ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(1), 1-3 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.1.001

Optical measurement and analysis technique for spin-orbit torques

Sang-Jun Yun, Joon Moon, Hyun-Seok Whang, and Sug-Bong Choe*
Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

(Received 15 January 2015, Received in final form 10 February 2015, Accepted 11 February 2015)

We demonstrate here an optical measurement technique to quantify the spin-orbit torques. The magnetization dynamics induced by the spin-orbit torques with a sinusoidal current injection is measured by use of polar magneto-optical Kerr effect. The measured signal is then analyzed based on the Landau-Lifhshitz-Gilbert equation with consideration of the spin-orbit torques. The present measurement technique is applied to Pd/Co/Pt films and then, the longitudinal and transverse components of the spin-orbit torques are successfully quantified. The present optical technique provides an alternative way to quantify the spin-orbit torques.
Keywords : spin-orbit torque, optical measurement, magneto-optical Kerr effect

스핀-궤도 돌림힘의 광학적 측정 및 분석법

윤상준 · 문준 · 황현석 · 최석봉*
서울대학교 물리 · 천문학부, 서울시 관악구 대학동, 151-747

(2015년 1월 15일 받음, 2015년 2월 10일 최종수정본 받음, 2015년 2월 11일 게재확정)

본 연구에서는 스핀-궤도 돌림힘의 광학적 측정 방법을 개발하였다. 사인파 전류에 의해 발생하는 스핀-궤도 돌림힘은 해당 주파수와 두 배 주파수로 진동하는 자화의 운동을 유발하는데, 이로 인해 변화하는 자화의 수직 성분을 극광자기 효과를 이용해 측정하였다. 스핀-궤도 돌림힘이 추가된 란다우-리프쉬츠-길버트 방정식의 평형 조건으로부터, 스핀-궤도 돌림힘에 의한 유효 자기장을 정량적으로 분석하였다. 이러한 측정법을 Pd/Co/Pt 박막 시료에 적용하여, 스핀-궤도 돌림힘 효율의 종 방향과 횡 방향의 성분 값을 각각 나누어 측정하는데 성공하였다. 본 연구에서 제시한 측정 및 분석 방법은 기존의 전기적 측정에 비해 오류가 적기 때문에, 스핀-궤도 돌림힘을 측정하는 더 개선된 방법으로 사용할 수 있다.
주제어 : 스핀-궤도 돌림힘, 광학적 측정, 극광자기 효과

I. 서 론

전류에 의한 자화 상태의 조절 방법은 차세대 자성 메모리나 논리 소자 구현 등의 스핀트로닉스 연구 분야에서 주요한 연구주제로서 최근 관심을 많이 받고 있다. 인접한 자성층 혹은 자구벽이 있는 경우에 발생하는 스핀-전달 돌림힘(spin-transfer torque)[1, 2]과 더불어, 최근에는 단일 자성층에서도 발생하는 스핀-궤도 돌림힘(spin-orbit torque)[3, 4]이 발견되어 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 스핀-궤도 돌림힘의 측정을 위해, 사인파 전류를 자성 시료에 주입하여 발생하는 비정상 홀 효과(extraordinary Hall effect)를 전기적으로 측정하는 방법이 제시되었다[5-7]. 그러나 이러한 전기적 측정법에서는 작지 않은 평면 홀 효과(planar Hall effect)를 비롯하여 다양한 부수 효과가 함께 발생하기 때문에, 측정된 자성 신호를 스핀-궤도 돌림힘으로 해석하는데 있어서 주의 깊은 분석을 필요로 한다. 최근에는 이와 같은 부수 효과를 배제하기 위해 극광자기 효과(polar Magneto-optical Kerr effect)를 이용한 광학적 측정법이 제안되었다[8, 9]. 본 연구에서는 이러한 광학 자성 현미경을 통해 스핀-궤도 돌림힘을 측정하고 정량화하는 방법을 개발하였다. 이 측정 방법을 이용하여 Pd/Co/Pt 구조의 자성 시료의 스핀-궤도 돌림힘 효율을 측정하였다.

