

2차원 자기장에 의한 spin-valve 터널링 자기저항 소자의 자유층 반전 거동에 관한 연구

이영우[†] · 김철기 · 김종오
충남대학교 재료공학부

Investigation on the Free Layer Switching behavior of a Spin-valve MTJ Device with 2 Dimensional Magnetic Field

Young-woo Lee, CheolGi Kim and Chong-Oh Kim
Division of Materials Engineering, Chungnam National University

(2003년 4월 4일 받음, 2003년 6월 12일 최종수정본 받음)

Abstract MTJ devices are fabricated using metal shadow masks and switching characteristics are investigated under 2 dimensional magnetic field. When the hard axis field is less than ± 16 Oe, switching behavior is similar to that based on the Stoner-Wohlfarth model. As the hard axis field is larger than ± 16 Oe, deviation from the expectation by Stoner-Wohlfarth model is observed. These phenomena are induced by the generation of multi-domain and inhomogeneous magnetization reversal.

Key words Free layer switching, MTJ, Permalloy, stray field

1. 서 론

반강자성체를 이용한 스핀밸브 자기저항 소자는 하드 디스크 헤드, 센서, 자기메모리 등에서의 응용을 목표로 많은 연구가 이루어져 왔다.¹⁻⁴⁾ 최근에는 스핀분극된 전자의 터널링 현상을 이용한 자기 터널 접합(Magnetic tunnel junction, MTJ)에서 10% 이상의 큰 자기저항비가 보고되면서 MTJ에 대한 양적, 질적 연구 수준이 비약적으로 발전되었다.⁵⁻⁸⁾ 스핀밸브 구조는 외부자기장에 대해서 쉽게 자화가 반전되는 자유층과 반강자성체에 자기적으로 결합되어서 작은 외부 자기장에 대해서 자화상태가 상대적으로 변하지 않는 고정층을 갖고 있다. 외부 자기장이 인가되면 자유층의 자화 상태는 민감하게 변화하고 고정층의 자화상태와의 상대적인 자화상태에 따라 저항값이 변하도록 되어있다. 따라서 스핀밸브 구조는 작은 자기장 변화를 저항의 변화로 쉽게 감지하는 장점을 지니고 있다.

MTJ는 자유층과 고정층 사이에 수 나노미터 두께의 절연층을 배치하여 두 자성체 사이에 스핀분극된 전자의 터널 전류를 이용한다. 전류가 다층박막 면에 수직하게 흐르므로 작은 단면적을 갖는 소자로 가공할수록 고밀도 자기메모리를 실현할 수 있다. 미세하게 패턴화된 소자들을 2차원 평면 상에 연속적으로 배열시키고, 각 소자 위치를 수직하게 지나가는 두 회선(bit line, word line) 주위로 생성되는 자기장의 합으로 자유층의 자화상태를 선택

적으로 반전시킴으로서 정보를 저장할 수 있다. 이 경우, 반전에 필요한 자기장의 크기는 전류가 흐르는 회선들이 교차하는 위치에 있는 자유층만 선택적으로 반전시키는 수준으로 조정되어야 한다. 또한 MTJ 소자의 크기가 감소할수록 반자장이 증가하기 때문에 반전에 필요한 자기장이 증가한다. 따라서 2차원 자기장을 이용한 자유층의 자화반전에 대한 연구는 소자특성 향상에 대한 연구와 더불어 소자활용에 필수적이다.

본 논문에서는 2차원 헬름홀츠 코일을 이용하여 자유층의 자화곤란 방향으로 정자기장을 인가하면서 자화용이축 방향으로 10 Hz의 교류자기장을 인가하여 MTJ 자유층의 자화반전 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

RF 마그네트론 스퍼터링장치를 이용하여 스핀밸브 구조를 갖는 MTJ를 제작하였다. 성장실의 기본진공은 3×10^{-7} Torr 이하로 유지하였으며, Ar 가스 압력은 1×10^{-3} Torr로 유지하였다. 반강자성층으로 FeMn 합금박막을 성막하고 자성층은 퍼말로이를 이용하여 고정층과 자유층을 제작하였다. 터널장벽은 Al 금속 박막을 1.5 nm로 성막한 후 산소분위기에서 자연산화시켰다. 성막된 MTJ 소자의 적층구조는 Permalloy (10)/Co₇₁Fe₂₉ (2)/Al oxide (1.5)/Co₇₁Fe₂₉ (2)/Permalloy (4)/Fe₄₉Mn₅₁ (25)/Al (30) (nm) 이다. 십자형 패턴을 제작하기 위하여 선폭 90 μ m를 갖는 금속 마스크를 이용하였다. 성막하는 동안 자유층의 장축 방향으로 60 Oe의 자기장을 인가하여 자화용

