

Optical Networking을 위한 MEMS 기술응용

박종연, 박정호
고려대학교 전기공학과
pak@korea.ac.kr

1. 서론

최근 광 네트워크 기술은 놀라운 발전을 거듭하고 있다. 이러한 이유는 광섬유(optical fiber)가 일반 케이블에 비해서 탁월한 장점들이 있기 때문인데, 예를 들면 넓은 대역폭, 낮은 손실, 케이블간의 전자기적인 간섭(electromagnetic interference)에 자유로운 점, 그리고 특히 WDM (Wavelength Division Multiplexing)에 의한 네트워크 용량의 증가는 광섬유가 가지고 있는 가장 큰 매력일 것이다.

이렇듯이 광통신 네트워크의 빠른 성장은 광 스위치를 포함한 광통신 부품의 많은 수요를 창출하게 되었고, 특히 저 비용의 광통신 부품을 요구하게 되었다. 이러한 요구와 맞물린 MEMS 기술의 발전은 여러 가지의 광통신 부품을 동일한 실리콘 기판 위에 집적화 함으로써(surface-micromachining technique) 낮은 비용으로 높은 성능을 얻을 수 있는 길을 열어주었고, 그 중에서도 광 네트워크의 가장 기본적인 소자인 광 스위치의 제작에 관한 연구가 가장 활발히 행해지고 있다.

또한 광 스위치를 제작하는데 있어서, MEMS 기술을 사용하는 주된 이유는 광섬유의 크기 때문이다. 광섬유는 머리카락 반 정도로 가늘며, 수천 개를 묶어도 손가락 굵기 밖에 되지 않는다. 그런데 한 개씩을 스위칭 하려면 사람의 손이 들어갈 수 있는 정도의 크기까지 벌려 놓아야 하고 그렇게 되면 매우 넓은 장소가 필요하다. 따라서 MEMS 기술을 사용하여 광섬유의 다발 크기는 무리지만 그보다 약간 큰 장치로 손을 거치지 않고 자동적으로 스위칭할 수 있는 방법을 다각도로 모색하

고 있다.¹⁾

이러한 광 스위치의 제작은 초기의 간단한 마이크로 액추에이터(microactuator)를 이용한 광 스위치로부터 시작하여 최근에 각광을 받고 있는 vertical torsion mirror를 이용한 광 스위치까지 계속해서 발전하고 있으며, 여기서는 주로 vertical torsion mirror를 이용한 광 스위치에 대해 주로 다루도록 할 것이다.²⁾

2. 본론

2.1 초기의 광 스위치

광섬유의 통신로를 스위칭하기 위해서 마이크로 액추에이터를 사용한 것이 초기의 광 스위치이며, 이 스위치는 Fig. 1에 보인 구조를 가지고 있다. 이 스위치는 위치결정을 위한 왼쪽에 움직일 수 있는 광섬유가 있고, 오른쪽에 이 광섬유와 위치가 맞도록 고정된 2개의 광섬유가 묶여져 있다. 왼쪽의 광섬유가 위에 붙은 경우, 오른쪽의 광섬유 중 위의 것으로 빛이 전달되고 아래쪽에 붙은 경우 아래쪽의 광섬유로 빛이 전달된다.

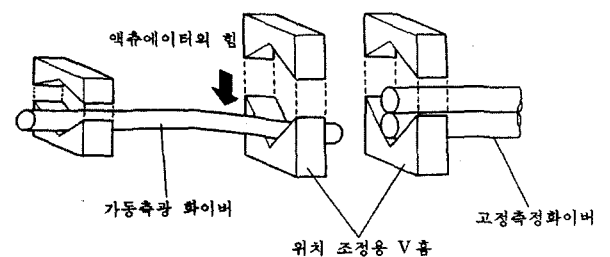


Fig. 1. Micro-actuator에 의한 optical fiber switch.



