

미세 가공기술의 센서 및 액츄에이터에의 응용

이 승 기

(단국대학교 전기공학과)

1. 머릿말

미세 가공기술(micromachining)을 이용한 미세 구조물의 제작은 1980년대 후반 이후 비약적인 발전을 거듭하며 다양한 기계적 부품들의 제작에 성공하여 초미세 시스템(Micro Electro Mechanical System : MEMS)의 구현에 대한 새로운 가능성을 제시해 주고 있다. 국내에서도 상당수의 연구자들이 이 분야의 연구에 많은 관심을 갖고 활발한 연구 활동을 해 나가고 있다. 그러나 이미 적지 않은 분야에서 미세 가공기술의 이용이 실용화 되어 있음에도 불구하고 이러한 미세 가공기술의 응용에 대해 지나치게 편협된 시각이 존재하고 또한 이 분야의 연구에 종사하는 일부 연구자들도 새로운 응용 분야의 제시에 어려움을 겪고 있는 것도 사실이다.

따라서 본 稿에서는 미세 가공기술의 실제적인 응용 예로써 일본 東北대학의 연구 내용을 간략히 소개하고자 한다. 동북대학은 미세 가공기술을 이용하여 미세 구조물의 제작 뿐 아니라 센서 및 주회로의 집적에 의한 미세 시스템의 연구에 많은 힘을 기울이고 있으며 특히 모든 연구의 최대 목표가 철저히 실제 응용이 가능한 시스템의 개발에 있으므로 이곳에서의 연구 내용을 전반적으로 살펴보는 것은 국내 연구에서의 방향설정 및 참고 자료로서 도움이 될 수 있으리라 판단된다.

동북대학에서의 미세 가공기술 관련 연구는 매우 방대하고 다소 산만한 느낌도 있으나 전체적으로

① 가속도 센서를 중심으로 한 집적화 용량형 센서의 개발, ② 고감도 센서의 개발, ③ 마이크로 액츄에이터의 제작, ④ 입체적 미세 가공기술의 개발 등으로 분류할 수 있다. 이 중에서 비교적 연구 성과가 나타나고 있는 대표적인 몇가지 예에 대해서 개략적으로 살펴보도록 하겠다.

2. 집적화 용량형 센서

2.1 집적화 용량형 가속도 센서

그림 1의 구조에서 알 수 있듯이 실리콘 mass가 다수의 SiON 빔에 의해 중앙에 지지되고 있는 형태로서 상하의 glass에 형성된 전극과 함께 capacitor를 이루고 있다. Mass의 바깥쪽에는 CMOS 회로부로서 C-F converter와 기준 capacitor가 집적되어 있다.

온도 변화에 따른 출력 주파수의 drift등은 외부에서의 PLL(Phase Locked Loop) servo 방식에 의해 보정하고 있다. 가속도 변화가 -1g에서 1g까지 일때의 PLL servo 시스템의 출력 전압은 그림 2에 나타난 바와 같이 선형적인 특성을 나타내고 있다.

실리콘의 가공이나 glass의 packaging등은 미세 가공기술을 이용한 것이며 특히 주변 회로의 집적에 의해 온도 변화에 따른 특성의 변화를 보상해 줄 수 있는 특징을 갖고 있다.