[†]E-mail: miru@cnu.ac.kr

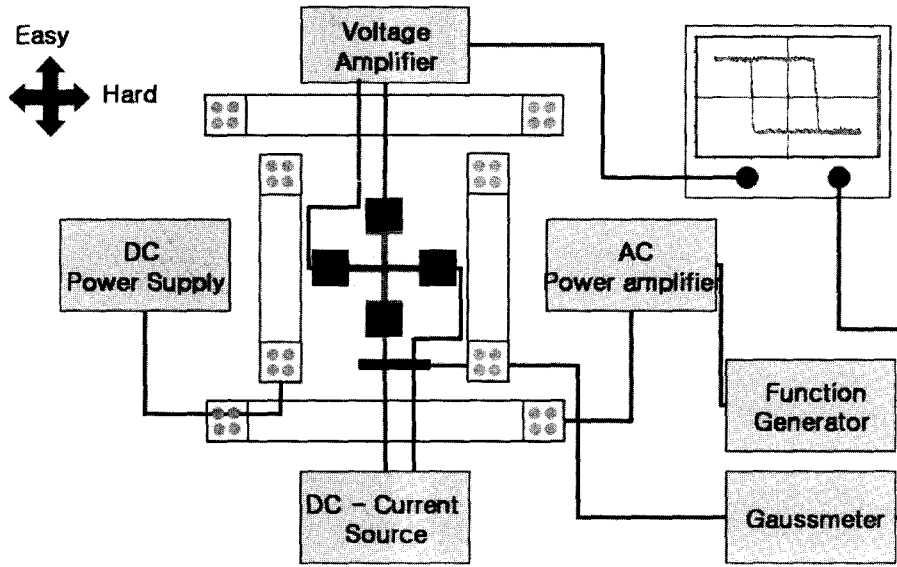


Fig. 1. Schematic diagram of switching measurement system.

이층을 생성하였다.

자유층의 자화반전은 Fig. 1에 나타난 측정 시스템을 이용하여 조사하였다. 서로 수직하게 위치한 두 헬름홀츠 코일에 직류와 교류 전류를 인가하여 자기장을 발생시켰다. 즉 직류 전류로 MTJ 소자의 자화곤란 방향으로 정자기장을 인가하고, 교류 전류로 자유층의 자화용이층에 평행하게 10 Hz, ± 10 Oe의 진폭을 갖는 교류 자기장을 인가하였다. MTJ 소자의 두 단자에 정전류를 인가한 상태에서 나머지 두 단자로부터 읽은 전압을 증폭기로 증폭하여 디지털 오실로스코프로 표시하고, 데이터를 수집하였다. 헬름홀츠 코일에 생성되는 자기장은 가우스미터를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구를 위하여 제작된 스핀밸브 자기저항 소자의 정적인 자기저항이 Fig. 2에 나타나 있다. 자유층의 보자력은 5 Oe이며 고정층의 바이어스 자기장은 45 Oe였다. 10 Hz의 자화용이층 자기장, H_{easy} 으로 자유층의 자화를 반전시키면서 고정층의 자화를 반전시키지 않기 위하여 H_{easy} 을 ± 10 Oe 범위에서 변화시켰다.

