나노기술을 이용한 Probe-based Data Storage(PDS)의 연구동향

전 종 업
울산대학교 기계 · 자동차공학부

1. 서론

현재까지 비휘발성(non volatile) 정보저장기기는 HDD, FDD등과 같은 자기기록장치와 DVD, CD, MODD등과 같은 광기록장치, 플래시 메모리, FRAM, MRAM등과 같은 반도체 기억소자등을 중심으로 발전되어 왔다. 그러나 광자기 기록장치의 경우 상자성 한계(superparamagnetic limit, 약100Gb/in2)와 빛의 회절현상등으로 인해 그 면밀도 증가에 있어서 곧 물리적 한계에 부딪치게 될 것이다. 반도체 기억소자의 경우 면밀도면에 있어서 광자기 기록장치에 미치지 못하고 있으며 소자의 단위 용량당 가격도 고가이고 향후 가격 전망도 불투명한 상태이다. 또한 자외선을 이용한 리소그래피의 한계로 인해 면밀도 증가에 대한 전망도 불투명한 상태이다. 21C 정보화 및 휴대화 시대에 있어서 폭증하는 정보량을 조금이라도 작은 용기에(소형화) 더 많이(대용량화) 그리고 더 값싸게(저가격화) 담고자 하는 것은 인간의 자연스러운 욕구이고 이러한 욕구를 충족시키기 위해서는 상기한 저장기기의 한계를 극복할 수 있는 새로운 개념의 차세대 저장기기에 대한 연구가 절실한 상황이다.

1981년 IBM 쥬리히 연구소의 Binnig등은, 끝이 뾰족한 미세 탐침(probe, 곡률반경 수Å~수십nm)과 시료 표면간의 간격을 매우 작게(수Å) 유지한 상태에서 양자간에 전압차(수mV~수V)를 부가함으로써, 미시세계에서 일어나는 전자의 양자역학적 터널링 효과를 이용하여 물질의 표면현상을 원자단위로 관찰 할 수 있는 STM(Scanning Tunneling Microscope)을 개발하여 원자단위의 표면물성 관찰에 대한 새로운 장을 열었다. 이후, 탐침과 시료간에 작용하는 원자력을 이용하여 표면 요철(topology)이나 마찰력등을 관찰할 수 있는 AFM(Atomic Force Microscope), 표면의 전기적 특성 및 자기적 특성을 관찰할 수 있는 EFM/SCM(Electrostatic Force Microscope/Scanning Capacitance Microscope) 및 MFM(Magnetic Force Microscope), 가시광선의 파장에 의한 해상도 한계를 극복한 SNOM(Scanning Near field Optical Microscope)등 탐침주사 방식을 이용하여 여러가지 물리량을 측정할 수 있는 다양한 형태의 현미경이 개발되었는데 이를 통칭하여 SPM(Scanning Probe Microscope)이라 한다.

STM이 개발된 이래 스탠포드 대학의 Quate교수는, SPM 기술이 미소탐침과 표면간의 상호작용(interaction)을 지극히 미소한 영역에 국한시킴으로써 원자단위의 해상도를 얻게 된다는 점에 착안하여, SPM 기술을 응용함으로써 TB급 이상의 대용량 저장기기가 실현가능함을 최초로 제안하였다. 이후 IBM, 히타치, CMU, HP, 캐논, 소니, 마쯔시타, NEC, Kionix등 세계 유수의 선진 기관에서 SPM 기술을 응용한 새로운 형태의 고밀도 저장 기기인 PDS(Probe-based Data Storage)에 대한 연구가 진행중에 있으며 국내에 있어서도 서울대, 삼성종합기술원, LG 종합기술원, KETI등을 중심으로 현재 연구개발이 활발히 진행중에 있다.

본 해설에서는 대표적인 연구사례를 중심으로 SPM 기술을 응용한 새로운 방식의 기록재생 메커니즘에 관하여 소개하고 각 방식의 장단점에 대하여 기술하고자 한다. 또한 PDS 저장장치의 구조에 대하여 소개하고 다중탐침, 평면 나노구동기등 관련된 요소기술들에 대한 개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

2. SPM 기술을 응용한 기록재생 메커니즘

현재까지 진행되어온 PDS용 기록재생 메커니즘의 연구개발현황을 표1에 나타내었다. 본 절에서는 이하 각 기록재생 메커니즘에 대해 보다 소상히 알아보고 각 메커니즘의 장단점에 대해 기술하고자 한다.

