

AFM을 이용한 데이터 저장 소자 연구

A Study of Data Storage Device Utilizing AFM Technology

최정환¹, 박근형^{1,a}

(Jung-Hwan Choi¹ and Kun-Hyung Park^{1,a})

Abstract

A new reading technology for the ultra-high density data storage device utilizing AFM technology was proposed and its experimental results were discussed in this paper. For the experiments, an about 2 μm thick conductive polymer layer was spin-coated on the heavily doped n-type Si wafer and an about 0.1 μm thick PMMA layer was also been spin-coated on it. After then, the 5x5 memory array was fabricated by making indents on the surface of the wafer with the heated AFM tip, and the data reading was performed by scanning the surface with the tip biased at 10 V and the measuring the current flowing out at the end of the tip. The experimental results clearly showed that the new data reading technology worked superbly. The current measured was about 0.92 pA at the cell with the indent, and it was not only below 0.31 pA at the cell without the indent, but also at the cell where the indent was erased.

Key Words : AFM, Nano-memory, Polymer, Tip, Indentation

1. 서론

HDD(hard disk drive)에 저장되는 정보의 단위 면적 당 저장용량은 현재 매년 60 % 정도의 급격한 증가 추세를 보이고 있다. 이는 드라이브의 소형화와 마그네틱 센서의 기술 발전에 의해 이루어지고 있는 것이다. 그러나 이러한 증가 추세는 집적도가 100 Gbits/sq. in에 이르면 한계에 이를 것으로 전망되고 있다[1]. 이는 첫째로, 디스크의 마그네틱 필름내의 마그네틱 도메인들이 크기가 너무 작아 실온에서도 불안정한 상태로 있기 때문이며(소위, super paramagnetic effect), 둘째로 MR 헤드와 마그네틱 필름과의 간격은 집적도의 증가와 함께 계속 감소하게 되는데 이 시점이 되면 contact 수준에까지 감소하기 때문이다. 물론 최근에는 super paramagnetic effect를 극복해서 더 마

그네틱 도메인 크기를 줄일 수 있는 획기적인 아이디어들이, 예를 들면 patterned magnetic media의 perpendicular recording[2], thermally assisted magnetic recording[3], 나와서 많은 연구가 진행되고 있지만 1 Tera bits/sq. in의 집적도까지 발달하기에는 쉽지 않을 것으로 판단된다.

한편, 최근에 AFM(atomic force microscopy)이 극미한 구조의 측정이나[4,5] 극미세 영역에서의 표면구조변화를 위하여[6-8] 다양하게 사용되면서 차세대 데이터저장기술로서 크게 각광을 받고 있다[9-11]. AFM을 이용한 표면구조변화 기술은 캔틸레버 팁을 사용하여 electromagnetic radiation을 photo reactive 폴리머에 조사하는 방식[12], 캔틸레버 팁을 사용하여 direct electrostatic discharge에 의해 reactive 표면의 특정영역이 산화되도록 하는 방식[6], 캔틸레버 팁으로 화학용액을 특정영역에 도포하는 방식[13], soft material 표면에 캔틸레버 팁으로 직접 표식을 새기는 방식[8], soft material 표면에 캔틸레버 팁으로 열을 가하면서 표식을 새기는 방식[10] 등이 있다.

1. 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부
(충북 청주시 흥덕구 개신동 12)
a. Corresponding Author : khp@cbuucc.chungbuk.ac.kr
접수일자 : 2006. 4. 13
심사완료 : 2006. 4. 20

앞에서 소개한 기술 중에서 현재 가장 주목을 받고 있는 기술은 캔틸레버 팁으로 열을 가하면서 표식을 새기는 방식이다. 이는 IBM이 현재 심혈을 기울여 개발하고 있는 기술로서, 실리콘 웨이퍼 위에 얇게 도포된 폴리머 박막에 데이터를 thermo-mechanical writing 방식으로 입력하고 thermal readout 방식으로 데이터를 읽어내는 것으로 현재 500 Gbits/sq. in의 집적도를 구현하였으며[10], 여기서 한 개의 bit 크기는 20-40 nm로서 현재 magnetic recording의 집적도보다 40-50 배 높은 집적도를 보여주고 있다. 그러나, 한 개의 캔틸레버를 가지고는 데이터를 읽는 최대 속도가 6 Mbit/sec로서[14] HDD의 80 Mbytes/sec의 데이터 읽는 속도에 비하여 크게 낮은 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 IBM에서는 AFM 팁의 캔틸레버 어레이 형태로 만들어 사용하고 있다.