Fig. 3은 곤란축 방향으로 인가하는 정자기장을 ± 27 Oe 범위에서 변화시키면서 측정한 저항변화 곡선들이다. 자화곤란축 자기장, H_{hard} 의 세기가 증가할수록 자유층의 자화방향이 용이축 방향에서 곤란축 방향으로 회전하고 고정층의 자화방향은 용이축 방향으로 고정되어 있으므로 두 자성층의 자화방향 사이의 각도가 180°로부터 작아지기 때문에 자기저항 곡선의 MR비에 비례하는 신호크기는 감소한다. 자화반전과 관련해서 널리 알려진 Stoner-Wohlfarth 모델에 따르면,⁹⁾ 단자구 상태에 있는 자성체의 자화방향을 회전시키기 위해서 서로 수직인 두 방향의 자기장을 동시에 인가할 경우 보자력보다 낮은 자기

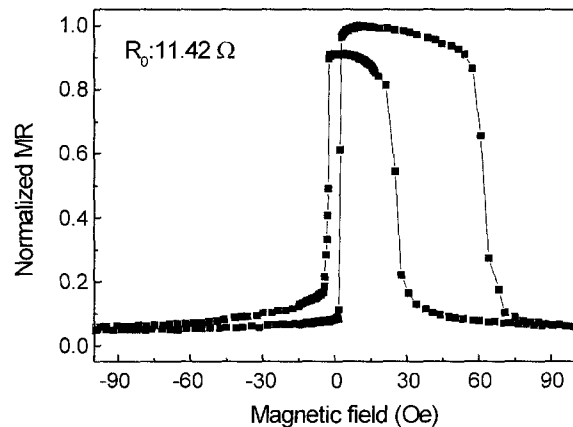


Fig. 2. Major magnetoresistance loop of the fabricated MTJ device.

장에서 자화반전이 발생한다. 소자의 크기가 박막 두께보다 훨씬 크기 때문에 면내의 반자장은 무시할 수 있는 수준이다. H_{hard} 이 "0"인 경우 보자력은 5 Oe이지만 H_{hard} 이 증가할수록 자화반전이 일어나는 자기장이 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 H_{hard} 이 계속 증가하여도 반전 자기장이 계속 감소하지는 않는다. 미세 패턴된 자성체의 자화곤란 방향으로 자기장을 인가할 경우 중심부의 자구는 회전하지만 자유자극이 생성되는 끝부분에서는 폐쇄자극이 생성되면서 다자구 상태가 된다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 이때 용이축 방향에 평행한 여러개의 다자구로 분할된 후 포텐셜 에너지를 감소시키기 위하여 H_{hard} 방향으로 회전한다. 이 상태에서 H_{easy} 을 인가하면 H_{easy} 방향에 가장 평행한 자화방향을 갖는 자구 포텐셜 에너지가 작아서 자벽이동에 의해 자구 면적이 증가한다. H_{hard} 이 증가할수록 자기저항 곡선에서 신호의 감응이 증가함을 Fig. 3에서 알 수 있다. 이는 자화반전시 자구벽 이동시 발생하는 Barkhausen 잡음에 기인한 것으로 사

