

## THz Study of Ferromagnetic Metallic Films

Dong-Hyun Kim\*

Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received 15 October 2017, Received in final form 22 October 2017, Accepted 23 October 2017)

THz technique, which is considered to have great potential in exploring fundamental magnetic properties, is briefly reviewed with a special focus on metallic ferromagnetic film samples. Although numerous works have been carried out for semiconductor or insulator materials, only recently a few studies have been devoted to THz study of metallic ferromagnetic film systems. THz investigation related with magnetotransport and Gilbert damping parameter is introduced.

**Keywords** : spintronics, ultrafast spin dynamics, THz

## 강자성 금속박막의 THz 연구

김동현\*

충북대학교 물리학과, 충북 청주시 서원구 충대로1, 28644

(2017년 10월 15일 받음, 2017년 10월 22일 최종수정본 받음, 2017년 10월 23일 게재확정)

자성의 근원적 특성을 연구하는데 큰 잠재력을 가졌다고 보여지는 THz 기술에 대한 간단한 리뷰를 금속 강자성 박막시료에 대한 활용을 염두에 두고 작성하였다. 반도체나 부도체에 대해서는 많은 연구가 수행되어 왔지만, 금속 강자성체에 대한 연구는 최근에야 비로소 몇몇 연구들이 수행되고 있다. 자기수송 및 Gilbert 소실상수와의 연관성을 갖는 THz 연구를 소개한다.

