



Spin orbit torque detected by spin torque FMR in W/CoFeB bilayer

Changsoo Kim*, Kyoung-Woong Moon, Byong Sun Chun, Dongseok Kim, and Chanyong Hwang

Spin Convergence Research Team, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Republic of Korea

Received Jul 7, 2019; Revised Jul 11, 2019; Accepted Jul 11, 2019

Abstract Spin orbit torque would be applied as the next generation of MRAM, so many researchers are interested in related field. To make a more efficient device, electric current should convert into spin current with high efficiency. Moreover, it becomes important to measure efficiency of spin orbit torque accurately. We measured spin torque FMR of W/CoFeB hetero structure system with direct current. The efficiencies of the damping like torque and field like torque were measured by using the linewidth and on-resonance field proportional to direct current. In addition, we analyzed that a quadratic shift of the on-response field was caused by the Joule heating.

Keywords FMR, spin torque ferromagnetic resonance, spin orbit torque, spin Hall effect, Rashba effect, damping like torque, field like torque

서문

최근 삼성전자나 에버스핀 같은 회사들에 의하여 자성을 기반으로 하는 STT-MRAM (Spin Transfer Torque Magnetic Random Access Memory) 이 상용화되었다. MRAM 을 개발하려 하는 가장 큰 이유중의 하나는 비휘발성이라는 점 때문이다. MRAM 은 자화의 방향을 기본 bit 로 사용하기 때문에 전력공급이 중단 되더라도 데이터가 그대로 남아있는 장점이 있으며, 이 때문에 DRAM 보다 다양한 방면에서 응용될 것이라 기대되고 있다. 예를 들어, 비휘

발성 MRAM 을 사용하면 컴퓨터의 주기억장치와 보조기억장치를 통합할 수 있고, 이는 보조기억장치로부터 정보를 읽어들이는 때 Latency 를 줄일 수 있기 때문에 컴퓨터의 전반적인 성능이 크게 향상될 수 있다.

다음 세대의 MRAM 으로 주목받는 것은 SOT-MRAM (Spin Orbit Torque Magnetic Random Access Memory) 인데, 이는 스핀-궤도 상호작용으로 분극된 스핀을 강자성체에 전달하여 자화방향을 조절하는 원리를 이용한다. spin orbit torque 의 원인으로 꼽히는 것은 spin Hall effect 와 Rashba effect 가 있으며, 이들 효과는 spin orbit coupling 이 큰 heavy metal 물질에서 잘 나타난다. heavy metal 에 전류를 흘리게 되면 spin orbit interaction 에 의하여 전류 방향에 수직하게 전자스핀이 분극하게 되며, 분극된 전자스핀의 흐름을 spin current 라고 부른다. (Fig. 1A) 분극된 스핀은 heavy metal 에 맞닿아 있는 강자성체에 전달되고 이 스핀이 토크를 일으켜서 자화를 스위칭할 수 있다.¹⁻⁴ 적은 전류로 큰 spin current 를 발생시킬수록 소자를 구동시키는 전력소모가 적어지기에 어떤 물질에서 spin current 가 잘 생성되는지를 아는 것이 매우 중요해진다. heavy metal 에 전류를 흘리면 Oersted field 와 spin current 가 발생하며 이들은 모두 자성체를 움직이는 토크를 발생시킨다. 만약 자성체가 precession 하고 있는 주파수에 맞추어 전류를 흘리게 되면 강자성공명이 일어난다. 이 때, Oersted field 뿐만 아니라 spin current 에 의한 토크가 자성체에 가해지므로 Oersted field 만 작용할 때와는 다르게

* Address correspondence to: **Changsoo Kim**, Spin Convergence Research Team, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Republic of Korea, Tel: 82-42-868-5476; E-mail: cskim00@gmail.com