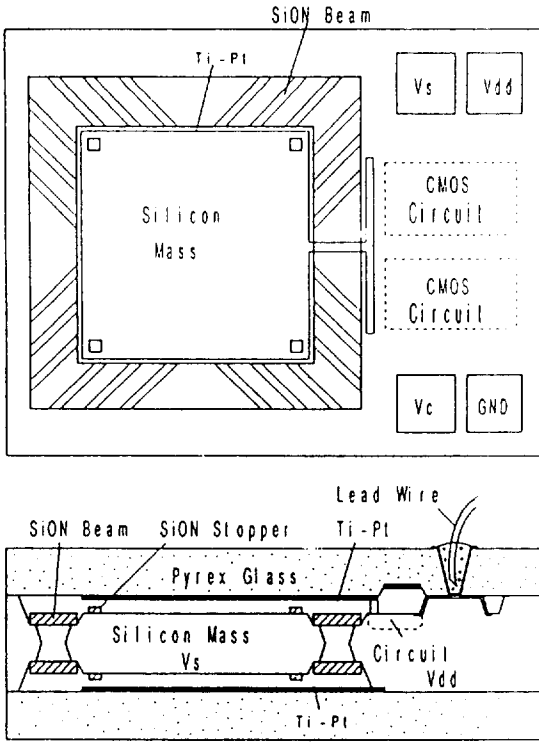


그림 1. 집적화 용량형 가속도 센서의 구조

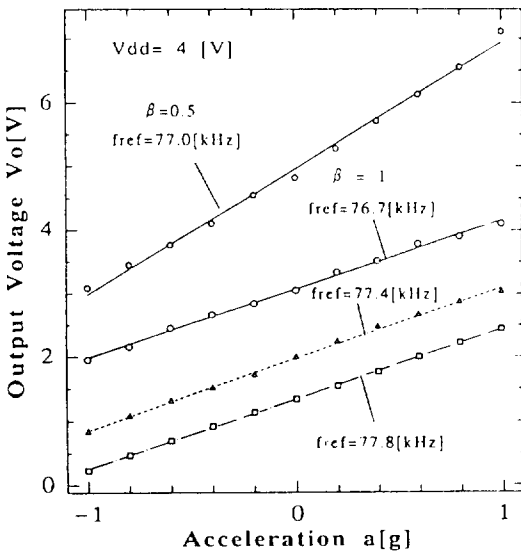


그림 2. PLL servo 시스템의 출력 특성

2.2 분산된 mass를 갖는 용량형 가속도 센서

가속도 센서의 감도 향상을 위해 mass부의 질량을 가능한 한 크게 제작한 형태이다. 그림 3의 구조

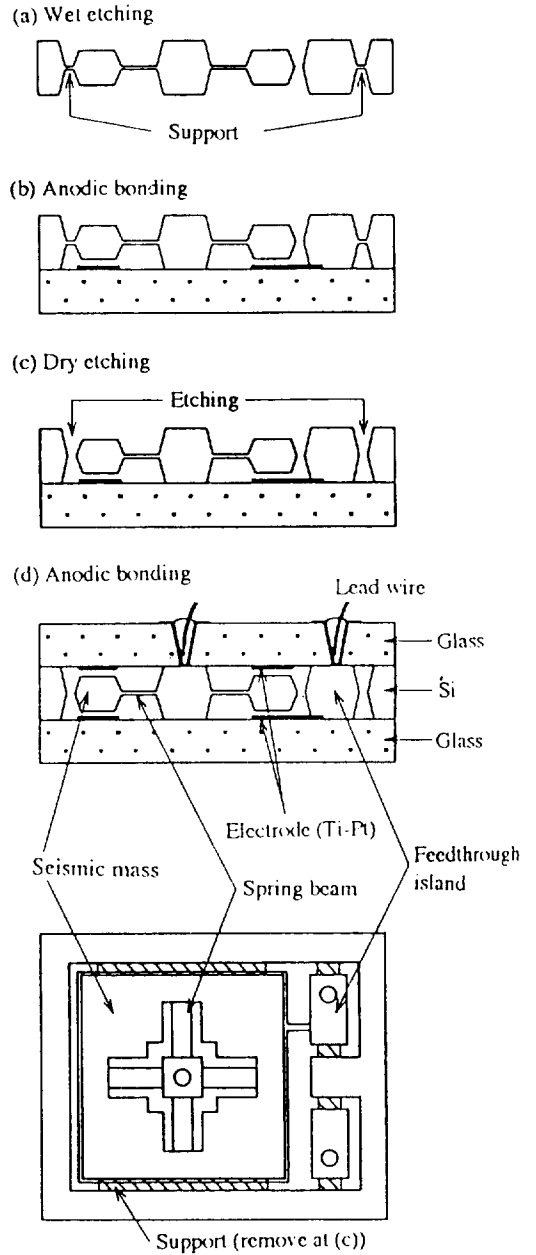


그림 3. 분산된 mass를 갖는 용량형 가속도 센서의 구조 및 제작 순서

및 제작 과정에서 알 수 있듯이 mass부를 기판으로부터 구조물 자체의 파괴 없이 분리하는 것이 매우 중요하며 여기에서는 laser assisted etching 방법을 이용하고 있다.