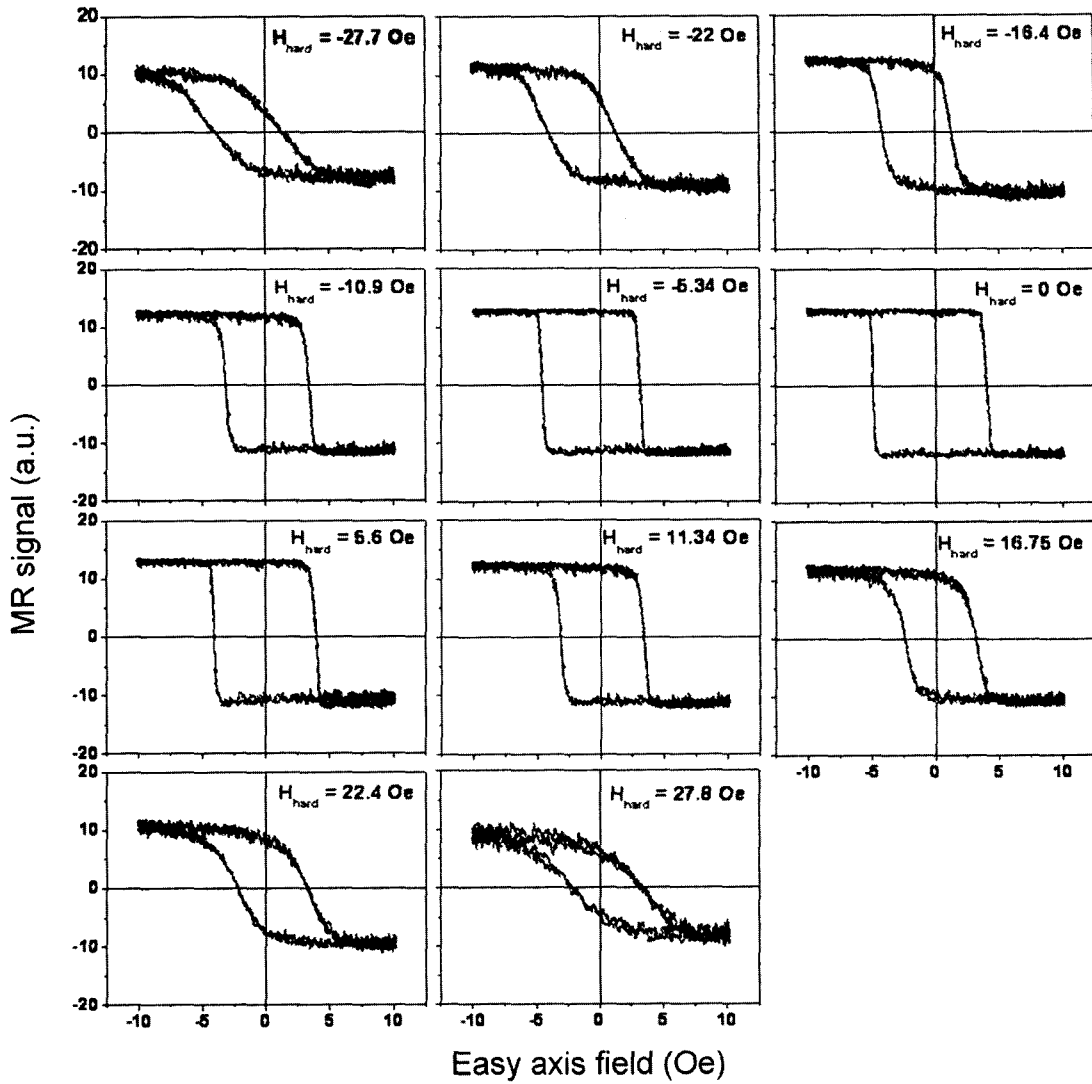


Fig. 3. Minor magnetoresistance curves of a MTJ as a function of H_{hard} .

료된다.

Fig. 4는 H_{easy} 와 H_{hard} 의 값에 따라 반전되는 위치를 표시한 에스트로이드(astroid) 곡선이다. H_{hard} 이 상대적으로 작을 때는 단자구 상태에서 자구가 회전해서 자화반

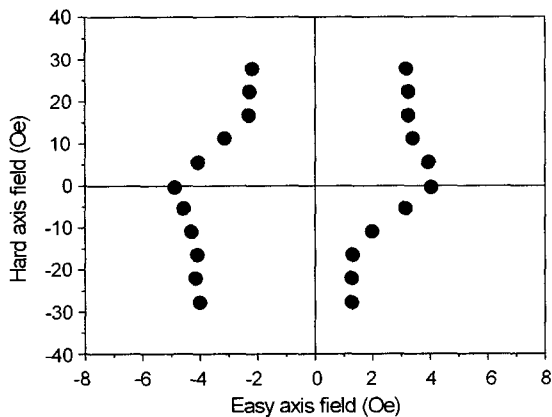


Fig. 4. Astroid curve of permalloy free layer of spin-valve MTJ.

전이 이루어진다고 가정한 Stoner-Wohlfarth 모델과 유사하게 자화반전하는 자기장 크기가 감소하지만 H_{hard} 이 증가할수록 자화반전에 필요한 H_{easy} 이 지속적으로 감소하지 않는다. 이것은 측정에 이용된 자기저항 소자의 폭과 길이가 두께보다 훨씬 크고 내부에 다자구를 형성하면서 자화반전이 자구 회전이 아닌 자벽이동을 통해서 진행되기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 본 실험에 이용된 소자보다 더 작은 $5 \times 25 \mu\text{m}^2$ 크기의 MTJ 소자의 자화반전 결과에서도 나타난다.⁷⁾