II. 배경 이론

전류가 $\hat{x}$ 방향으로 흐를 때 발생하는 스핀-궤도 돌림힘에

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-2-880-9254,
Fax: +82-2-884-3002, e-mail: sugbong@snu.ac.kr

의한 유효자기장 $\vec{H}_{SOT}$은 $\vec{H}_{SOT} = H_L(\hat{y}\times\hat{m}) + H_T\hat{y}$으로 주어진다[8]. 여기서, H_L은 전류에 종(longitudinal) 방향 유효자기장이고, H_T는 전류에 횡(transverse) 방향 유효자기장이고, $\hat{m}$은 자화 방향의 단위 벡터이고, $\hat{y}$는 전류에 횡 방향의 단위 벡터이다. 이러한 유효자기장을 포함한 란다우-리프쉬츠-길버트 방정식은 $\partial\hat{m}/\partial t = -\gamma\hat{m}\times(\vec{H}_{ext} + \vec{H}_{ans} + H_T\hat{y} - H_L\hat{m}\times\hat{y}) + \alpha\hat{m}\times\partial\hat{m}/\partial t$로 쓸 수 있다. 여기서, t는 시간이고, γ는 자기회전 비율이고, α는 길버트 감쇠 상수이고, $\vec{H}_{ext}$와 $\vec{H}_{ans}$는 각각 외부 자기장과 자기이방성에 의한 유효자기장이다. 시료의 수직 방향을 $\hat{z}$로 하였을 때, $\vec{H}_{ext} = H_x\hat{x} + H_y\hat{y} + H_z\hat{z}$으로 나타낼 수 있고, 수직 자기이방성에 의한 유효자기장은 $\vec{H}_{ans} = H_k m_z\hat{z}$로 나타낼 수 있다.

자화 벡터 $\hat{m}$을 $\hat{z}$ 축을 기준으로 하는 극좌표(θ, φ)로 나타내면, θ가 크지 않은 경우에, θ는 평형상태에서 아래와 같은 식을 만족한다.

$$\cos\theta = 1 - \frac{(H_x + H_L)^2 + (H_y + H_T)^2}{2(H_z + H_k)^2}. \quad (1)$$

주파수 ω를 가지고 흐르는 교류 전류 밀도가 $J_0\sin\omega t$로 주어진 경우에, 전류에 종(횡) 방향의 유효자기장 $H_{L(T)}$는 $H_{L(T)} = J_0\beta_{L(T)}\sin\omega t$와 같이 주어진다. 여기서, J_0는 전류 밀도 진폭, $\beta_{L(T)}$는 종(횡) 방향의 스핀-궤도 돌림힘 효율이다. 이 식을 식 (1)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\cos\theta = A_0 + A_\omega \sin\omega t + A_{2\omega}\sin^2\omega t \quad (2)$$

여기서, 각 항의 비례상수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} A_0 = 1 - \dfrac{(H_x^2 + H_y^2)}{2(H_k + H_z)^2} \\ A_\omega = -J_0\dfrac{H_x\beta_L + H_y\beta_T}{(H_k + H_z)^2} \\ A_{2\omega} = -J_0^2\dfrac{\beta_L^2 + \beta_T^2}{2(H_k + H_z)^2} \end{cases} \quad (3)$$

III. 실험방법

수직 자기 이방성을 가지는 1.8-nm Pd/0.33-nm Co/2.5-nm Pt 구조로 직류 마그네트론 스퍼터링 방법으로 열산화막이 있는 Si 기판 위에 증착하였다. 그리고 시료에 전류를 주입하기 위해 폭 5 μm의 마이크로 선과 이와 연결된 5-nm Ti/100-nm Au 전극을 광식각 과정을 통해 구조화하였다. 이 시료의 이방 자기장의 크기 H_k는 비정상 스핀홀 효과 측정법[10]을 통해 (930 ± 20) mT로 측정되었다.

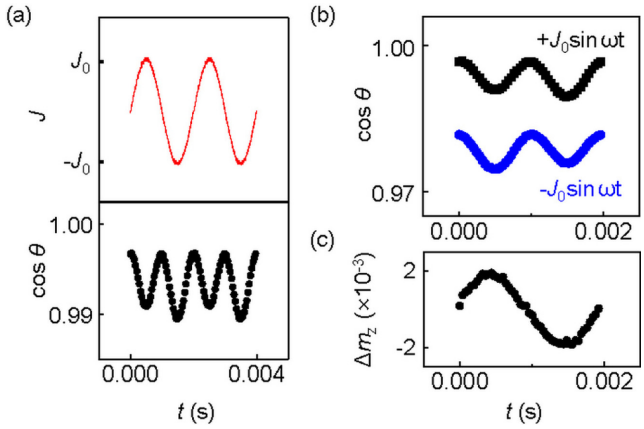

Fig. 1. (Color online) (a) Typical cosθ signal with injected sinusoidal current. Applied magnetic field H_x is 80 mT. (b) Measured signal when the current $\pm J_0\sin\omega t$ is injected into the sample. (c) The data Δm_z obtained by subtracting signals in (b) then divided by 2.