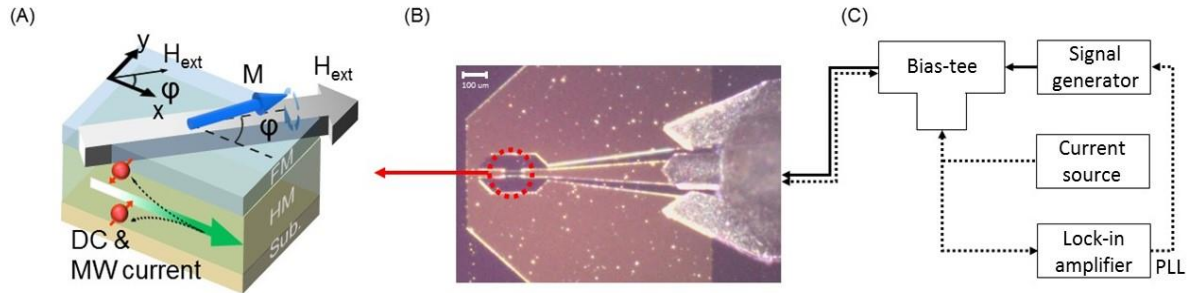


Figure 1 (A) Schematic diagram of DC tuned spin torque FMR. Direct and microwave currents flow along x-axis when an external magnetic field is applied with a tilted angle. (B) Picture of spin torque FMR device. CPWG is patterned for impedance matching. A GSG probe is in contact with the electrodes of device. (C) Electronic configuration of spin torque FMR.

precession 위상이 바뀌게 된다. 이런 위상정보를 분석하여 자성체에 가하여진 spin current 에 의한 토크의 크기가 얼마나 큰지를 판단할 수 있으며, 이 측정기법을 spin torque FMR 이라 부른다. 공명이 일어나는 자화의 precession 운동은 anisotropic magnetoresistance 와 spin Hall magnetoresistance 에 의하여 precession frequency 의 흔들리는 저항으로 나타난다. 이 저항들과 가해진 microwave 전류가 믹싱되면서 발생하는 기저대역의 전압으로 FMR 신호를 측정한다.⁵⁻⁹

microwave current 에 의하여 공명하고 있는 자성체에 직류전류를 흘려주게 되면 직류전류에 의하여 발생하는 spin current 와 Oersted field 가 자성체의 공명현상에 추가적인 변화를 일으킨다. spin current 에 의하여 발생하는 토크의 방향에 따라서 공명선폭이 변하기도 하며, 공명이 일어나는 자기장이 변하기도 한다. 우리는 이런 DC tuned spin torque ferromagnetic resonance 를 이용하여 *W/CoFeB* heterostructure 에서 나타나는 spin orbit torque 의 효율을 측정하였다

실험방법

***W/CoFeB* 박막 제작, 물성평가와 소자제작-** 샘플은 산화된 SiO_x 기판위에 dc 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 증착되었다. *CoFeB* 합금의 비율은 40:40:20 (%)이다. 증착된 샘플은 *SiO_x/W(5 nm)/CoFeB(3.5 nm)/Ta(1*

nm) 구조이다. *Ta* 층은 *CoFeB*가 자연적으로 산화되는 것을 막기 위하여 증착되었다.

Vibrating sample magnetometer로 측정된 포화자화는 943 kA/m이고, 자성층의 dead layer는 0.44 nm 이다. 4-프로브로 측정된 *W* 층과 *CoFeB* 층의 resistivity는 2와 $1.31 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ 로 나타났다.

샘플은 포토리소기법과 이온빔밀링기술을 이용하여 $20 \times 90 \mu\text{m}^2$ 사이즈로 제작되었다. *Ti(5 nm)/Au(65 nm)* 층이 전극으로 증착되었고 같은 기법으로 패터닝되었다.

DC tuned spin torque ferromagnetic resonance 실험- 패터닝된 샘플에는 Ground-Signal-Ground (GSG) 프로브에 의하여 microwave가 인가되었다. (Fig. 1B) Fig. 1C에 실험에 쓰이는 전자장비들을 간단히 나타내었다. 측정에 이용된 주파수는 6~10 GHz 영역이며 10~20 dBm 의 파워를 사용하였다. 자기장을 스위핑하면서 microwave를 amplitude modulation 하였으며 이에 의하여 변조된 FMR 신호는 Lock-in amplifier로 측정되었다. 또한, Bias-tee를 통하여 수 mA의 직류전류를 가하였다.

