

초소형 고밀도 정보저장장치를 위한 고종횡비의 팁을 갖는 정전 구동형 폴리 실리콘 프로브 어레이 개발

전종업#, 이창수*, 최재준*, 민동기*, 전동렬**

Electrostatically-Driven Polysilicon Probe Array with High-Aspect-Ratio Tip for an Application to Probe-Based Data Storage

Jong Up Jeon[#], Chang-Soo Lee^{*}, Jae-Joon Choi^{*}, Dong-Ki Min^{*} and Dongryeol Jeon^{**}

ABSTRACT

In this study, a probe array has been developed for use in a data storage device that is based on scanning probe microscope (SPM) and MEMS technology. When recording data bits by poling the PZT thin layer and reading them by sensing its piezoresponse, commercial probes of which the tip heights are typically shorter than $3\mu\text{m}$ raise a problem due to the electrostatic forces occurring between the probe body and the bottom electrode of a medium. In order to reduce this undesirable effect, a poly-silicon probe with a high aspect-ratio tip was fabricated using a molding technique. Poly-silicon probes fabricated by the molding technique have several features. The tip can be protected during the subsequent fabrication processes and have a high aspect ratio. The tip radius can be as small as 15 nm because sharpening oxidation process is allowed. To drive the probe, electrostatic actuation mechanism was employed since the fabrication process and driving/sensing circuit is very simple. The natural frequency and DC sensitivity of a fabricated probe were measured to be 18.75 kHz and 16.7 nm/V, respectively. The step response characteristic was investigated as well. Overshoot behavior in the probe movement was hardly observed because of large squeeze film air damping forces. Therefore, the probe fabricated in this study is considered to be very useful in probe-based data storages since it can stably approach toward the medium and be more robust against external shock.

Key Words : Scanning probe microscope (주사전자현미경), Data storage (정보저장기기), Polysilicon probe (폴리실리콘 프로브), Molding (몰딩), High-aspect-ratio tip (고종횡비 팁)

1. 서론

21 세기를 흔히 정보화 시대라고 한다. 멀티미디어의 발달과 이동 통신의 보편화로 지구 어디서

나 정보의 교환이 가능해지고 이차원적 정보 통신은 삼차원적인 입체정보의 교환으로 바뀌고 있으며, 노트북, 팜탑 컴퓨터와 같은 휴대용 컴퓨터가 보편화되고 있다. 또한, 정지 화상이 아닌 동화상

☞ 접수일: 2006 년 1 월 31 일; 게재승인일: 2006 년 4 월 26 일

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail jujeon@ulsan.ac.kr Tel. (052) 223-7811

* 삼성종합기술원

** 명지대학교 물리학과

정보가 주류가 되고 있으며 화상 정보도 디지털식의 고화질이 되어가고 있다. 이러한 변화가 예상되는 21 세기 초에는 정보저장기기 또한 같은 변화를 요한다.

MEMS 및 SPM(Scanning Probe Microscope) 기술은 21 세기 정보화 시대에 있어서 필수적으로 요구되어지는 소형, 저전력, 고밀도 정보저장장치의 개발에 긴요하게 응용되어 질 수 있는 기술이다. 휴대용 기기의 저장장치에의 응용을 목표로 개발된 IBM 의 마이크로 드라이브는 자기 기록방식이 갖는 상자성 한계(superparamagnetic limit)로 인해 그 면기록밀도에 있어서 조만간 한계에 부딪힐 것이며 스핀들 모터 및 전자력형 액추에이터의 채용으로 인해 저전력화에도 한계가 있다. 플래시 메모리로 대변되는 반도체소자의 경우 저전력인 장점이 있으나 그 구조적 특성 및 리소그래피(lithography)의 한계로 인해 저장밀도(단위용량당 단가)가 자기 기록방식에 비해 현저하게 떨어진다. 상기한 HDD 나 반도체 소자의 단점을 극복하기 위해 SPM 기술과 MEMS 기술을 응용한 차세대 초소형, 저전력, 고밀도 저장기기에 대한 연구가 선진 연구기관을 중심으로 진행되고 있다.¹⁻⁴ 차세대 저장기기 용 여러 가지 기록재생 메커니즘 중 PZT 박막과 EFM(Electrostatic Force Microscope)기술을 이용한 기록재생 메커니즘에 관한 연구는 삼성 등이 중심이 되어 수행되고 있는데,⁵⁻⁷ 본 논문에서는 이 기록재생 메커니즘을 보다 높은 해상도와 S/N 비(Signal to Noise Ratio)로 구현하는데 적합한 정전 구동형 폴리 실리콘 프로브(probe)의 구조 및 제작에 관하여 기술하고자 한다.

