

전류에 의한 자화 스위칭에서 공명 세차운동에 의한 스위칭 전류밀도 증가

김우진^{1*}, 이택동¹, 이장은², 오세충², 신경호³, 서홍주⁴, 이경진⁴

¹한국과학기술원 신소재공학과

²삼성전자

³한국과학기술연구원

⁴고려대학교 신소재공학부

1. Introduction

스핀전달토크는 스핀분극된 전도 전자의 스핀각운동량이 국부자화에 전달되기 때문에 일어나는 현상으로 자기장 없이 국부자화를 조작할 수 있는 방법으로 최근 많은 관심을 받고 있다. 스핀밸브구조에서 이를 이용한 전류에 의한 자화 스위칭(CIMS)은 기존의 고밀도 MRAM의 기록방식인 자기장에 의한 자화 스위칭(FIMS)을 대체할 방식으로 기대되고 있다. CIMS는 magnetic cell의 크기가 작아질수록 스위칭전류밀도가 감소하며, FIMS에서 발생하는 half-selected cell의 자화반전 문제가 발생하지 않는 장점을 갖고 있다. MRAM에 적용되기 위해서 스위칭전류밀도(J_c)는 10^5 - 10^6 A/cm² 정도가 되어야 한다. 단일자구모델을 가정했을 때, J_c 는 식 (1)과 같이 주어진다[1].

$$J_c = \frac{1}{P} \frac{2e}{\hbar} \alpha M_s d (\pm H_{ext} + H_K + 2\pi M_s) \quad (1)$$

이 때 P 는 스핀분극율, α 는 damping constant, M_s 는 포화자화, d 는 free layer의 두께, H_{ext} 는 외부자기장, H_K 는 free layer의 이방성 자기장을 나타낸다.

고밀도 기억소자를 만들기 위해서는 magnetic cell의 크기와 함께 cell 사이의 거리도 함께 작아져야 한다. Magnetic cell에서 발생하는 정자기장의 크기는 거리의 제곱에 반비례하기 때문에 cell 사이의 거리가 작아지면 이웃한 cell 사이에 작용하는 정자기장에 의한 영향도 커진다. 이웃 cell에서 발생하는 정자기장은 switching cell에 작용하는 외부자기장에 해당한다. 따라서 식 (1)에 의하면 switching 방향과 정자기장의 방향이 같으면 J_c 는 감소하고, 반대이면 J_c 는 증가하게 된다.

본 연구에서는 micromagnetic model을 이용하여 MRAM cell의 배열에서 switching cell과 이웃 cell 사이의 정자기장에 의한 상호작용이 J_c 에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

2. Model and Method

스핀전달토크의 효과는 식 (2)와 같이 기존의 Landau-Lifshitz-Gilbert 식에 추가되는 항을 통하여 micromagnetic model에 고려할 수 있다.

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} + \frac{\gamma \hbar}{2e} \frac{P}{M_s^2 d} \mathbf{J} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{p}) \quad (2)$$

이 때 γ 는 gyromagnetic ratio, \mathbf{M} 은 자화벡터, \mathbf{H}_{eff} 는 외부자기장, 정자기장, 교환자기장, thermal fluctuation field, 그리고 Oersted field를 포함하는 유효자기장이다. \mathbf{p} 는 pinned layer의 자화방향을 나타내는 단위벡터로 x 축에 평행하며, \mathbf{J} 는 전류밀도를 나타낸다. 전류펄스 길이는 5 ns이다. M_s 는 600 emu/cm³, exchange constant는 2.0×10^{-6} erg/cm, α 는 0.02, P 는 0.7을 사용하였다. 온도는 300K 그리고 결정이방성은 0으로 가정하였다. Magnetic cell의 크기는 $90 \times 30 \times 2.5$ nm³ 이고 unit cell의 크기는 6nm이다. Switching cell은 그림 1(a)의 삽입도와 같이 3x3 MRAM cell 배열의 중앙에 위치한다.

Magnetic cell 사이의 거리는 30nm이다. 스위칭 확률(P_{sw})은 100회 스위칭을 시도했을 때 스위칭이 일어나는 횟수를 세어 구했다. 스위칭 전류밀도(J_{sw})는 $P_{sw}=0.5$ 일 때의 전류밀도로 정의한다.