Laser assisted etching 방법은 그림 4와 같이

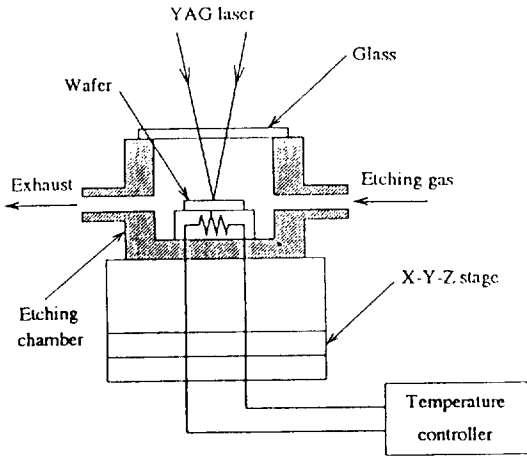


그림 4. Laser assisted etching 시스템

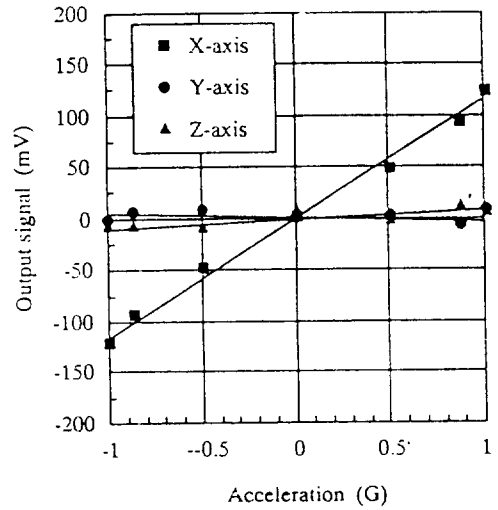
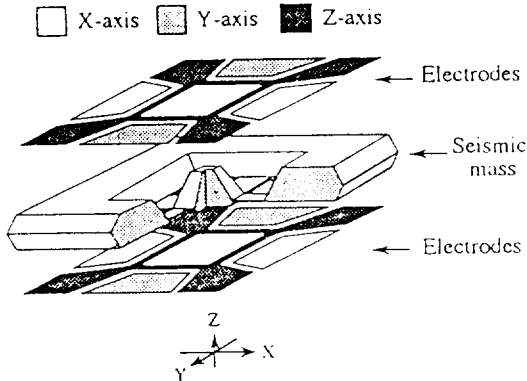
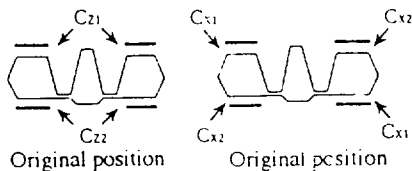


그림 6. 각 축 성분의 출력 특성

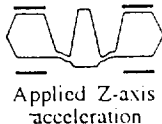


(a) Configuration of each axial electrodes

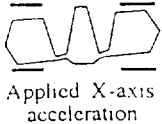


Original position

Original position



Applied Z-axis acceleration



Applied X-axis acceleration

(b) Bending mode (c) Tilting mode

그림 5. 3축 가속도 센서의 구조 및 원리

시료의 원하는 부분만을, laser 조사에 의한 반응 가스와의 화학 반응에 의해 etching하는 방법이다. 반응 가스로는 HCl, SF₆, NF₃ 등이 쓰이는데 HCl

의 경우 재증착의 문제, SF₆의 경우 금속도 etching되는 문제등이 나타났으나 NF₃를 사용할 경우 양호한 결과가 나타났다.

Laser assisted etching 방법은 이와 같은 가속도 센서뿐 아니라 미세구조물의 분리 단계에서 구조물 자체의 파괴 위험 없이 기판으로부터의 분리를 가능하게 해주는 매우 유용한 수단으로 이용되고 있다.

