

광응용 MEMS 기술의 동향

부 종 욱

(LG전자 기술원 마이크로시스템 팀장)

1. 서 론

MEMS(Micro Electro Mechanical System) 분야를 소형화와 저가격화라는 대치 개념을 뛰어넘어 새로운 시스템의 창출 및 실현이라는 관점에서 볼 때, 가장 가능성이 크게 열릴 수 있는 응용 분야 중 하나로 광학 기술과 접목된 광응용 MEMS 분야를 꼽을 수 있다. 광 응용을 위한 MEMS의 연구는 MEMS 기술의 발아기인 70년대 Peterson(1) 등에 의해 처음 보고된 이후 미미한 상태에 머물렀으나, 90년대 이르러 본격적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. TI의 디스플레이 관련 미러(2)가 상품화를 달성하였고, 최근에는 광통신 분야를 중심으로 시스템 업체와 부품 업체 업체간의 활발한 M&A 가 이루어지는 등, 가장 기술 개발이 치열한 분야 중 하나로 부상하고 있다.

광응용 MEMS는 광의 범위에서 표 1과 같이 광신호를 제어하는 수단과 감지하는 수단, 또한 광을 이용하여 구조물을 제작하거나 가공하는 방법을 모두 포함하여 생각할 수 있다. MEMS 기술을 이용한 광응용 시스템의 잇점은 낮은 구동력으로 광을 제어할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이다. 또한 정전기력이나 전자기력들을 이용하여 AOM 등 보다도 큰 편향각을 얻을 수 있고, 부피의 감소로 인해 공진 주파수가 증가하므로 고속 응답 특성을 갖는 소자를 제작할 수 있다. 가격적인 측면에서도 기본적으로 반도체 일괄 공정 및 이방성 에칭등에 의해 저가의 고정밀 부품을 얻을 수 있으며, 기계적 구동에 의한 삽입 손실의 최소화를 꾀할 수 있다. 이 밖에도 소형화에 의해 공진 주파수가 증가함으로써 저주파 노이즈의 영향이 적어지며, 열팽창에 의한 노이즈 역시 저감된다. 본 고에서는 광통신 및 광 정보 저장에 응용 기술의 동향을 중심으로 소개하므로써 이 분

표 1. 광 응용 MEMS 의 연구 예

광신호 제어용 MEMS	과장 가변 필터	Fabry-Perot형 filter, waveguide 형 등(WDM용)
	Tunable LD	VCSEL 형, Edge emitting 형
	광 모듈레이터	Local LAN급 스위치(MARS)/10 MHz
	디스플레이	가동미러 어레이(DMD, GLV, TMA)
	광스위치	저 삽입손실, 낮은 파장/편파 의존성, 확장성
	스캐너	Printer, Display, Hologram storage 등
	Chopper & Shutter	초진형 적외선 센서, beam 제어용
	Connector & Coupler	V groove, SFF용 SiOB, LIGA 정밀 금형
	Micro lens	Resist reflow, Silicon mold, LIGA/SU-8 등
	Interferometer	회절 격자를 이용한 화학 분석기
광신호 감지용 MEMS	Variable focusing mirror/lens	Thin membrane을 이용한 deformable mirror
	NSOM	Probe tip 가공, Tracking
	Encoder, 변위 센서	LD, lens, waveguide의 집적화
	Optical Data Storage	NFR 기록용 SIL/Tracking/slider 등
	waveguide sensor	감습계에 의한 물리량/화학량 검지
광을 이용한 MEMS 제작/구동	Fiber Sensor	물리량/화학량 원격 검지
	LASER manipulator	미세 물질(세포, 분자) 조작
	LASER 가공	곡면, 정밀 3차원 가공
광 조형법	3차원 구조물 제작	

야에의 국내 연구자들의 관심을 높이고 참여를 유도하고자 한다.