2. EFM 기술을 이용한 정보 저장기기

2.1 저장기기의 구성

본 연구에서 개발한 폴리 실리콘 프로브 어레이가 적용되어질 PDS(Probe-based Data Storage)는 PZT 박막의 분극/압전반응(poling/piezoresponse) 특성을 이용하여 기록/재생이 이루어지며, 크게 기록 매체 표면에 정보를 기록 혹은 재생하는 정전 프로브 어레이와 기록 매체를 정밀하게 이동시켜 프로브에 의한 정보 저장 위치를 결정하는 마이크로 XY-스테이지, 그리고 이 들을 제어하고 이 들로부터 발생하는 신호를 처리하기 위한 신호처리부 등으로 구성된다. Fig. 1(a)는 저장장치의 구성도이며

이는 Fig. 1(b)와 같이 DRAM 의 모듈 형태로 패키 지되어 진다.^{5-6,8-11}

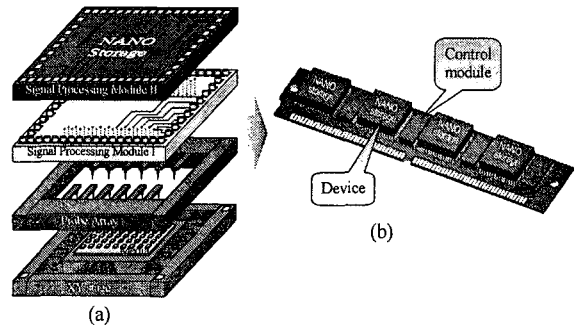


Fig. 1 Device concept of the probe-based data storage (PDS); (a) Schematic view, (b) PDS module after packaging

2.2 기록 및 재생 원리

기록재생 메커니즘으로서 PZT 박막과 EFM 기술을 이용하는 PDS 에 있어서, 정보의 기록 및 재생은 PZT 박막의 분극현상 및 압전반응현상을 이용한다.⁷ PZT 와 같은 강유전체 재료의 경우, 분극시키기 위해 외부로부터 전기장이 가해지기 전에는 그 재료 안에 무질서하게 배열된 전기쌍극자의 상쇄 효과에 의해 전체적인 분극화(polarization)는 0 이 되고, 따라서 압전 성질을 띄지 않게 된다. 이러한 재료에 외부로부터 직류 전압을 가하면 쌍극자들이 정렬하게 되는데 이 정렬된 영역을 도메인(domain)이라 하며, 전압을 증가시키에 따라 도메인들의 크기는 점점 커지게 되고 결국엔 포화 분극화가 이루어진다. 한편, 분극화의 방향을 반전시키기 위해서는 반대 방향의 전압을 인가하면 된다. PDS 에 있어서는 날카로운 선단을 갖는 프로브를 이용하여 외부 전기장을 가함으로써 분극도메인의 크기를 국부적으로 제한하여 나노미터 크기의 데이터 비트를 기록한다.

Fig. 2 는 강유전체 박막에 위/아래로 분극되어 저장된 정보비트를 재생하기 위한 원리도를 나타낸다. 재생신호의 크기는 분극방향과는 무관하며 분극의 각도에 따라 연속적으로 변화한다. 즉, 수평방향으로 분극되었을 때 재생신호의 크기는 0 이며 위 또는 아래로 분극의 각도가 증가함에 따라 재생신호의 크기도 점점 커져 완전히 상방향

또는 하방향으로 분극되었을 때 최대값을 나타낸다. 여기서 재생신호의 크기가 특정한 임계값 이상인가 이하인가에 따라 정보의 1 과 0 으로 구분할 수 있다. 이에 반해 재생신호의 위상은 분극된 각도에 관계없이 수평방향에 대해 위 또는 아래로 분극된 경우 정확히 180 도의 위상차를 나타낸다. 이 위상차를 이용하여 정보의 1 과 0 을 구분하게 되고 이를 저장장치의 정보비트로써 이용할 수 있다.