2.3 3축 가속도 센서

한 방향으로의 가속도 성분뿐만 아니라 공간상에서의 x, y, z축 방향의 가속도 성분을 측정하기 위한 구조로서 그림 5와 같은 구조 및 원리를 갖는다.

출력 신호로부터 각 축 성분의 출력을 얻는데에는 동기화된 demodulator를 사용하고 각 축에서 벗어난 움직임에 대한 감도는 mass를 원래의 위치로 고정시키게 하는 servo 시스템의 구현으로 억제한다. 그림 6에 각 축 성분에 대한 측정 예가 나타나 있다.

3. 고감도 센서

3.1 진동형 각 가속도 센서

입력 각 가속도를 측정하는 소자로서 그림 7과 같은 구조를 하고 있다.

실리콘은 (110) 웨이퍼를 미세 가공하고 상하

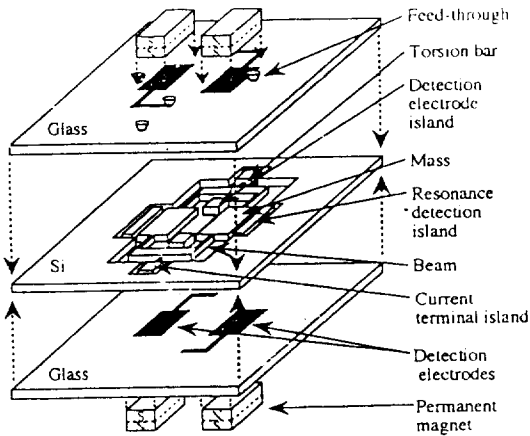


그림 7. 진동형 각 가속도 센서의 구조

glass에 영구 자석을 부착하여 Lorentz 힘에 의해 구동시키는 방식이다. 이때의 출력은 정전형으로 감지하고 (110) 웨이퍼의 대칭 etching을 위해 etching 전에 laser drilling 방법을 사용하고 있다.

측정결과는 구동층의 진폭이 $5.5\mu\text{m}$, 감지층의 진폭이 $1.0\mu\text{m}$ 이며 0.80 fF sec/deg 정도인 것으로 나타났다.

3.2 고에너지 이온 주입에 의한 온도보상형 압전저항

수 Mev의 고에너지에 의한 이온 주입에 의해 매입형 압전저항을 제작한다. 그림 8에 나타난 바와 같이 JFET와 유사한 구조의 압전 저항을 제작하고 공핍층의 폭이나 채널에서의 캐리어 이동도와 같은 온도에 무관한 변수들을 이용함으로써, 적절한 동작조건에서 온도에 무관한 압전 저항 특성을 얻을 수 있게 된다.

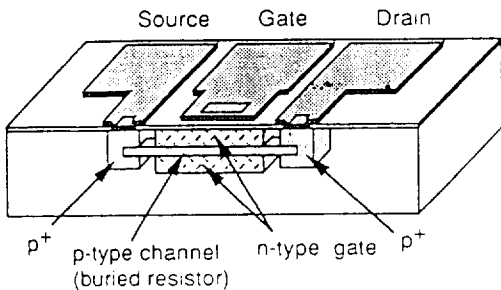


그림 8. 고에너지 이온 주입에 의한 압전 저항

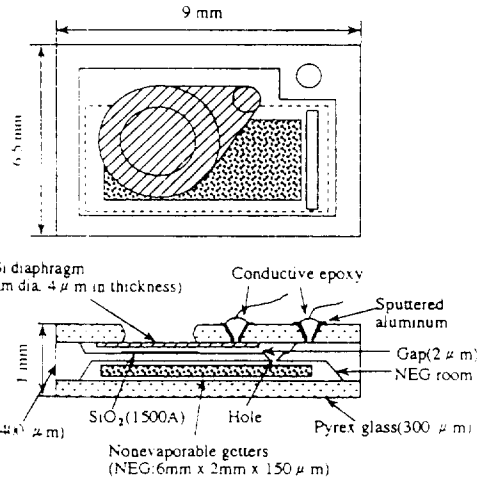


그림 9. 실리콘과 glass의 진공 밀봉

이와 같이 0의 온도 계수값을 갖는 압전 저항은 strain gauge로서 응용될 수 있다.