이 시료에 수평 방향의 외부 자기장을 인가하고 500 Hz 주파수의 사인파 전류를 주입하면 [Fig. 1(a)]와 같은 광자기 신호가 측정되는데, $\sin\omega t$와 $\sin^2\omega t$에 비례하는 신호가 섞여 나옴을 확인할 수 있다. 이 때 $\sin^2\omega t$에 비례하는 신호는 주입된 전류에 의한 줄(Joule) 열 효과에도 영향을 받기 때문에, 본 측정법에서는 $\sin^2\omega t$ 성분을 배제하고, $\sin\omega t$ 성분만 분석하였다. 참고로, cryostat을 이용하여 측정된 온도-저항 및 전류밀도-저항 상관관계로부터 추정되는 온도 증가는 약 2 K 정도로 작은 값이지만, 이 정도 온도 변화에 의해 발생하는 신호 변화는 약 1.6 %로서 스핀-궤도 토크에 의해 발생하는 신호 변화에 비해 무시하지 못할 정도로 큰 값으로 확인되었다. 본 측정에서는 $\sin^2\omega t$ 성분을 제거하기 위해서, [Fig. 1 (b)]와 같이 $+J_0\sin\omega t$와 $-J_0\sin\omega t$의 전류를 주입하여 각각 극광자기 효과를 측정하고, 측정된 두 신호의 차이 Δm_z를 구함으로써, [Fig. 1(c)]와 같이 $\sin\omega t$ 성분만을 추출하였다.

IV. 실험 결과 및 고찰

[Fig. 2(a)]는 H_x의 세기에 따른 $\sin\omega t$ 성분의 측정값을 보여주고 있다. 이 때, $H_y = 0$으로 고정하였다. 각 측정값의 진폭으로부터 [Fig. 2(b)]와 같이 A_ω와 H_x의 관계를 얻을 수 있다. 그림에서 관찰되는 선형 비례관계를 식(3)와 비교함으로써, β_L~131 × 10^{-12} mT · m^2/A의 값을 얻었다. 또한, [Fig. 2(c)]와 같이 H_y의 세기에 따른 $\sin\omega t$ 성분을 측정하여, [Fig. 2(d)]와 같이 A_ω와 H_y의 관계를 얻음으로써, β_T~55 × 10^{-12} mT · m^2/A의 값을 얻었다.

이 값들은 이제까지 논문들에서 보고된 다양한 시료들의 스핀-궤도 돌림힘 효율[3-9]에 비해 비교적 큰 값으로 확인되었다. 스핀-궤도 돌림힘은 기본적으로 표면 효과에 해당하기 때

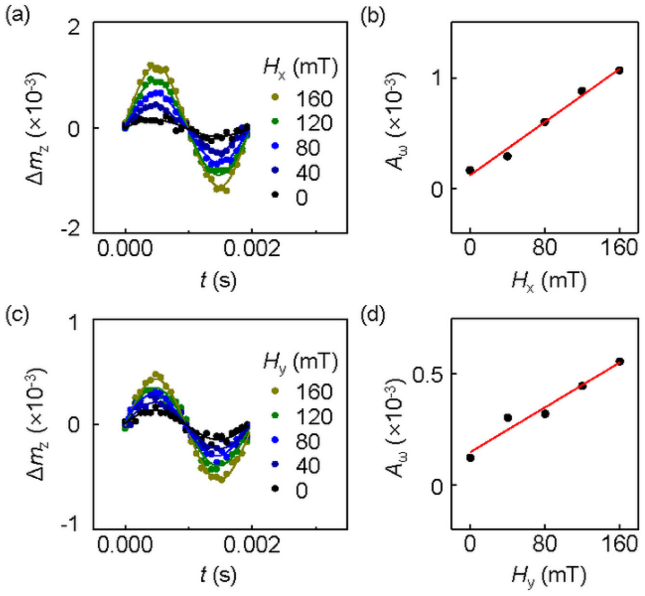

Fig. 2. (Color online) (a) Measured Δm_z with various H_x and constant $H_y = 0$. (b) The amplitude of a sinusoidal data in (a) with respect to H_x. The red line is the best linear fit. (c) Measured Δm_z with various H_y and constant $H_x = 0$. (d) The amplitude of a sinusoidal data in (c) with respect to H_y. The red line is the best linear fit.

문에, 자성층 두께에 대한 의존성을 가지며, 일반적으로 두께의 역수에 비례하는 것으로 알려져 있다[6, 8]. 본 연구에서 측정한 Pd/Co/Pt 박막의 자성 Co층의 두께는 0.33 nm로서, 일반적으로 연구되는 다른 시료의 자성층 두께보다 상당히 얇기 때문에, 이와 같이 큰 스핀-궤도 돌림힘 효율이 발생한 것으로 사료된다.