3. Result and Discussion

그림 1(a)의 삽입도와 같이 이웃 cell들이 자화방향을 가질 경우 switching cell에 가해지는 정자기장의 크기는 +x 방향으로 가장 큰 값을 갖는다. 이와 같은 상황에서 switching cell의 자화를 -x 방향에서 +x 방향으로 스위칭시키기 위한 전류밀도(J_{sw}^{+x})와 +x 에서 -x 로 스위칭시키기 위한 전류밀도(J_{sw}^{-x})를 구했다. 또한 이웃 cell이 J_{sw} 에 미치는 영향을 알아보기 위해 이웃 cell 없이 switching cell만 스위칭시킬 때의 전류밀도(J_{sw}^0)를 구하여 J_{sw}^{+x} , J_{sw}^{-x} 와 비교하였다 (그림 1(a)). J_{sw}^{+x} 와 J_{sw}^{-x} 를 비교하면, 식 (1)이 나타내는 바와 마찬가지로, 스위칭 방향이 정자기장 방향과 같

은 J_{sw}^{+x} 가 방향이 반대인 J_{sw}^{-x} 보다 작다. 그러나 정자기장의 크기가 0인 J_{sw}^0 와의 대소관계는, 식 (1)에 따르면 $J_{sw}^{+x} < J_{sw}^0 < J_{sw}^{-x}$ 가 되어야 하는데, 그림 1(a)의 결과는 $J_{sw}^{-x} > J_{sw}^{+x} > J_{sw}^0$ 이다.

CIMS에서는 FIMS와 달리 자화가 많은 세차운동을 거친 후 스위칭된다. 이 때 switching cell과 이웃 cell들 사이의 정자기장에 의한 상호작용 때문에 switching cell의 세차운동은 이웃 cell들 사이의 공명세차운동을 유발한다. 그림 1(b)와 (c)는 각 방향으로 스위칭할 때 자화의 y성분으로부터 얻은 세차운동 스펙트럼이다. 두 경우 모두 switching cell과 이웃 cell의 공명세차운동 주파수는 약 4 GHz 이다. 이와 같은 공명세차운동으로 인해 시간에 따라 변하는 정자기장은 스위칭을 방해하여 스위칭에 필요한 시간은 증가한다. 따라서 전류 펄스 길이가 고정되었을 때 J_{sw} 는 증가하게 된다. 이는 그림 2의 결과를 통해 더욱 명료해진다. 이웃 cell들이 그림 2의 삽입도와 같은 자화방향을 가지면 switching cell이 받는 정자기장의 합은 0이 된다. 이 경우 J_{sw} 의 대소관계는 $J_{sw}^{-x} \approx J_{sw}^{+x} > J_{sw}^0$ 가 된다. 즉, 정자기장의 합이 0이므로 식 (1)에 따라 J_{sw} 는 스위칭 방향에 관계없이 같아지지만 공명세차운동에 의한 J_{sw} 의 증가로 인해서 J_{sw}^0 보다 항상 큰 값을 갖게 된다.

따라서 전류 펄스 길이가 고정되었을 때 J_{sw} 는 증가하게 된다. 이는 그림 2의 결과를 통해 더욱 명료해진다. 이웃 cell들이 그림 2의 삽입도와 같은 자화방향을 가지면 switching cell이 받는 정자기장의 합은 0이 된다. 이 경우 J_{sw} 의 대소관계는 $J_{sw}^{-x} \approx J_{sw}^{+x} > J_{sw}^0$ 가 된다. 즉, 정자기장의 합이 0이므로 식 (1)에 따라 J_{sw} 는 스위칭 방향에 관계없이 같아지지만 공명세차운동에 의한 J_{sw} 의 증가로 인해서 J_{sw}^0 보다 항상 큰 값을 갖게 된다.

4. Conclusion

고밀도 기록을 위해서는 MRAM cell 사이의 간격이 좁아지게 되면 magnetic cell 사이의 정자기장에 의한 상호작용으로 인한 J_{sw} 의 증가를 고려해야 한다. 상세한 연구 결과는 발표를 통해 이루어질 것이다.

5. Reference

- [1] J. Z. Sun, Phys. Rev. B **62**, 570 (2000).

