

# 1 ns 이하의 펄스자기장에 의한 자성박막의 자화반전 시뮬레이션 (Magnetization reversal dynamic simulation of magnetic thin film devices in respond to subnanosecond longitudinal field pulses)

\*이진원,<sup>1</sup> 김은식,<sup>2</sup> 김용수,<sup>2</sup> 김성동,<sup>3</sup> 홍종일<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 신소재공학부 세라믹공학과, 서울특별시 서대문구 신촌동 134

<sup>2</sup> 삼성종합기술원, 경기도 용인시 기흥읍 농서리 산 14-1

<sup>3</sup> 서울산업대학교 기계설계자동화공학부, 서울특별시 노원구 공릉2동 172번지

## 1. 서론

자성재료를 이용한 정보저장시스템 개발에 있어 자성박막의 고속 스위칭에 관한 연구는 간과해서는 안 될 분야중의 하나이다. 최근에 자화 곤란축 (hard axis)으로 인가한 외부자기장에 의한 precession 스위칭 및 GHz 영역의 자기장을 자화 용이축 (easy axis)으로 인가하여 자화 반전을 일으키는 고속 자기 스위칭 연구가 활발히 진행되고 있다 [1,2]. Precession 스위칭의 경우 자기모멘트가  $H_{eff}$ (effective field)를 중심으로 precession을 하기 때문에 자기장을 인가한 시간에 따라 주기적으로 자화 반전 현상이 일어나지만 [3], 자화 용이축으로 특정 시간 이상동안 자기장을 인가한 경우는 지속적으로 자화 반전 현상이 일어난다고 보고돼 왔다 [2]. 자성박막의 자화 반전시간은 주로 1 ns 이하에서 이루어지며 이런 초고속의 스위칭 장점을 자성 메모리소자에 적용하기 위해서는 자화 반전이 일어나는 데 필요한 최소 시간을 찾고 그에 따른 자화 반전의 안정성을 확보해야한다. 이 논문에서  $1.00 \times 0.24 \mu\text{m}^2$  크기의 작은 자성 박막에 자화 용이축으로 자기장을 20 ps에서 500 ps까지 인가하였을 때 일어나는 자화 반전 현상을 micromagnetic 시뮬레이션을 통해 관찰하였고, 자성 박막의 두께와 모양에 따른 자화 반전 거동의 변화를 연구하였다.

## 2. 실험방법

이 논문에서는  $1.00 \times 0.24 \mu\text{m}^2$  크기의 직사각형 모양  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  자성 박막을 OOMMF (object oriented micromagnetic framework) [4]를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 포화 자화 (saturation magnetization)값으로 800 mT, 그리고  $A$  (exchange stiffness constant)값은  $1.3 \times 10^{-11} \text{ J/m}^3$ 를 적용하였다. 그리고 자성 박막이 자화 용이축인  $x$  축을 따라 일축 자기 이방성(uniaxial anisotropy)을 지니고 있으며 이 때 일축 자기 이방성 상수  $K_u$ 는  $700 \text{ J/m}^3$ 를  $\alpha$  (damping constant)는 0.03을 사용하였다. 셀 크기는  $20 \times 20 \text{ nm}^2$ 로 하였고, 각각의 셀에 있는 자기모멘트 값은 일정하다고 가정하였으며, 최초의 모든 자기모멘트는 자화 용이축을 따라 양의  $x$  방향으로 놓여있으며, 외부 자기장을 인가하기 전 자화 곤란축으로 0.5 mT의 자기장을 지속적으로 인가하여 주었다. 여기에 음의  $x$  방향으로 펄스 자기장을 인가하여 자화 반전을 유도하였으며 모든 자기모멘트가 최초 방향과 반대인 음의  $x$  방향으로 배열했을 때 자화 반전이 일어난 것으로, 양의  $x$  방향으로 배열하고 있을 때 자화 반전이 일어나지 않은 것으로 판단하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

자화 용이축으로 펄스 자기장을 인가하기 전 자화 곤란축 방향으로 0.5 mT의 자기장을 지속적으로 인가하였다. 이는 자기모멘트들이 반전하는 데 필요한 자기장의 크기를 낮춰주고, 펄스 자기장이 인가되기 전 시편을 'S' 상태로 만든다 [5]. 그림 1과 2는  $1.00 \times 0.24 \mu\text{m}^2$  크기의 직사각형 모양  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  자성 박막과 타원형 모양 소자에 15 mT부터 60 mT까지 펄스 자기장을 인가했을 때 일어나는 자화 반전의 신뢰도를 나타낸 것이다.  $x$  축은 자화 용이축으로 인가한 자기장의 크기를 나타내고  $y$  축은 자기장을 인가한 시간으로 20 ps씩 증가하며 500 ps까지 나타낸다. 그림에서 밝은 부분이 자기모멘트들이 음의  $x$  방향으로 회전하여 자화 반전이 일어난 영역이고, 어두운 부분이 자화 반전이 일어나지 않은 영역을 의미한다. 그림 1 a)는 두께가 2 nm인 박막을 계산한 결과로서 인가한 자기장의 크기가 증가할수록 자화 반전이 일어나는 데 필요한 최소 시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있다(흰색 실선) [2,6]. 하지만 인가한 자기장의 크기가 35 mT 이상일 때 자화 반전 영역 내에 자화 반전이 일어나지 않는 구간이 발생한다(어두운 영역). 이러한 현상은 그림 1 b)에서도 확인할 수 있는데, 그림 1 b)는 두께만 4 nm이고 그림 1 a)와 같은 시료이다. 자화 반전이 일어나는 데 필요한 최소 시간은 a)와 마