2.2 Tilting Micro-mirrors를 이용한 WAD (Wavelength Add Drop) Switch

장거리 통신 시스템에서는 전송 도중 신호의 감쇄 (attenuation)나 손실로부터 신호를 보호하기 위해서는 중간 중간에 repeater라고 하는 신호 복원 장치를 설치해야 한다.³⁾

하지만, WDM 방식에서는 이러한 repeater의 수가 급격히 늘어나므로 분할 방식에 어느 정도 제한을 받는다. 이러한 제한을 없애기 위해서 광 네트워크에서는 MEMS 기술을 이용한 WAD (Wavelength Add Drop) 스위치를 사용하는 방법이 제안되고 있다. WAD 스위치는 선택된 신호를 전송라인 밖으로 뽑아내고(DROP), 새로운 신호를 전송라인으로 실어내는 역할을 한다(ADD).⁴⁾

이러한 WAD 스위치의 블록 다이어그램을 Fig. 2에 나타냈는데, 이 경우 4개의 광섬유 포트를 가지고 있다

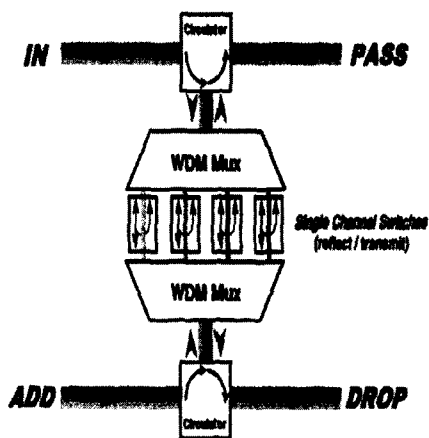


Fig. 2. Wavelength add-drop switch.

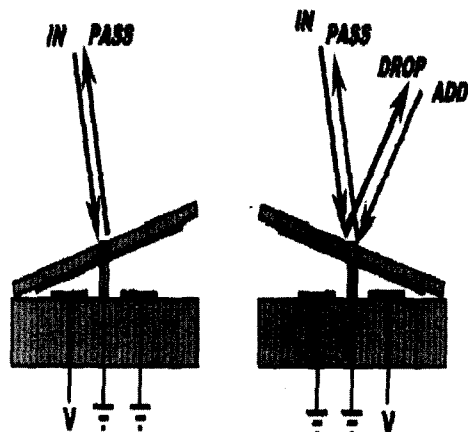


Fig. 3. Tilting micro-mirror switch.

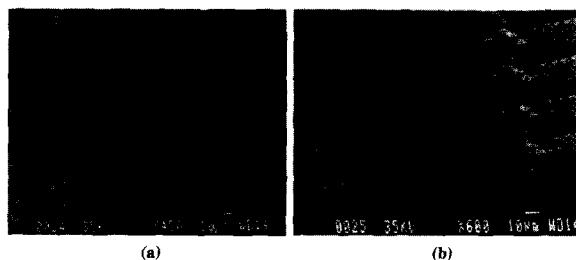


Fig. 4. Tilting-mirror array: (a) top view and (b) side view.

IN, ADD, PASS, DROP). IN은 optic circulator를 통해 WDM MUX로 연결된 후 스위치에 연결된다. 이 스위치에서 반사된 신호는 지나쳐왔던 경로를 따라 PASS 출력으로 나가게 되고 통과한 신호는 DROP 출력으로 나간다. 동시에 ADD 신호도 DROP 포트에 나가는 신호와 동일한 경로를 따라 PASS 출력으로 나간다. Fig. 3은 tilting micromirror를 이용한 스위치를 보여주고 있으며 전압에 따라 지나가는 경로가 결정된다. Fig. 4는 이의 SEM 사진을 보여주고 있다.

2.3 Vertical Torsion Mirrors를 이용한 Free-Space Fiber-Optic Switch

WAD 스위치에서는 tilting mirror를 이용하였지만, vertical torsion mirror를 이용하는 스위치는 vertical torsion mirror를 2차원적으로 배열하고 그 mirror들을 각각 독립적으로 구동시키며, 광 신호를 반사시키려는 mirror만을 일으켜 세워 입력 광 섬유로부터 나온 광 신호를 출력 광 섬유로 반사시켜 보낸다. 따라서, n개의 입력 신호 각각을 n개의 광섬유로 보낼 수 있어 다른 채널을 방해하지 않고 자유롭게 신호를 교환할 수 있다.⁵⁾ 서론에서 언급했듯이 이러한 구조는 같은 substrate 위에 일괄공정(batch-processing techniques)을 이용하여 단일 칩으로 만들어지기 때문에 적은 비용으로 높은 집적도

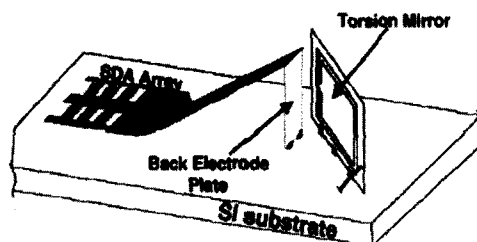


Fig. 5. Vertical torsion mirror switch.