표 1. PDS(Probe based Data Storage)용 기록재생 메커니즘의 연구현황
(SPM : Scanning Probe Microscope ; STM : Scanning Tunneling M. ; AFM : Atomic Force M ; EFM : Electrostatic Force M. ; SCM : Scanning Capacitance M. ; MFM : Magnetic Force M. ; WORM : Write Once Read Only ; RW : Rewritable)

SPM	기록재생 메커니즘	타입	기록매체	탐침	비트크기 (nm)	기록 재생 속도	연구기관
STM	전계증발, 표면형상변화	WORM	MoS_2	도전성	0.3	70ms/N.A	히타치
	도전율변화	RW	polyimide Langmuir Blodgett films	도전성	10	2μs/10μs	캐논
		RW	N-(3-nitrobenzylidene)-p-phenylenediamine(NBPDA)	도전성	0.7	10ms/N.A	중국과학원
		RW	vanadium bronze (β-$Na_{0.33}V_2O_5$)	도전성	10	1ms/N.A	NEC

AFM	열기계적 표면형상변화	WORM RW	PMMA	열반응	50~40	50μs~10μs	IBM
	기계적 표면형상변화	WORM	polycarbonate	열반응, 윤활제	10	60μs~0.2μs	히타치
	전계증발 표면형상변화	WORM	highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) or SiO_2	도전성, 윤활제	10	2ms~N.A	히타치
	도전율변화	WORM	a-GeSbTe	도전성	10	0.5ms~N.A	마쓰시타
EFM	압전박막의 분극	RW	PZT	도전성, 윤활제	24	0.1ms~10ms	HP, 삼성전자 등
	전하주입	RW	TTPAE tetra-N,N-diphenyl-4-aminophenylethylene	도전성, 윤활제	30	N.A	도시바
SCM	전하트랩	RW	nitride-oxide-silicon(NOS)	도전성	75	40ns~2μs	스탠포드대학
MFM	자화	RW	Co-Cr-Ni-Fe	도전성, 윤활제	300	N.A	NTT
		WORM	Co-Cr-Ni-Fe	자화, 윤활제	150	N.A	DI
	열보조자화	WORM	Pt-Co	도전성, 자화, 윤활제	60x240	0.25s~N.A	광통신

2-1. STM 기술 응용 기록재생 방식

STM을 이용한 기록재생 방식은 전계증발(field evaporation)현상을 이용하여 표면의 형상을 변형시키는 방법 및 터널링 전류를 이용하여 매체의 전기적 특성을 변화시키는 방법등으로 크게 나눌 수 있다. 히타치의 Hosaka 등은 그림1(a)에 나타난 바와 같이 MoS_2 표면으로부터 0.3nm의 간격을 두고 위치한 텅스텐 탐침에 5.5V, 70ms의 전압펄스를 인가하여 MoS_2 시료로부터 S원자 하나 하나를 전계증발 현상을 이용하여 떼어내고, 이를 1nm 높이에서 STM의 원리를 이용하여 읽어내었다[1]. 이 때 기록된 도트(dot)크기는 0.3nm이며 이를 면밀도로 환산하면 6Pb/in^{2}로 이는 현재 실험실수준에서 발표한 HDD의 면기록밀도인 100Gb/in^{2}의 약 6만배에 해당하는 저장밀도이다. 이와 같은 STM을 응용한 기록재생 방식은 STM이 현존하는 현미경중에서 가장 높은 해상도를 가진 만큼 가장 큰 저장밀도를 이룰 수 있는 가능성이 있다. 그러나, 터널링 전류가 탐침 매체간 간격에 지수함수적으로 변하므로 재생시 안정적인 전류를 얻기 위해서는 탐침-매체간 간격이 약 0.1Å의 정밀도로 제어되어야 하는 난점이 있다. 정밀한 간격제어와 동시에 저장기기로서 충분한 재생속도를 얻기 위해서는 수~수십 MHz에 해당하는 높은 대역폭(bandwidth)을 갖는 고속 서보 메카니즘의 개발이 필수적이나 현재의 기술수준으로 그다지 용이한 기술은 아니다. 또한, STM을 응용한 기록재생 방식은 매체 표면의 조건(산화정도, 청정도등) 변화에 민감하게 반응하므로 신뢰성 있는 기록재생을 실현하기 위해서는 고진공하에서 수행하여야 하는 문제점이 있다.

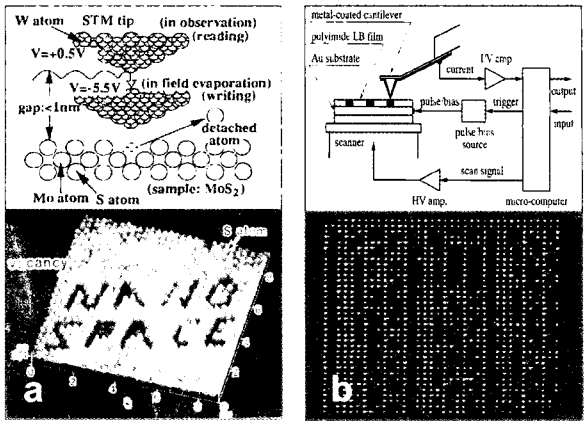

그림 1. (a) 전계증발(field evaporation) 현상을 이용한 정보의 기록 및 재생(Hitachi). (b) LB 필름의 도전성 변화에 의한 정보의 기록 및 재생(Canon).

