

양성자 조사에 의한 복잡한 자성 나노 구조물의 비파괴적 나노 패터닝

홍종일*, 김상훈, 이수길, 고정호, 손장엽, 김민석

연세대학교 신소재 공학과, 서울시 신촌동, 120-749

1. 서론

이온 조사법은 He, N, Ar, Kr, Ga 등의 이온을 다층 구조로 되어있는 자성 박막에 수십~수천 keV의 에너지로 가속시켜 그것의 계면이나 결정 구조를 인위적으로 손상시킴으로써 나노 크기의 패터닝을 구현하는 독특한 방법으로 알려져 있다[1]. 그러나 이 방법은 이온이 갖는 높은 가속 에너지로 인해 표면 및 구조의 손상과 예상치 못한 결함들이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 특히, 패터닝이 어려운 강자성 물질의 경우 패터닝된 단위 셀 간의 교환 결합력에 의해 패터닝된 단위 셀 간 상호작용이 발생하고 자기적 성질이 변형되어 소자의 오작동을 유발하는 단점을 피할 수 없다. 게다가 재료 자체가 자기적 성질을 갖고 있는 물질에 국한되고 금속 시스템에만 적용할 수 있어 다양한 분야로의 응용에 어렵다.

본 연구에서 제안하는 저에너지 양성자(수소 이온) 조사 패터닝 방법은 금속 산화물 내 산소원자만을 선택적으로 제거하는 환원 현상을 이용한 것으로, 가장 가볍고 작은 이온인 양성자를 기존 기술의 수 천분의 일 수준인 300 eV의 작은 에너지로 가속시켜 원자 단위의 물리적 또는 화학적 손상을 최소화하고 복잡한 공정 절차 없이 나노미터 수준의 패터닝이 가능한 새로운 개념의 패터닝 기술이다[2].

2. 실험방법

[Co₃O₄ 0.6 nm/Pd 1.0 nm]₁₀ 인공격자는 초고진공 d.c. 마그네트론 스퍼터를 이용하여 4.0×10⁻⁹ torr 이하의 진공에서 증착되었다. 양성자 플라즈마는 Arios 사의 EMIS 221 플라즈마 건을 이용하여 2.5 GHz의 microwave power로 형성되었고, 300 eV의 가속전압을 이용하여 이빔 리소그래피에 의한 나노 마스크 패터닝이 형성된 산화 인공격자에 조사되었다. 나노 자성 패터닝의 자기적 특성은 비정상 홀 효과를 이용하여 측정되었으며 XRD, XRR, TEM을 이용하여 환원된 인공격자의 결정학적 구조를 확인하였다. 나노패터닝의 이미지는 MFM을 이용하여 확인하였다.

3. 실험결과

스퍼터링법으로 제작된 [Co₃O₄ 0.6 nm/Pd 1.0 nm]₁₀ 인공격자에 농도와 에너지가 섬세하게 조절된 양성자를 조사함으로써 인공격자 내 0.6 나노미터 두께의 산화물 층에 존재하는 산소이온만을 선택적으로 제거하여 물질 자체를 변화시키게 된다. 이때, [Co₃O₄/Pd]₁₀ 인공격자는 [Co/Pd]₁₀ 인공격자로 환원되어 산화물이 금속으로, 비자성이 강자성으로 동시에 상변태되는 독특한 특성을 보인다. [Co₃O₄/Pd] 인공격자의 상온 상자성 또는 비자성 특성은 패터닝 후 단위 셀 간 자기적 상호작용을 피할 수 있게 해준다. 이 [Co₃O₄/Pd] 인공격자에 양성자의 농도와 에너지를 제어하여 조사하면 환원에 따른 강자성 특성이 나타나는데, 자기이력 곡선들을 통해 양성자의 농도가 증가함에 따라 비자성체에서 강자성체로 변이가 일어나면서 영구적인 자기모멘트가 증가함을 알 수 있다. 4.3×10²⁰ ions/m² 양성자 농도에서 환원된 [Co₃O₄/Pd] 인공격자의 자기이방성은 1.54×10⁶ J/m³ 으로 초상자성 효과를 극복할 수 있는 기준 시료의 자기이방성(1.43×10⁶ J/m³)보다 큰 값을 갖고 있어 환원된 인공격자는 나노소자에서 요구되는 열적으로 우수한 특성도 갖고 있음을 알 수 있다. 양성자 농도가 증가할수록 환원된 인공격자가 갖고 있는 FCC Co/Pd (111) 결정 배향성이 증가함을 x선 회절법(XRD)을 통해 확인하였