3.3 실리콘-glass 양극 접합에 의한 센서의 진공 밀봉

센서 내부를 진공으로 밀봉하는 것은 절대압용 압력 센서뿐만 아니라 센서 자체의 성능 향상을 위해서도 매우 중요한 기술이다.

일반적으로 실리콘과 glass를 양극 접합할 때 내부를 진공으로 만드는 방법은 진공 중에서 양극 접합을 하거나 양극 접합후 산화에 의해 내부의 산소를 소비하여 진공으로 만드는 방법들이 이용되어 왔다. 그러나 이와 같은 방법들로 얻을 수 있는 진공도는 수 m torr 정도에 불과하다.

그림 9에 나타난 바와 같이 내부에 공기 흡착 물질(getter 材)을 함께 넣은 후 봉입하고 이것을 활성화 시키는 방법에 의해 10^{-5} torr 이하의 고진공 밀봉이 가능해졌다.

이러한 센서의 고진공 밀봉은 절대압용 압력 센서에의 응용은 물론 정전형 가속도 센서에서의 squeeze film 효과의 감소나 진동형 센서에서의 Q factor의 증가등 다양하게 응용될 수 있다.

4. 액츄에이터의 제작

4.1 분포형 정전 마이크로 액츄에이터

그림 10과 같이 glass 기판 상에 구리를 $5\mu\text{m}$ 두

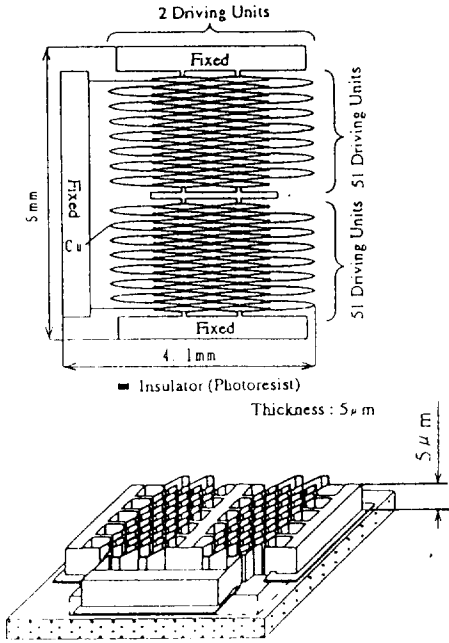


그림 10. 분포형 정전 마이크로 액츄에이터의 구조

께로 도금하여 정전형으로 구동되는 액츄에이터를 제작하였다.

그림에서 알 수 있듯이 액츄에이터의 구조는 근육의 구조와 매우 유사하며 동일한 unit의 직렬 연결에 의해 구동 거리를 증가시킬 수 있고 병렬 연결에 의해 발생력이 커질 수 있게 된다. 또한 동일 구조가 반복해서 나타나 있는 구조이므로 먼지등과 같은 외부 환경에 의한 영향도 감소될 수 있다.

실제로 160V의 전압에 의해 구동될 경우 $28\mu\text{m}$ 의 움직임이 관측되었으며 200V의 전압에서 $6.3\mu\text{N}$ 의 발생력을 갖는 것으로 계산되어졌다.

4.2 Ferrite core를 사용한 평면형 미소변압기

자기 디바이스의 소형화를 위해 그림 11과 같은 평면형 미소 변압기를 제작하였다. 코일은 glass 기판 위에 구리를 도금하여 제작하고 상하로 Ni-Zn ferrite core를 부착하였다.

이때 1차측과 2차측의 절연 내압은 1kV까지 $10\text{M}\Omega$ 의 값이 확인되었고 1 MHz 이하의 주파수에서 40 정도의 Q factor가 얻어졌다. 또한 전력전송 밀도는 $1.5\text{W}/\text{cm}^2$ 인 것으로 나타났다.