IBM의 Millipede 칩이 사용하고 있는 데이터 쓰기의 기본 동작원리는 팁의 캔틸레버에 전류를 흘려 캔틸레버를 400 °C 까지 가열한 후 약간의 힘을 가하면서 폴리머 박막 위를 접촉하여 홈을 새기는 방식이다(그림 1). 물론, '0'의 데이터를 입력하고자 할 때는 캔틸레버 어레이에 x-y 어드레스 라인에 가하는 전압을 제어하여 그 해당 팁에는 전류가 흐르지 않도록 한다.

한편으로 데이터를 읽을 때는 쓸 때와 비슷하게 팁에 전류를 흘려주어 팁의 온도를 약 300 °C 까지 가열한 다음 각 지정된 위치에 팁을 접촉한다. 이 때, 그림 2에서 보여주고 있는 바와 같이 홈이 있으면 열전도가 커서 팁의 온도가 떨어지고 따라서 팁의 저항이 낮아진다. 따라서 팁의 저항을 측정하여 데이터를 읽는다.

IBM이 지금까지 개발한 기술을 분석하면 현재 가장 문제가 되는 것 중의 하나가 데이터 읽기 기술이다. IBM의 발표한 자료에 의하면 읽을 때 폴리머 위에 홈이 있는가 없는가에 따라 달라지는 저항의 차이는 0.001 %에 불과하다. 따라서 일기 동작의 신뢰성을 확보하기가 여간 어렵지 않다. 또한, 이 경우에는 팁 캔틸레버의 높이가 지나치게 낮은 경우 그 온도 차이가 적어 사용할 수 없으므로 팁 캔틸레버의 높이를 일정 수준 이하로(약 1.5 um) 낮출 수 없으며 따라서 홈의 크기를 작게 하는데 한계가 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 데이터를 읽는 방식을 온도 센싱이 아닌 전기

적 센싱 방식을 제안하였다. 즉, 폴리머 밑의 실리콘 웨이퍼를 고농도로 도핑시키고 폴리머도 전도성 폴리머를 사용하면서 데이터를 읽을 때 이들을 접지시킨 후 팁에 전기적인 펄스를 인가하면 폴리머 표면에 홈이 있으면 전류가 많이 흐르고 홈이 없으면 전류 흐름이 차단됨으로 이를 통하여 데이터를 읽는 방식이다.

2. 실험 방법

실험에 사용할 기관을 만들기 위해 실리콘웨이퍼 위에 전류를 잘 흘려줄 수 있는 약 2 μm 두께의 전도성 폴리머 막을 증착하고, 그 위에 약 0.1 μm 두께의 PMMA 막을 증착하였다(그림 1). 전도성 폴리머 증착은 hot plate에서 150 °C로 3 분간 가열하여 spin coating하는 방식을 사용하였다. PMMA 증착은 hot plate에 120 °C에서 60 초 동안 prebake 시킨 후 5,000 rpm에서 30 초 동안 spin coating 하였고, hot plate에서 90 초 동안 post bake 하는 방식을 사용하였다.

데이터 쓰기는 그림 2와 같은 방식으로 실험하였다. 가열이 가능한 팁에 전류를 흘려주어 약 400 °C까지 팁을 가열한 후 PMMA층 표면에 팁을 접촉하고 힘을 약간 가하여 PMMA 층에 홈을 뚫었다. 홈이 파인 곳은 데이터 '1'이 저장되고, 그렇지 않은 곳은 데이터 '0'이 저장된다.