2. 광통신 응용 MEMS

MEMS 기술은 파장분할다중화(DWDM: dense wavelength division multiplexing) 광통신 시스템에 응용되는 핵심 부품인 광 스위치나 광 송수신 모듈 등을 저가화, 고기능화, 소형화로 구현할 수 있는 핵심 요소 기술이다. 본 기술로 제작될 수 있는 광 스위치의 경우, WDM 네트워크 간의 회선을 효율적으로 분배, 교환, 복구하는 데 이용될 수 있으며, 고가의 광스위치나 감쇠기등의 핵심 부품을 저가 및 소형화로 구현함으로써 광 통신망의 보급에 커다란 기여가 기대된다고 할 수 있다. 최근 폭발적으로 증가하는 전자상거래 및 정보검색 등으로 인한 인터넷 트래픽, 대용량 데이터 서비스, 멀티미디어 서비스 등의 수요를 충족시키기 위해 Tera bps급의 대용량 광통신시스템이 필수적이다. 현재 통신망의 증가로 인터넷통신의 시간 지연이 사회적으로 큰 문제가 되어 정부에서도 초고속 통신망을 구축하기 위하여 막대한 예산을 투자하고자 계획하고 있다. WDM방식은 기존에 포설된 광섬유를 그대로 이용하여 통신 속도를 수백 배 이상 증가시킬 수 있는 가장 경제적인 방안으로 각광 받고 있다. 대용량 WDM시스템의 실용화를 위해서는 망운용 효율의 극대화를 위한 회선 분배(cross-connect) 스위칭 시스템이 필수적이다. 예를들어, WDM네트워크의 일부 채널이 단절될 경우 우회 선로를 찾아주지 못한다면 전체 시스템이 마비되는 통신대란이 일어날 수 있다. 확장성 (scalability), 신뢰성, 저소비전력 등의 요건을 만족하는 대용량 배열 광스witch는 WDM용 회선 분배 시스템의 핵심 소자이다. 이 소자는 또한 임의의 장소에서 광신호를 추가하거나 분배할 수 있는 add/drop 다중화기의 핵심소자이기도 하다. 현재는 전화국의 절반의 공간을 차지할 정도의 대규모 전자식 스위칭 시스템이 일부 이용되고 있지만 실리콘 미세가공을 이용하여 집적화된 소형 광스witch로 이를 대체할 경우,

- Central office의 부동산 비용 절감
- 소비전력의 감소
- 전화국간의 연결수 감소
- 필요한 네트워크 요소들의 감소
- 회선 복구 시간 단축 (10~100배)

등의 장점을 얻을 수 있으며 이로 인해 25% 이상의 비용 절감이 예상될 수 있다. 특히, 회선분배용 미소 광스witch 소자는 WDM시스템의 핵심 기술로서 선진국에서는 부품기술의 이전은 물론 부품 자체의 판매를 꺼리고 있을 뿐만 아니라, 고가의 장비 전체를 구매하도록 강요하고 있는 실정이다. 지금까지 연구되어 온 미소 광스switch는 평면 광도파로 구조 (PLC: Planar lightwave circuit)를 이용하는 소자가 주류를 이루고 있다. 그러나, 이러한 평면 도파로형 광소자는 포트 수가 증가함에 따라 소자의 내부 구조가 복

잡해져서 삽입손실, 누화, 편광의존성 등이 매우 나빠지게 된다. 이로 인하여 16x16 이상의 광스witch를 구현하기에는 현실적으로 거의 불가능하다. 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 소자로 기존의 실리콘 반도체 공정과 광기술을 접목함으로써 32x32이상의 고성능의 배열형 광스switch를 용이하게 구현한 기술들이 최근 연이어 발표되고 있다.

