Sign Inversion of Anomalous Hall Effect in heavy metal/permalloy bilayer structures

Mingu Kang[1*], Seung-heon Chris Baek[1,2], Kab-Jin Kim[3] and Byong-Guk Park[1]
[1]Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea
[2]School of Electrical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea
[3]Department of Physics, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

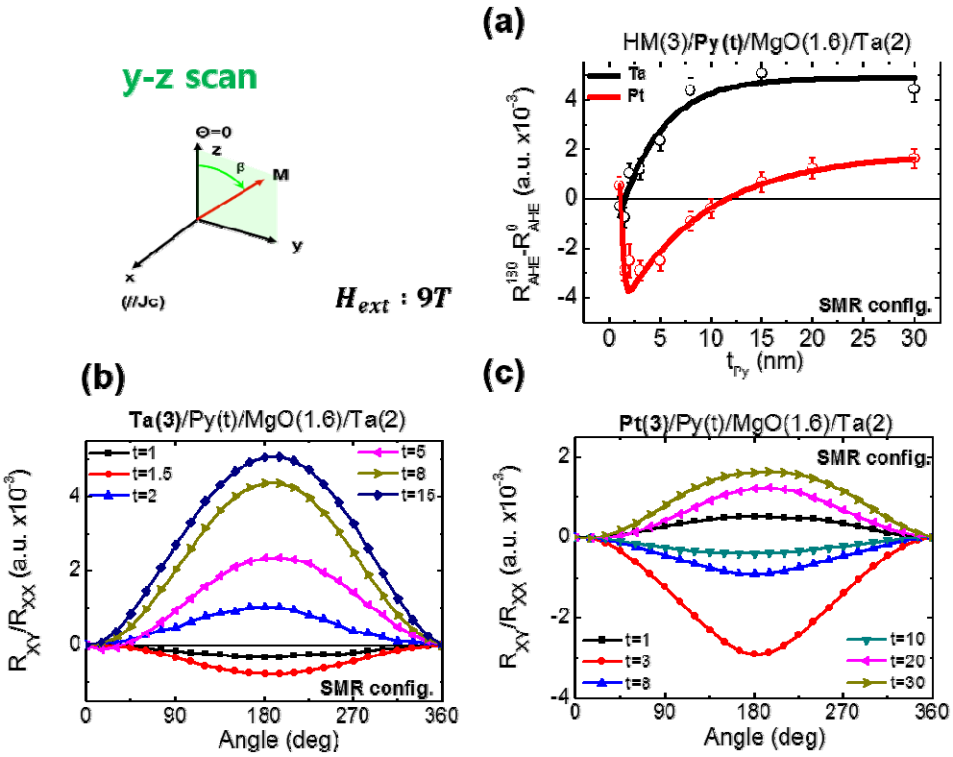
비정상 홀 효과는 전기장과 강자성 금속의 자화 모두에 수직한 전류의 생성을 의미하며 강한 스핀-오빗 결합과 스핀 편극된 전자 사이의 상호작용으로 설명된다. 이처럼 비정상 홀 효과와 스핀 수송 현상간의 밀접한 연관성이 밝혀지면서 비정상 홀 효과에 대한 새로운 관심과 연구가 진행되어 왔다. 그러나 자성 전이 금속들에 대한 이론적, 실험적 연구가 집중적으로 진행되어 온 것과 달리 전이 합금에 대한 연구는 거의 이뤄지지 않았다. Permalloy(Py,Ni81Fe19) 박막은 비정상 홀 비저항과 홀 각도가 다른 자성 전이 금속 및 합금보다 작기 때문에 side-jump나 skew scattering등의 외부의 기여를 분리시키고 새로운 물리적 현상의 메커니즘을 연구하는데 적합하다[1,2].

본 연구에서는 heavy metal(HM)/permalloy(Py)/MgO/Ta 구조에서 HM의 스핀 홀 각도의 부호에 의존하는 홀 저항 신호를 보고함으로써 자성 계면으로부터 발생하는 스핀 의존 산란과 중금속 물질에서 발생하는 스핀 홀 효과의 결합된 거동에 기초한 비 편재된 비정상 홀 효과 이론을 실험적으로 증명하고자 한다. 또한 해당 구조에서 각도에 의존하는 자기저항 신호를 측정함으로써 Py 물질의 스핀 수송 특성에 대해 보고하고자 한다.