캐논에서는 그림1(b)에 나타난 바와 같이 매체의 도전성 변화를 이용한 기록재생 방식을 제안하였다[2]. 외팔보(cantilever) 선단에 같이 뾰족한 도전성 팁(tip)이 형성되어 있는 탐침을 기록매체인 폴리이미드 LB 필름(polyimide Langmuir Blodgett film)에 접촉시킨 상태에서 탐침과 LB 필름 하부의 금전극간에 전압을 인가한다. 이때 전압이 인가된 부분의 LB 필름에는 물리적 또는 화학적 변화가 발생하여 국부적으로 도전성이 달라지게 된다. 기록된 정보비트는 탐침과 하부전극간에 일정전압을 가한 상태에서 전류를 읽어냄으로써 재생되어진다. 이와 같은 방법으로 구현된 최소도트의 크기는 10nm로 이는 1Tb/in^{2}의 기록밀도에 해당된다. 본 연구는 정보 저장 기기로서의 비트 패턴을 꽤 현실성 있게 보여준 것으로서, 빠른 재생속도를 얻을 수 있는 장점이 있으나 양질의 재현성 있는 박막 매체의 제조, 형성된 비트의 온도 안정성 및 반복 기록 횟수, 매체의 장기 안정성등에 대한 연구가 선행되어야 한다. 또한 탐침이 매체 표면에 접촉한 상태에서 기록 재생이 이루어지므로 매체의 마모문제가 심각하게 대두될 수 있다.

상기한 방법 이외에도, 중국과학원에서는 다양한 종류의 유기박막에 국부적인 전계를 인가하여 박막의 전기 전도율을 변화시킴으로써 정보비트를 기록하는 연구를 수행하여 최소 도트 크기 0.7nm를 달성하고 있다[3]. 이 방식의 경우 사용전압보다 약간 높은 전압에도 유기박막의 전기적 특성이 손상될 수 있으며 기록된 정보의 장기 안정성이 해결되어야 한다. 한편, NEC에서는 기록매체의 상변화(phase transition)에 의한 매체 전도율의 변화를 이용하여 약 10nm 크기의 도트를 기록재생하고 있다[4].

2-2. AFM 기술 응용 기록재생 방식

AFM 기술을 응용한 기록재생 방식에는 기계적 또는

전계증발현상을 이용하여 매체의 표면형상을 변형시키는 방법, 매체의 상변화에 의한 전기 전도도를 변화시키는 방법등이 있다. IBM에서는 그림2에 보인 바와 같은 열기계적(thermomehanical) 방식을 이용하여 정보비트를 기록하고 있다[5][6]. PMMA 박막에 미세 탐침을 접촉하여 기계적으로 누른 상태에서 팁 부분에 설치된 저항발열체를 이용하여 팁 끝에 열을 발생시킴으로써 PMMA 박막을 녹여내어 미세 피트(pit)를 형성시킨다. 이 때 형성된 미세 피트가 데이터에 해당된다. 재생은, 탐침이 데이터 피트안으로 들어간 상태와 피트 밖의 평평한 매체 표면에 위치한 상태에 있어서 탐침으로부터 매체쪽으로 전달되는 열량이 서로 차이가 있다는 사실을 이용하여 저항발열체의 온도(저항) 변화를 감지함으로써 이루어진다. 본 방식은 탐침의 구조가 매우 간단하며 저가의 매체 제작이 용이하므로 실용적 관점에서 매우 유력한 기록재생 방식이다. 그러나, 탐침의 기계적 공진 주파수 및 열 시상수가 재생 속도를 결정하므로 이에 대한 지속적인 개선이 요구되며 접촉식으로 인한 팁 또는 매체 마모에 대한 대책이 필요하다. 또한 IBM에 의하면 열유동(thermal reflow)에 의해 다수의 반복 기록이 가능하며 이에 대한 실험결과를 발표하였으나 반복기록시의 기록확률(writing probability) 및 반복횟수등에 대한 좀 더 세밀한 정량적인 분석이 필요하다. IBM에서는 본 방법을 이용하여 크기 30~40nm(면밀도 400~500Gb/in^2)의 정보 도트를 50μs, 100kHz의 속도로 기록, 재생하고 있다.

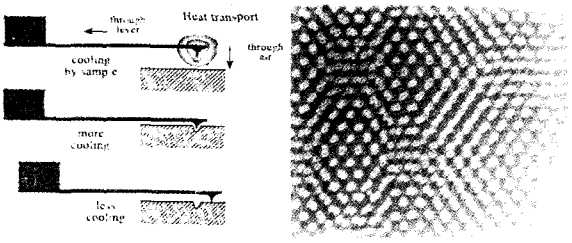

그림 2. 열기계적 방법에 의한 정보 기록 및 재생(IBM).

히타치에서는 폴리카보네이트(polycarbonate) 매체 표면을 탐침을 이용하여 고주파로 두들김으로써 매체에 미소 피트를 형성하고 이를 6.6MHz의 높은 고유진동수를 갖는 탐침을 이용하여 AFM 방식으로 고속 재생하였다. 최소 피트 크기 10nm(1.2Tb/in^2)를 달성하고 있으며 5Mb/s의 빠른 재생속도를 얻고 있다.

AFM을 이용한 또 다른 기록재생방식으로는 STM의 경우와 유사한 전계증발을 이용한 방법과 전기전도도 변화를 이용하는 방법이 있다. 전계증발을 이용한 방법의 경우, 표면에 금박막이 입혀져 있는 탐침을 이용하여 SiO_2나 그라파이트(graphite) 기판 위에 금 피트나 돌기(mound)를 형성할 수 있는데 히타치의 경우[7][8] 최소 도트 크기 10nm 정도를 구현하고 있다. 한편, 마쯔시타에서는 현재 상변화를 이용한 ODD에 주로 사용되고 있는 a-$Ge_2Sb_2Te_4$를 기록매체로 이용하여 매체의 전기전도도 변화에 의한 정보비트의 기록재생에 대한 연구를 수행하였다[9].