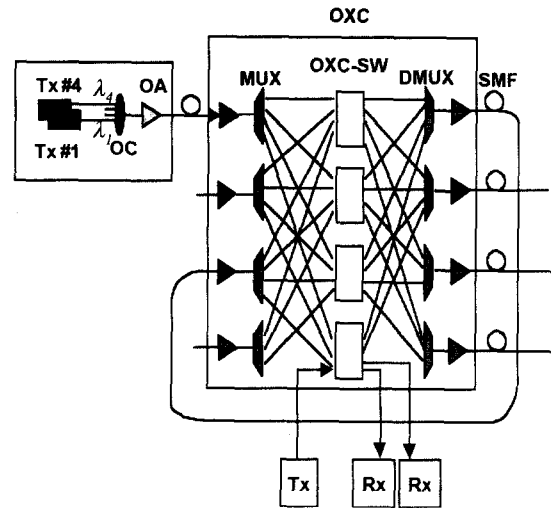


그림 1. DWDM network

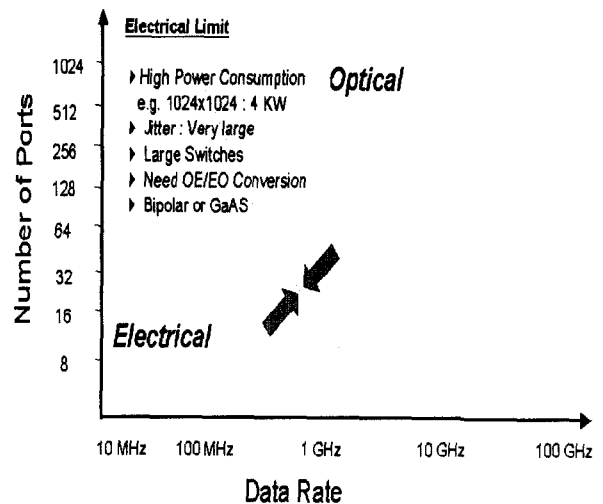


그림 2. All optical switch/Electrical Switch 비교

이러한 cross-connect 스위치에 대한 접근 방법으로는 N^2 개의 mirror fabric을 이용한 addressing 방법(AT&T, OMM 등), index matching 유체를 이용하거나 유체내 bubble의 전반사를 이용하는 방법(NTT, Agilent), $2N$ 개의 미러를 이용하여 3차원적인 배열 구성을 이용하는 방법 (Lucent, Xros, Tellium, LG, Onix, 등) 등이 지금까지 발표되어 왔다. 그림 2와 3은 2000년 Lucent와 LG 전자 기술원이 보고하였던 256x256 광라우터용 미러 어레이와 모듈의

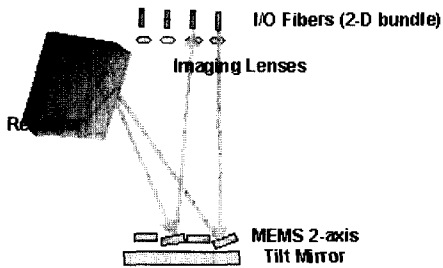
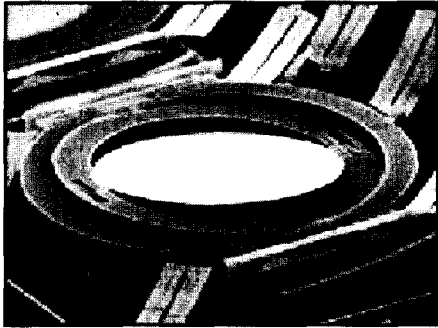


그림 3. 2축 자유도 미러 어레이와 이를 이용한 라우팅 architecture(Lucent)

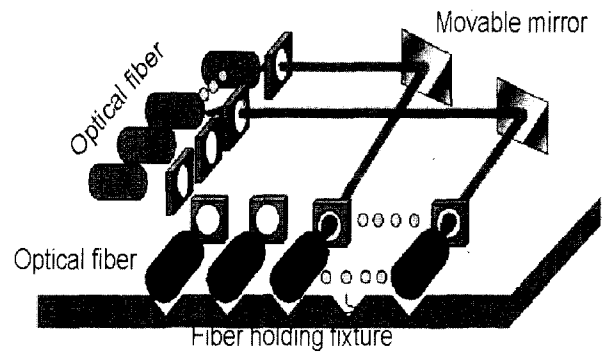
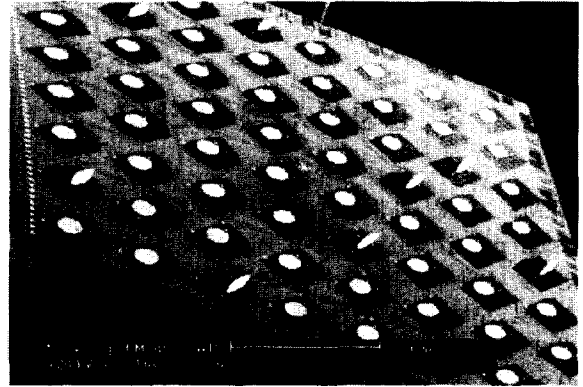


