

# Investigation of electric field effect on perpendicular magnetic anisotropy with MTJ structures

박경웅<sup>1,2\*</sup>, 김대훈<sup>1</sup>, 백승현<sup>1</sup>, 서수만<sup>2</sup>, 정성웅<sup>2</sup>, 박병국<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon

<sup>2</sup>Research and Development Division, SK hynix semiconductor Inc., Gyeonggi-do

## 1. 서론

모바일 통신 기기의 급격한 증가와 대용량 정보 전달의 효율성을 확보하기 위하여 비휘발성 메모리 소자를 이용한 에너지 효율 개선에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 차세대 반도체 메모리로 각광 받고 있는 STT-MRAM의 경우 뛰어난 동작 속도와 영구적인 비휘발성 같은 장점을 가지고 있기 때문에 non-volatile computing architecture를 구성하는데 있어 ROM (read only memory) 및 SDRAM 또는 DRAM을 대체 가능한 메모리 소자로 주목 받고 있는 상황이다. 그러나 충분한 switching current를 확보하기 위한 transistor 개수의 증가가 소자 집적도 증가에 큰 저해요소가 되고 있으며[1], device size 감소 시 자성 물질의 체적 감소에 기인하는 thermal stability 감소 등의 문제가 대두되고 있다. 최근 보고된 연구에 의하면, 수직 MTJ에 electric field를 인가할 때 switching에 필요한 에너지 장벽을 감소시킴으로써 switching current 감소 효과 및 transistor 개수 감소에 따른 고집적화에 용이하며, switching 후 electric field를 제거하면 에너지 장벽이 원래의 상태로 복구되면서 정보저장 안정성을 확보하는 구조를 나타낸다고 알려져 있다. 그러나 전계 인가에 따른 자성 물질의 특성 변화의 원인과 제어 인자에 대한 분석은 아직 명확히 규명되지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 MTJ 적층 구조에 따라 electric field가 미치는 영향을 파악하고 물리적 원인과약을 위한 근거를 마련하고자 하였다.

## 2. 실험방법과 결과

본 연구에서는 electric field가 MTJ 소자에 미치는 영향을 명확하게 파악하기 위하여 Non Magnet/Ferromagnet/oxide와 같은 단일 자성박막에 대한 현상을 살펴보았다. 전극 물질로는 Ta, Pt, Ta/Ru/Ta를 사용하였고, 자성 박막은 Co와 CoFeB에 대해 각각 비교하였다. 상부 interface anisotropy 확보를 위한 산화물은 MgO/AlO 박막을 적용하였다. 각 박막은 UHV sputtering 법으로 제작한 다음 열처리 공정을 수행하였다. 한편, 안정적인 수직 자기 이방성을 유지하면서 효율적인 전계 전달 효과를 확보하기 위하여 저온 ALD법을 통한 고유전율의 ZrO<sub>2</sub> 박막을 증착한 다음 상부 전극을 형성하였다. 자성 박막의 수직 자기 이방성 및 자기 이력 곡선 평가는 VSM (vibrating sample magnetometer) 및 AHE (anomalous hall effect) 법을 이용해 측정하였다.

Figure 1은 Ta(10)/CFB(1)/MgO(1.6)/AlO(1.5)/ZrO<sub>2</sub>(40nm) 구조에서 electric field 크기와 방향에 따른 수직 MTJ의 coercivity (H<sub>c</sub>)변화를 관찰한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 negative electric field를 인가하였을 때에는 수직 자기장하에서 H<sub>c</sub>가 증가되었고 electric field를 제거한 다음에도 그 효과가 지속되었으며 반대로 positive electric field를 인가함에 따라 증가되었던 H<sub>c</sub>가 원래의 값으로 회복되는 결과를 나타내었다. 이는 electric field가 인가될 때 FM/oxide 계면에서 non-volatile, reversible reaction을 유도하는 것으로 판단되며, 특정 자기장하에서 완전한 저항 hysteresis loop가 형성되는 결과를 통해 electric field 만으로도 저항 상태의 변화를 제어할 수 있다는 결과를 확보하였다. 상기와 같이 electric field가 수직 이방성에 영향을 미치는 예상 원인으로서는 FM/oxide 계면에서 charge transfer 효과와 ion migration에 따른 FM-Oxygen 결합 상태 변화로 예상할 수 있다[2]. 두 효과가 모두 수직 자기 이방성에 영향을 미치는 인자이나, 전자의 경우 순수한 FM의 band structure

