

**E-beam lithography를 이용하여 나노미터 크기로 패터닝된
magnetic tunnel junction (MTJ)의 건식식각**

박익현, 이장우, 민수련, 정지원*
인하대학교 화학공학과
(cwchung@inha.ac.kr*)

**Dry Etching of Magnetic Tunnel Junction Patterned with Nanometer Size
Using Electron-Beam Lithography**

Ik Hyun Park, Jang Woo Lee, Su Ryun Min, Chee Won Chung*
Department of Chemical Engineering, Inha University
(cwchung@inha.ac.kr*)

서론

최근 dynamic random access memory (DRAM)와 flash memory 등을 대체할 수 있는 차세대 메모리 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 magnetoresistance random access memory (MRAM)는 flash memory의 비휘발성 특성과 읽기 쓰기의 고속화 특성을 나타내고, DRAM보다 높은 기록 밀도가 가능하고 낮은 동작전압과 소비전력 때문에 대표적인 차세대 메모리로서 주목받고 있다[1, 2]. 이러한 MRAM 소자의 고속화, 고집적화를 위해서는 재증착이 없고, 우수한 profile을 나타내는 나노미터 크기의 magnetic tunnel junction (MTJ) stack의 건식 식각이 선행되어야 한다[3].

본 연구에서는 나노미터 크기의 MTJ stack의 건식식각을 위하여 electron (e) beam lithography 공정을 이용하여 나노미터 크기의 패턴을 형성하였고, 고밀도 유도결합 플라즈마(high density inductively coupled plasma; HDICP)를 이용한 반응성 이온 식각법(reactive ion etching)을 사용하였다.

실험

본 실험에서는 MTJ stack의 건식식각을 위해서 e-beam lithography 공정으로 나노미터 크기의 패턴을 형성하였고, 고밀도 플라즈마를 이용하는 유도결합 플라즈마(ICP) 건식식각 장비가 이용되었다. 식각장비는 크게 loadlock chamber, process chamber, 그리고 substrate susceptor로 구성되어 있다. Substrate susceptor는 chiller에 의해 일정한 온도로 냉각되어지며, 시료가 놓여지는 substrate는 He 가스를 이용하여 냉각된다. ICP 생성을 위하여 chamber 상단에 감겨진 코일은 13.56 MHz rf power supply에 연결되어 있으며 이로 인하여 고밀도 플라즈마가 유도된다. Selfbias voltage는 또 하나의 13.56 MHz의 rf power가 substrate susceptor에 연결되어 유도되고 독립적으로 ion energy를 조절한다.

실험에서 사용된 MTJ stack은 hard mask로 사용되는 TiN(1500 Å)을 시작으로 그 아래에 Ru(50)/Ta(100)/CoFe(70)/MgO(15)/CoFe(35)/Ru(8)/CoFe(35)/IrMn(120)/Ru(50)/Ta(300)/SiO₂(1000)/Si (Å in unit)의 구조로 증착되었다. TiN 박막은 rf 마그네트론 스퍼터

링 방법에 의하여 증착되었고, 다른 박막들은 dc 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착되었다. 나노미터 크기의 패턴을 형성하기 위하여 e-beam resist (ER) (MA-N2403)를 2000 Å 두께로 도포한 후 e-beam lithography 공정으로 500×500 nm², 300×300 nm² 크기의 패턴을 형성하였다. MTJ stack을 식각하기 위하여 사용되는 TiN hard mask의 식각조건을 확립하기 위해 800 W의 coil rf power, 400 V의 dc bias voltage, 그리고 2 mTorr의 gas pressure 조건에서 Cl₂(SF₆)와 Ar의 혼합가스 내에서 Cl₂(SF₆) 가스의 농도변화에 따른 식각이 시도되었다. 그리고 MTJ stack의 식각조건을 확립하기 위해 1100 W의 coil rf power, 300 V의 dc bias voltage, 그리고 5 mTorr gas pressure에서 Cl₂(BCl₃)와 Ar의 혼합가스 그리고 Ar plasma를 사용하여 MTJ stack의 식각 profile이 관찰되었다. 본 실험에서 TiN hard mask의 식각속도는 surface profilometer를 사용하여 측정하였고, 식각 profile은 field emission scanning electron microscope (FESEM)을 이용하여 측정하였다.