그림 4. Cross-connect switch fabric(AT&T)

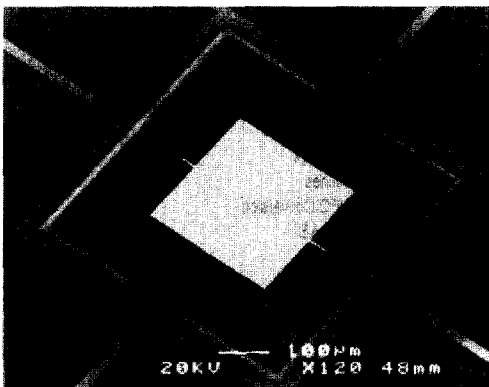


그림 3. 2축 자유도 미러 어레이(LG)

Architecture를 나타낸 그림으로서 512개의 미러 어레이를 이용하는 non-blocking 형의 ceoss-connect 스위치이다. 이 미러는 2축 자유도를 갖는 gimbal 구조를 갖고 있고, 아날로그 제어에 의해 구동된다. 그림 3은 마이크로 미러 fabric에 의해 스위칭 동작을 디지털로 행하는 AT&T가 보고한 16 x 16 미러 어레이와 그 구성도를 나타낸 그림이다. 이들의 장단점을 비교하면, 먼저 광도파로와 유체를 구동하여 광을 전반사 시키는 구동방식을 이용하는 경우 유체의 패키징이 복잡하고, 일정 유체의 주입등에 제조상의 문제가 있다. 미러 형태의 문제점으로는 첫째, 입출력으로 이용되는 광섬유들을 정밀하게 거울과 정렬하는 것, 둘째로 서로 다른 광섬유 간의 광경로 차이로 인하여 유발되는 삽입손실의

불균일, 셋째로 반복적으로 거울을 구동하고 난 후에 정확하게 제 자리를 찾아가지 못하는 문제로 인한 손실 및 누화 등의 문제가 예상된다. 일반적으로 3차원 2N 형은 N^2 형에 비해 확장성이 우수한 것으로 알려져 있다. 비공식적이지만 현재 대용량 스위치 개발에 참여하고 있는 업체는 미국에서만 60여개에 이르고 있고 이들은 시스템 업체와의 M&A, lock-in 등에 의해 후발 기업들의 시장 참여 기회를 어렵게 하고 있다. 대략 시스템 업체와 MEMS 기술을 갖고 있는 회사들과의 제휴 관계를 살펴보면, Nortel-Xros와, Calient-Kionix, Siemens-OMM, Alcatel-OMM, Tellium-

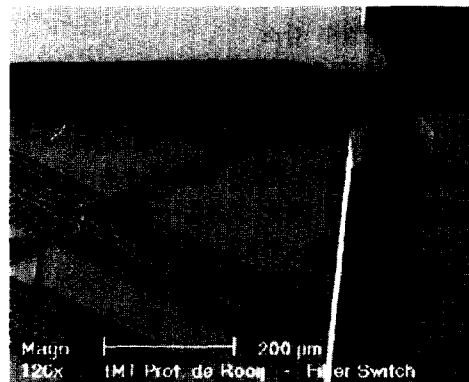


그림 5. 2x2 광스위치(Neochatel Univ.)

Astarte, Corning-Intellisense, JDSU-Cronos 등의 제휴가 모두 금년에 이루어졌고 이들은 service 업체와도 별도의 제휴를 통해 시장 선점의 경쟁이 치열하게 일어나고 있는 실정이다.

