5] Y. Wang, R. Ramaswamy, and H. Yang, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 273002 (2018).
- [6] S. Klingler, A. V. Chumak, T. Mewes, B. Khodadadi, C. Mewes, C. Dubs, O. Surzhenko, B. Hillebrands, and A. Conca, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 015001 (2014).
- [7] M. Haertinger, C. H. Back, J. Lotze, M. Weiler, S. Geprägs, H. Huebl, S. T. B. Goennenwein, and G. Woltersdorf, *Phys. Rev. B* **92**, 054437 (2015).

- [8] H. L. Wang, C. H. Du, Y. Pu, R. Adur, P. C. Hammel, and F. Y. Yang, *Phys. Rev. B* **88**, 100406 (2013).
- [9] F. Yang and P. Chris Hammel, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 253001 (2018).
- [10] O. Mosendz, J. E. Pearson, F. Y. Fradin, G. E. W. Bauer, S. D. Bader, and A. Hoffmann, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 046601 (2010).
- [11] Q. Song, H. Zhang, T. Su, W. Yuan, Y. Chen, W. Xing, J. Shi, J. Sun, and W. Sci. Adv. **3**, e1602312 (2017).
- [12] J. Park, I. Oh, A.-Y. Lee, H. Jang, J.-W. Yoo, Y. Jo, and S.-Y. Park, *J. Alloys. Compd.* **829**, 154534 (2020).
- [13] D. Jhahria, N. Behera, D. K. Pandya, and S. Chaudhary, *Phys. Rev. B* **99**, 014430 (2019).
- [14] A. Kumar, S. Akansel, H. Stopfel, M. Fazlali, J. Åkerman, R. Brucas, and P. Svedlindh, *Phys. Rev. B* **95**, 064406 (2017).
- [15] D. Lee, J. Kim, H. Park, K.-J. Lee, B.-K. Ju, H. C. Koo, B.-C. Min, and O. Lee, *Phys. Rev. Appl.* **10**, 024029 (2018).
- [16] C. Wang, H. Seinige, and M. Tsoi, *Low Temp. Phys.* **39**, 247 (2013).
- [17] Q. Song, J. Mi, D. Zhao, T. Su, W. Yuan, W. Xing, Y. Chen, T. Wang, T. Wu, X. H. Chen, X. C. Xie, C. Zhang, J. Shi, and W. Han, *Nat. Commun.* **7**, 13485 (2016).
- [18] P. Noël, F. Trier, L. M. Vicente Arche, J. Bréhin, D. C. Vaz, V. Garcia, S. Fusil, A. Barthélémy, L. Vila, M. Bibes, and J.-P. Attané, *Nature* **580**, 483 (2020).
- [19] Z. Zhou and K. L. Melde, *IEEE Trans. Adv. Packag.* **31**, 861 (2008).
- [20] D. Deslandes and W. Ke, *IEEE Trans. Micro. Theory Techn.* **51**, 593 (2003).
- [21] M. El Gibari and H. Li, *Int. J. Antennas Propag.* **2015**, 481768 (2015).
- [22] S. Klingler, V. Amin, S. Geprägs, K. Ganzhorn, H. Maier-Flaig, M. Althammer, H. Huebl, R. Gross, R. D. McMichael, M. D. Stiles, S. T. B. Goennenwein, and M. Weiler, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 127201(2018).
- [23] H. Qin, S. J. Hämäläinen, and S. van Dijken, *Sci. Rep.* **8**, 5755 (2018).
- [24] S. Beguhn, Z. Zhou, S. Rand, X. Yang, J. Lou, and N. X. Sun, *J. Appl. Phys.* **111**, 07A503 (2012).
- [25] S. Yoshii, R. Ohshima, Y. Ando, T. Shinjo, and M. Shiraishi, *Sci. Rep.* **10**, 15764 (2020).
- [26] N. Fujita, N. Inaba, F. Kirino, S. Igarashi, K. Koike, and H. Kato, *J. Magn. Magn. Mater.* **320**, 3019 (2008).
- [27] I. Oh, J. Park, D. Choe, J. Jo, H. Jeong, M.-J. Jin, Y. Jo, J. Suh, B.-C. Min, and J.-W. Yoo, *Nat. Commun.* **12**, 1057 (2021).