2 3. EFM/SCM 기술 응용 기록재생 방식

EFM/SCM을 이용한 기록재생 방식은 압전박막의 수축팽창을 이용한 방법과 전하를 질화물이나 산화물안에 트랩(trap)시키는 방법, 유기물질내에 전하를 주입하는 방법등이 있다. 압전박막의 수축팽창을 이용한 방법은 HP와 삼성종합기술원에서 주로 연구되고 있다. 그림3(a)에 보인 바와 같이 정보의 기록은 압전박막(PZT)위에 위치한 도전성 탐침에 전압을 인가하여 압전박막을 분극시킴으로써 이루어진다[10]. 기록된 정보 비트는 탐침을 이용하여 매체에 외부전계를 가하고 이때 발생하는 박막의 수축팽창 현상을 이용하여 재생된다. 본 방식은 자기기록에 비해 도메인이 안정적이고 더 작은 정보 비트를 기록할 수 있는 장점이 있으나 박막의 피로(fatigue)현상이나 고품질의 박막 제조등의 문제점이 해결되어야 한다.

전하트랩에 의한 기록재생방법은 스탠포드 대학에서 1991년에 최초로 시도 되었다[11][12]. 그림3(b)는 그 구성도 및 정보 기록의 한 예를 보여주고 있다. 매체는 CVD 방법에 의해 제작된 $Si_3N_4/SiO_2/Si$(NOS)로 구성되며 AFM 팁에 증착된 전극과 Si 웨이퍼 사이에 전기적 펄스를 가하여 Si_3N_4/SiO_2의 계면에 전하를 트랩시켜 데이터를 기록한다. 전하가 트랩된 부분에서는 팁과 Si 웨이퍼 사이의 정전용량이 변화하므로 이를 측정하여 기록된 데이터를 읽어낸다. 한편 이외에도 도시바에서는 AFM 탐침을 이용하여 TTPAE 유기박막에 전하를 주입시켜 데이터를 저장하고 표면의 포텐셜(potential)을 측정함으로써 데이터를 읽어내는 연구를 수행하였다[13]. 이상에서 기술한 EFM/SCM을 이용한 기록재생방식은, 신호대 잡음비가 너무 작아 신호 재생에 로크인 증폭기(lock in amplifier) 또는 고정도의 정전용량 센서가 필요하고 이로 인해 신호처리부의 크기가 커지며 재생속도가 느려지는 단점이 있다.

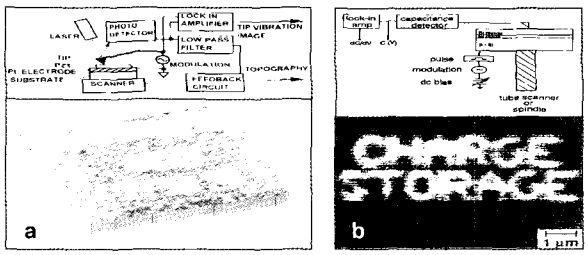

그림 3. (a) 압전박막의 분극현상을 이용한 정보기록 (삼성종합기술원). (b) 전하트랩을 이용한 정보기록 (스탠포드대학).

2 4. MFM 기술 응용 기록재생 방식

MFM을 이용하여 매체에 정보를 기록하는 방법으로는 일정 크기의 외부자기장의 도움으로 미소 자기 도메인을 형성하는 방법과 터널링 전류에 의한 매체의 국부적인 가열을 이용하여 자기도메인을 형성시키는 방법이 있다. 외부 자기장의 도움을 이용하는 경우 코일은 매체를 중심으로 탐침의 반대쪽에 위치한다. 팁을 매체에 접촉시킨 상태에서 코일에 전류를 인가하면 뾰족한 팁 부분에 자계가 집중되어 국부적인 자기 도메인이 형성되어 데이터를 기록하게 된다. 기록된 데이터는 기계적으로 변조된 팁을 매체 표면으로부터 수백 ㎛m의 간격을 두고 스캔하면서 자기력의 변화율을 측정함으로써 재생된다. NTT에서는 퍼말로이 팁(permalloy tip)과 Co Cr/Ni-Fe 수직 기록 매체를 이용하여 0.5~1.0㎛ 크기의 데이터를 기록하였으며 DI에서는 Co Cr로 코팅된 팁을 이용함으로써 150nm 크기의 데이터를 기록하였다. 한편 히타치에서 수행한 방법으로[1], 그림4와 같이 터널링 전류로 매체를 가열시킨 상태에서 자화된 탐침만을 이용하여 자기 도메인을 형성시킴으로써 60×240㎚의 비트 크기에 40Gb/in^{2}에 해당되는 기록 밀도를 얻고 있다. 이때 탐침은 자기적 성질을 위해 SiO_2에 PtCoCr 합금 박막을 코팅하고 그 위에 탄소 막을 입혀 전도성을 부여하였으며 매체로는 Pt/Co 다층 박막을 사용하였다.