이러한 대용량 스위치 외에도 2x2 스위치의 개발에도 많은 개발이 이루어져 왔고, 그 중 일부는 기존 폴리머 스위치를 저가로 대체하기 위해 이미 시장에 나와 있는 실정이다. 프랑스 LETI 연구소는 광도파로를 정전력을 이용하여 구동시킨 스위치를 보고하였는데(4) 구동 전압과 insertion loss를 그들의 이전의 연구(3)에 비해 크게 저감시켰다는 데에 의미가 있다. 그림 5는 C. Marxer(5) 등이 보고한 2 x 2 광 스위치로서 comb drive로 구동되는 미러에 의해 구동되는 소자이다. 이는 fiber groove가 같이 집적화된 것으로 스위칭 시간은 0.2 ms 이하이다. 이 소자는 현재 스위스 내 venture 회사에 의해 주문 생산되고 있다. 동경 대학의 Fujita lab. 에서 보고된 hinge mirror를 이용한 2 x 2 matrix switch 는(6) matrix size를 더 넓힐 수 있다는 점에서 optical multiplexer나 demultiplexer에 응용이 가능하다는 이점을 갖고 있다. AT&T Bell lab.에서는 3.5 Mbit/sec. 의 MARS (Mechanical Anti-Reflection Switch)를 보고하였는데(7), 이는 air gap이 Fabry-Perot 구조를 갖도록 설계되었으며, service bandwidth의 요구 사양을 고찰해 볼 때, 압축된 영상을 전송할 수 있는 속도에 해당된다. 전자 기력을 이용한 광 스위치는 voice coil 형의 actuator를 소형화시키는 개념에서 출발하였는데 최근 그 연구는 보다 커다란 변위를 얻을 수 있고, 정전력형에서 요구되는 holding voltage가 필요하지 않다는 점에서 커다란 장점을 갖고 있다. 가장 최근 Hitachi에서 보고한 prototype의 광 스위치(8)는 광도파로가 집적화되어 있는 silicon 기판이나 석영 기판을 소자라는 점에서 매우 흥미 있는 시도라 할 수 있다. 보다 간단한 구조로 이미 시장에 나와 있는 것은 NTT에서 연구했던 single-mode fiber switch(9)이다. 이는 non-silicon micromachining 기술을 이용한 것으로 어느 정도의 내구성 시험 결과까지 보고된 상태이며 이를 확장하여 -30 dB 이하의 polarization crosstalk을 갖는, 1 x N PANDA (Polarization-Maintaining and Absorption Reducing) switch를 연구 중이다. 또한 MicroJoinery라는 자기력으로 구동되는 switch(10)는 비교적 그 제작 과정이 간단하며, n x m switch로 확장이 용이하다는 점에서 매우 흥미로운 소자라 할 수 있다. 이 외에도 도금 Ni을 구조체로 이용하여 열적으로 actuating 시키는 방법(11)등 다양하고 독특한 여러 가지 방법들이 제안, 보고되고 있다.

2.2. 광 connector

광의 주파수는 전기와 비교하여 상당히 높으므로 광의 전송 능력은 압도적으로 우수하나 어느 시점에서는 전기로 변환시켜야 한다. 이러한 광과 전기의 상호 변환 과정을 어느 정도 순조롭게 진행 시키느냐는 문제는 조립의 간편성, 또한 조립의 정확성과 연계되어 명확하게 규정되어야

한다. 이 모든 것은 cost와 밀접하게 관련되는 것으로서, 광통신의 경쟁력을 강화시킬 수 있는 중요한 요소로 대두되고 있다. 예를 들어 single mode fiber의 core부의 직경이 약 10 μ m라 할 때 alignment의 정확도는 약 1 μ m이내가 되어야하므로 전기 배선의 입장에서 보면 생각할 수도 없을 정도의 높은 정확도가 요구되며, 이것이 광의 assembly 및 connection에 있어 비용을 크게 증가시키는 요인으로 작용하게 된다. 이러한 점에서 종래 사용되는 광량을 모니터 하면서 조립하는 active alignment 방법은 조립 시간의 지연으로 cost의 발생 원인이 된다. 이에 비해 실리콘의 이방성 에칭 특성을 이용한 V groove의 형성에 의한 passive alignment 방법은 열전도 특성이 비교적 우수한 heat sink를 직접 이용할 수도 있고, 빠른 시간에 조립을 완성시킬 수 있다는 이점 때문에 광집속 기술에서의 장래 가장 중요한 요소가 되리라 생각된다. 초기의 이에 대한 연구는 단순한 V-groove의 형성이 주가 되었지만(12), 미소 위치 조정 기능을 갖는 optical coupling machine(13) LIGA 기술을 이용한 connector(14)등 수많은 연구들이 보고되고 있는 실정이다. 이러한 제품은 이미 많은 회사들이 사용하고 있으며, 국내에서도 LG등에서 custom design based optical bench를 제작 시판 중이다(misob.lg-elite.com).

