

SPM 및 MEMS 기술을 응용한 PDS(Probe-based Data Storage) 연구

현재까지 비휘발성(non-volatile) 정보저장기기는 HDD, FDD등과 같은 자기기록장치와 DVD, CD, MODD등과 같은 광기록장치, 플래시 메모리, FRAM, MRAM등과 같은 반도체 기억소자들을 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 주리히 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 관찰할 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 현미경



전 종 업

삼성종합기술원 MEMS랩 수석연구원

이 개발되었는데 이를 통칭하여 SPM(Scanning Probe Microscope)이라 한다.

STM이 개발된 이래 스탠포드 대학의 Quate 교수는, 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 기기에 대한 연구가 진행중에 있으며 국내에 있어서도 서울대, 삼성종합기술원, KETI등을 중심으로 현재 연구개발이 활발히 수행중에 있다.

본 원고에서는 대표적인 연구사례를 중심으로 SPM 기술을 응용한 새로운 방식의 기록재생 메커니즘에 관하여 소개하고 각 방식의 장

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	2 μ s/10 μ s	캐논
		RW	N-(3-nitrobenzylidene)-p-phenylenediamine (NBPDA)	도전성	0.7	10ms/N/A	중국과학원
		RW	vanadium bronze (β -Na _{0.33} V ₂ O ₅)	도전성	10	1ms/N/A	NEC
AFM	열기계적, 표면형상변화	WORM (RW)	PMMA	열발생	30~40	50 μ s/10 μ s	IBM
	기계적, 표면형상변화	WORM	polycarbonate	힘발생, 휨감지	10	60 μ s/0.2 μ s	히타치
	전계증발, 표면형상변화	WORM	highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) or SiO ₂	도전성, 휨감지	10	2ms/N/A	히타치
	도전율변화	WORM	a-GeSb ₂ Te ₄	도전성	10	0.5ms/N/A	마쯔시타
EFM	압전박막의 분극	RW	PZT	도전성, 휨감지	24	0.5ms/N/A	HP, 삼성중기원
	전하주입	RW	TTPAE(tetra(N,N-diphenyl-4-aminophenyl)ethylene)	도전성, 휨감지	30	N/A	도시바
SCM	전하트랩	RW	nitride-oxide-silicon(NOS)	도전성	75	40ns/2 μ s	스탠포드대학
MFM	자화	RW	Co-Cr/Ni-Fe	도전성, 휨감지	500	N/A	NTT
		WORM	Co-Cr/Ni-Fe	자화, 휨감지	150	N/A	DI
	열보조자화	WORM	Co-Cr/Ni-Fe	도전성, 자화, 휨감지	60x240	0.25s/N/A	히타치

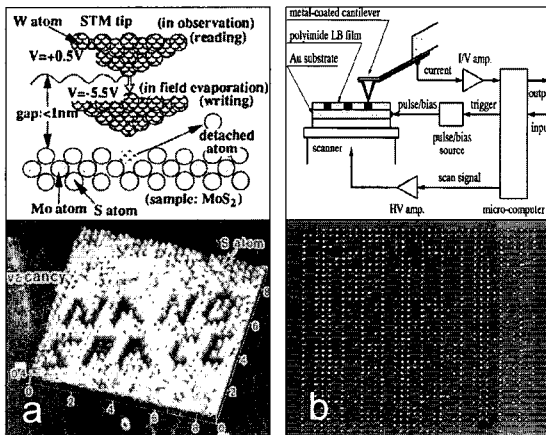
단점에 대하여 기술하고자 한다. 또한 저장장치의 기구 메커니즘에 대해 소개하고 다중 탐침, 평면 스캐너등 관련된 요소기술들에 대한 개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

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 Hosaka등은 MoS₂ 표면으로부터 0.3nm의 간격을 두고 위치한 텅스텐 탐침에 -5.5V, 70ms의 전압펄스를 인가하여 MoS₂ 시료로부터 S원자 하나 하나를 전계증발(field evaporation) 현상을 이용하여 떼어내고, 이를 1nm 높이에서 STM의 원리를 이용하여 읽어내었다. 이 때 기록된 도트(dot)크기는 0.3nm이며 이를 면밀도로 환산하면

6Pb/in²로 이는 현재 실험실수준에서 발표한 HDD의 면기록밀도인 60Gb/in²의 약 10만배에 해당하는 저장밀도이다. 이와 같은 STM을 응용한 기록재생 방식은 STM이 현존하는 현미경 중에서 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 재생 속도를 얻기 위해서는 수~수십MHz에 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.