서론에서 언급한 바대로, 데이터 읽기는 팁에 전압을 걸어 일정한 전류를 흘려주고 데이터가 저장된 기관에 팁을 접촉한 상태에서 스캔하면서 팁의 전류 변화를 센싱하여 각 셀에 저장된 데이터

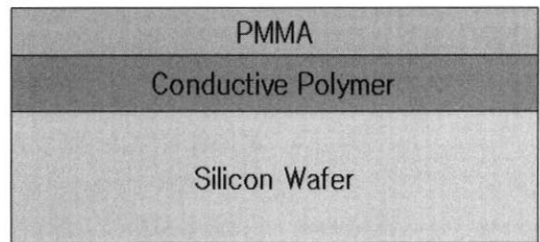


그림 1. 실험에 사용된 실리콘 기관의 수직구조.
Fig. 1. Vertical structure of Si substrate used for the experiments.

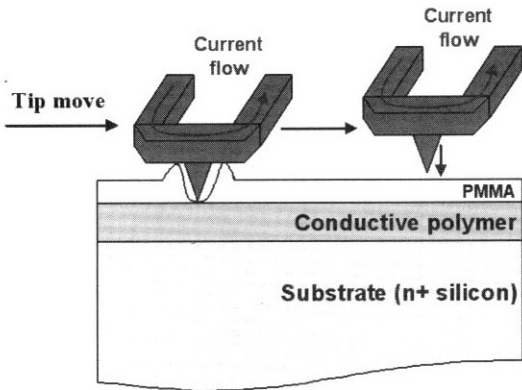


그림 2. 데이터 쓰기의 기본 메카니즘.
Fig. 2. Basic mechanism of data writing.

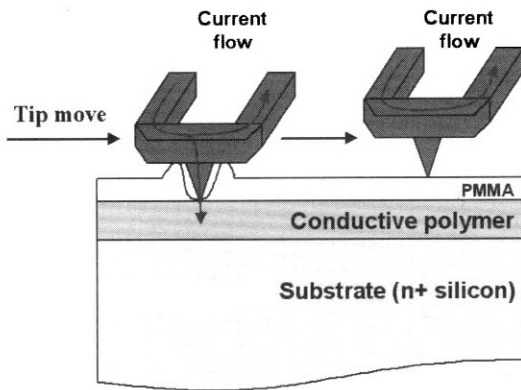


그림 3. 데이터 읽기 기본 메카니즘.
Fig. 3. Basic mechanism of data reading.

를 읽는 방식으로 수행되었다. 예를 들면, '0'의 데이터가 저장되어 있는 셀에서는 PMMA에 홈이 파져 있지 않아서 PMMA가 비전도성 물질이므로 팁의 전류에 변화가 없고, '1'의 데이터가 저장된 셀에서는 PMMA에 홈이 파져있어 팁에 흐르는 전류 중 일부가 conducting layer를 통하여 빠져 나가므로 원래 흐르던 전류보다 낮은 전류가 팁에 흐르게 된다(그림 3).

데이터 소거는 쓰기와 비슷하여 팁에 열을 가한 후 만들어진 홈 위에 팁을 올려놓으면 홈 주변에 폴리머의 부피 팽창으로 불룩하게 올라온 부분이 다시 reflow 하여 홈을 메꿈으로써 수행되었다(그림 4).