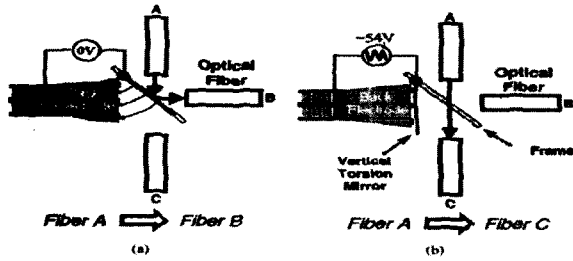
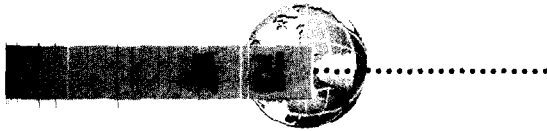


Fig. 6. 1x2 Vertical torsion mirror switch의 회로도

와 안정성 및 성능을 얻을 수 있다.

Fig. 5는 vertical torsion mirror switch의 개요를 보여 준다. 스위치의 구조는 크게 SDA(scratch driver actuator)와 전극판(back electrode) 그리고 torsion mirror로 구성되어 있다. 이 스위치의 동작 원리는 Fig. 6에 묘사되어 있다. 전압이 가해지지 않은 상태에서는 전극판은 기판에 수평으로 누워 있는 상태이며, 입력 광신호가 광섬유 A를 거쳐 광섬유 B로 반사된다. 전압이 인가되면 전극판은 수직으로 세워지고 vertical torsion mirror가 전극판을 향해 이동한다. 따라서 입력 광신호는 광섬유 A를 거쳐 광섬유 C로 전달된다.

Vertical torsion mirror의 SEM이 Fig. 7에 나타나 있다. Torsion mirror는 고정된 poly silicon에 torsion beam을 통해 연결되어있으며, stopper beam이 mirror가 overshoot 되는 것을 막아주는 구조로 되어있다. 그리고 많은 구멍들이 프레임에 에칭된 이유는 전극판과 프레임의 정전력을 줄이기 위해서이다.

전극판은 Fig. 8에 보이듯이 microhinge에 의해 결합된 3개의 polysilicon plate로 구성되어 있다. 전압이 SDA array에 인가되면 actuator plate가 support plate를 향해 이동하고, 따라서 back electrode가 substrate에 수직으로



Fig. 7. Vertical torsion mirror의 SEM 이미지.

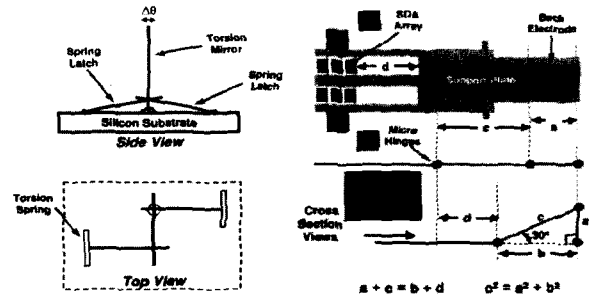


Fig. 8. Self-assembly of the back electrode.



Fig. 9. SEM of the 2x2 Fiber-optic switch.

세워진다.

Fig. 9는 1x2 fiber optic 스위치를 기본으로 한 2x2 fiber optic switch로 크게 mirror chip과 silicon submount로 구성되어 있다. 동작원리는 1x2 fiber optic switch와 유사하며 4개의 mirror가 사용되었다. Fig. 9에서 보면 전압을 인가하지 않은 상태에서는 항상 reflection mode에서 동작하며, 전압을 인가하면 transmission mode에서 동작한다.