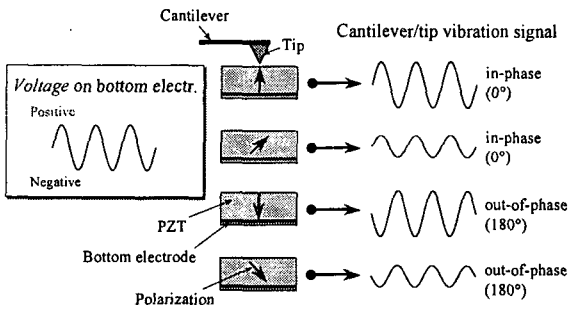


Fig. 2 Principle of domain imaging by piezoelectric deformation of domain⁷

이상에서 기술한 바와 같이, 강유전체 박막을 이용한 정보저장기기의 경우, 작은 크기의 도메인들을 분극시킴으로써 그 분극 방향에 따라 1 과 0 을 기록한다. 정보의 재생은 분극의 크기 및 방향에 따라 달라지는 캔티레버(cantilever)의 변위 또는 위상을 감지하는 방법을 사용한다. 여기서 중요한 것은 팁(tip)의 반경, 캔티레버가 강유전체 박막으로부터 떨어져 있는 거리가 전기장 분포에 미치는 영향, 그리고 그것이 얼마나 작은 면적의 도메인들의 방향을 바꿀 수 있느냐 하는 점이다. 또한 분극 방향이 반대인 도메인 사이에 일어나는 상호 작용과 도메인들의 움직임, 안정성도 중요한 요소이다. 한편 데이터 재생시 프로브는 PZT 박막의 압전반응 뿐만 아니라 매체표면의 굴곡에 의해서도 변형하게 된다. 재생신호로부터 표면의 굴곡에 의한 영향을 제거하기 위해서 프로브에는 그 움직임을 능동적으로 제어하기 위한 액추에이터 기능이 갖추어져야 한다.

2.3 기존 프로브의 문제점

수~수십 nm 크기의 작은 데이터 비트를 높은

해상도와 S/N 비로 기록/재생하기 위해서는 프로브와 미디어 간의 상호작용은 팁 끝과 미디어에만 국한되어야 한다. 그러나, 기존 프로브의 경우 팁의 높이(tip height)가 수 μm (약 $3\mu\text{m}$) 이하이기 때문에 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 프로브의 몸체(캔티레버)와 PZT 의 하부 전극(bottom electrode) 간에 무시할 수 없는 정전인력이 작용한다. 따라서 데이터 비트를 보다 높은 해상도와 S/N 비로 기록/재생하기 위해서는 팁 높이가 큰 프로브를 사용하여 미디어와 캔티레버 사이에 발생하는 정전기력의 영향을 제거하여야 한다.⁷ 그러나, 기존 공정방법을 이용한 프로브 제작의 경우 그 제작공정의 특성상 수 μm 이상의 팁 높이를 갖는 프로브의 제작이 용이하지 않다. 또한 기존 방법의 경우 팁의 보호가 난이한 단점이 있다. Fig. 4 는 기존 프로브의 구조 중 하나의 예를 도시한 것이다. 프로브의 움직임을 능동적으로 제어하기 위한 PZT 또는 ZnO 층이 팁과 동일면상에 위치하고 있으므로 높은 팁을 제작할 때 공정상 팁을 보호하기가 난이함을 알 수 있다. 따라서, PDS의 성공적인 개발을 위해서는 공정의 마지막 단계까지 팁을 보호하면서 큰 팁 높이를 갖는 새로운 공정방법이 개발되어야 한다. 본 연구에서는 몰딩기법을 이용한 프로브 제작방법을 제안하고자 한다. 몰드 및 프로브의 재질로는 각각 단결정 실리콘과 폴리 실리콘을 이용한다. 폴리 실리콘은 확립된 반도체 도핑공정을 통하여 여타의 물질에 비해 전기 전도도 및 열 전도도, 팁 표면의 재료 및 화학적 안정성 등 다양한 측면에서 이점을 갖고 있다.

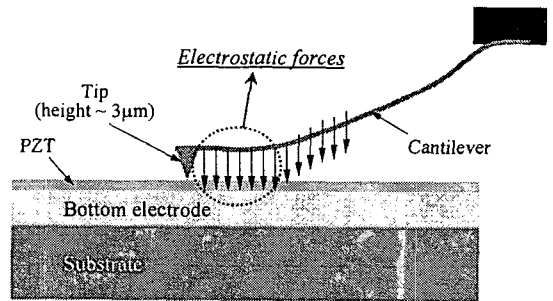


Fig. 3 Electrostatic forces generated between the probe body(cantilever) and bottom electrode