이러한 큰 스핀-궤도 돌림힘 효율을 검증하기 위하여 자화 역전 실험을 수행하였다. 시료에 주입되는 전류와 평행한 방향의 자화 성분이 있는 경우, 스핀-궤도 돌림힘에 의한 종 방향 유효자기장은 시료에 수직한 방향의 성분을 가지기 때문에 이

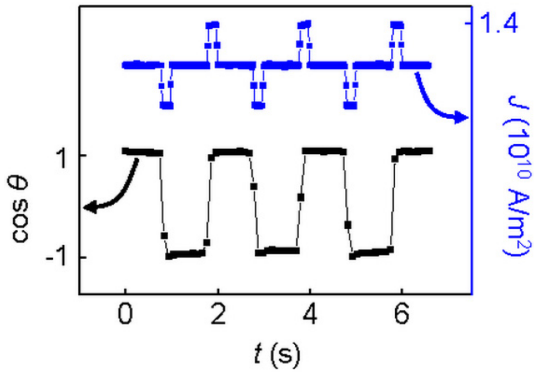

Fig. 3. (Color online) Measured polar Magneto-optical Kerr effect signal when successive current pulses with alternating polarity are injected. Applied magnetic field H_x is 500 mT and the current density J_0 of the pulses is 1.4×10^{10} A/m^2.

에 의해 자화 역전이 일어나게 된다. 이를 구현하기 위하여, H_x를 500 mT 인가한 상태에서, 시료에 전류 펄스를 주입하여 자화 역전이 발생하는 최소 전류밀도를 측정하였다. [Fig. 3]는 주입된 전류 펄스에 의해 자화 역전이 발생하는 결과를 보여주고 있다. 이러한 측정을 통해 자화 역전이 발생하는 최소 전류밀도는 1.4×10^{10} A/m^{2}으로 확인되었다. 이 최소 전류밀도는 기존의 보고[3, 4]에 비해 수 배 이하로 작은 값으로, 큰 스핀-궤도 돌림힘 효율을 검증하는 또 하나의 증거로 판단된다.

V. 결 론

광학적 측정법을 바탕으로 스핀-궤도 돌림힘을 정량화할 수 있는 측정 및 분석 방법을 개발하였다. 전류를 주입하여 발생하는 자화 현상의 진폭을 외부 자기장의 세기에 따라 측정하고, 스핀-궤도 돌림힘이 추가된 란다우-리프쉬츠-길버트 방정식과 비교함으로써, 스핀-궤도 토크의 효율을 측정하는데 성공하였다. Pd/Co/Pt 시료에서 측정된 스핀-궤도 토크의 효율은 매우 큰 값으로 확인되었으며, 이는 시료의 자성층 두께 의존성에 따르는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-003418).

References

[1] L. Berger, Phys. Rev. B **54**, 9353 (1996).
[2] G. Tatara and H. Kohno, Phys. Rev. Lett. **92**, 086601 (2004).
[3] I. M. Miron, K. Garello, G. Gaudin, P. J. Zermatten, M. V. Costache, S. Auffret, S. Bandiera, B. Rodmacq, A. Schuhl, and P. Gambardella, Nature **476**, 189 (2011).
[4] L. Liu, C. F. Pai, L. Yi, H. W. Tseng, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, Science **336**, 555 (2012).
[5] U. H. Pi, W. K. Kim, J. Y. Bae, S. C. Lee, Y. J. Cho, K. S. Kim, and S. Seo, Appl. Phys. Lett. **97**, 162507 (2010).
[6] J. Kim, J. Sinha, M. Hayashi, M. Yamanouchi, S. Fukami, T. Suzuki, S. Mitani, and H. Ohno, Nature Mater. **12**, 240 (2013).
[7] K. Garello, I. M. Miron, C. O. Avci, F. Freimuth, Y. Mokrousov, S. Blugel, S. Auffret, O. Boulle, G. Gaudin, and P. Gambardella, Nature Nanotech. **8**, 587 (2013).
[8] X. Fan, H. Celik, J. Wu, C. Ni, K. J. Lee, V. O. Lorenz, and J. Q. Xiao, Nat. Commun. **5**, 3042 (2014).
[9] S. Emori, U. Bauer, S. Woo, and G. S. D. Beach, Appl. Phys. Lett. **105**, 222401 (2014).
[10] K. W. Moon, J. C. Lee, S. B. Choe, and K. H. Shin, Rev. Sci. Instrum. **80**, 113904 (2009).