Silicon submount는 스위치의 hybrid packaging을 위해 설계되었다. Fig. 11은 packaging한 스위치의 단면을

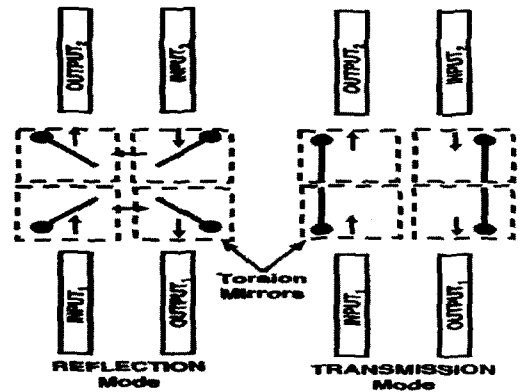


Fig. 10. 2x2 Fiber-optic switch의 동작개요



보여주고 있으며 두 개의 silicon wafer가 서로 결합되어 있다. 위쪽의 wafer에는 mirror chip이 들어갈 수 있는 구멍, 4개의 광섬유를 할당하기 위한 V자 홈, 그리고 ball 렌즈를 부착하기 위한 작은 구멍이 만들어져 있다. 아래쪽의 wafer에도 mirror chip을 위한 구멍이 만들어져 있다. 이러한 구멍과 홈들은 100 wafer를 이용한 이방성 에칭으로 단일 step으로 만들 수 있다.

여기서 ball 렌즈의 역할은 coupling loss를 줄이고 광섬유로부터 빛을 모아 신호가 먼 거리까지 전송될 수 있도록 증폭하는 역할을 하고 있다.

Fig. 12는 제작과정을 보여주고 있다. Top substrate와 Bottom substrate 모두 (100) 실리콘 웨이퍼를 사용하였고, top substrate는 양면을 연마한 웨이퍼로 되어 있다. 먼저, 1000 Å의 열산화막과 1500 Å의 LPCVD 실리콘 질화 막을 silicon etch mask로 사용하여 anisotropic wet 에칭을 한다. 에칭 시 lattice-to-mask misalignment를 최소화하기 위해 reference mark도 함께 에칭된다. 양면 photolithography를 사용한 Reactive Ion Etching (RIE) 후, top wafer를 KOH로 식각한다. 중앙의 hole이 열리면 웨이퍼를 에칭 용액에서 꺼낸다. 모든 구조물은 한번의 anisotropic wet etching으로 제작된다. 그 다음 wire

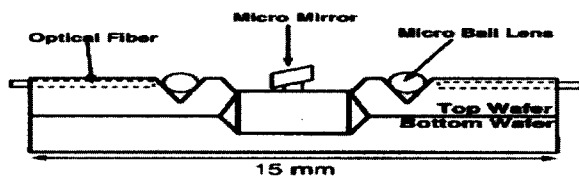


Fig. 11. Packaging 한 switch의 단면도

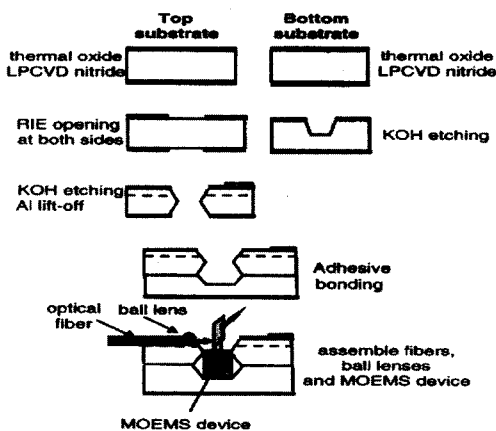


Fig. 12. MOEMS device 제작공정도.

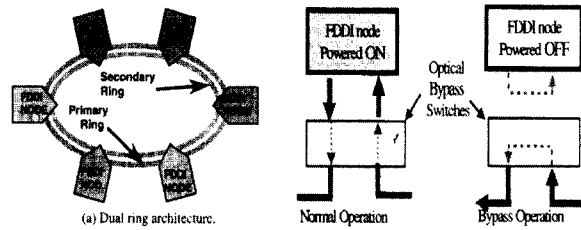


Fig. 13. FDDI optical bypass switch.

bonding을 위해 5000 Å 알루미늄 패드를 life-off 공정을 이용해 증착한다.⁶⁾

이렇게 만들어진 광 스위치는 Fig. 13에서처럼 FDDI(Fiber Distributed Data Interface) fiber optical ring network에서 문제가 발생한 노드를 bypass시키기 위한 bypass switch로 사용된다. 이와 같은 free-space 방식은 전통적인 waveguide 방식에 비하여 더 적은 coupling loss와 cross talk의 장점이 있지만 packaging에 좀 더 많은 신경을 써야 하는 단점이 있다.