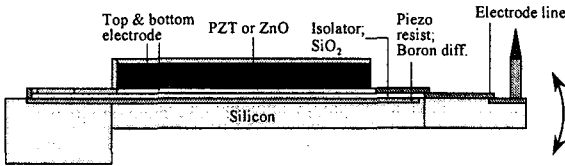


Fig. 4 Schematic drawing of a conventional probe

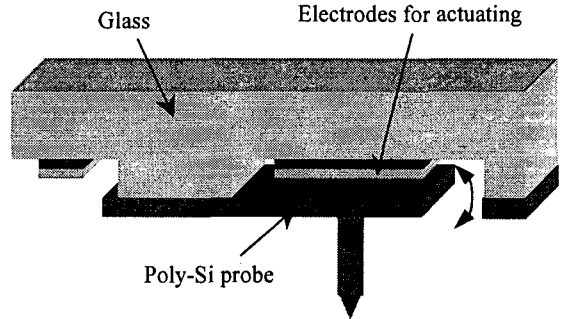


Fig. 5 Structure of electrostatically driven polysilicon probe

3. 폴리 실리콘 정전 프로브의 설계 및 제작

3.1 설계

Fig. 5 는 본 연구에서 개발하고자 하는 프로브의 구조이다. 프로브의 몸체 및 팁은 폴리 실리콘으로 제작되며 글래스(glass)에 접합되어 지지된다. 프로브 몸체의 크기 및 두께는 각각 $150 \times 180 \mu\text{m}^2$, $1 \mu\text{m}$ 이며 팁 기둥의 단면 및 팁 전체의 높이는 각각 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$, $15 \mu\text{m}$ 이다. 글래스 기판에는 프로브와 $3 \mu\text{m}$ 의 간격을 두고 프로브에 대향(對向)된 부분에 전극이 형성된다. 본 프로브는 글래스 기판 상의 전극과 프로브 몸체 간의 정전기력을 이용하여 상하방향으로 구동된다. 정전기력을 이용한 구동방식은 PZT¹², ZnO¹³ 를 이용한 압전 구동방식에 비해 공정이 매우 간단한 장점을 갖고 있으나 과도한 댐핑으로 인해 프로브 동특성에 있어서 제한을 받게 된다. 즉, 본 프로브의 경우 전극간(글래스 기판 상의 전극과 프로브 몸체) 간격($3 \mu\text{m}$)이 프로브 몸체의 면적에 비해 매우 작기 때문에, 전극간 간격에 존재하는 공기의 스퀴즈 필름 효과(squeeze film effect)에 의한 댐핑력이 과도하게 된다. 이를 완화하기 위해 프로브의 몸체 상에 $5 \times 8 \times 1 \mu\text{m}^3$ 의 직사각형 홈을 60 개 형성하였다. Table 1 은 폴리 실리콘 프로브의 설계값을 정리한 것이다.

Table 1 Designed specifications of a polysilicon probe

Specifications	Value
Stiffness	1 N/m
Displacement	1 μm
Gap btw. electrodes	3 μm
Driving voltage	15 V
Tip size	$5 \times 5 \times 15 \mu\text{m}^3$
Cantilever size	$150 \times 180 \times 1 \mu\text{m}^3$
Array	4×8

3.2 제작 공정

정전 구동형 폴리 실리콘 프로브의 제작공정은 실리콘 웨이퍼 공정, 글래스 웨이퍼 공정, 실리콘과 글래스 웨이퍼의 양극 접합 후 공정 등으로 나눌 수 있다. Fig. 6 은 제작 공정도를 도시한 것이다. 먼저 실리콘 웨이퍼 부분의 제작공정을 살펴보면, (a) 실리콘 웨이퍼에 두께 $1 \mu\text{m}$ 의 산화막을 증착한 후 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 의 사각 홈을 패터닝한다. (b) ICP-RIE(Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)을 사용하여 단면 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$, 깊이 $12 \sim 13 \mu\text{m}$ 의 실리콘 몰드를 형성한다. 후술하는 피라미드 형상 팁부분의 몰드 형성시 몰드의 측벽을 보호하기 위하여 두께 2000 \AA 로 몰드 전면을 습식 산화한다. (c) 몰드 바닥면의 산화막을 RIE 로 제거하고 몰드 바닥면의 실리콘이 드러나게 되면, TMAH(Tetra Methyl Ammonium Hydroxide) 20wt%를 사용하여 피라미드 형상의 팁 몰드를 형성한다. Fig. 7 은 팁 몰드가 형성되어 가는 과정을 보여주는 광학 현미경 사진이다. 형성된 피라미드를 샤프닝 산화(sharpening oxidation)하여(산화시간은 1000°C 에서 5 시간) 팁 끝단의 반경을 최대한 작게 한다. 샤프닝 산화공정은 산화막이 성장하면서 실리콘 속으로 침투해 들어가는 특성을 이용하는 공정으로, 전 단계 공정에서 형성시킨 실리콘 피라미드 형상을 뾰족하게 형성시킬 수 있는 방법이다.¹⁴ (d) 폴리 실리콘을 증착하고 PoCl_3 을 도핑한다. 실리콘 웨이퍼의 마지막 공정으로 폴리 실리콘을 프로브 형태로 패터닝한다. 다음으로 글래스 웨이퍼 부분의 제작 공정을 살펴 보면, (e) 전극층을 형성하기 위해서 글래스 웨이퍼를 깊이 $3 \mu\text{m}$