결과 및 토론

Figure 1은 TiN hard mask의 식각속도를 나타낸다. Photolithography 공정을 이용하여 photoresist 패턴을 형성하였고, Cl₂ 가스와 SF₆ 가스의 농도변화에 따른 식각속도와 profile을 조사하였다. TiN hard mask의 식각속도는 Cl₂(SF₆) 가스의 농도증가에 따라 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 이것은 TiN 박막이 Cl₂(SF₆) 가스와 반응하여 휘발성 물질을 형성하면서 식각되는 반응성 이온 식각이 되고 있음을 증명하는 것이다. 그리고 반응성 가스로 Cl₂ 가스를 선택했을 경우가 SF₆ 가스를 사용했을 때 보다 빠른 식각속도를 나타냈다.

Figure 2는 Cl₂와 SF₆ 가스를 사용했을 때 TiN hard mask의 식각경사를 보여준다. MTJ stack은 TiN hard mask를 이용하여 식각되어야 하기 때문에 처음으로 식각되는 TiN hard mask의 최적 식각조건 확립이 매우 중요하다. SF₆ 가스의 경우 식각속도는 느리고 식각경사가 매우 좋지 않았다. 그러나 Cl₂ 가스는 90°에 가까운 식각경사를 보여준다. 따라서 MTJ stack을 식각하기 위한 TiN hard mask의 식각조건은 40% Cl₂ in Cl₂/Ar; coil rf power 800 W; dc bias voltage 400 V; 2 mTorr의 식각조건이 최적식각 조건으로 성립되었다.

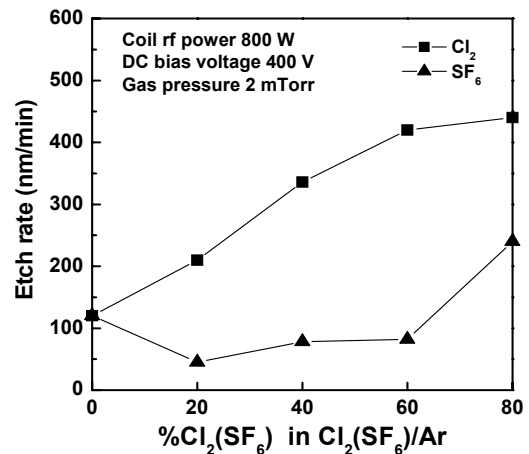


Figure 1. Etch rate of TiN hard mask as a function of chlorine gas concentration; coil rf power 800 W; dc bias voltage 400 V; gas pressure 2 mTorr.

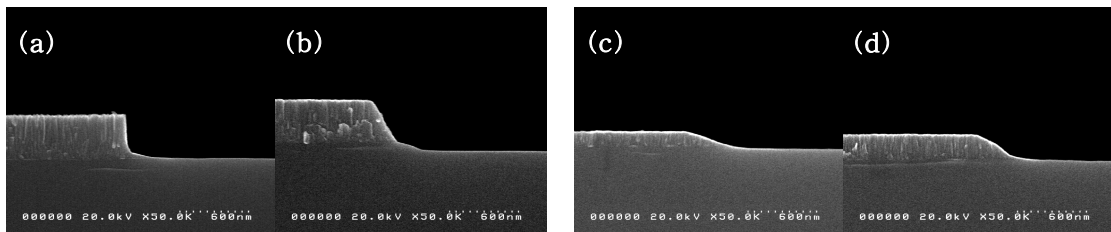


Figure 2. FESEM photographs of etched TiN hard mask using (a) 40% Cl₂; (b) Cl₂ 60%; (c) 40% SF₆; (d) 80% SF₆; coil rf power 800 W; dc bias voltage 400 V; gas pressure 2 mTorr.

확립된 TiN hard mask의 식각결과를 바탕으로 나노미터 크기로 패터닝된 MTJ stack의 건식식각이 진행되었다. Figure 3(a)는 e-beam lithography 공정을 이용하여 $500 \times 500 \text{ nm}^2$, $300 \times 300 \text{ nm}^2$ 크기로 패터닝된 시료의 FESEM 사진이다. 2000 \AA 두께의 ER이 매우 수직적으로 형성되었음을 관찰할 수 있다. Figure 3(b)은 확립된 TiN hard mask의 식각조건으로 식각된 시료의 FESEM 사진이다. 1500 \AA 의 두께로 증착된 TiN이 모두 식각된 것을 확인할 수 있다.

