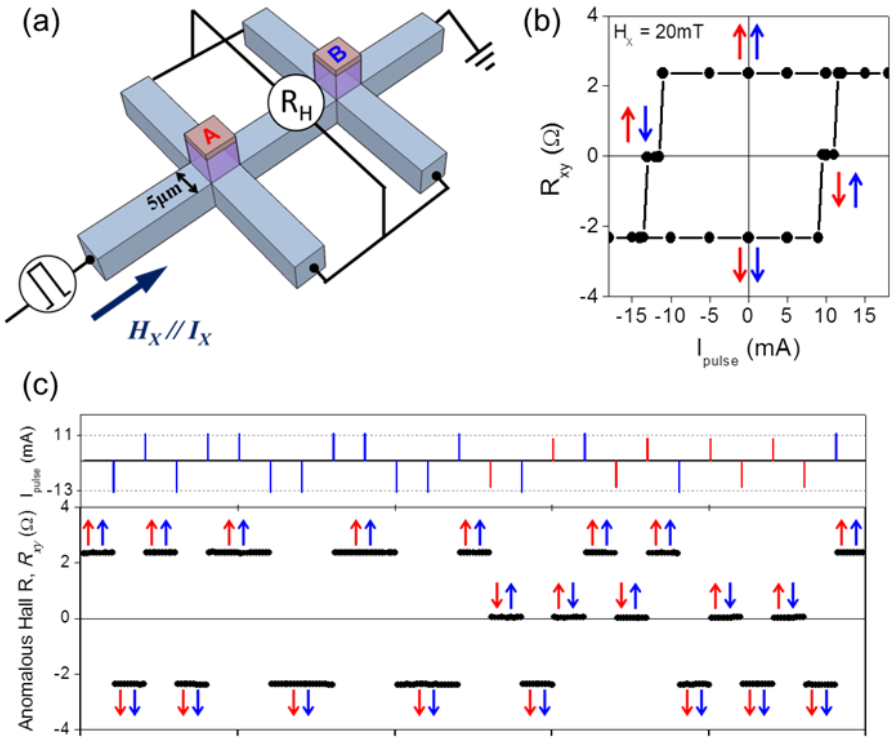
Reconfigurable Spin-orbit torque based logic-in-memory

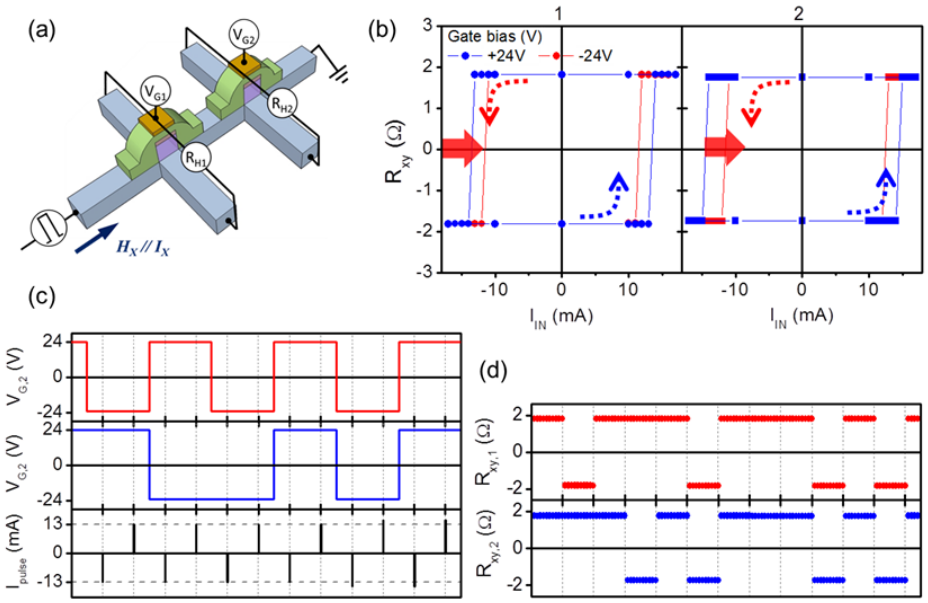
Seung-heon Chris Baek[1,2*], Kyung-Woong Park[1], Byong-Guk Park[1]
[1]Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 34141, Korea
[2]School of Electrical Engineering, KAIST, Daejeon 34141, Korea