다. 이는 자기 모멘트의 증가 경향과 일치하여 환원에 따른 결정 배향성 향상이 자기적 특성에도 좋은 영향을 주었음을 알 수 있었다. 투과 전자 현미경(TEM) 측정 결과는 4.3×10^{20} ions/m²의 양성자 농도로 환원된 인공 격자가 원자수준의 결합이나 계면에서의 손상이 없음을 보여준다.(그림 1좌)

4.3×10^{20} ions/m²의 양성자 농도로 형성된 100 나노미터 크기를 갖는 인공격자의 패턴은 자기력 현미경(MFM)을 통해 외부 자기장이 없을 때에도 하나의 자기영역 형태로 존재함을 알 수 있었다.(그림 1우) 또한 패턴들 사이의 공간은 비자성체로 이루어져 있어 이들 간의 자기적 상호작용이 없음을 확인하였다. 패턴들의 수직 자기 이방성 및 자화 반전 특성은 비정상 홀 효과(AHE) 자기 검출법에 의해 측정되었다. 이를 통해 양성자 조사에 의해 패터닝된 인공격자 패턴들은 강한 수직자기이방성을 갖고 있으며 인접 패턴들 간 상호 작용 없이 우수한 자기 스위칭 특성을 보임을 확인하였다. 특히 양성자 조사에 의해 패터닝된 강한 수직자기이방성을 갖는 패턴들은 크기가 작아지면서 열에너지에 의해 발생하는 초상자성 효과에 의한 정보손실을 막을 수 있는 장점을 갖고 있음을 증명하였다.

4. 고찰

환원된 [Co/Pd] 인공격자에 대한 화학 및 결정학적 구조 분석을 통해 기존에 문제가 되었던 격자 내 결합의 발생과 인공격자의 물리적 또는 화학적 손상이 원자수준에서 발견할 수 없음을 확인하였다. 또한 자기적 특성 분석을 통해 나노 크기의 구조체에서 필요한 열적 안정성이 기존의 방법으로 만들어진 인공격자에 비해 우수하다는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구 결과는 기존의 방법으로 시도하기 어려운 복잡한 구조와 화합물로 이루어진 재료 시스템에서 목표로 하는 원자만을 선택적으로 제거함으로써 복잡한 절차 없이 비파괴적 패터닝이 가능한 새로운 개념의 양성자 조사 나노 패터닝 방법을 제시하고 있다. 나노 기술이 발전함에 따라 점차 중요해지는 구조 및 계면의 상태를 결합 없이 패터닝할 수 있는 최초의 방법으로, 물질을 구성하는 원자 각각의 결합 에너지가 서로 다른 원리를 이용하기 때문에 다양한 물질 시스템에 적용할 수 있어 과학기술적 응용 및 관련 산업 전반에 걸쳐 상당한 파급 효과를 가져올 것으로 기대된다.

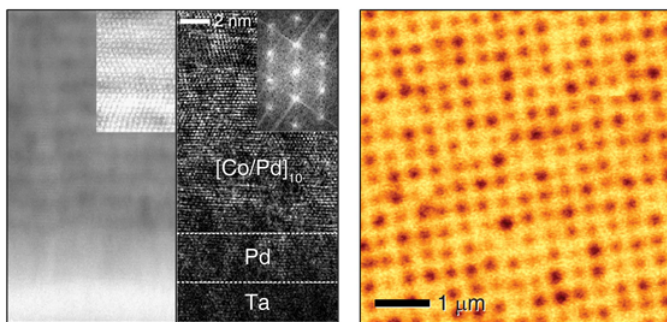


그림 1 (좌) 환원된 [Co/Pd] 인공격자의 STEM 및 XHRTEM 측정 결과. (우) 양성자 조사에 의해 형성된 패턴들의 MFM 이미지.

6. 참고문헌

- [1] C. Chappert *et al.* Planar patterned magnetic media obtained by ion irradiation. *Science* **280**, 1919–1922 (1998).
- [2] S. Kim *et al.* Nanoscale patterning of complex magnetic nanostructures by reduction with low-energy protons. *Nature Nanotech.* **7**, 567 (2012)