실험결과

핵자기공명과 전자스핀공명의 동역학을 기술하는 Bloch equation 의 자화는 제만 효과 (Zeeman effect)에 의하여, 스핀시스템의 불츠만 분포로 나타난 자화들의 기대값이다. 시

시스템을 이루는 각 스핀들은 기본적으로 고립되어 있으며 스핀간에 상호작용이 있더라도 그 크기가 제만 효과보다는 작다는 가정하에서 동역학이 기술된다. 이에 반해 강자성공명은 모든 스핀이 강한 교환상호작용으로 묶여있으므로 이보다 강한 에너지가 주입되는 않는 한. 유닛 단위당 자화는 모두 한방향을 향하는 것을 전제하고 있으며 잘 알려진 Landau-Lifshitz-Gilbert equation 으로 자화의 동역학을 설명한다. 특히, 강자성공명 같은 경우에는 모든 자화가 coherence 를 유지하며 외부자기장에 대하여 precession 운동을 하므로 자화들끼리의 상호작용을 나타낼 필요가 없다. 따라서 단일한 자화방향과 스핀-격자간의 상호작용만으로 모든 자화상태를 기술할 수 있다.

Spin orbit torque 에 의하여 공명하는 강자성체의 동역학은 Slonczewski torque 식이 추가된 Landau-Lifshitz-Gilbert equation 에 의하여 기술될 수 있고 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = -\gamma(\mathbf{m} \times \mathbf{H}_{eff}) + \alpha\left(\mathbf{m} \times \frac{d\mathbf{m}}{dt}\right) + \gamma \frac{\hbar}{2e\mu_0 M_s t_{FM}^{eff}} (\xi_{DL}(\mathbf{m} \times (\mathbf{s} \times \mathbf{m})) + \xi_{FL}(\mathbf{s} \times \mathbf{m}))$$

여기서 $\mathbf{m}$ 은 유닛 자화의 방향, $\mathbf{H}_{eff}$ 는 외부자기장과 이방성에 의한 자기장의 합이다. α 는 길버트 댐핑 상수이며, γ 는 전자스핀의 자기회전비율, $\hbar$ 는 플랑크 상수, e 는 전자의 전하량, μ_0 는 진공에서의 투자율이다. j_c 는 heavy metal 에 흐르는 전류밀도이며, M_s 는 자성체의 포화자화, t_{FM}^{eff} 는 자성체의 유효두께이다. $\mathbf{s}$ 는 spin orbit torque 에 의하여 분극되어 자성체에 입사한 스핀의 방향이다. ξ_{DL} 과 ξ_{FL} 은 damping like torque efficiency 와 field like

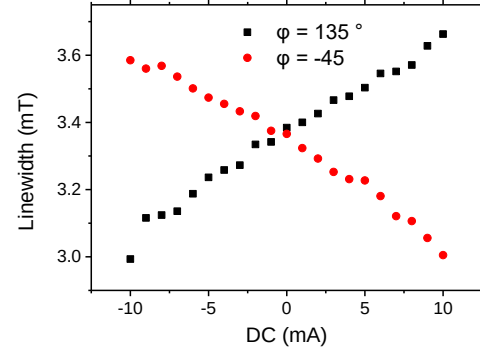


Figure 2 Direct current dependence of linewidth

torque efficiency 이며 전도전자가 분극하여 spin current 를 발생시키는 비율이다. 이들 비율이 클수록 같은 전류에 대비하여 더 많은 스핀이 분극하여 자성체에 공급되기 때문에 각 heavy metal 에서 이들 비율을 정확히 측정하는 것이 중요하다.

j_c 는 microwave 와 DC 전류밀도를 모두 내포하고 있는데, microwave 에 의하여 발생된 spin orbit torque 는 자화가 precession 하는 위상에 영향을 준다. 위 식에서 direct current 의 영향을 살펴보자면, damping like torque efficiency 와 관련된 항은 damping 을 더 크게 혹은 더 작게 만들 수 있다는 것을 알 수 있다. 강자성공명에서 감쇠현상은 선폭으로 나타나므로 직류전류를 흘려주면 선폭이 늘어나거나 줄어 들 수 있고, 이를 통하여 damping like torque efficiency 를 측정할 수 있다. 이는 다음과 같은 식으로 정리된다.^{10,11}

$$\xi_{DL} = \left(\frac{2e}{\hbar}\right) \left(\frac{\Delta H_{LW}}{\Delta I} \frac{1}{\frac{2\pi f \sin \phi}{\gamma(H_{ext} + 0.5M_{eff})\mu_0 M_s t_{FM}^{eff}}} \frac{R_{FM} + R_{HM}}{R_{FM}} A_{C,HM}\right)$$