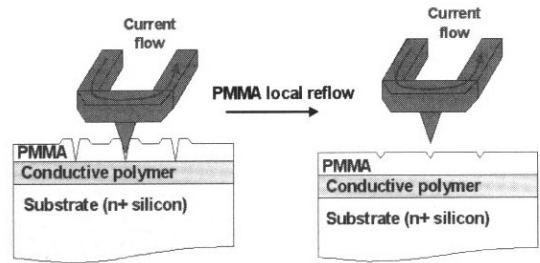


그림 4. 데이터 소거 기본 메카니즘.
Fig. 4. Basic mechanism of data erasing.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 데이터 쓰기

AFM 팁에 가하는 힘의 크기에 따라 PMMA 층에 파는 홈의 크기가 홈을 파는데 있어 어떠한 영향을 주는지 실험을 하였다. 그림 5는 AFM의 팁에 가하는 힘을 각각 0.01 nN, 1 nN 하여 홈을 파고 AFM으로 스캔한 이미지이다. 그림 5에서 크기가 큰 4개의 홈은 AFM 팁에 가하는 힘을 1 nN 으로 하여 데이터 쓰기를 하였을 경우이고, 그 외에 5개의 작은 홈은 0.01 nN 으로 하여 데이터 쓰기를 하였을 경우이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 팁에 가한 힘이 0.1 nN 일 때는 홈의 직경 크기가 약 0.6 μm 이고, 반면에 팁에 가한 힘의 크

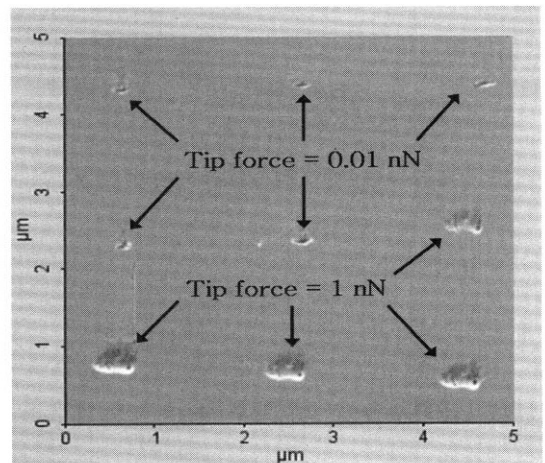


그림 5. 데이터 쓰기 후의 AFM 사진.
Fig. 5. AFM image after data writing.

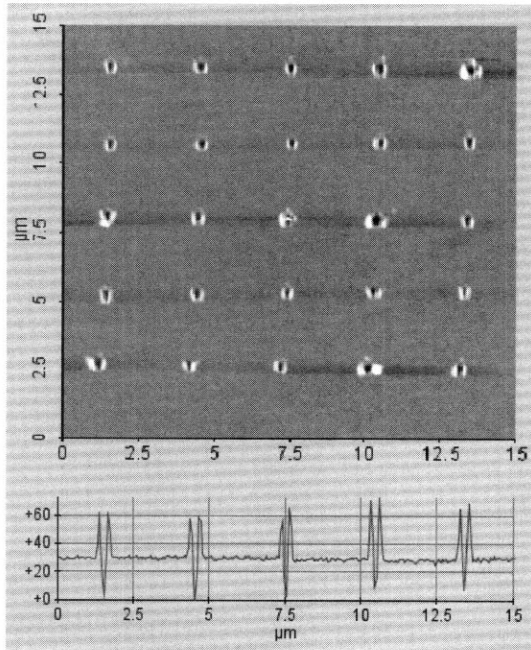


그림 6. 팁에 0.01 nN의 힘을 가하여 제작한 5x5 메모리 어레이의 AFM 사진.

Fig. 6. AFM image of 5x5 memory array fabricated with tip force of 0.01 nN.

기가 0.01 nN일 때는 홈의 직경 크기가 약 0.15 μm 이었다. 따라서, 메모리 소자의 고집적도를 구현하기 위해서는 AFM의 팁에 가하는 힘의 크기를 가능한 적게 할 필요가 있음을 알 수 있다. 이러한 방법을 사용하여 5x5 메모리 어레이를 제작한 결과가 그림 6에 나타나있다.