이러한 평면형 미소 변압기는 고주파용 DC-DC

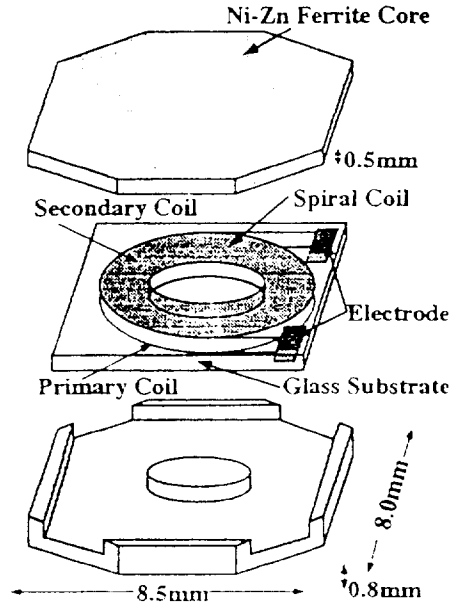


그림 11. 평면형 미소 변압기의 구조

converter로 응용될 수 있으며 실제로 DC-DC converter를 제작하여 relay 구동용으로 동작시켰다.

4.3 선형 stepping 마이크로 모우터

실리콘(110) 웨이퍼를 미세 가공하고 glass를 상하로 packaging하여 그림 12와 같은 선형 stepping

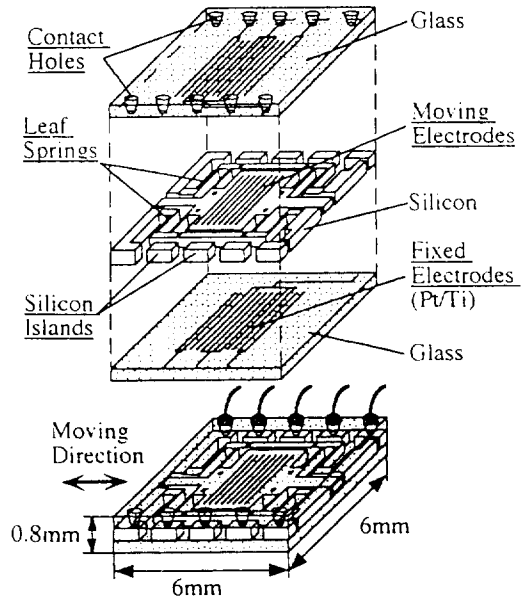


그림 12. 선형 stepping 마이크로 모우터의 구조

마이크로 모우터를 제작하였다. 이동부는 stripe 형태의 전극으로 구성되며 고정부인 glass 측에 인가되는 3상의 전압에 의해 구동된다.

지금 현 단계로서는 몇가지 문제점이 있으나 250V의 전압 인가에 의해서 $9\mu\text{m}$ 의 움직임이 관찰되었다.

현재의 구조를 개선하여 자기 테이프의 이동용 구동원으로서의 응용에 관한 연구가 계속되고 있다.

5. 입체적 미세 가공기술

5.1 극세경 광 파이버 압력 센서

직경이 0.1mm 정도인 광 파이버의 끝 부분에 실리콘 박막 형태의 압력 센서를 제작하는 것으로서 그림 13과 같은 구조를 갖는다.

측정 원리는 두개의 cavity를 갖는 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 것이다. 직경 0.1mm 정도의 광 파이버 끝 부분에 센서부를 제작하는 것은 매우 어려운 미세 가공기술로서 FIB(Focused Ion Beam)를 사용하거나 형성된 pattern에 광 파이버를 정렬하여

형성된 pattern을 떼어내는 특수한 가공기술을 개발하여 이용하고 있다.

이러한 극세경 광 파이버 압력 센서는 미세 혈관용 내시경에 응용될 수 있다.