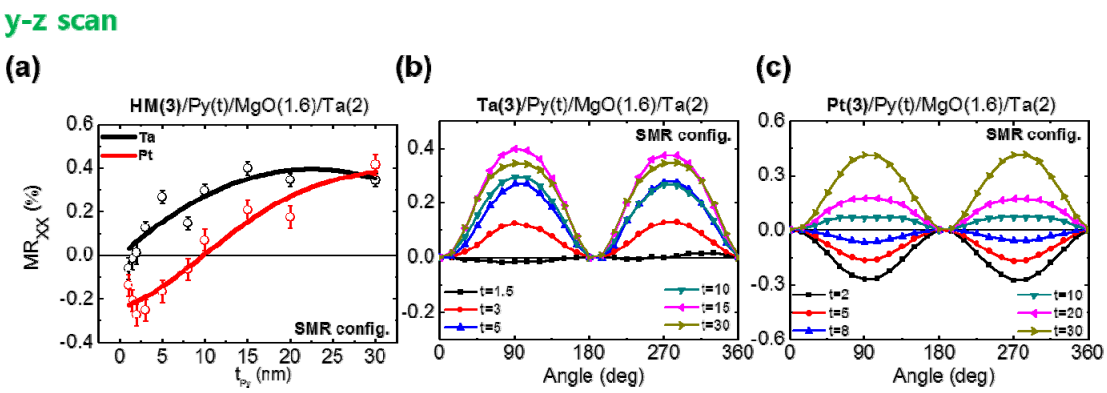
비정상 홀 전압의 생성에 있어 자성 계면의 기여도 차이를 주고자 Py 박막을 1nm에서 30nm까지 증가시키며 증착하였으며 9T의 외부자기장에 대해 x방향으로 전하전류를 인가해주면서 x-y, y-z, x-z면으로 자화를 회전시키며 y방향에 생성되는 홀 전압을 측정해 각도 의존 비정상 홀 저항을 구하였고 x방향의 전압을 측정해 각도 의존 자기저항을 구하였다.

Py 두께에 따른 y-z scan 비정상 홀 저항 데이터인 그림 1.(a)을 보면 Ta/Py의 경우, Py 두께가 1.5~2nm인 영역에서 negative에서 positive로 비정상 홀 저항 신호의 부호 반전이 한번 일어나며 Pt/Py의 경우, Py 두께가 1~1.5nm인 영역에서 positive에서 negative로 한번, 10~15nm인 영역에서 negative에서 positive로 총 두 번 부호 반전이 일어난다. 비정상 홀 저항 신호는 자화가 +z일 때와 –z일 때의 저항 차로 정의하였으며 그림 1.(b),(c)는 Ta/Py, Pt/Py 각각의 각도 의존 비정상 홀 저항 신호이다. 중금속 물질에서 발생하는 스핀 홀 효과와 역 스핀 홀 효과가 연속으로 일어나는 메커니즘에 의한 비정상 홀 신호의 경우, 스핀 홀 각도의 제곱에 비례하기 때문에 부호의 반전이 일어나지 않는다[3]. 때문에 그림 1의 비정상 홀 저항 신호의 부호 반전은 자성 계면에서 발생하는 스핀 의존 산란에 의해 생성되며 중금속의 스핀 홀 각도에 비례하는 스핀 편극된 홀 전류에 의한 것으로 보인다.

Py 두께에 따른 y-z scan 자기저항 데이터인 그림 2.(a)를 보면 Py두께 10nm영역에서 Pt/Py의 자기저항 값의 부호 반전이 일어남을 알 수 있다. 그림2.(c)의 Pt/Py의 Py 두께가 8nm이하인 자기저항 신호는 기존에 보고된 스핀 홀 자기저항(SMR)신호와 일치한다. 그러나 Py 10nm 이상에서 보이는 반전된 자기저항 신호는 전류 밀도 분배를 고려하였을 때 Py층으로 전류가 dominant하게 흐르면서 중금속 물질에 의해 발생하는 스핀 홀 자기저항 뿐 아니라 Py에 의한 자기저항이 더해지면서 발생하는 것으로 생각된다.



[그림 1] Ta/Py, Pt/Py의 y-z scan 각도 의존 비정상 홀 저항.
(a) Py두께에 따른 비정상 홀 저항 (b) Ta/Py의 y-z scan 각도 의존 비정상 홀 저항
(c) Pt/Py의 y-z scan 각도 의존 비정상 홀 저항



[그림 2] Ta/Py, Pt/Py의 y-z scan 각도 의존 자기저항.
(a) Py두께에 따른 각도 의존 자기저항 (b) Ta/Py의 y-z scan 각도 의존 자기저항
(c) Pt/Py의 y-z scan 각도 의존 자기저항

References

[1] Steven S.-L. Zhang et al. Nonloacl Anomalous Hall Effect. Phys, Rev. Lett, 116, 136601 (2016).
[2] Y.Q. Zhang et al. Anomalous Hall effect in epitaxial permalloy thin films. JAP 114, 163714 (2013)
[3] Yan-Ting Chen et al. Theory of spin Hall magnetoresistance, Phys. Rev. B 87, 144411 (2013).