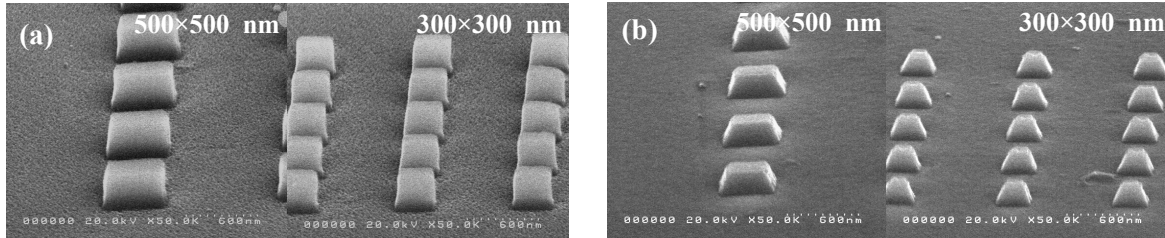


Figure 3. FESEM photographs of (a) e-beam patterned samples and (b) TiN hard mask etched at 40% coil rf power 800 W; dc bias voltage 400 V; gas pressure 2 mTorr.

Figure 4(a)는 1100 W의 coil rf power, 300 V의 dc bias voltage, 그리고 5 mTorr gas pressure에서 Ar plasma를 사용하여 식각한 MTJ stack의 FESEM 사진이다. Ar plasma를 사용하여 식각한 MTJ stack의 하단부분은 정사각형 모양을 유지하지만, 상단부분은 둥근 모양으로 변화된 모습이 관찰되었다. 그러나 Cl_2 와 BCl_3 가스를 첨가할 경우 profile이 개선되는 경향이 관찰 되었다. Figure 4(b)는 10% Cl_2 가스를 첨가하여 식각된 MTJ stack의 식각 profile을 보여준다. 상단부분과 하단부분의 정사각형 모양이 유지되었고, 약 60° 의 식각경사를 나타내어 Ar plasma로 식각했을 때 보다 개선된 식각경사를 나타냈다. 그러나 Figure 4(c)에 나타난 30% Cl_2 가스를 첨가할 경우 상단부분의 정사각형 모양이 많이 변형된 것을 알 수 있다. 이것은 반응성이 높은 Cl_2 가스의 증가로 인하여 상단부분이 빨리 식각되어 나타난 결과로 판단된다. 즉, 90% Ar 가스에 10% Cl_2 가스농도에서 가장 좋은 식각 특성이 나타났으며, 낮은 Cl_2 가스 농도에서 식각 profile이 개선될 수 있는 가능성이 보인다.

Figure 5는 Ar 가스에 BCl_3 가스 농도를 10%와 30% 농도로 첨가했을 때 나타나는 MTJ stack의 식각 프로파일이다. 10% BCl_3 가 첨가 되었을 때 나타나는 식각프로파일은 정사각형 모양이 매우 잘 유지되고, 식각경사에서도 우수한 프로파일을 나타냈다. 그러나 BCl_3 가스의 농도가 30%로 증가하면 MTJ stack의 정사각형 모양 주변으로 매우 심한 재증착 현상이 관찰되었다.

즉, Cl_2 가스가 첨가된 조건에서는 재증착 현상은 나타나지 않는 반면 식각경사가 좋지 않았고, BCl_3 가스가 첨가된 조건에서는 좋은 식각경사를 나타낸 반면 재증착 현상이 관찰되었다.

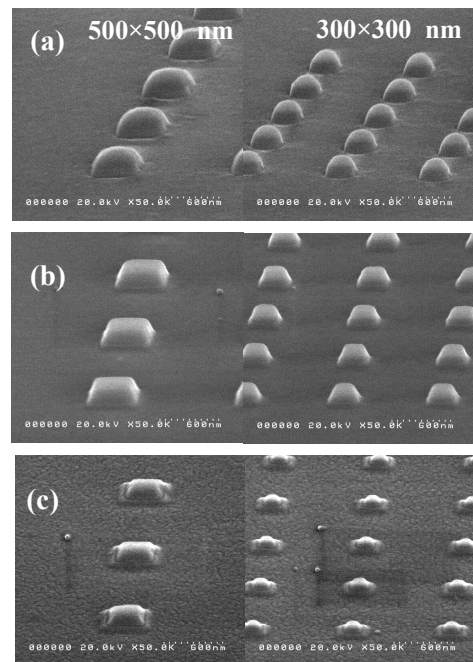


Figure 4. FESEM photographs of etched MTJ stack using (a) pure Ar; (b) 10% Cl_2 in Cl_2/Ar mixture; (c) 30% Cl_2 in Cl_2/Ar mixture, coil rf power 1100 W; dc bias voltage 300 V; gas pressure 5 mTorr.