캐논에서는 매체의 도전성 변화를 이용한 기록재생 방식을 제안하였다. 외팔보(cantilever) 선단에 끝이 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 재생되어 진다. 이와 같은 방법으로 구현된 최소도트의 크기는 10nm이었다. 본 연구는 정보 저장 기기로서의 비트 패턴을 꽤 현실성 있게 보여



a. STM의 전계증발(field evaporation) 현상을 이용하여 MoS₂ 표면으로부터 S 원자를 떼어내어 "NANO SPACE"라는 문자를 새기고 있다. 약 6Pb/in²의 면기록밀도에 해당된다. (히타치)
 b. STM 탐침을 이용하여 LB 필름의 도전성을 변화시킴으로써 데이터를 저장하고 있다. 도트크기는 10nm이며 이는 약 1Tb/in²에 해당된다. (캐논)

준 것으로서, 빠른 재생속도를 얻을 수 있는 장점이 있으나 양질의 재현성 있는 박막 매체의 제조, 형성된 비트의 온도 안정성 및 반복 기록 횟수, 매체의 장기 안정성 등에 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. 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.

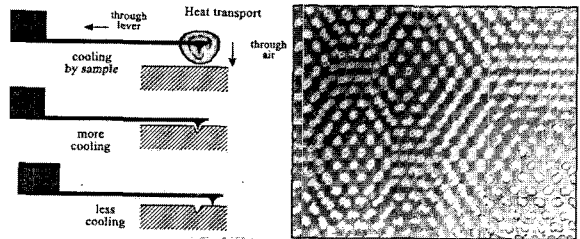
AFM 기술 응용 기록재생 방식

AFM 기술을 응용한 기록재생 방식에는 기계적 또는 전계증발현상을 이용하여 매체의 표면형상을 변형시키는 방법, 매체의 상변화에 의한 전기 전도도를 변화시키는 방법 등이 있다. IBM에서는 열기계적(thermomechanical) 방식을 이용하여 정보비트를 기록하고 있다. PMMA 박막에 미세 탐침을 접촉하여 기계적으로 누른 상태에서 팁 부분에 설치된 저항발열체를 이용하여 팁끝에 열을 발생시킴으로써 PMMA 박막을 녹여내어 미세 피트(pit)를 형성시킨다. 이때 형성된 미세 피트가 데이터에 해당된다. 재생은, 탐침이 데이터 피트안으로 들어간 상태와 피트 밖의 평평한 매체 표면에 위치한 상태에 있어서 탐침으로부터 매체쪽으로 전달되는 열

량이 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 의한 다수의 반복기록이 가능한 것으로 되어있으나 이에 대한 좀 더 정량적인 분석이 필요하며 비트단위의 소거가 어려운 단점이 있다. IBM에서는 본 방법을 이용하여 크기 30-40nm(면밀도 400-500Gb/in²)의 정보 도트를 50 μ s, 100kHz의 속도로 기록, 재생하고 있다.

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/in²)를 달성하고 있으며 5Mb/s의 빠른 재생속도를 얻고 있다.

AFM을 이용한 또 다른 기록재생방식으로는 STM의 경우와 유사한 전계증발을 이용한 방법



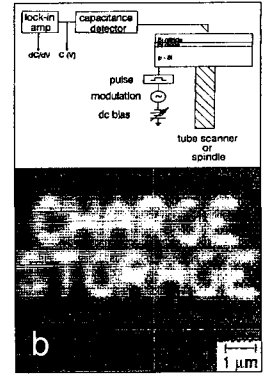
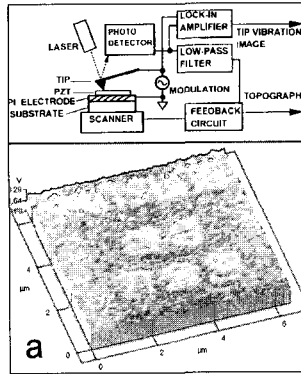
열저항 히터가 장착된 탐침을 이용하여 PMMA 표면을 녹여냄으로써 데이터를 기록하고 있다. 도트크기는 30-40nm이며 이는 약 400-500Gb/in²에 해당된다. (IBM)

과 전기전도도 변화를 이용하는 방법이 있다. 전계증발을 이용한 방법의 경우, 표면에 금박막이 입혀져 있는 탐침을 이용하여 SiO₂나 그라파이트(graphite) 기판 위에 금 피트나 돌기(mound)를 형성할 수 있는데 히타치의 경우 최소 도트 크기 10nm 정도를 구현하고 있다. 한편, 마쯔시타에서는 현재 상변화를 이용한 ODD에 주로 사용되고 있는 a-Ge₂Sb₂Te₄를 기록매체로 이용하여 매체의 전기전도도 변화에 의한 정보비트의 기록재생에 대한 연구를 수행하였다.