**주제어** : 스핀트로닉스, 초고속 스핀동역학, 테라헤르츠

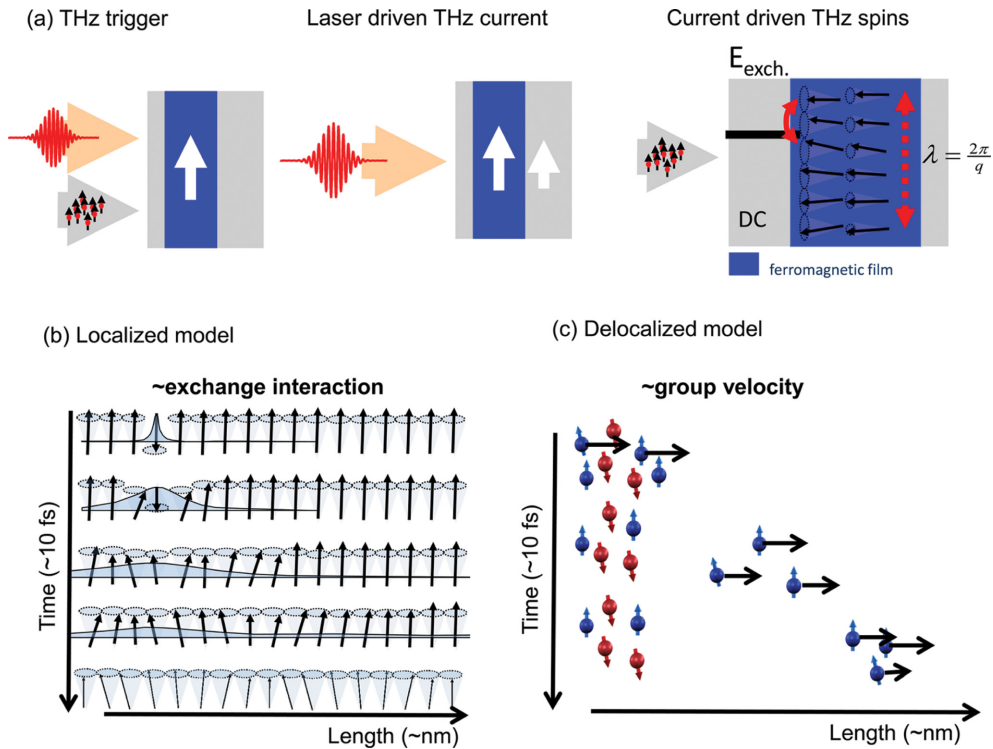
### I. 서 론

최근 스핀트로닉스 소자들의 초고속 구현을 위한 특성이 활발히 연구되면서, 피코초 이하 시간스케일의 스핀-전자-격자-광 상호작용이 큰 관심을 받고 있다[1-3]. 특히 광에 의해 여기된 강자성 시스템에서 스핀-전자-격자간 상호작용을 거치며 피코초 및 그 이하의 비평형 시간스케일에서 어떻게 완화되는가에 대한 근원적인 질문에 대한 해답을 찾고자 하는 탐구가 집중적으로 진행되고 있다[4, 5]. 극초단 레이저에 의해 제공된 에너지는 전자와 스핀에서 특정시간 이후 격자로 이동되며, 이 과정에서 스핀 시스템은 다양한 동역학 현상을 발현한다. 여기된 스핀 시스템은 급격히 온도가 상승한 후 격자로 에너지를 전달하면서 냉각되는 데, 그 과정에서 시스템의 자화가 탈자(demagnetization)되었다가 재자화(remagnetization)

된다. 초고속 비평형 상태에서의 탈자-재자화 동역학은 THz 영역의 방사를 가져오며[6], THz 광이 상기의 이유로 자기적 여기상태 에너지와 기본적으로 연관이 깊기 때문에 자성시스템을 이해하고 분석하는데 THz 기술은 상당히 유용하게 쓰일 수 있는 가능성을 갖는다. THz 광과 스핀동역학간의 관계는 Fig. 1에[6] 간단히 설명되어 있다.

### II. 본 론

최근, THz의 전기장이 직접 자성시스템에 영향을 주어 자성특성을 변화시키고 비평형 시간스케일에서 스핀상태를 제어할 수 있다는 연구가 보고되었다[7, 8]. 또한 가시광 레이저펄스 또는 스핀전류 펄스에 의해 자성시스템에서 THz 스핀동역학이 발생함도 보고되었다[9, 10]. 따라서, 초고속 비평형 시간스케일의 스핀동역학을 이해하는데에 THz 영역의 측정분석은 매우 결정적인 정보를 제공하므로, 이에 대한 체계적인 연구가 절실히 필요하다. THz 실험의 가장 큰 어려움은



**Fig. 1.** (Color online) (a) THz dynamics: Spin current and spin wave. (b) Spin wave relaxed from excited state in localized model. (c) Case of delocalized model. Figure is from J. Walowski and M. Munzenberg, *J. Appl. Phys.* 120, 140901 (2016) [6].

THz 광 소스를 얻기 힘들다는데에 있었으나, 최근 기술의 발전으로 국내에도 수 곳의 THz 광원이 건설되었다. 그 중 포항 방사광가속기(PAL)의 THz 빔라인은 사용자지원 장비로서 안정적으로 동작하고 있다[11]. PAL Fs-THz 빔라인은 75 MeV LINAC에서 발생하는 THz 방사를 이용하여 0.1 nC 빔전하 및 0.9  $\mu$ J 펄스당 에너지를 갖는다. 현재는 약 3 THz 영역내에서 200 fs 이하의 펄스를 제공하고 있고 Time-domain spectroscopy(TDS) 및 Optical-pump/THz-probe 실험을 제공하고 있어 앞으로 많은 자성연구자들의 활용이 기대된다.

한편, 불행히도 현재까지의 THz 특성연구는 주로 반도체 및 부도체에 대해 수행되어 왔다. 광으로 여기되어 밴드갭을 넘어선 전자는 차츰 전도밴드의 아래쪽으로 이동하며 안정화되면서 THz 광을 방사하는데, 대부분의 측정실험은 이러한 메커니즘에 기반하여 진행되어 왔다[12]. 최근의 강자성 물질에 대한 실험도 밴드갭이 존재하는 산화물기반의 자성 물질에 대해서 주로 수행되었다[7-9]. 그러나 밴드갭이 존재하지 않는 금속물질에 대해서는 연구가 크게 부족한 실정이며, 향후 진행될 금속기반 스핀트로닉스 소자연구를 위해서는 금속에 대한 체계적이고 안정적인 THz 측정분석법이 필요하다.