MFM을 이용한 기록방식은 현존 HDD 기술의 상당 부분을 그대로 이용할 수 있다는 커다란 장점이 있으나 타 방식에 비해 데이터 비트 크기면에서 상당히 열세에 있고 탐침 제작이 매우 어려우며 로크인 증폭기가 필요하고 재생속도가 매우 느린 단점이 있다.

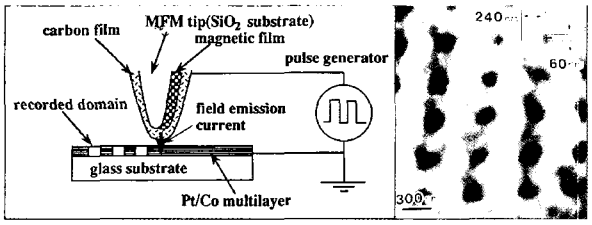

그림 4. 자화된 탐침에 의해 자기 도메인을 형성함으로써 정보를 기록하는 방식(Hitachi).

3. PDS의 구조

3 1. PDS의 디바이스 형태

PDS의 디바이스 형태는 크게 회전형과 스캔형의 두 가지로 나눌 수 있다. 회전형은[14] 기존 HDD나 ODD의 형태를 거의 대부분 그대로 이용하고 기록재생용 헤드부분만을 SPM 탐침으로 대체한 형태로 IBM과 Hitachi에서 주로 연구되었으나 최근 IBM의 경우 후술하는 스캔형으로 개발 방향을 선회하였다. 그림5는 Hitachi에서 연구하고 있는 스캔형 PDS의 구조도이다. 회전형은 간단하게 디바이스를 구현할 수 있는 장점이 있으나, 빠른 재생속도를 얻기 위한 매체의 고속 회전으로 말미암아 회전진동이 발생하게 되고 이로 인해 데이터의 정밀 트랙킹이 매우 난이하게 된다. 또한 접촉식 기록재생인 경우, 매체의 고속회전으로 인해 매체 또는 팁의 마모문제가 발생하게 된다.

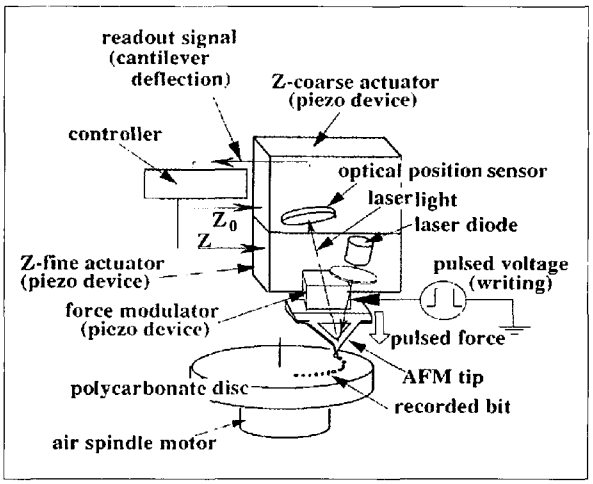

그림 5. 스캔형 PDS의 구조도(Hitachi).

현재, 기록재생 메커니즘의 연구에 국한되지 않고 상품화를 목적으로 시스템 관점에서 연구를 수행하고 있는 기관으로는 IBM, Hitachi, CMU[15], 삼성종합기술원, Kionix, Nanochip등을 들 수 있는데 Hitachi를 제외한 나머지 기관 대부분은 PDS의 형태로써 스캔형을 채택하고 있다. 그림6은 IBM과 삼성등에서 제안하는 스캔형 PDS의 구조도이다. 스캔형 PDS는 크게 정보 기록 및 재생 기능을 수행하는 다중탐침(multi probe), 기록매체와 다중탐침간의 평면상 상대운동을 부여하기 위해 기록매체를 구동하는 다축 나노 구동기(기록매체는 나노구동기의 플랫폼에 장착됨), 다중탐침으로부터의 기록 및 재생신호를 처리하기 위한 신호처리모듈등으로 구성되어진다. 나노 구동기와 다중탐침은 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 가공기술을 이용하여 제작되어지며 이를 ASIC화한 신호처리 모듈과 한 칩안에 집적함으로써 반도체 칩들과 같이 매우 콤팩트한 저장장치를 구현하고자 한다. 제II절에서 기술한 기록재생메커니즘을 포함하여 PDS의 핵심요소기술을 나열하면 다음과 같다.

- 나노미터 크기의 기록/재생 기술 및 기록매체 제조기술
- MEMS 기술을 이용한 대변위, 초정밀 다축 평면구동기의 제작 및 제어기술
- MEMS 기술을 이용한 다중탐침 제작기술
- 데이터 신호처리 및 서보정도 기록방식 기술

• 전기회로부의 ASIC화 기술 및 인터페이스 기술
• 장치 패키징 기술 및 표준화

상기 요소기술중 현재까지 주로 연구가 활발히 수행되고 있는 부분은 제2에서 기술한 기록재생 기술 및 후술하는 나노구동기와 다중탐침 기술이다.