나 수직 moment를 갖는 3d orbital 분포 등에 영향을 받기 때문에 electric field에 대해 즉각적이며 휘발적 특성을 보이는 반면에, 후자의 경우 이온 이동에 필요한 시간 의존성을 가지며 비휘발적 특성을 나타낼 확률이 높게 된다. 이러한 물리적 원인을 실험적으로 비교 평가 하고자 electric field를 일정시간 인가한 후  $H_c$ 가 변화되는 경향을 살펴보았다. 그 결과 임계 전압 이상에서 포화  $H_c$  변화량을 갖는데 수십초 이상 필요한 것으로 확인됨에 따라 charge transfer effect 보다는 ion migration 효과에 주로 기인하는 것으로 예상된다. 이는 FM/oxide 계면 산화 상태뿐만 아니라 후속 열처리 및 process integration 공정 조건에 따라 electric field가 interface anisotropy에 미치는 효과에 영향을 미칠 수 있다는 것을 내포한다. 한편, in-plane 자기 이방성을 갖는 시편에 대한 electric field 의존성을 살펴본 결과에 의하면, electric field 만으로 anisotropy field ( $H_A$ )도 reversible, non-volatile hysteresis loop를 확보하는 것이 가능하였다. 이는 실제 STT-MRAM의 switching 동작에 있어 electric field 제어에 따라 switching current를 감소시키는 것이 가능하다는 것을 간접적으로 확인한 것이다.

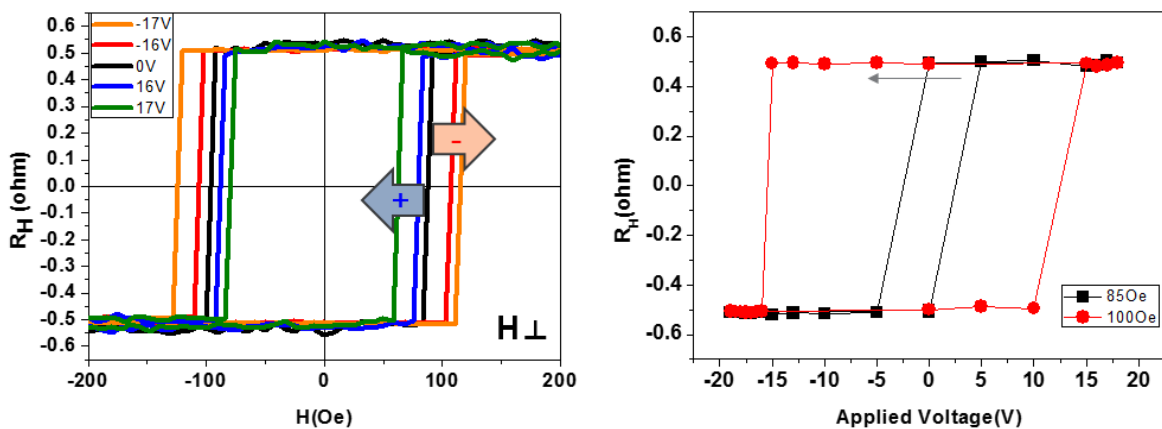


Fig. 1. Ta/CFB/MgO/AIO 구조에서 electric field의 크기 및 방향에 따른 AHE 효과 비교 및 저항 hysteresis loop.

### 3. 결론

본 연구를 통해 electric field 효과가 수직 자기 이방성에 미치는 영향을 살펴본 결과, electric field 만으로  $H_c$  및 anisotropy field ( $H_k$ )를 비휘발적, 가역적으로 제어하는 것이 가능함에 따라 STT-MRAM의 switching current 감소가 가능하다는 것을 간접적으로 확인하였다. 또한 이 효과가 시간에 따른 의존성을 갖는 것으로부터 ion migration과 동일한 물리적 원인을 유추하는 것이 가능하였다. 이는 FM/oxide 계면에서 산소결합상태 및 후속 공정에 큰 영향을 받을 수 있으며, 실제 소자에 적용하기 위해서는 시간 의존성을 최소화하고 Full MTJ에 적용 가능성을 평가하는 것이 요구된다.

### 4. 참고문헌

- [1] T. Kawahara et al. Microelectronics reliability **52** (2012)
- [2] Chong. Bi et al. PRL **113**, 267202 (2014)