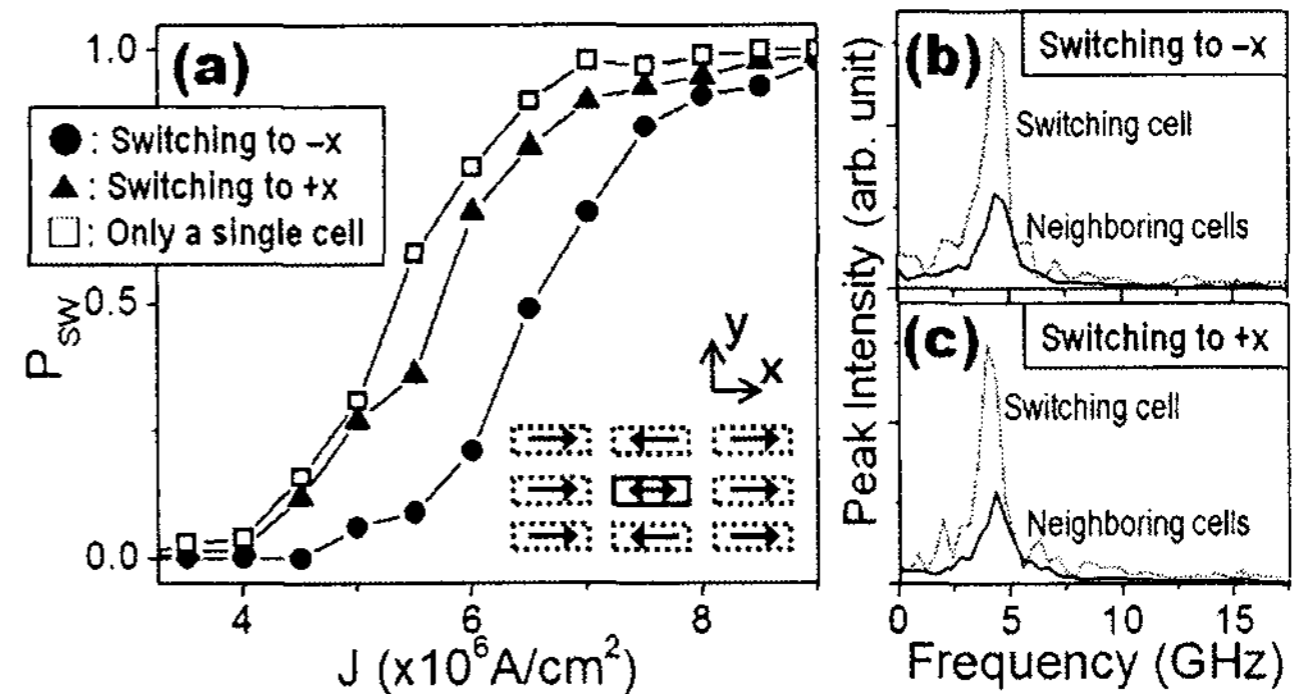


그림 1. (a) 전류밀도(J)의 함수로 나타낸 스위칭확률(P_{sw}). 삽입도는 개략적인 MRAM cell 배열을 나타낸다. 실선으로 나타낸 것이 switching cell이고 점선으로 나타낸 이웃 cell 안의 화살표는 각각의 자화방향을 나타낸다. (b) -x 방향 스위칭에서의 세차운동 스펙트럼. (c) +x 방향 스위칭에서의 세차운동 스펙트럼.

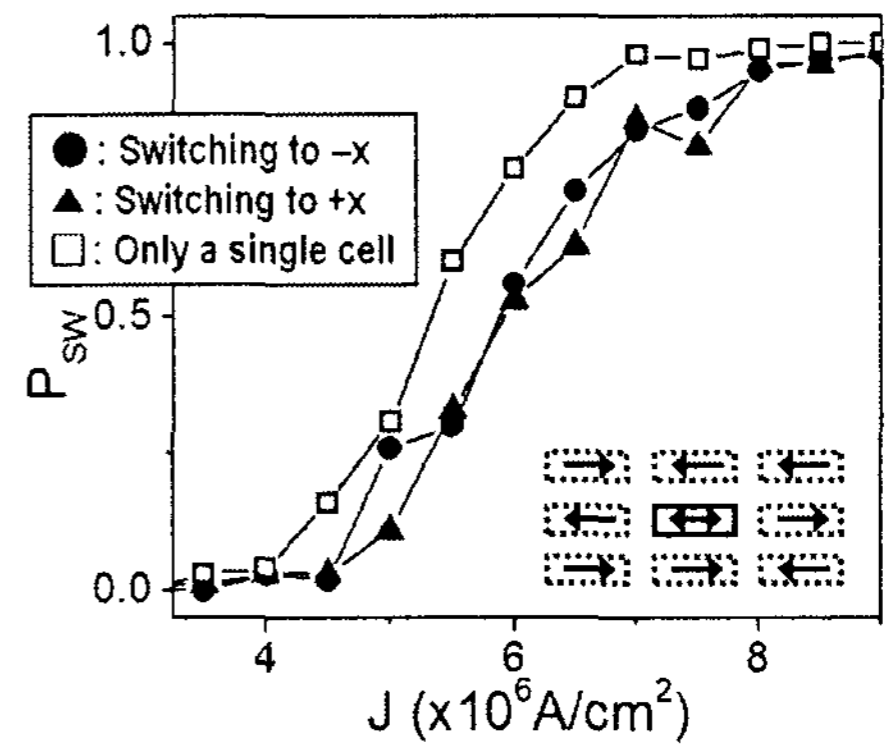


그림 2. 이웃 cell들의 자화가 삽입도와 같은 방향을 가질 때 J의 함수로 나타낸 P_{sw} .