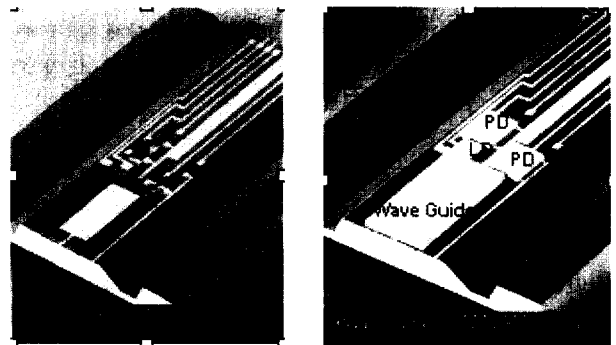


그림 6. SFF용 silicon optical bench(LG)

2.3. 기타

MEMS 기술은 switching 소자나 정밀 platform 외에도 여러 가지 광통신 부품에의 응용이 연구되고 있다. Add/drop system(15), Optical amplifier(16), MARS 구조를 이용한 attenuator(17), WDM equalizer(18) 등 매년 새로운 응용이 보고되고 있으며, 우리가 상상할 수 없는 빠른 시간 내에 사업화에 성공하고 있다.

3. 데이터 저장 시스템 응용 MEMS

앞으로도 광 기록 기술의 발전과 정보의 대용량화라는 추세에 비추어 볼 때 현재의 광 기록 기술을 뛰어 넘는 초대용량의 광 기록 기술의 개발이 필수적으로 진행될 것이



다. 이를 위하여 현재의 광 기록 기술의 연장선상에서 청색 광 레이저 개발을 통한 빛의 단파장으로 광 기록 밀도를 높이려고 하고 있지만 근본적으로 optical lens를 사용하는 현재의 광 기록 기술은 레이저 광의 단파장 이내로는 광 기록 밀도를 높일 수 없다는 한계가 있다. 따라서 이를 극복하기 위해서는 새로운 방식의 광 기록 기술 개발이 필요한데 최근 이러한 문제점을 해결하기 위하여 근접장 광학(Near Field Optics)을 응용한 광 기록 기술이 새롭게 각광을 받고 있다. 근접장 광 기록(Near Field Optical Data Storage)기술은 광의 단파장 보다 작은 크기의 광 출력부와 광 인지부를 만들고 이를 레이저 광의 단파장 이내의 거리로 기록 매체에 근접시킴으로서 레이저 광의 단파장보다 적은 단위의 정보를 읽거나 쓸 수 있게 한다. 초기에는 Optical Fiber의 선단을 미세 Tip으로 만들어서 광 입출력을 제어하였으나 현재는 이 외에도 Solid Immersion Lens, Micro Electro Mechanical System을 이용한 연구도 활발하다. 특히 MEMS를 응용할 경우 근접장 광학에서 요구되는 미세 Tip 개발이 용이 할 뿐 아니라 미소 위치 제어도 가능하여 본 기술 개발에 최적이라고 할 수 있다. 이 기술을 토대로 현재 최소 200Å 단위의 해상도를 가진 광 기록 데이터가 발표되기도 하였다. 이는 현재의 광 기록 기술과 비교하여 1000배 이상의 고밀도를 가지는 것으로 디스크 한 장에 이론적으로 수백 편의 영화가 들어가는 것이다. 이 기술이 실용화되면 근본적으로는 현재 기록 매체 시장에서 주도권을 행사하고 있는 기존의 광 기록 기술의 비약적인 발전을 이룰 수 있기 때문에 세계 각 연구소에서 장기 과제로서 연구 투자를 강화하고 있다. 이 기술을 실현하기 위해서는 초 미세 광 입출력 기술 개발, nano scale 위치 제어 기술 개발, 광 기록 재료 및 디스크 개발, 광 기록/재생을 위한 시스템 개발 등의 과제가 남아 있다. NTT의 연구 group에 의해 보고된(19) photocantilever는 tip과 PD를 일체화 시킨 형태의 것을 보고 하고 있다. 간략하게 광메모리에의 응용 현황을 보면, IBM의 Group에서는, AFM (Atomic Force Microscope) Cantilever와 광기술을 융합시켜, 수십 nm 크기의 Pit을 형성하여 그것을 읽어내는 각종 초고밀도기록 기술을 보고하고 있다. 또한 이와는 별도로 스탠포드 대학과 함께 Cantilever를 접촉 방식으로 압저항과 joule열을 이용하여 tip을 만들어 기록하고 읽어내는 방법으로 30G Bit/in²의 기록밀도를 보고하였다. AT&T Bell 연구소는 광 Memory응용을 Target으로 하여, 기록 및 읽기 속도의 향상, 광출력 증대, Tracking 제어의 실현 등에 관한 연구를 행하고 있으며, 광출력을 증대하기 위하여, 광 Fiber Probe로 Nd³⁺ Dope Fiber를 이용하여, 1.06 μm인 파장으로 Nd³⁺ Laser 발진 Threshold 부근에서 동작시키는 방법을 보고하였다. 이것으로 100nW Power로 100nm인 공간분해능으로 읽어낼수 있는 것으로 보고되고 있다. 그림 7은 LG에서 보고한 근접장 기록용 마이크로 SIL의 사진으로서 크기 0.2-0.3 mm의 초소형 SIL 렌즈를 개발하였다(20). 이 밖에도 미국과 일본을 중심으로 많은 대학에서 활발한 창의적 연구가 진행되고 있으며, 향후 높은 S/N비, 쓰기 및