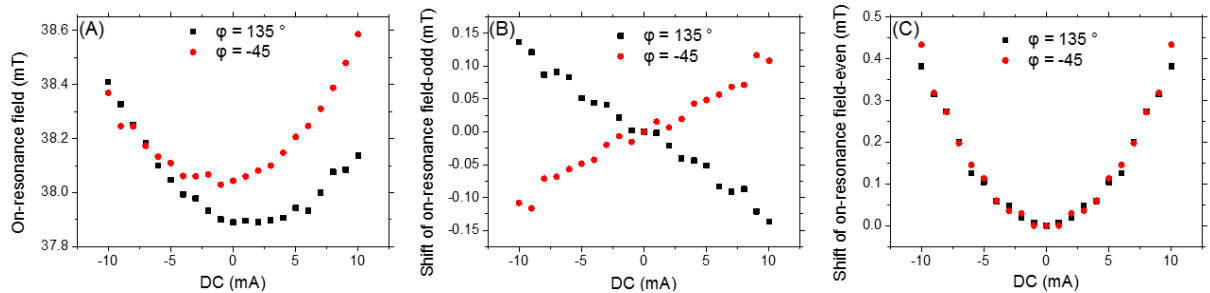


Figure 3 (A) Direct current dependence of on-resonance field. (B) Odd component and (C) even component of on-resonance field.

H_{LW} 은 선폭, I 는 소자에 가해주는 전류량, f 는 microwave 의 주파수, H_{ext} 는 외부 자기장 φ 는 직류전류의 방향과 자기장 사이의 각도, M_{eff} 는 유효자화이다. R_{FM} 과 R_{HM} 은 강자성체 층과 heavy metal 층의 저항이며 $A_{c,HM}$ 은 heavy metal 층의 단면적이다.

Fig. 2 에서 보여지는 것처럼 직류전류와 선폭이 선형적인 관계를 보여준다. 우리가 구한 damping like torque efficiency 는 -0.29 로 나타났다.

field like torque efficiency 와 관련된 항은 H_{eff} 와 비슷하게 작용하여 자화가 받는 유효자기장을 더 크게 혹은 더 작게 만들 수 있다. 그러므로 on-resonance 현상이 일어나는 외부자기장의 크기가 직류전류에 의하여 변조될 수 있다. 물론 직류전류는 spin current 뿐만 아니라 Oersted field 도 발생시키기 때문에 이 효과를 고려해주어야 한다. 이들의 관계를 다음처럼 정리할 수 있다.¹²

$$\xi_{FL} = \left(\frac{2e}{\hbar}\right) \left(\frac{\Delta H_R}{\Delta I \sin \varphi} \frac{1}{R_{FM} + R_{HM}} A_{c,HM} S - \frac{d_{HM}}{2}\right) \mu_0 M_s t_{FM}^{eff}$$

H_R 은 on-resonance 에서의 자기장, d_{HM} 은 heavy metal 층의 두께이다. S 는 소자의 구조와 관련있는데, heavy metal 층이 자성체보다 아래에 있으면 1, 그렇지 않으면 -1 이다.

하지만 실제실험에서는 Fig. 3A 에서 보는 것처럼 on-resonance field 와 직류전류의 관계가 단순히 선형적이지 않다. 이를 Fig. 3B 와 3C 에서 나타난 것처럼 odd 와 even component 로 분리할 수 있다. Fig. 3B 에서 나타난 직류전류와 on-resonance field 의 선형적인 관계를 통하여 field like torque efficiency 를 구할 수 있고 이는 -0.07 로 계산되었다.