강자성 금속 시스템에 대한 THz 연구는 최근에야 시작되

고 있는데, THz 광을 프로브로 사용하여 NiCoFe/Cu 다층박막 시스템에서 전도전자의 스핀의존 특성을 분석한 연구가 보고된 바 있다[13]. 스핀밸브 시스템에서 구현된 THz 측정분석법을 통해 스핀-의존 산란에 의한 거대자기저항에서 전도전자의 스핀비대칭도가 기존에 알려져 있던 것보다 훨씬 큰 기여를 한다는 사실이 밝혀졌다. 이 결과는 THz 광을 활용한 금속 자성체 연구에 중요한 진전을 보여주는 것이다. THz 광 분석법의 기본은 광학전도도를 구하는 작업인데, 이렇게 구한 전도도들이 자기수송 현상 분석에 필요한 전도도 정보를 제공할 수 있게 된다.

THz TDS 측정은 일반적으로 투과형태로 진행되며 단일 사이클의 THz 펄스가 시료를 투과한 후 ZnTe 등의 특정 결정을 통해 측정된다. ZnTe 결정의 경우 0.1~3 THz 영역의 THz 광 영역에 사용될 수 있다. THz 광의 편광 또한 중요한 파라미터이지만 국내 셋업들의 경우 대부분 선형편광 THz 광을 제공한다. 시료에 수직입사한 THz 전자기 펄스의 경우 자기장 방향이 시료면 방향에 평행하고 THz 펄스의 진행방향에 수직이 된다. 입사 및 투과된 THz 펄스 프로파일을 푸리에 변환하면 주파수영역의 THz 성분을 볼 수 있다. 이 때 기관 단일의 신호도 측정을 해야 시료의 TDS 신호를 뽑아낼 수 있게 된다. 금속박막의 전도도는 Tinkham 방정식에 의해 다음과 같이 주어진다[13-15].

$$\frac{E(\omega)}{E_0(\omega)} = \frac{n+1}{n+1+Z_0\hat{\alpha}(\omega)} \quad (1)$$

이 때  $Z_0$ 는 진공의 임피던스이고  $n$ 은 기판의 굴절율이다. 금속의 경우 Drude 전도모델을 이용해 전도도를 근사할 수 있으며, 전도도  $\hat{\alpha}(\omega) = \sigma_{dc}/(1 - i\omega\tau)$ 의 실수부와 허수부의 비는 모든 진동수 영역에서 진동수에 선형으로 비례하며  $\text{Im}(\hat{\sigma}/\text{Re}(\hat{\sigma})) = \omega\tau$ 가 된다. 이 관계식을 통해 산란시간  $\tau$ 를 구할 수 있게 된다. 금속의 경우 산란시간  $\tau$ 가 피코초 이하에서 형성되며 전기적 방법으로 이를 측정하기가 거의 불가능하며, THz 광을 이용한 측정법이 이 때 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

THz 광을 활용한 스핀동역학 연구 중 또 하나의 큰 가능성을 갖는 것은 펨토초 레이저 등에 의해 초고속으로 여기된 강자성체가 보이는 스핀 세차운동과 관련된 부분이다. 스핀 세차운동은 보통 수십~수백 GHz 영역으로 sub-THz 영역에 해당하지만, 반강자성체 등과 같은 높은 자기이방성을 갖는 물질은 THz 영역에 해당하는 스핀세차운동이 나타날 수 있다. 이 경우 세차운동 진폭의 완화와 함께 필연적으로 THz 광의 방사가 나타나야 한다[16]. 펨토초 펄스에 의한 탈자화 및 세차운동 과정에서 방사되는 THz 광은[17], 특히 Gilbert 소실상수를 결정하는 방법이 될 수 있으며 강자성공명(Ferromagnetic resonance, FMR)에서 구해지는 값과 서로 상보적으로 활용될 수 있다. 소실상수가 크면 그에 비례하여 THz 방출이 커져야 하며, 실제로 FMR로 구한 소실상수와 THz 측정법으로 구한 소실상수가 크게 다르지 않음이 실험적으로 보고된 바 있다[17].