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 삼성중합기술원에서 주로 연구되고 있다. 정보의 기록은 압전박막(PZT)위에 위치한 도전성 탐침에 전압을 인가하여 압전박막을 분극시킴으로써 이루어진다. 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. 매체는 CVD 방법에 의해 제작된 Si₃N₄/SiO₂/Si(NOS)로 구성되며 AFM 탐침에 증착된 전극과 Si 웨이퍼 사이에 전기적 펄스를 가하여 Si₃N₄/SiO₂의

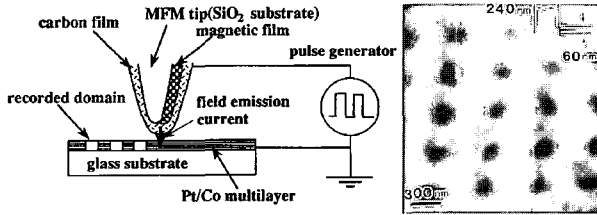


- a. 압전박막의 분극현상을 이용하여 "삼성기술원"이라는 문자를 새기고 있다. (삼성중합기술원)
- b. 질화물내 또는 질화물과 산화물의 경계면에 전하를 트랩시킴으로써 "CHARGE STORAGE"라는 문자를 새기고 있다. (스탠포드대학)

계면에 전하를 트랩시켜 데이터를 기록한다. 전하가 트랩된 부분에서는 탐침과 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. 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.

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 매



터널링 전류로 매체를 가열한 상태에서 자화된 탐침을 이용하여 자기 도메인을 형성하고 있다. (히타치)

체를 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 μm 의 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 μm 크기의 데이터를 기록하였으며 DI에서는 Co-Cr로 코팅된 팁을 이용함으로써 150nm 크기의 데이터를 기록하였다. 한편 히타치에서 수행한 방법으로, 터널링 전류로 매체를 가열시킨 상태에서 자화된 탐침만을 이용하여 자기 도메인을 형성시킴으로써 60x240nm의 비트 크기에 40Gb/in²에 해당되는 기록 밀도를 얻고 있다. 이때 탐침은 자기적 성질을 위해 SiO₂에 PtCoCr 합금 박막을 코팅하고 그 위에 탄소 막을 입혀 전도성을 부여하였으며 매체로는 Pt/Co 다층 박막을 사용하였다.

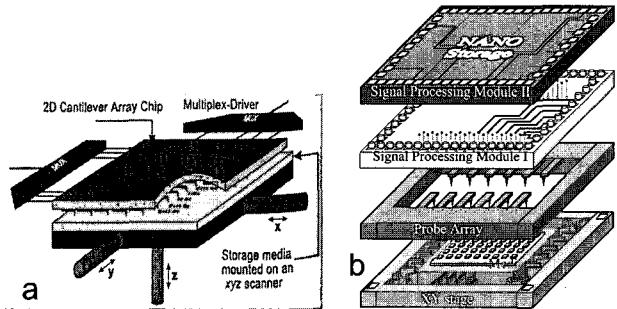
MFPM을 이용한 기록방식은 현존 HDD 기술의 상당 부분을 그대로 이용할 수 있다는 커다란 장점이 있으나 타 방식에 비해 데이터 비트 크기면에서 상당히 열세에 있고 탐침 제작이 매우 어려우며 로크

인 증폭기가 필요하고 재생속도가 매우 느린 단점이 있다.

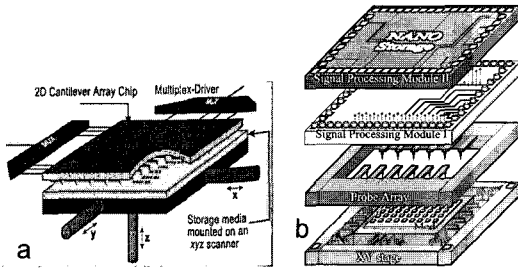
PDS의 디바이스 형태 및 향후 과제

PDS의 디바이스 형태는 회전형과 스캔형의 크게 두가지로 나누어 연구가 진행중이다. 회전형은 기존 HDD나 ODD의 형태를 거의 대부분 그대로 이용하고 기록재생용 헤드부분만을 SPM 탐침으로 대체한 형태이다. 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 마모 문제가 발생하게 된다.