5.2 3차원 비평면 미세 가공

비평면적으로 원하는 부분만 선택적으로 metallization 할 수 있는 미세 가공 기술이며 기본적으로

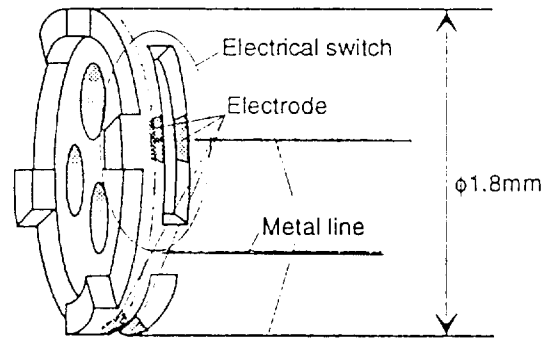


그림 14. 내시경 단부에 제작된 촉각 센서

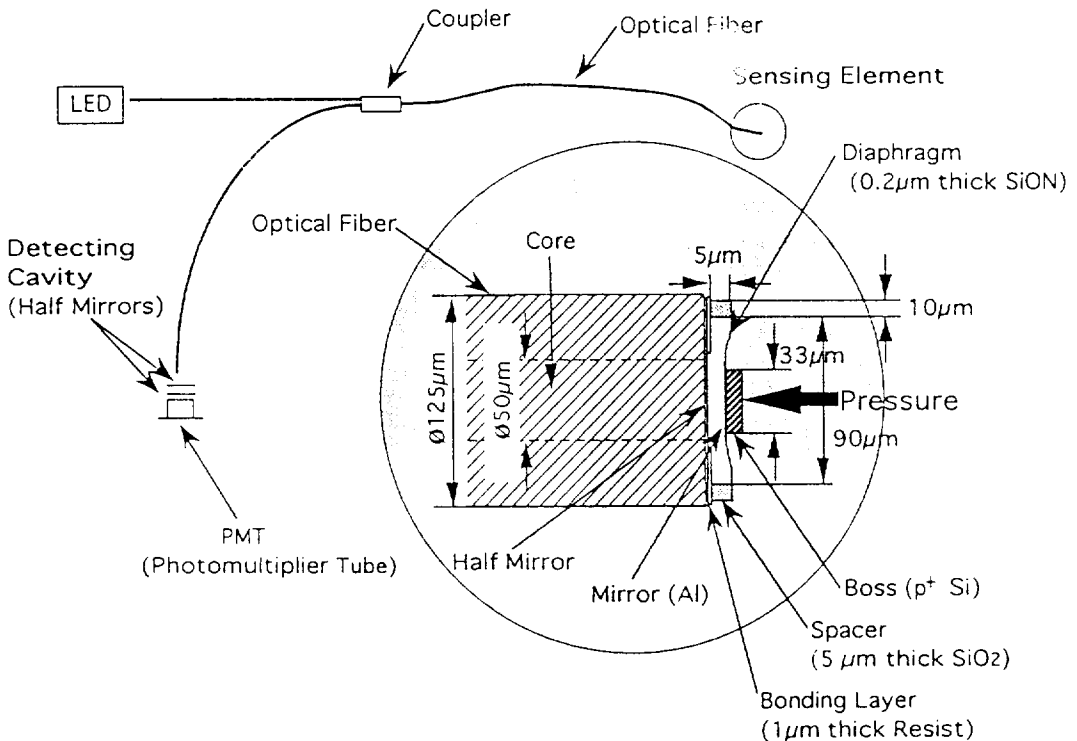


그림 13. 극세경 광 파이버 압력 센서의 구조

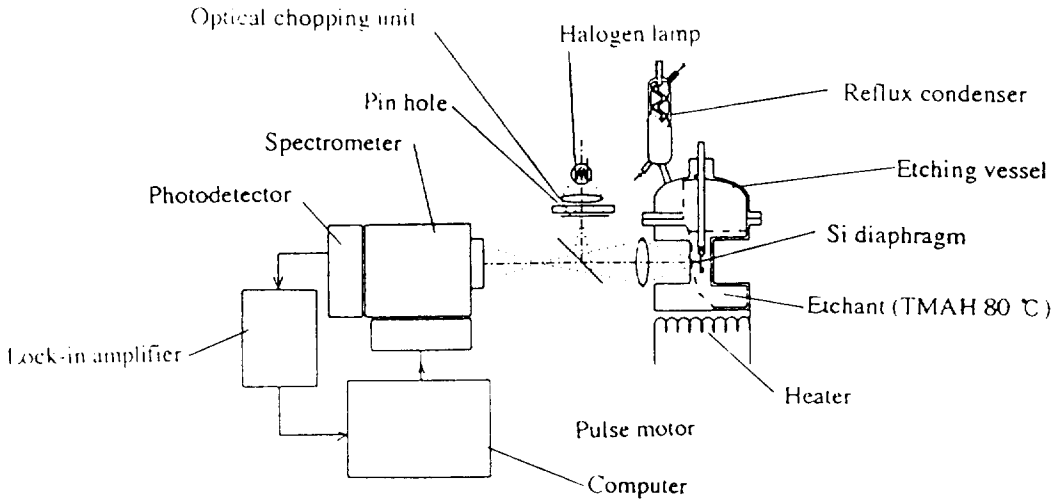


그림 15. 실리콘 박막 두께의 광학적 측정 시스템

로 laser CVD 시스템을 이용한다. 즉 크롬등의 금속을 laser 조사에 의해 광화학적으로 반응가스 상태에서 분리, 증착하는 기술이며 이 기술을 응용하여 그림 14에 나타난 바와 같이 내시경의 끝 부분에 촉각 센서를 제작할 수 있다.

5.3 실리콘 etching의 optical in-situ monitoring

Etching하고 있는 실리콘의 두께를 광학적으로 측정하여 원하는 두께에서 etching을 정지할 수 있도록 하는 것이며 다중 빔 간섭계의 원리를 이용한다. 간단한 원리도가 그림 15에 나타나 있으며 800nm에서 1000nm의 파장을 갖는 자외선 영역의 스펙트럼을 사용한다.

실리콘의 양쪽 면에서 반사되는 빛의 간섭을 이용하여 측정 가능한 실리콘 박막의 두께는 2-20 μ m인 것으로 측정되어졌다.

6. 맺음말