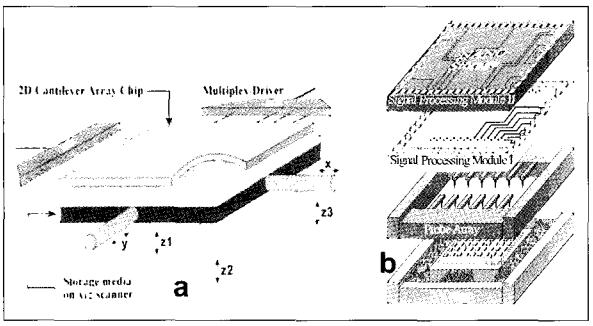

그림 6. (a) "Millipede"로 명명되어진 IBM PDS의 개념도(IBM). (b) 탐침모듈위에 집적화된 신호처리 모듈을 갖는 PDS의 개념도(삼성종합기술원).

3 2. 다중탐침

PDS의 상품화에 있어서 가장 큰 장애물(bottleneck)이 되고 있는 것은 HDD에 비해 현저히 느린 기록/재생속도이다. 한 개의 탐침을 이용한 정보의 재생속도는 HDD의 수십~수백분의 1에 지나지 않는다. PDS에서는 느린 재생속도를 해결하기 위해 그림6에 보인 바와 같이 다중탐침(multi probe)을 이용하고 있다. 즉, 다수의 탐침을 이용하여 동시에 데이터를 기록재생함으로써 경쟁력있는 재생속도가 얻을 수 있을 것으로 기대되고 있다.

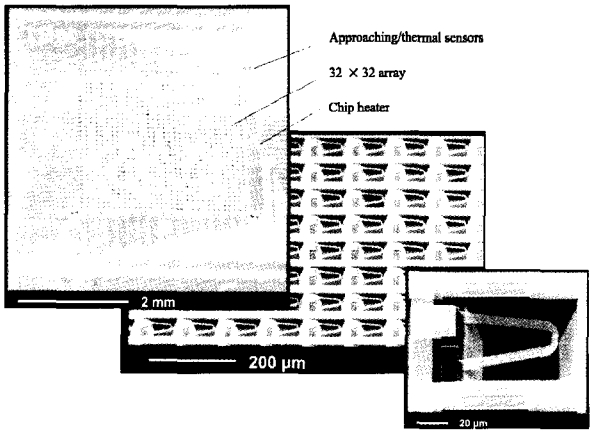

그림 7. 1024개(32×32)의 탐침어레이(IBM).

IBM에서는[6] 그림7에 보인 바와 같이 $3\times3mm^2$안에 $92\times92\mu m^2$의 피치로 2차원적으로 배열된 32×32개(총 1024개)의 탐침어레이를 개발하였다. 본 칩에는 기록재생을 위한 1024개의 다중탐침 이외에도 4개의 접근/레벨링센서를 장착하여 탐침과 기록매체간의 접근 및 기록매체의 레벨링을 제어할 수 있도록 하였으며, 4개의 열감지센서 및 히터를 각각 설치하여 칩의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 그림8은 IBM에서 상기한 1024개의 다중탐침을 이용하여 기록재생을 실시한 예이다. 약 80%의 탐침이 정상적으로 작동하였으며 기록된 데이터의 면밀도는 15~30Gb/in^{2}이었다. 한편, 삼성종합기술원에서는 그림9에 나타난 바와 같이, 고종횡비(high aspect ratio)를 갖고 정전력에 의해 구동되는 4×8 폴리실리콘 탐침 어레이를 개발하였으며[16] LG 종합기술원에서는 PZT층을 탐침의 외팔보 상부에 증착하고 이에 구동전압을 인가함으로써 압전력에 의해 구동되는 능동형 탐침어레이를 개발하였다.

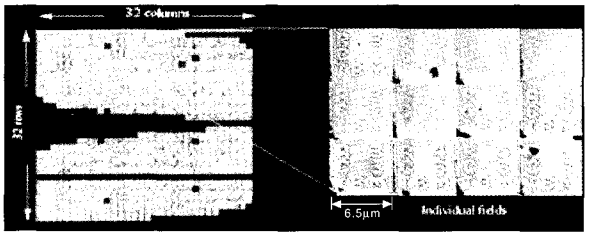

그림 8. 1024개의 다중탐침을 이용한 기록재생(IBM).

PDS에 있어서 비록 정보의 기록재생 속도를 높이기 위해 다중탐침을 이용하고 있으나 속도를 높이기 위해서는 기본적으로 각각의 탐침의 고유진동수를 가능한 한 높여야 한다. 이를 실현하기 위해서는 탐침의 질량은 가능한 한 작게, 기계적 강성은 가능한 한 높게 설계하여야 하는데 이 경우 탐침의 구동범위가 작아지게 되는 단점이 발생하게 된다. 따라서, 다중탐침의 설계시에는 이에 대한 적절한 절충(trade off)이 필요하게 된다. 제작 측면에서는 균일한 치수 및 특성을 갖는 수백~수천개의 다중탐침을 수율 좋게 제작할 수 있는 보다 신뢰성있는 제작공정에 대한 연구가 보다 심도있게 연구되어져야 한다.

