자성 다층박막의 계면이 미치는 길버트 감쇠 거동

김보성*, 조영준, 김준회, 양재학, 김상국

National Creative Research Initiative Center for Spin Dynamics and Spin-Wave Devices, Nanospinics Laboratory, Research Institute of Advanced Materials, Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, South Korea

1. 서론

최근 소자의 소형화, 고집적화를 지향함에 따라 소자를 이루는 박막 두께도 점점 얇아지는 상황에서, 박막을 이루는 물질이 갖는 물리상수의 검증이 중요하게 되었다. 특히 박막의 두께가 수 나노미터 수준 이하로 얇을 경우 물리상수들이 기존 덩어리 (bulk) 값과 상이한 값을 가질 수 있음이 보고되고 있다. 대표적으로 자성 다층박막을 이루는 자성층의 두께와 이에 인접한 물질의 종류에 따라 자성층의 포화자화 (magnetization, M)와 길버트 감쇠상수 (Gilbert damping constant, α) 값의 변화가 관찰된 바 있다.[1,2] 특히 길버트 감쇠상수는 자성체 내에서 일어나는 스핀동역학 (spin dynamics) 뿐만 아니라 자화반전에 미치는 중요한 물리상수로, 스핀트로닉스 소자의 설계와 제작에 있어서 필수적으로 알아야 할 값이다. 본 연구에서는 자성 다층박막에서 자성층의 두께, 그리고 이에 인접한 물질의 종류에 따른 길버트 감쇠상수의 변화를 관찰하기 위해 NM/Py/NM (Py: 퍼멀로이, NM: 비자성 금속) 삼층박막 시료를 제작하였고, 길버트 감쇠상수의 변화를 측정하기 위하여 강자성 공명 (ferromagnetic resonance, FMR) 측정을 진행하였다.

2. 실험방법과 결과

NM/Py/NM 시료는 10 mm × 10 mm 크기의 실리콘 웨이퍼 기판에 바탕 압력 (base pressure) 10^{-8} Torr 이하의 고진공 스퍼터링 방법으로 상온에서 제작하였다. 실리콘 기판 위에 박막의 성장을 돕기 위해 5 nm 두께의 Ta을 씨앗층 (seed layer)으로 먼저 증착하였다. 비자성층은 Pt, Ta, Ti, Cu 원소를 사용하였으며 모든 시료에 대해 5nm 두께로 증착하였다. Py의 두께 (d)는 3 nm부터 10 nm까지 변화시켰다. 강자성 공명은 벡터 네트워크 분석기 (Vector Network Analyzer, VNA)를 이용하여 측정하였으며, 공명 주파수 (resonance frequency)는 20 GHz까지, 외부 자기장은 0.4 T까지 변화시켜가며 측정하였다. 측정 결과, Py의 두께가 감소함에 따라 유효 포화자화 (effective magnetization, M_{eff})가 감소하고 길버트 감쇠상수가 증가함을 볼 수 있었다. 길버트 감쇠상수의 증가량은 NM = Pt일때 가장 크게 나타났다. Ta은 Pt의 경우보다는 작지만 조금 증가하는 경향을 보였으며, Ti, Cu에서는 거의 변화하지 않는 것을 관찰할 수 있었다.

3. 고찰

Py의 두께에 따른 유효 포화자화의 감소는 이종 접합된 박막계면이 갖는 표면자기 이방성 (K_s) 으로 설명될 수 있으며, 다음과 같은 식으로 해석할 수 있다.[3]

$$M_{eff} = M_s - \frac{2K_s}{M_s d} \qquad (1)$$

여기서 M_{eff}는 시료의 Py가 갖는 유효 포화자화, M_s는 bulk Py의 포화자화, K_s는 표면자기이방성, 그리고 d는 Py의 두께이다. 식(1)을 통해 각 시료가 갖는 K_s와 M_{eff} 를 얻을 수 있었다. 한편 길버트 감쇠상수의 변화는 Py와 인접한 NM의 종류와 Py의 두께에 의존하여 Py 내부 스핀의 각운동량이 소실되는 정도가 달라짐을 의미한

다. 본 경향성은 스핀-펌핑(spin-pumping) 현상으로 이해될 수 있으며, 아래와 같은 수식으로 설명할 수 있다.[4]

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{\gamma\hbar}{4\pi M_s d} / g_{mix}^{\uparrow\downarrow} \qquad (2)$$

여기서 α는 측정된 길버트 감쇠상수이며, α_0는 벌크 Py에서의 길버트 감쇠상수, $4\pi M_s$는 Py의 포화자화, γ는 자이로 상수, $\hbar$ 는 2π로 나눈 플랑크 상수, $g_{mix}^{\uparrow\downarrow}$는 NM의 spin mixing conductance를 각각 의미한다. 측정된 길버트 감쇠상수의 증가량 ($\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$) 과 $g_{mix}^{\uparrow\downarrow}$의 d에 따른 양상을 M_{eff}와 K_s로 설명 가능함을 보였으며, 이것은 자성층의 두께가 수 나노미터 이내일 경우 $g_{mix}^{\uparrow\downarrow}$가 기존에 알려진 모델에서 벗어나 거동한다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 NM/Py/NM삼층박막을 제작하여 비자성층의 종류와 Py의 두께를 바꾸어가며 강자성 공명을 측정하였고 이를 통해서 표면자기이방성과 길버트 감쇠상수를 측정하였다. Py의 두께가 얇아질수록 유효 포화자화가 감소함과 동시에 길버트 감쇠상수가 증가함을 알 수 있었다. 또한 M_{eff}와 K_s를 이용한 $g_{mix}^{\uparrow\downarrow}$을 분석함으로써 기존 모델로 설명하기 어려운 $g_{mix}^{\uparrow\downarrow}$의 경향을 관찰할 수 있었고 이는 박막두께의 감소에 따른 계면효과가 커지기 때문이다. 본 연구는 얇은 자성층에서 계면이 스핀동역학에 영향을 줌을 보여주는 한편 기존에 수행되어온 스핀-펌핑 현상을 이용한 $g_{mix}^{\uparrow\downarrow}$측정과 inverse spin Hall effect를 이용한 spin Hall angle측정 등의 연구에 있어서도 자성층의 두께가 충분히 얇다면 계면효과를 반드시 고려해야 함을 의미한다.

5. 참고문헌

[1] S. Mizukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys., 40, 580 (2001).

[2] J. P. Nibarger, R. Lopusnik, Z. Celinski, and T. J. Silva, Appl. Phys. Lett., 83, 93 (2003).

[3] Y.-K. Kim and T. J. Silva, Appl. Phys. Lett., 68, 2885 (1996).

[4] Y. Liu, Z. Yuan, R. J. H. Wesselink, A. A. Starikov, and P. J. Kelly, Phys. Rev. Lett., 113, 207202 (2014).