IBM, 삼성종합기술원등에서는 PDS의 상품화에 있어서 가장 큰 장애물(bottleneck)이 되고 있는 느린 재생속도를 해결하기 위해 다중탐침(multi-probe)을 이용한 기록재생에 관한 연구를 수행하고 있다. 즉, 다수의 탐침을 이용하여

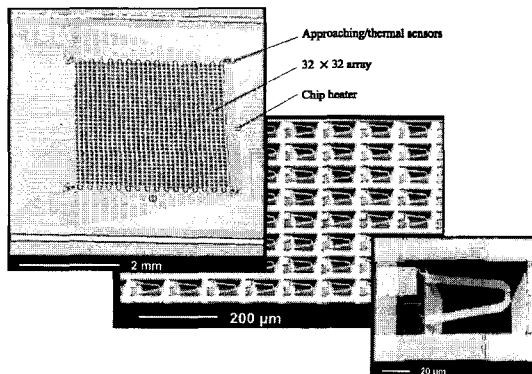


- a. "Millipede"로 명명되어진 IBM PDS의 개념도이다. 2차원적으로 배열된 다중 탐침과 매체를 평면상에서 스캐닝하기 위한 정밀 스테이지로 구성된다. (IBM)
- b. IBM과 유사한 PDS 개념도이다. 신호처리 모듈은 ASIC화하여 탐침모듈 위에 집적함으로써 콤팩트한 저장기기를 실현한다. (삼성종합기술원)



- a. "Millipede"로 명명되어진 IBM PDS의 개념도이다. 2차원적으로 배열된 다중 탐침과 매체를 평면상에서 스캐닝하기 위한 정밀 스테이지로 구성된다. (IBM)
- b. IBM과 유사한 PDS 개념도이다. 신호처리 모듈은 ASIC화하여 탐침모듈 위에 집적함으로써 콤팩트한 저장기기를 실현한다. (삼성종합기술원)

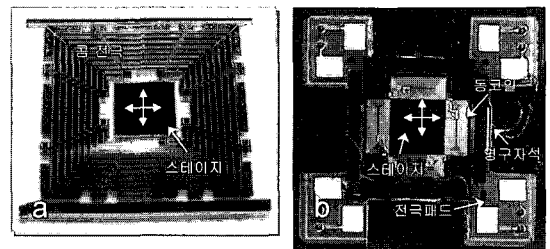
동시에 데이터를 기록재생함으로써 경쟁력있는 재생속도를 얻을 수 있다. IBM에서는 $3 \times 3 \text{mm}^2$ 안에 $92 \times 92 \mu\text{m}^2$ 의 피치로 2차원적으로 배열된 32×32 개의 탐침어레이를 개발하였으며 삼성종합기술원에서는 폴리실리콘으로 정전구동형 4×8 다중 탐침 어레이를 개발하였다. 기록매체는 정전력 또는 전자력으로 구동되는 2축 스캐너의 스테이지위에 장착되어 다중탐침에 대하



$3 \times 3 \text{mm}^2$ 안에 총 1024개 (32×32)의 탐침이 배열되어 있다. 탐침어레이의 피치는 $92 \times 92 \mu\text{m}^2$ 이며 32개의 탐침이 병렬처리되도록 결선되어 있다. (IBM)

여 평면상 상대운동을 하게된다. 이때 스캐너의 구동범위는 탐침 어레이의 피치보다 크게 설정 되어야만 매체의 전영역에 데이터를 기록재생 할 수 있다. 현재 IBM과 삼성종합기술원에서는 로렌츠력을 이용한 전자력형 스테이지를, Kionix와 삼성종합기술원은 정전력을 이용한 MEMS 스테이지를 개발하고 있다. 삼성종합기술원에서 제작한 스테이지의 경우 구동범위는 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 이고 제어정밀도는 $10 \mu\text{m}$ 이다.

PDS는 이상에서 기술한 바와 같이 데이터의 저장 면밀도 측면에서는 타 방식의 추종을 불허하며 탐침 어레이와 평면 스캐너등을 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 기록성 등 보다 신뢰성 있는 기록재생 메커니즘에 대한 연구가 필요하며, 균일한 치수 및 특성을 갖는 다중탐침 어레이 제작, 나노미터 정밀도를 갖는 평면 스캐너 제작, 데이터의 정밀 트래킹 방법, 신호처리부의 ASIC화 및 집적화, 기록재생의 병렬처리 기법의 최적화등이 향후 지속적으로 연구되고 해결되어야 한다.



- a. 정전력으로 구동하는 2축 MEMS 스테이지이다. 구동범위는 30V에서 약 $100 \mu\text{m}$ 이다. (삼성종합기술원)
- b. 전자력으로 구동하는 2축 MEMS 스테이지이다. 구동범위는 50mA에서 약 $100 \mu\text{m}$ 이다. (삼성종합기술원)