고찰

우리가 $W/CoFeB$ hetero structure 측정한 damping like torque efficiency 와 field like torque efficiency 는 다른 연구그룹과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.¹¹ Fig. 3C 에서

관찰된 직류전류의 2 차항에 관계된 on-resonance field 의 이동은 소자의 Joule heating 에 의한 것으로 보인다. 소자의 총 저항은 760Ω 로 나타났는데, 여기에 직류전류를 흘릴 경우 소자의 온도가 증가되어 총 자화가 작아질 수 있기 때문이다. 자화가 작아지면 같은 주파수의 microwave 로 공명에 도달하기 위하여 더 많은 외부자기장이 필요하다. 이를 증명하기 위해 직류전류를 흘리지 않고 소자의 온도를 $12 K$ 올렸을 때 on-resonance field 가 약 $0.3 mT$ 증가하는 것을 관찰하였다. 비슷한 시스템에서 측정된 Bloch law 의 critical exponent 를 이용하면 상온으로부터 $10 K$ 정도 증가된 온도에서 자화가 1 % 정도 변하는 것을 알 수 있다.¹³ 이렇게 줄어든 자화와 Kittel equation 을 이용하면 공명조건에 도달하기 위하여 $0.3 mT$ 의 외부자기장이 추가적으로 필요한 것을 계산할 수 있으며 이는 직류전류가 $7 mA$ 흐를 때 나타나는 자기장 변화량과 같다.¹²

다른 bilayer 시스템에서는 $W/CoFeB$ 에서와 같은 Joule heating 이 명확하게 보이지 않는데, 이는 W 이나 $CoFeB$ 가 다른 heavy metal 이나 자성체보다 비교적 높은 비저항을 가지고 있기 때문인 것으로 추측된다.

결론

우리는 spin torque FMR 을 이용하여 $W/CoFeB$ bilayer 시스템에서 damping like torque efficiency ($\xi_{DL} = -0.29$)와 field like torque efficiency ($\xi_{FL} = -0.07$)를 평가하였으며 이들은 다른 연구그룹과 비슷한 값을 보였다. 직류전류와 선폭은 선형적인 관계가 잘 나타났으며 직류전류와 on-resonance field 의 odd component 또한 선형적인 관계가 나타났다. on-resonance field 의 even component 는 Joule heating 때문에 자화가 줄어드는 효과에 의하여 나타난 것으로 추측된다.

감사의 글

This research was supported by Future Materials Discovery Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT(MSI) (2015M3D1A1070462) and by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant (No. CAP-16-01-KIST) by MSIP.

References

1. J. E. Hirsch, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1834 (1999)
2. J. Sinova, S. O. Valenzuela, J. Wunderlich, C. H. Back, and T. Jungwirth, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 1213 (2015)
3. K. Garello, I. M. Miron, C. O. Avci, F. Freimuth, Y. Mokrousov, S. Blgel, S. Auffret, O. Boulle, G. Gaudin, and P. Gambardella, *Nat. Nanotechnol.* **8**, 587 (2013)
4. X. Fan, J. Wu, Y. Chen, M. J. Jerry, H. Zhang, and J. Q. Xiao, *Nat. Commun.* **4**, 1799 (2013)
5. M. Harder, Y. Gui, and C.-M. Hu, *Phys. Rep.* **661**, 1 (2016)
6. A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and S. Yuasa, *Nature* **438**, 339 (2005)
7. J. C. Sankey, Y.-T. Cui, J. Z. Sun, J. C. Slonczewski, R. A. Buhrman, and D. C. Ralph, *Nat. Phys.* **4**, 67 (2008)
8. H. Kubota, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and Y. Suzuki, *Nat. Phys.* **4**, 37 (2008)
9. L. Liu, T. Moriyama, D. C. Ralph, and R. A. Buhrman, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 036601 (2011)
10. K. Ando, S. Takahashi, K. Harii, K. Sasage, J. Ieda, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 036601 (2008)
11. K.-U. Demasius, T. Phung, W. Zhang, B. P. Hughes, S.-H. Yang, A. Kellock, W. Han, A. Pushp, and S. S. P. Parkin, *Nat. Commun.* **7**, 10644 (2016)
12. C. Kim, D. Kim, B. S. Chun, K.-W. Moon, and C. Hwang, *Phys. Rev. Applied* **9**, 054035 (2018)
13. K.-M. Lee, J. W. Choi, J. Sok, and B.-C. Min, *AIP Adv.* **7**, 065107 (2017)