만큼 불산:중류수(1:2)를 이용하여 습식 식각한다. (f) Cr/Au(500/2000Å)를 증착, 패터닝하여 전극층을 형성한다. 이상에서 기술한 방법을 이용하여 실리콘 부분과 글래스 부분을 각각 제작한 후, (g) 실리콘 웨이퍼와 글래스 웨이퍼를 양극 접합(anodic bonding)한다. (h) 실리콘 웨이퍼의 뒷면을 TMAH 20wt%로 약 10 시간 습식 식각한다. 최종적으로, 산화막을 제거한 후 PDCV(P-dicrolo vengen)을 사용하여 스틱션(stiction)을 방지한다.

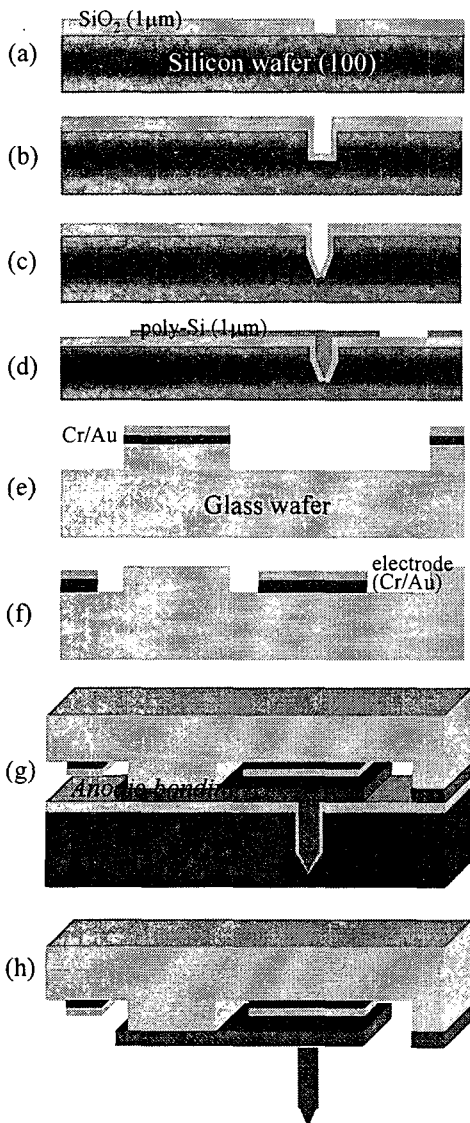


Fig. 6 Fabrication process

이상에서 설명한 바와 같이, 본 공정방법은 팁 이 공정의 마지막 단계까지 실리콘 몰드 안에 보호되므로 팁 형성의 높은 수율이 기대된다. 또한 기 알려진 바와 같이 높은 중형비를 갖는 실리콘 몰드는 ICP-RIE 를 이용하여 간단하게 제작할 수 있으며, 본 연구에서 사용한 폴리 실리콘 증착장 비인 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition)는 스텝커버리지(step coverage)가 좋은 장점을 갖고 있어 샤프닝 산화되어 있는 실리콘 몰드 안에 폴리 실리콘을 어렵지 않게 채워 넣을 수 있으므로 큰 중형비를 갖는 프로브를 용이하게 제작할 수 있다.