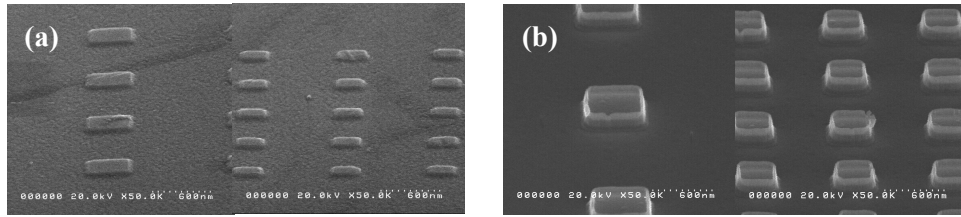


Figure 5. FESEM photographs of etched MTJ stack using (a) 10% BCl_3 in BCl_3/Ar mixture and (b) 30% BCl_3 in BCl_3/Ar mixture; coil rf power 1100 W, dc bias voltage 300 V, gas pressure 5 mTorr.

결론

본 연구에서는 고밀도 유도결합 플라즈마를 이용한 반응성 이온식각법으로 MRAM에 적용되는 MTJ stack을 깨끗하고 우수한 profile을 나타내는 최적의 식각을 하고자 하였다. Hard mask로 사용될 TiN 박막의 식각조건을 확립하기 위하여 Cl_2 가스와 SF_6 가스가 선정되었다. SF_6 가스는 Cl_2 가스보다 느린 식각속도를 나타내었으며 수직적인 profile을 얻지 못하였고, Cl_2 가스의 경우는 SF_6 에 비하여 빠른 식각속도 뿐만 아니라 40% Cl_2 가스의 농도에서 매우 수직적인 profile을 얻을 수 있었다.

확립된 TiN hard mask 식각조건을 이용하여 MTJ stack 위에 증착된 TiN hard mask를 식각하고 그 이후 pure Ar, Cl_2 , 그리고 BCl_3 가스의 농도변화에 따른 MTJ stack의 식각 profile이 조사되었다. Ar plasma를 사용할 경우 MTJ stack의 정사각형 모양이 유지되지 못했고, 식각경사도 좋지 않았다. 그러나 10% Cl_2 가스가 첨가되면 정사각형 모양이 유지되고 60° 정도의 식각경사를 나타냈다. 또한 BCl_3 가스의 첨가 시, 10% BCl_3 농도에서 깨끗하고 정사각형 모양이 잘 유지되었지만 TiN hard mask가 너무 빨리 식각되어 over etching의 가능성이 높은 것으로 판단되었다. 30% BCl_3 가스가 첨가되었을 경우 MTJ stack의 매우 심한 재증착 현상이 관찰되었지만 매우 수직적인 식각경사를 얻을 수 있었다. 즉, Ar plasma만을 사용하였을 경우보다 반응성 가스인 Cl_2 의 첨가는 재증착 현상이 없는 깨끗한 profile의 식각을 가능하게 하였고, BCl_3 가스를 첨가한 경우에는 매우 수직적인 profile이 관찰되었다. 따라서 보다 개선된 MTJ stack의 식각 profile을 획득하기 위해서는 Cl_2 가스와 BCl_3 가스를 여러 가지 비율로 혼합하는 조건을 고려해 볼 필요가 있을 것이다.

참고문헌

1. D. D. Tang, P. K. Wang, V. S. Speriosu, and S. Le. K. K. Kung, "Spin Valve RAM Cell", *IEEE Trans. Magn.* **31**, 3206-3208(1995).
2. Y. Zheng, and J. G. Zhu, "Micromagnetics of Spin Valve Memory Cells", *IEEE Trans. Magn.* **32** 4237-4239(1996).
3. S. Tehrani, J. M. Slaughter, E. Chen, M. Durlam, J. Shi, and M. DeHerrera, "Process and Outlook for MRAM Technology", *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2814-2817(1999).