읽기 속도 향상, access 방식 등의 연구에서 MEMS 기술을 접목하여 괄목할 만한 성과가 이루어진다면, tera byte급의 초고밀도 Memory를 실현할 수 있는 가능성이 매우 큰 기술이라 생각된다.



그림 7. Micro SIL lens (LG)


4. 결 론

지금까지 설명한 바와 같이 초고속 인터넷시대의 대용량 정보의 고속 전송 및 저장을 위해서는 초고밀도 광 Memory의 실현과 초고속 광통신망의 구축이 필수적이며, 이를 달성하기 위해 현재 상존하고 있는 기술적 난점을 극복해야 하는 것이 선결 과제이다. 국외의 경우, 인터넷 통신 및 데이터 통신 등으로 대변되는 초고속 정보화 고속도로를 실현하기 위해서는 광네트워크가 필수적이라는 인식 하에 막대한 예산을 투입하여 차세대 DWDM 광통신시스템을 구축하고 있다. 광스위치는 광add/drop 다중화기, 공간 광분배기, 광 crossconnect 등의 제품의 핵심요소이기 때문에 그 수요가 급증할 것으로 예상된다. 미국의 광산업 관련 전문조사기관인 Electronicast사에 의한 자료에 의하면 향후 5년 이내에 광스위치 소자의 전세계 수요가 US\$30억에 이를 것으로 예상된다. 특히, MEMS 기술을 효과적으로 활용하여 광스위치 이외의 광변조기, 광감쇠기, 광분리기 등의 소자로 개발함으로써 관련 산업의 발전을 도모할 수 있을 것이다. 필자는 문제 해결 방법들 중 하나가 MEMS 기술에 기반하여 접근하는 것이라 믿고 있으며, MEMS 기술과 광학 기술의 접목을 통해 새로운 시스템의 창출을 기대하고 있다. 결국 MEMS 소자는 그 자체로서의 부가가치를 기대하는 것 보다는 구현되는 시스템을 통해 사회 전체에 커다란 변화를 가져 오게 할 수 있는 수단이라 생각한다.