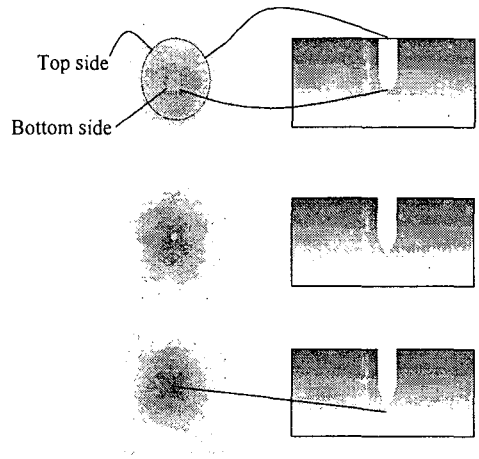


Fig. 7 Optical microscopic images showing the pyramidal mold shapes as the etching time elapses

3.3 제작 결과

Fig. 8 은 제작 결과이다. 팁의 몸체는 3.1 절에서 기술한 바와 같이 크기 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 의 사각형상으로 제작하였다. 프로브의 몸체 및 피라미드 형태의 팁이 잘 형성되어 있음을 알 수 있다. 총 32 개 (4×8 어레이)의 프로브를 제작하였으며 형성된 팁의 반경은 약 15nm 이었다. 팁의 반경이 작을수록 작은 크기의 데이터 비트를 기록/재생할 수 있음을 상기하면 본 연구에서 개발한 프로브를 이용함으로써 직경이 약 30nm 인 데이터를 기록/재생할 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 9 는 댄핑의 영향을 완화시키기 위해 캔티레버 몸체에 형성한 홀을 보여주는 현미경 사진이다. 홀이 형성된 캔티레버 뿐만 아니라, 구동전극, 팁 등이 잘 형성된

것을 볼 수 있다.

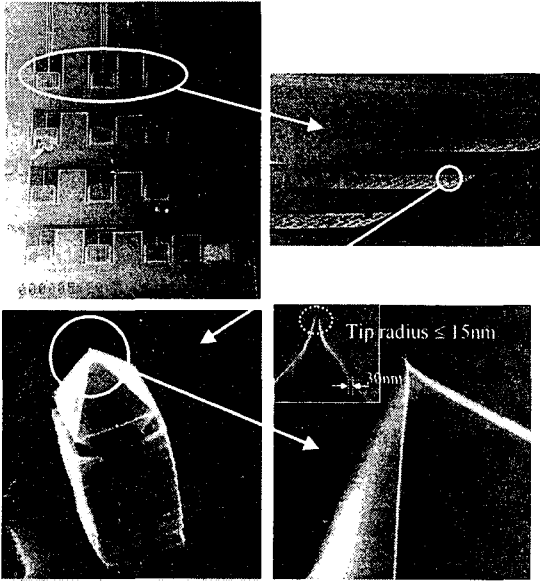


Fig. 8 SEM images showing the fabricated poly-silicon probes. The tip radius is about 15nm

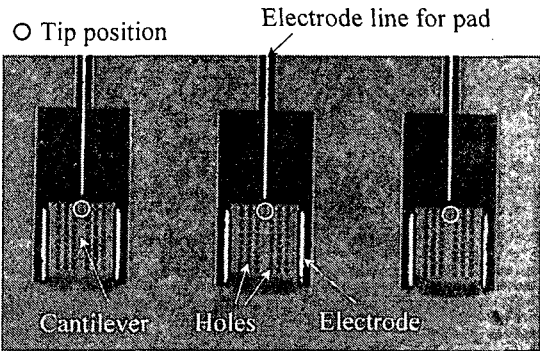


Fig. 9 Optical microscopic photograph showing the holes formed on the cantilever for reducing damping effect

4. 폴리 실리콘 정전 프로브의 구동 특성

제작된 폴리 실리콘 프로브의 구동 특성을 LDV(Laser Doppler Vibrometer)와 DSA(Dynamic Signal Analyzer)를 이용하여 측정하였다. Fig. 10 은 측정장치의 개략도이다.

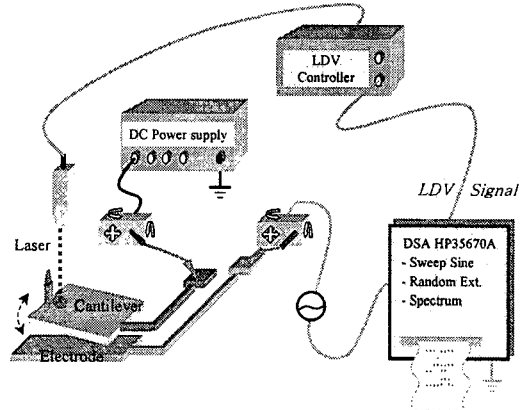


Fig. 10 Schematic diagram of measurement set-up using laser doppler vibrometer (LDV) and dynamic signal analyzer (DSA)