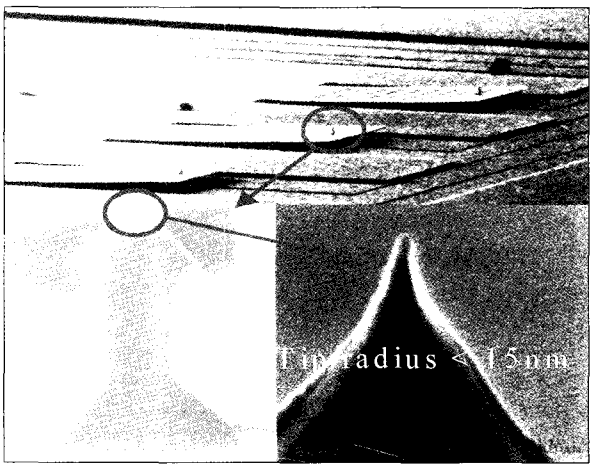

그림 9. 32개(4×8)의 폴리실리콘 탐침어레이(삼성종합기술원).

3 3. 나노구동기

전술한 바와 같이 기록매체는 정전력 또는 전자력으로 구동되는 다축 나노구동기의 플랫폼에 장착되어 다중탐침에 대하여 평면상 상대운동을 하게된다. 이때 나노구동기의 구동범위는 탐침 어레이의 피치보다 크게 설정되어야만 매체의 전영역에 데이터를 기록재생할 수 있다. 현재 IBM과 삼성종합기술원에서는 로렌츠력을 이용한 전자력형 나노구동기를, Kionix와 삼성종합기술원은 정전력을 이용한 나노구동기를 개발하고 있다. 전자력형 나노 구동기는 큰 구동력을 얻을 수 있는 장점이 있으나 일반적으로 큰 소비전력, 발열문제, 복잡한 제작공정등의 단점을 갖고 있다. 이에 비해 정전력형 나노구동기는 소비전력이 작고 발열문제가 없으며 제작이 용이한 장점을 갖고 있으나 구동력이 매우 작아 이를 크게하기 위해서는 큰 전압을 인가하여야 하는 단점이 있다. 또한 전기력선에 의해 주위의 먼지등을 끌어 들이기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다. 그림10은 IBM에서 개발중인 전자력형 나노구동기의 코일 및 영구자석의 배치도이다[17].

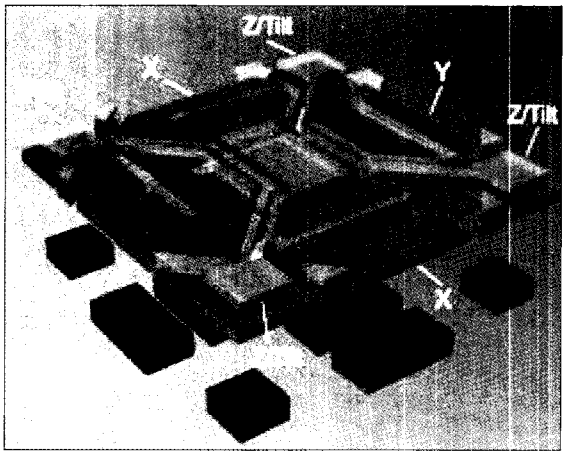

그림 10. IBM에서 개발중인 전자력형 나노구동기의 코일 및 영구자석의 배치도(IBM).

IBM에서는 궁극적으로는 z방향 회전을 제외한 5축운동을 구현하고자 하고 있으며 현재 평면상의 2축구동에 성공한 상태이다. 구동범위 100㎛, 소비전력 3mW를 실현하고 있다. 그림11의 (a)와 (b)는 각각 삼성에서 개발한 정전형 및 전자력형 나노구동기를 보여주고 있다[18][19]. 정전기력에 의해 구동되는 정전형의 경우 구동전압 30V에서 구동범위 약 100㎛, 전자력형의 경우 구동전류 50mA에서 구동범위 약 100㎛를 실현하고 있다.

현재까지의 나노구동기 관련 연구는 시작품을 한번 제작하여 움직임을 확인하여 본 정도로 향후 나노구동기의 보다 구체적인 성능, 즉 위치 및 속도 정밀도, 응답성, 소비전력, 온습도의 의존성, 충격실험등에 대한 보다 세밀한 정량적인 분석이 필요하다.

4. 결론 및 향후과제

PDS는 이상에서 기술한 바와 같이 데이터의 저장 면밀도 측면에서는 현재의 타 방식의 추종을 불허하며 다중탐침 어레이와 평면 나노구동기등을 MEMS 기술을 이용하여 제작하므로 소형화 및 저가격화가 용이하나 이의 실용화에는 아직 해결하여야 할 기술적 문제가 많이 남아 있다. 정보 비트의 안정성, 탐침 및 매체의 마모, 반복 기록성등 보다 신뢰성 있는 기록재생 메커니즘에 대한 연구가 필요하며, 균일한 치수 및 특성을 갖는 다중탐침 어레이 제작, 나노미터 정밀도를 갖는 평면 나노구동기 제작, 데이터의 정밀 트랙킹 방법, 신호처리부의 ASIC화 및 집적화, 기록재생의 병렬처리 기법의 최적화등이 향후 지속적으로 연구되고 해결되어야 한다. 무엇보다도 기존의 정보저장기기에 견줄만한 고속의 기록재생 메커니즘에 대한 획기적인 아이디어가 절실히 요구된다.