참가지로 펄스 자기장의 크기가 증가할수록 줄어들지만, 전체 부피가 증가했기 때문에 자화 반전에 필요한 시간이 더 길다(흰색 실선). 50 mT의 자기장을 200~220 ps동안 인가했을 때 자화 반전이 일어나지 않는 것을 볼 수 있고, 자기장의 크기가 60 mT일 때는 160~180 ps 사이에서 자기장을 차단하면 자화 반전이 일어나지 않는다. 그림 2는  $1.00 \times 0.24 \mu\text{m}^2$  크기의 타원 모양  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  자성 박막의 자화 반전에 대한 결과이고, a)는 두께가 2 nm이고 b)는 두께가 4 nm이다. 그림 2에서 보면 자화 반전 영역 내에 자화 반전이 일어나지 않는 영역이 직사각형일 때보다 더 많은 것을 확인할 수 있고, 박막이 두꺼워질수록 자화 반전이 일어나지 않는 영역이 줄어드는 결과는 그림 1과 같다.

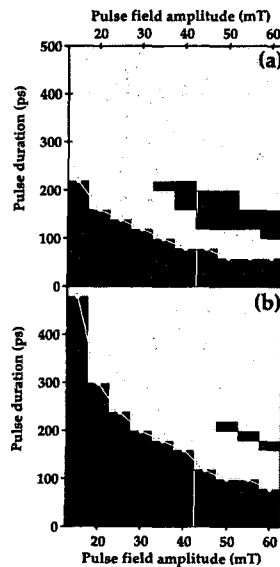


그림 1. 직사각형 모양 박막의 스위칭 신뢰도 map. (a)  $t=2$  nm, (b)  $t=4$  nm.

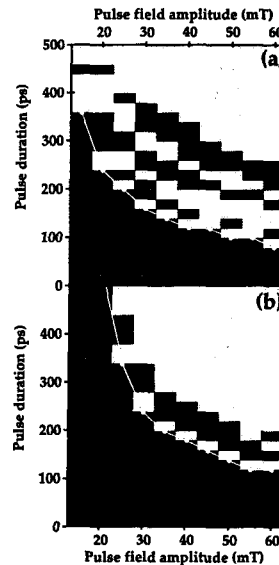


그림 2. 타원형 모양 박막의 스위칭 신뢰도 map. (a)  $t=2$  nm, (b)  $t=4$  nm.

#### 4. 결론

마이크로미터 이하 크기의 자성 박막에 자화 용이축으로 1 ns 이하동안 펄스 자기장을 인가했을 때 자화 반전이 일어나는 것을 micromagnetic 시뮬레이션으로 확인하였다. 그 결과 자기장을 인가한 시간에 따라 자화 반전 현상이 교차적으로 일어났음을 관찰하였다. 박막의 두께가 증가할수록 자화 반전이 일어나지 않는 영역은 줄어들고, 타원 모양에 비해 edge domain이 많은 직사각형 모양일 때 더 안정적으로 자화 반전이 일어났다. 본 연구는 초고속의 스핀스위칭이 이루어지는 소자에서는 스위칭이 안정적으로 일어나는 영역을 검증하고 확보하는 것이 중요하다는 것을 강조하고 있다.

#### 5. Acknowledgment

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-041-D20252)

#### 6. 참고문헌

- [1] R. H. Koch, J. G. Deak, D. W. Abraham, P. L. Trouilloud, R. A. Altman, Yu Lu, W. J. Gallagher, R. E. Scheuerlein, K. P. Roche, and S. S. P. Parkin, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4512 (1998).
- [2] Shehzaad KaKa and Stephen Russek, *J. Appl. Phys.* **87**, 6391 (2000).
- [3] H. W. Schumacher, C. Chappert, R. C. Sousa, P. P. Freitas, J. Miltat, and J. Ferre, *J. Appl. Phys.* **93**, 7290 (2003).
- [4] M. J. Donahue and D. G. Porter, <http://math.nist.gov/oommf>.
- [5] Xiaoxi Liu, John N. Chapman, Stephen McVitie, and Chris D. W. Wilkinson, *Appl. Phys. Lett.* **84**(22), 4406 (2004).
- [6] Shehzaad Kaka, John P. Nibarger, Stephen E. Russek, N. A. Stutzke, and S. L. Burkett, *J. Appl. Phys.* **93**(10), 7539 (2003).