3.2 데이터 읽기

그림 7은 그림 8의 5x5 메모리 어레이를 Current-AFM 시스템을 사용하여 측정된 결과이다. 팁에 10 V로 주고 스캔하면서 팁의 전류를 측정하였는데, 그림 7(a)는 그림 8의 A-A' 선을 따라 스캔하면서 측정된 결과이고, 그림 7(b)는 그림 8의 B-B' 선을 따라 스캔하면서 측정된 결과이다. 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이, 홈이 파여 있지 않은 곳에서는 팁의 전류가 약 0.92 pA이었고, 홈이 파져있는 곳에서는 팁의 전류가 0.31 pA 미만이었다. 따라서, 본 논문에서 새롭게 제안한 읽기 방식이 아주 우수하게 동작하고 있음을 볼 수가 있다.

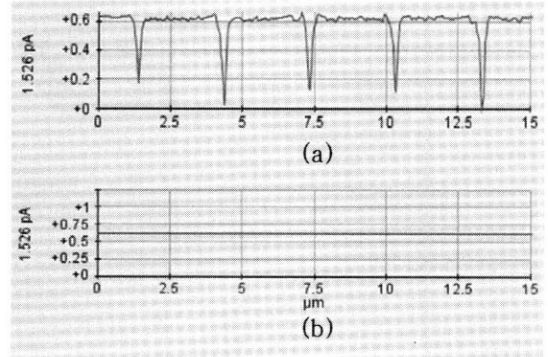


그림 7. (a) 그림 8의 A-A' 선을 따라 팁을 스캔하면서 측정된 팁의 전류 분포곡선, (b) 그림 8의 B-B' 선을 따라 팁을 스캔하면서 측정된 팁의 전류 분포곡선.

Fig. 7. (a) Tip current profile measured with scanning of tip along the line A-A' in the Fig. 8, (b) Tip current profile measured with scanning of tip along the line B-B' in the Fig. 8.

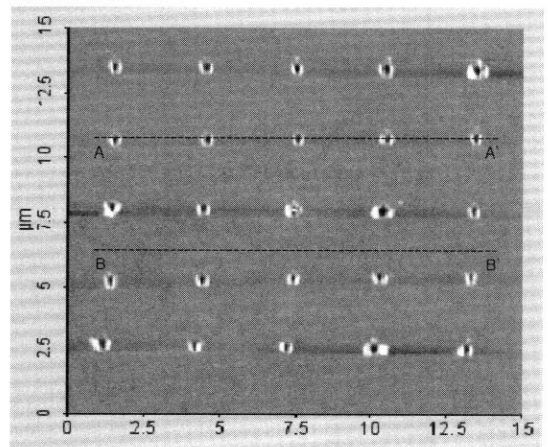


그림 8. 데이터 읽기에 사용된 5x5 메모리 어레이의 AFM 사진.

Fig. 8. AFM image of 5x5 memory array used for data reading.

3.3 데이터 소거

그림 9는 데이터 소거 후에 찍은 AFM 사진이다. 홈이 파인 곳에 약간의 흔적이 남아있음을 볼 수 있다. 이는 데이터 쓰기 시에 홈 주변에 솟아오

참고 문헌

[1] E. Grochowski and R. Hoyt, "Future trends in hard disk drives", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 32, No. 3, p. 1850, 1996.

[2] J. Lohau, A. Moser, C. T. Rettner, M. E. Best, and B. D. Terris, "Writing and reading perpendicular magnetic recording media patterned by a focused ion beam", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, p. 990, 2001.

[3] J. J. M. Ruigrok, R. Coehoorn, S. R. Cumpson, and H. W. Kesteren "Disk recording beyond 100 Gb/in² : Hybrid recording?", *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, Iss. 9, p. 5398, 2000.

[4] G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber, "Atomic force microscope", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 56, p. 930, 1986.

[5] R. Lüthi, E. Meyer, M. Bammerlin, A. Baratoff, T. Lehmann, L. Howald, C. Gerber, and H.-J. Güntherodt, "Atomic resolution in dynamic force microscopy across steps on Si(111) 7x7", *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, Vol. 100, p. 165, 1996.

[6] A. Majumdar, P. I. Oden, J. P. Carrejo, L. A. Nagahara, J. J. Graham, and J. Alexander, "Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 61, p. 2293, 1992.