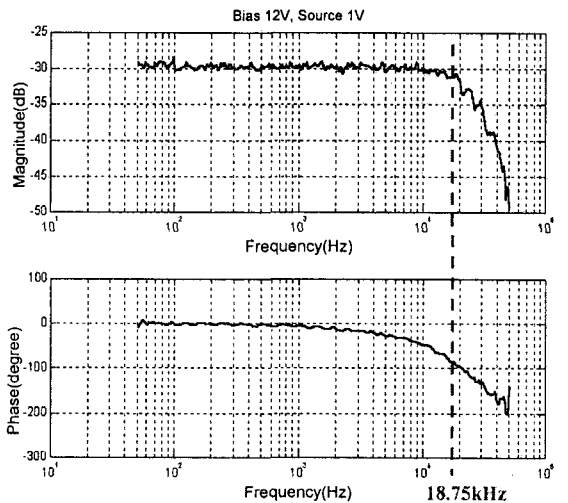


Fig. 11 Frequency response characteristic of polysilicon probe

Fig. 11 은 프로브의 주파수 응답 특성을 측정 한 결과이다. 본 프로브의 경우, 3.1 절에서 기술한 바와 같이 정전기력을 발생하기 위한 두 전극(글래스에 형성되어 있는 전극과 프로브 몸체)간 간격이 프로브의 면적에 비해 상당히 작기 때문에 프로브의 움직임에는 공기의 스퀴즈 필름 효과에 의한 댐핑이 크게 작용한다. 그 결과, Fig. 11 에서 알 수 있듯이 프로브의 동특성에는 피크점이 보이

지 않았다. 프로브는 약 18.75kHz 에서 -90° 의 위상차를 보였다. 제작한 프로브의 힘(인가전압)과 변위 간의 관계식을 2 차 선형 시스템으로 모델링하여 변위를 구하고 이를 주파수 응답 측정 결과와 비교하였다. 응답 특성간 오차가 최소인 2 차 선형 시스템의 댐핑계수를 구하였으며, 그 결과 값이 약 $\zeta=0.64$ 인 댐핑계수가 얻어졌다. 고유진동수는 Fig. 11 에서 알 수 있듯이 18.75kHz 이었다. Fig. 12 는 프로브에 바이어스 전압 12V, 구형파의 제어 전압 2V, 1kHz 를 인가하였을 때, LDV 를 이용하여 측정한 프로브의 시간 응답 특성이다. 공기에 의한 적절한 댐핑력의 영향으로 오버슈트(overshoot)이 적고 매우 안정된 응답특성이 얻어졌다. 본 프로브의 DC 이득은 16.7nm/V 이었다.

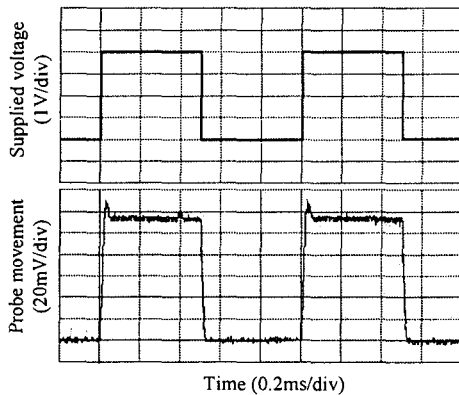


Fig. 12 Time response of polysilicon probe where the bias voltage is 12V and the control voltage is 2V, 1kHz in square

5. 결론

본 연구에서는 초소형, 고밀도의 차세대 정보저장기기인 PDS(Probe-Based Data Storage)에 응용하기 위해 팁의 반경이 15nm 이고 높이가 15 μ m 인 폴리실리콘 프로브 어레이를 제작하였다. 본 연구에서 시도된 몰드기법을 이용한 폴리 실리 콘 프로브 제작 방식은 팁을 보호하면서 공정을 진행할 수 있고, 큰 중형비를 갖는 팁을 제작할 수 있으며, 샵닝 공정이 가능하여 작은 팁 반경을 재현성 있게 구현할 수 있는 다수의 장점을 갖고 있다. 제작된 폴리 실리 콘 프로브의 고유진동수 및 DC 이득