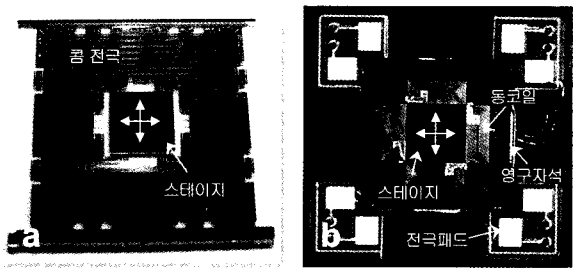

그림 11. (a) 정전형 2축 나노구동기 (구동범위 : 100㎛@30V). (b) 전자력형 2축 나노구동기 (구동범위 : 100㎛@50mA). (삼성종합기술원).

참고문헌

1. S. Hosaka, "SPM based storage", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 32, No. 3, pp.1873 1877, May 1996.
2. K. Takimoto *et al.*, "Writing and reading bit arrays for information storage using conductance change of a Langmuir Blodgett film induced by scanning tunneling microscopy", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 15, No. 4, pp. 1429 1431, Jul/Aug 1997.
3. L. P. Ma, W. J. Yang, Z. Q. Xue and S. J. Pang, "Data storage with 0.7nm recording marks on a crystalline organic thin film by a scanning tunneling microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, No. 6, pp. 850 852, Aug. 1998.
4. A. Sato and Y. Tsukamoto, "Nanometre scale recording and erasing with the scanning tunneling microscope", *Nature*, Vol. 363, pp. 431 432, June 1993.

5. P. Vettiger *et al.*, "The "Millipede"-More than one thousand tips for future AFM data storage", *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 44, No. 3, pp. 323-340, May 2000.
6. P. Vettiger *et al.*, "The "Millipede"-Nanotechnology entering data storage", *IEEE Trans. Nano technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 39-55, March 2002.
7. P. Imura, S. Hosaka *et al.*, "Demonstration of nanometer recording with a scanning probe microscope", *Microelectronic Eng.*, Vol. 27, pp. 105-108, 1995.
8. S. Hosaka, H. Koyanagi and A. Kikukawa, "Nanometer recording on graphite and Si substrate using an atomic force microscope in air", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 32, Part 2, No. 3B, pp. L464-L467, March 1993.
9. H. Kato and T. Tohda, "Nanometer-scale recording on chalcogenide films with an atomic force microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, No. 22, pp. 2961-2962, May 1995.
10. S. Hong *et al.*, "Principle of ferroelectric domain imaging using atomic force microscope", *J. Appl. Phys.*, Vol. 89, No. 2, 1377-1386, Jan. 2001.
11. R. C. Barrett and C. F. Quate, "Charge storage in a nitride-oxide-silicon medium by scanning capacitance microscopy", *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, No. 5, pp. 2725-2733, Sep. 1991.
12. B. D. Terris and T. C. Barrett, "Data storage in NOS: Lifetime and carrier-to-noise measurements", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 42, No. 5, pp. 944-949, May 1995.
13. H. Hieda, K. Tanaka and N. Gemma, "Charge injection and extraction on organic dot structure by atomic force microscopy", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 14, No. 2, pp. 1234-1237, Mar/Apr. 1996.
14. H. J. Mamin *et al.*, "High-density data storage based on the atomic force microscopy", Proc. IEEE, Vol. 87, No. 6, pp. 1014-1027, June 1999.
15. L. R. Carley *et al.*, "Single-chip computers with microelectromechanical systems-based magnetic memory", *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, No. 9, pp. 6680-6685, May 2000.
16. 이창수, 최재준, 민동기, 전동렬, 전종업, "초소형 대용량 저장장치를 위한 정전 프로브 어레이 개발", *제3회 한국 MEMS 학술대회 초록집*, 서울대학교, pp. 239-247, 2001년 4월
17. H. Rothuizen *et al*, "Compact copper/epoxy-based electromagnetic scanner for scanning probe applications", *Proc. 15th Ann. Int. MEMS 2002 Conf.*, Las Vegas, USA, pp. 582-585, Jan. 2002.
18. C.-H. Kim, Y.-K. Kim, H.-M. Jeong, J.-J. Choi and J. U. Jeon, "Fabrication of micro xy-stage with large area rectangular shuttle using anodic bonding process", *Transducers '01*, Munich, Germany, pp. 752-755, June 2001.
19. J.-J. Choi, H. Park, K. Y. Kim and J. U. Jeon, "Electromagnetic micro x-y stage for probe-based data storage", *J. Semiconductor Technol. and Sci.*, Vol. 1, No. 1, pp. 84-93, March 2001.

저자소개

《진종업》

- 1986년 서울대 기계설계학과(공학사)
- 1988년 KAIST 생산공학과(공학석사)
- 1997년 동경대학 정밀기계공학전공(공학박사).
- 1988년~1992년 KIST 연구원.
- 1995년~1997년 일본 Kanagawa Academy of Science and Technology 연구원.
- 1997년~2001년 삼성종합기술원 수석연구원.
- 2001년~현재 울산대학교 기계자동차공학부 조교수.
- 관심분야: MEMS, Nano technology, 제어시스템등.
- E mail : jujeon@mail.ulsan.ac.kr