[7] Minne, S. C., Soh, H. T., Flueckiger, Ph., and Quate, C. F., "Fabrication of 0.1 um metal oxide semiconductor field-effect transistors with the atomic force microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, p. 703, 1995.

[8] M. Heyde, K. Rademann, B. Cappella, M. Geuss, H. Sturm, T. Spangenberg, and H. Niehus, "Dynamic plowing nanolithography on polymethylmethacrylate using an atomic force microscope", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 72, p. 136, 2001.

[9] E. B. Cooper, S. R. Manalis, H. Fang, H. Dai, K. Matsumoto, S. C. Minne, T. Hunt, and C. F. Quate, "Terabit-per-square-inch data storage with the atomic force microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, p. 3566, 1999.

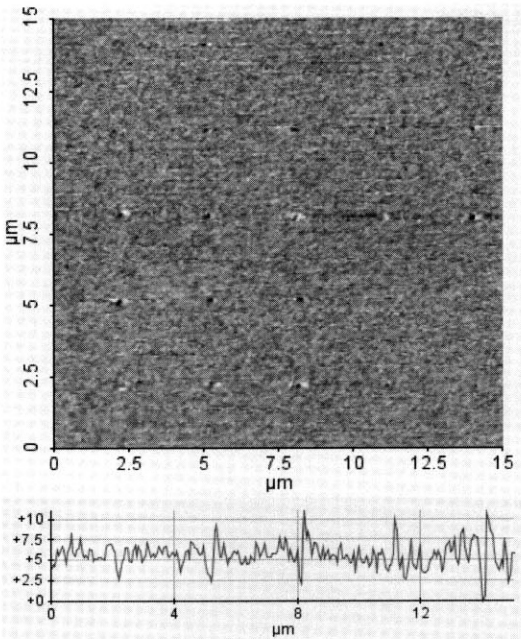


그림 9. 데이터 소거를 한 후의 5x5 메모리의 AFM 사진.
 Fig. 9. AFM image of 5x5 memory array after data erasing.

른 부분이 있는 것은 데이터 소거를 하면서 완전히 reflow되지 않고 남아있기 때문이나, 그 높이가 10 nm 이하로 소자의 쓰거나 읽기 동작에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

4. 결론

AFM 팁을 이용한 메모리 소자의 데이터 쓰기, 읽기, 소거 동작이 확실하게 수행될 수 있음을 보여 주었다. 특별히, 지금까지 가장 널리 사용되고 있는 온도 센싱에 의한 데이터 읽기 방식을 획기적으로 개선한 새로운 읽기 방식, 즉 전류 센싱에 의한 데이터 읽기 방식이 아주 우수하게 동작하는 것을 보여 주었다. 이러한 새로운 기술은 향후 AFM 데이터 저장소자 기술의 발전에 크게 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

- [10] H. J. Mamin, B. D. Terris, L. S. Fan, S. Hoen, R. C. Barrett, and D. Rugar, "High-density data storage using proximal probe techniques", IBM J. Res. Dev., Vol. 39, p. 681, 1995.
- [11] P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, W. Haerberle, M. I. Lutwyche, H. E. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, and G. K. Binnig, "The 'Millipede' - More than one thousand tips for future AFM data storage", IBM J. Res. Dev., Vol. 44, p. 323, 2000.
- [12] K. Wilder, C. F. Quate, D. Adderton, R. Bernstein, and V. Elings "Noncontact nanolithography using the atomic force microscope", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, p. 2527, 1998.
- [13] R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. H. Hong, and C. A. Mirkin, "Dip-pen nanolithography", Science, Vol. 283, p. 661, 1999.
- [14] Ried, R. P., Mamin, H. J., Terris, B. D., L.-S. Fan, and Rugar, D., "6-MHz 2-N/m piezoresistive atomic-force-microscope cantilevers with incisive tips", J. Microelectromech. Syst., Vol. 6, p. 294, 1997.