최근 발견 된 스핀-오빗 토크 (spin-orbit torque; SOT) 는 비자성/강자성/산화막 구조에 흐르는 수평 전류로 인해 생성 된 토크로 전기적인 방법으로 수직 자화물질의 자화방향을 제어하게 해준다. 특히 SOT는 기존 스핀-전달 토크 (spin-transfer torque; STT)에 비해 구동 속도가 빠르고 쓰기와 읽기 선이 다르기 때문에 기존 STT-MRAM이 가졌던 단점을 극복 할 수 있다. SOT MRAM처럼 수평전류를 이용한 자화방향 제어 방식은 공통의 쓰기 선에 인가 된 하나의 펄스전류로 그 위에 제작 된 다수의 자기비트를 제어 할 수 있다. 본 연구에서는 Ta/CoFeB/MgO 구조에서 발생하는 SOT를 이용하여 CoFeB 층의 자화반전을 유도하고 이러한 현상을 이용해 2-비트의 비휘발성 SOT MRAM을 구현하고자 한다.

본 실험에서는 2개의 CoFeB 비트의 스위칭 임계 전류를 서로 다르게 제작함으로써 인가하는 전류의 크기를 변화시켜 2개의 CoFeB 비트를 자유롭게 제어 하였다. 특히 충분히 큰 전류를 인가해주면 동시에 모든 CoFeB 비트의 데이터를 지우거나 (0) 쓸 수 (1) 있다. 이는 현재 사용화 된 플래시 메모리의 erase 동작과 유사한 동작으로 스핀-오빗 토크 기반 소자에서만 볼 수 있는 고유의 동작이다.



[그림 1] (a) 전류 구동 2-비트 SOT MRAM 소자. 공통의 쓰기선 (Ta) 위에 2개의 자성비트 (A. B) 가 제작되어 있다. (b) 2-비트 SOT MRAM 소자의 자화반전 임계전류 (JC). (c) 2-비트 SOT MRAM 소자의 구동 동작.



[그림 2] (a) SOT logic-in-memory 소자. (b) SOT logic-in-memory 소자의 게이트 전압에 따른 각 자성비트의 동작. SOT 스위칭 전류의 차이를 볼 수 있다. (c) 2-비트 SOT logic 소자의 input ($V_{G,1}$, $V_{G,2}$, I_{input}). (d) 2-비트 SOT logic 소자의 output ($R_{xy,1}$, $R_{xy,2}$).

본 2-비트 SOT MRAM은 1 트랜지스터로 2개의 비트를 구동 시킬 수 있기 때문에 일종의 multi-level cell (MLC) MRAM의 구현으로 집적도 측면에서는 유리하나 모든 디지털 상태를 쓰기 위해서는 2-step writing을 필요로 한다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해서 본 2-비트 SOT MRAM에 게이트막과 게이트 전극을 추가하여 외부전압을 이용해 각 CoFeB 비트를 독립적으로 제어하고자 했다.

이러한 Gated SOT MRAM의 경우에는 voltage controlled magnetic anisotropy (VCMA) 현상을 이용해 각 CoFeB 비트의 자성특성 (magnetic anisotropy)을 독립적으로 제어하고 이를 통해 SOT 스위칭 전류를 제어한다. 이러한 특성을 이용하면 일정한 펄스전류를 인가해 주었을 때 특정 비트는 자화반전이 일어나고 특정 전류는 자화반전이 일어나지 않는 랜덤 selection이 가능해진다. 이 뿐만 아니라 게이트 전압과 펄스전류를 2개의 input으로 고려하면 간단한 로직 동작 (AND, OR) 이 가능해져서 본 소자를 SOT 기반 logic-in-memory 로 활용 할 수도 있다.

References

[1] Miron, I.M. et al. Perpendicular switching of a single ferromagnetic layer induced by in-plane current injection. Nature 476, 189-193 (2011).

[2] Liu, L., Lee, O. J., Gudmundsen, T. J., Ralph, D. C., & Buhrman, R.A. Current-Induced Switching of Perpendiculary Magnetized Magnetic Layers Using Spin Torque from the Spin Hall Effect.. Phys. Rev. Lett. 109, 096602 (2012).

[3] Matsukura, F., Tokura, Y., & Ohno, H. Control of magnetism by electric fields. Nature Nanotech. 10, 209-220 (2015)