### III. 결 론

금속 강자성체에 대한 THz 연구는 최근 막 시작되는 단계이다. 강자성 동역학 메커니즘이 근원적으로 THz 영역과 깊게 연결되어 있어 THz 분석법을 자성체 연구에 활용하는 것이 앞으로 스핀동역학 연구에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 현재까지는 주로 TDS 측정 및 펨토초 레이저 펄스에 의해 여기된 시료에 대한 펄프-프로브 측정이 주를 이루고 있지만, 앞으로는 훨씬 더 다양하고 새로운 방법이 개발될 수 있는 여지가 충분한 것으로 판단된다. 현재, 포항가속기연구소를 포함하여 국내에 설치되었거나 설치되고 있는 THz 측정장비의 활발한 활용과 관련연구 공유를 통해 THz 활용 자성학 연구 네트워크가 충실해질 수 있기를 개인적으로 희망한다.

### 감사의 글

이 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내

연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] E. Beaurepaire, J.-C. Merle, A. Daunois, and J.-Y. Bigot, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4250 (1996).
- [2] I. Radu, K. Vahaplar, C. Stamm, T. Kachel, N. Pontius, H. A. Dürr, T. A. Ostler, J. Barker, R. F. L. Evans, R. W. Chantrell, A. Tsukamoto, A. Itoh, A. Kirilyuk, Th. Rasing, and A. V. Kimel, *Nature* **472**, 205 (2011).
- [3] J.-H. Shim, Ph.D. Thesis, Chungbuk National University, Korea (2015).
- [4] C. H. Kim, J.-H. Shim, K. M. Lee, J.-R. Jeong, D.-H. Kim, and D. E. Kim, *Sci. Rep.* **6**, 22054 (2016).
- [5] J.-H. Shim, A. A. Syed, C.-H. Kim, K. M. Lee, S.-Y. Park, J.-R. Jeong, D.-H. Kim, and D. E. Kim, *Nature Comm.* **8**, 796 (2017).
- [6] J. Walowski and M. Munzenberg, *J. Appl. Phys.* **120**, 140901 (2016).
- [7] A. H. M. Reid, Th. Rasing, R. V. Pisarev, H. A. Dürr, and M. C. Hoffmann, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 082403 (2015).
- [8] S. Baierl, M. Hohenleutner, T. Kampfrath, A. K. Zvezdin, A. V. Kimel, R. Huber, and R. V. Mikhaylovskiy, *Nature Photon.* **3**, 1(2016).
- [9] T. Kampfrath, M. Battiato, P. Maldonado, G. Eilers, J. Nötzold, S. Mährlein, V. Zbarsky, F. Freimuth, Y. Mokrousov, S. Blügel, M. Wolf, I. Radu, P. M. Oppeneer, and M. Münzenberg, *Nature Nanotech.* **8**, 256 (2013).
- [10] C. Vicario, C. Ruchert, F. Ardana-Lamas, P. M. Derlet, B. Tudu, J. Luning, and C. P. Hauri, *Nature. Photon.* **7**, 720 (2013).
- [11] J. Park, C. Kim, J. Lee, C. Yim, C. H. Kim, J. Lee, S. Jung, J. Ryu, H.-S. Kang, and T. Joo, *Rev. Sci. Instr.* **82**, 013305 (2011).
- [12] G. Carpintero, E. Garcia-Munoz, H. Hartnagel, S. Preu, and A. Räisänen, *Semiconductor Terahertz Technology*, John Wiley & Sons (2015).
- [13] Z. Jin, A. Tkach, F. Casper, V. Spetter, H. Grimm, A. Thomas, T. Kampfrath, M. Bonn, M. Kläui, and D. Turchinovich, *Nature Phys.* **6**, 761 (2015).
- [14] K. P. H. Lui and F. A. Hegmann, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3478 (2001).
- [15] R. Ulbricht, E. Hendry, J. Shan, T. F. Heinz, and M. Bonn, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 543 (2011).
- [16] J. Shen, X. Fan, Z. Chen, M. F. DeCamp, H. Zhang, and J. Q. Xiao, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 072401 (2012).
- [17] E. Beaurepaire, G. M. Turner, S. M. Harrel, M. C. Beard, J.-Y. Bigot, and C. A. Schmuttenmaer, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 3465 (2004).