참고문헌

- [1] K.E Peterson, "Micromechanical light modulator array fabricated on silicon", Appl. Phys. Letter, Vol 31, 8, p

- 521, 1977.
- [2] L.J. Hornbeck, "Current status of the digital micromirror device(DMD) for projection television applications," International Electron Devices Technical Digest, p 381, 1993
- [3] E. Ollier, P. Labeye, F. Revol, "Micro-opto mechanical switch integrated on silicon", Electronics Letter, Vol. 31, No. 23, p 1297, November 1995.
- [4] E. Ollier, P. Labeye, F. Revol, "Micro-opto mechanical switch integrated on silicon for optical fiber network", Digest IEEE/LEOS 1996 Summer Topical Meetings, Keystone, Colorado, Aug. 5-9, 1996, FB2.
- [5] C. Marxer, M.-A. Gretillat, N.F. de Rooij, R. Battig, O. Anthamatten, B. Valk, P. Vogel, "Vertical mirrors fabricated by RIE for fiber optical switching applications." Proc. of The 10th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nagoya, Japan, p 49, Jan. 26-30, 1997
- [6] H. Toshiyoshi, Hiroyuki Fujita, "Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix" Jr. of Micromechanical Systems, Vol. 5, No. 4, p 231, Dec. 1996
- [7] J.A. walker, P.P Iannone, W.M. McDonald, R. Ruel, R. Boie, S.C.Arney, N.J. Frigo, D.J. Bishop, "3.5Mbit/sec. MARS modulator system performance for FTTH applications", Late-news poster session supplemental digest of Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, June 3-6, 1996, p 35
- [8] K. Sato, M. Horino, T. Akashi, Y. Aida, "Prototype of optical switch by micro machine technologies" 電子情報通信學會技術研究報告 EMD 97-30~44, p7, Aug. 1997
- [9] Shinji Nagaoka, Yoshio Suzuki, "Compact optomechanical switches and their applications in optical communication and testing system", Proc. of The 10th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nagoya, Japan, p 366, Jan. 26-30, 1997
- [10] C. Gonzalez, S.D. Collins, "MicroJoinery: Micromachined translational stage for optomechanical devices and systems", Digest of Technical Papers Volume 1, p 273, Transducers 97, Chicargo, June 16-19, 1997
- [11] L.A. Field, D.L. Burriesci, P.R. Robrish, R.C. Rubby, "Micromachined 1 x 2 optical-fiber switch", Sensors and Actuators A53, p 311, 1996
- [12] J. V. Collins, et. al. "Passive alignment of a tapered laser with more than 50% coupling efficiency" Electron Letter., Vol 31, No.9, p 730-1
- [13] Y. Kikuya, et. al., "Micro alignment machine for optical coupling", Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, FL, p 36, Feb. 7-10, 1993
- [14] M. Gerner et. al. "Micro-optical components for fiber and integrated optics realized by the LIGA technique" Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Amsterdam, the Netherlands, p 328, Feb. 2, 1995
- [15] E. Goldstein, L. Eskildson, "Er-Doped amplifiers for multiwavelength lightwave networks: impact of the non-flat gain spectrum" Current trend in Optical Amplifiers and Their Applications (Selected topics in Electronics and Systems Vol 7) ed T. P. lee(Singapore: World Scientific), 1996, p 37-54
- [16] C. Giles, E. Desurvire, "Modeling Er-Doped Fiber Amplifiers" IEEE J. Lightwave Tech., 9 271-83, 1991
- [17] J. Ford et. al. "Micromechanical Fiber-Optic Attenuator with 3 ms Response" J. Lightwave Tech. 16 1663-70, 1998
- [18] J. A. Walker et. al. "Demonstration of a Gain-flattened Optical Amplifier with a Micromechanical Equilizer Element" Solid-State Sensor and Actuator Workshop, (Hiltonhead Workshop) 1998
- [19] K. Fukuzawa, et. al. "Imaging of optical and topographical distributions by simultaneous near field scanning optical/atomic force microscopy with a microfabricated photocantilever" J. Appl. Phys. 78, (12), 15 p 7376, Dec. 1995
- [20] Y. Yee et. al. "Fabrication of Micro SIL using Silicon Mold" MOEMS 2000, Kauai, Hawaii, Aug. 23-26, 2000



저 자 소개

부종욱 (夫種郁, Bu Jong-Uk)
 LG 전자 기술원 소재재료 연구소
 마이크로 시스템 팀장/ 공학박사
 jbu@lg-elite.com