Fig. 5에서 반전 자기장, H_{sw} 는 그래프가 X축과 만나는 두 점들 사이의 자기장 간격의 절반값이며, 그래프 이동, H_{shift} 는 그래프의 중심이 자기장 원점으로부터 이탈한 값이다. 반전 자기장은 H_{hard} 이 증가함에 따라 감소하다가 일정하게 유지된다. H_{shift} 최대 변화량이 1 Oe 정도이며 H_{hard} 이 없을 때 존재하는 0.5 Oe의 이동은 계면의 거칠기에 의해 발생하는 orange peel 결함에 의한 것으로 판단된다. H_{hard} 이 세어질수록 자유층의 자화방향이 회전하면서 H_{hard} 방향의 누설 자속이 증가한다. 자유층

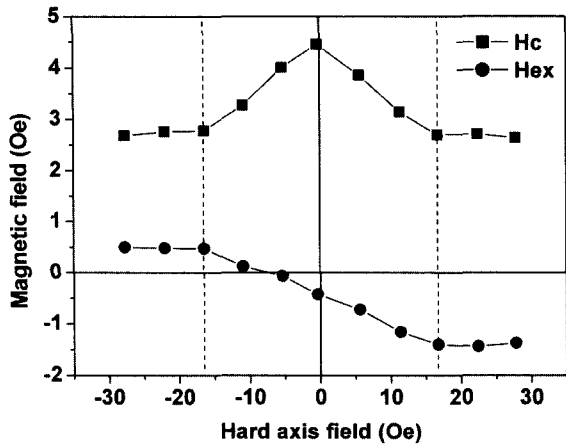


Fig. 5. Switching field and shift of minor MR loops as a function of hard axis field. (dashed lines are guides for your convenience.)

의 패턴 종횡비가 20임에도 불구하고 박막 두께에 비하여 소자의 크기가 10000배 정도로 크기 때문에 반자장에 의한 영향이 상대적으로 작아져서 그래프 이동도 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

4. 결 론

Permalloy로 자유층과 스핀밸브 구조를 갖는 MTJ를 제작하고, 2차원 헬름홀츠 코일을 이용하여 자유층의 자화반전 거동을 조사하였다. 10 nm 두께를 갖는 Permalloy 자유층의 자화반전은 H_{hard} 의 크기가 ± 16 Oe 이내의 작은 자기장 범위에서 단자구와 자화 회전을 기초로한

Stoner-Wohlfarth 모델에 근접한 거동을 하며, H_{hard} 이 증가할수록 복잡한 자화거동에 의한 자화반전이 이루어진다고 판단된다. 자화반전 그래프의 위치 이동을 측정할 결과 Neel orange peel 결합이 존재하며 H_{hard} 이 커질수록 자유층의 누설자속의 영향이 증가함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 고기능성 자성재료 연구센터(ReCAMM)에 의해 지원되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. B. Dieny, V.S. Speriosu, S.S.P. Parkin, B.A. Gurney, D.R. Wilhoit, and D. Mauri, *Phys. Rev. B* **43**, 1297 (1991).
2. J.C.S. Kools, *IEEE Trans. Magn.* **32**, 3165 (1996).
3. J.A. Brug, T.C. Anthony, and J.H. Nickel, *MRS Bull.* 1996, 23.
4. D.D. Tang, P.K. Wang, V.S. Speriosu, S. Le, and K.K.K. Kung, *IEEE Trans. Magn.* **31**, 3206 (1995).
5. Jagadeesh S. Moodera, George Mathon, *J. Magn. Magn. Mater.*, **200**, 248 (1999).
6. T. Miyazaki, N. Tezuka, *J. Magn. Magn. Mater.*, **139**, L231 (1995).
7. W.J. Gallagher, S.S.P. Parkin, Yu Lu, X.P. Bian, A. Marley, K.P. Roche, R.A. Altman, S.A. Rishton, C.Jahness, T.M. Shaw, and Gang Xiao, *J. Appl. Phys.* **81**(8), 3741 (1997).
8. Y.M. Lee, O. Song, *Kor. J. of Mater. Res.* **11**(10), 900 (2001).
9. E.C. Stoner and E. P. Wohlfarth, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* **240**, 599 (1948).
10. C. Tsang and S.K. Decker, *J. Appl. Phys.* **53**, 2602 (1982).