3. 결론

광 네트워크(optical networking)을 위한 SONET/SDH(Synchronous Optical Network/ Synchronous Digital Hierarchy) 장비는 이전부터 단일 채널 광 전송을 위해 성공적으로 사용되어 왔다. 그러나 routing이나 switching과 같은 광 네트워크 기능은 SONET/SDH와 같은 단일 채널 광 전송에서는 지원할 수 없다. 단일 채널 SONET/SDH 광 시스템에서는 routing이나 switching과 같은 기능은 광 영역(optical domain)이 아닌, Time-Division Multiplexing(TDM)을 통한 디지털 영역(digital domain)에서 실행된다.

전 세계적인 통신 네트워크에 WDM, 좀 더 정확하게는 point-to-point WDM line 시스템의 신속한 도입이야말로 진정한 광 네트워크를 가능하게 할 수 있다고 보여진다. 이에 따라 WDM 네트워킹을 위한 요소(element)들이 새롭게 부각되고 있다. 예를 들어, fixed wavelength add/drop capability를 가지는 WDM line 시스템이 사용되고 있으며, WDM add/drop multiplexers(WDM-ADMs)와 Optical Cross-Connects(OXCs)와 같은 nodal 특징을 가지는 광 네트워크 요소들이 연구실과 현장에




서 연구되고 있다.

이런 WDM nodal 요소들의 add/drop 기능과 실질적으로 wavelength-switched 네트워크와 wavelength-routed 네트워크를 구축할 수 있는 능력은 TDM 네트워크에서 time slot을 조작하고 FDM(Frequency-Division Multiplexed) 시스템에서 주파수를 사용한 것처럼 WDM 네트워크 시스템에서 wavelength를 조작을 가능하게 해 준다. 따라서 단일 채널 광 전송 시스템을 넘어서 wavelength routing, switching 그리고 conversion/interchange와 같은 향상된 특징들을 가지는 WDM 네트워크를 구축하는 것은 광 네트워킹의 중요한 주제가 되어 있다.

이 글에서는 광 스위치 중에서 특히, tilting mirror와 torsion mirror의 제작과 이것의 동작 특성 및 활용에 대하여 고찰해 보았다. 물론 MEMS 기술이 아니더라도 충분한 노력을 기울인다면 원하는 만큼의 성능을 가지는 스위치를 개발할 수 있을 것이다. 하지만 이러한 기술들은 MEMS 기술에 비해서 분명한 한계가 있다. MEMS 기술만이 가질 수 있는 소형화, 그러한 소형화에 따른 처리 속도의 향상, 동일한 wafer 상에 여러 부품들을 일괄 처리 제작함으로써 생기는 신뢰도 향상 등은 다른 어떤 기술적 시도보다 효과적이다.


참고문헌

1. S.S Lee, L.S Huang, C.J Kim and M.C. Wu, "Free-Space Fiber-Optic Based on MEMS Vertical Torsion Mirrors", J. Lightwave Technology, **17** [1] (2000).
2. J.E. Ford, V.A. Aksyuk, D.J. Bishop, and J.A. Walker, "Wavelength Add-Drop Switching Using Tilting Micromirrors", Journal of Lightwave Technology, **17** [5] (2000).
3. L.S Huang, S.S Lee, E.d Montamedi, M. C. Wu and C.J. Kim, "MEMS Packaging for Micro Mirror Switches", Electronic Components and Technology Conference, pp 592-597. 1999.
4. Alan McGuire, Paul Bonenfant, "Standards: The Blueprints for Optical Networking", IEEE Communications Magazine, Feb. 1998.
5. L.Y Lin, E. L. Goldstein, R. W. Tkach, "On the Expandability of Free- Space Micromachined Optical Cross Connects", J. of Lightwave technology, **18** [4] Apr. (2000).
6. W. S. Chan, K. L. Hall, E. Modiano, K. A. Rauschenbach, "Architectures and Technologies for High-Speed Optical Data Networks", J. of lightwave technology, **16** [12] Dec. (1998).



박종연

- 1999년 한국외대 전자제어공학부 학사
- 2000년 고려대학교 전기공학과 석사
- 2002년 및 한국과학기술연구원(KIST) 마이크로시스템 연구 센터 학연 연구원
- 2002년 KIST, Microsystem Research Center 연구원
- 2004년 Center 연구원



박정호

- 1985년 미 Purdue Univ. 전기공학과 학사
- 1988년 미 Purdue Univ. 전기공학과 석사
- 1992년 미 Purdue Univ. 전기공학과 박사
- 1992년 미 Intel 사 책임연구원
- 1995년 ~현재
- 1995년 고려대학교 전기공학과 교수