은 각각 18.75kHz, 16.7nm/V 이었다. 주파수 및 시간 응답 측정 결과로부터 계산된 프로브의 댐핑계수는 $\zeta=0.64$ 이었으며 이는 프로브의 응답특성에 오버슈트(overshoot)이 적어 미디어에 안정적으로 팁이 접근한다는 측면과 외란에 대한 강건성, 프로브의 운동제어의 용이성 측면에서 고무적인 결과라 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 국가 지정 연구실사업(과제명: 초소형 고집적 Nano Storage 개발)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Barrett, R. C. and Quate, C. F., "Charge Storage in a Nitride-Oxide-Silicon Medium by Scanning Capacitance Microscopy," *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, No. 5, pp. 2725-2733, 1991.
2. Sato, A. and Tsukamoto, Y., "Nanometre-Scale Recording and Erasing with the Scanning Tunneling Microscope," *Nature*, Vol. 363, pp. 431-432, 1993.
3. Takimoto, K., Kawade, H., Kishi, E., Yano, K., Sakai, K., Hatanaka, K., Eguchi, K. and Nakagiri, T., "Switching and Memory Phenomena in Langmuir-Blodgett Films with Scanning Tunneling Microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 61, No. 25, pp. 3032-3034, 1992.
4. Hidaka, T., Maruyama, T., Saitoh, M., Mikoshiba, N., Shimizu, M., Shiosaki, T., Wills, L. A., Hiskes, R., Dicarolis, S. A. and Amano, J., "Formation and Observation of 50 nm Polarized Domains in $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ Thin Film using Scanning Probe Microscope," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, No. 17, pp. 2358-2359, 1996.
5. Lee, K., Shin, H., Moon, W. K., Jeon, J. U. and Pak, Y. E., "Detection Mechanism of Spontaneous Polarization in Ferroelectric Thin Films using Electrostatic Force Microscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, No. 3A, pp. 264-266, 1999.
6. Shin, H., Lee, K., Lim, G., Jeon, J. U., Pak, Y. E., Hong, S. and No, K., "Formation and Observation of Ferroelectric Domains in $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ (PZT) Thin

- Films using Atomic Force Microscopy,” Proc. 6th SPIE’s Ann. Int. Symp. on Smart Structures and Materials, Switzerland, Vol. 3675, pp. 94-102, 1999.
7. Hong, S., Woo, J., Shin, H., Jeon, J. U., Pak, Y. E., Colla, E. L., Setter, N., Kim, E. and No, K., “Principle of Ferroelectric Domain Imaging using Atomic Force Microscope,” J. Appl. Phys., Vol. 89, No. 2, pp. 1377-1386, 2001.
 8. Imura, R., Shintani, T., Nakamura, K. and Hosaka, S., “Nanoscale Modification of Phase Change Materials with Near-Field Light,” Microelectronic Eng., Vol. 30, pp. 387-390, 1996.
 9. Ma, L. P., Yang, W. J., Xue, Z. Q. and Pang, S. J., “Data Storage with 0.7nm Recording Marks on Crystalline Organic Thin Film by a Scanning Tunneling Microscope,” Appl. Phys. Lett., Vol. 73, No. 6, pp. 850-852, 1998.
 10. Binnig, G., Despont, M., Drechsler, U., Haberle, W., Lutwyche, M., Vettiger, P., Mamin, H. J., Chui, B. W. and Kenny, T. W., “Ultrahigh-Density Atomic Force Microscopy Data Storage with Erase Capability,” Appl. Phys. Lett., Vol. 74, No. 9, pp. 1329-1331, 1999.
 11. Vettiger, P., Brugger, J., Despont, M., Drechsler, U., Duig, U., Haberle, W., Lutwyche, M., Rothuizen, H., Stutz, R., Widmer, R. and Binnig, G., “Ultrahigh Density, High-Data-Rate NEMS-Based AFM Data Storage System,” Microelectronic Eng., Vol. 46, pp. 11-17, 1999.
 12. Itoh, T., Ohashi, T. and Suga, T., “Noncontact Scanning Force Microscopy using a Direct-Oscillating Piezoelectric Microcantilever,” J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 14, No. 3, pp. 1577-1581, 1996.
 13. Minne, S. C., Yaralioglu, G., Manalis, S. R., Adams, J. D., Zesch, J., Atalar, A. and Quate, C. F., “Automated Parallel High-Speed Atomic Force Microscopy,” Appl. Phys. Lett., Vol. 72, No. 18, pp. 2340-2342, 1998.
 14. Marcus, R. B., Ravi, T. S., Gmitter, T., Chin, K., Liu, D., Orvis, W. J., Ciarlo, D. R., Hunt, C. E. and Trujillo, J., “Formation of Silicon Tips with <1nm Radius,” Appl. Phys. Lett. Vol. 56, No. 3, pp. 236-238, 1990.