지금까지 간단히 살펴본 몇가지 예는 일본 東北 대학의 미소 기계학 연구실(Esashi 교수)에서 수행하고 있는 연구 주제 가운데 대표적인 몇가지 만을 간추려 본 것이다. 각각의 연구 내용을 제한된 지면에서 깊이 있게 분석해 보는 것은 매우 어려운 일이나 위의 간단한 소개를 통해 우리는 다음과 같은 사실들

을 알 수 있다.

먼저 미세 가공기술을 이용한 연구의 대상이 미세 구조물 자체의 제작보다 새로운 혹은 기능이 향상된 센서의 제작에 상당히 치중되고 있음을 알 수 있다. 이는 철저하게 실용적인 기술의 개발을 목표로 연구가 진행되고 있음을 감안할때 자연스러운 결과라고 판단된다. 현 단계에서 센서의 응용 분야는 매우 다양하고, 요구되고 있는 센서 자체의 특성이나 기능도 복합적이라고 할 수 있으며 이러한 센서 기능의 향상은 미세 가공기술의 적절한 이용에 의해 가능해질 수 있다. 특히 이 점은 국내에서의 연구 방향 설정에 좋은 참고 자료가 될 수 있을 것으로 보인다. 즉 미세 가공기술의 응용을 고려할 때 동적인 구조 자체만을 생각하는 것은 실제적인 응용 범위를 좁은 영역으로 국한시켜 버릴 수 있음을 위의 예에서 알 수 있는 것이다.

소개된 예를 통해서 우리가 알 수 있는 또 하나의 특징적인 사실은 기술적인 측면에서 다양하고 독창적인 미세 가공기술을 안정적으로 운영해나가고 있다는 점이다. 이는 물론 미세 가공 전용의 실험 시설이 잘 갖추어져 있기 때문이기도 하지만 무엇보다 중요한 것은 오랜 기간동안 꾸준한 실험과 경험을 기반으로, 사소하게 보이는 경험적 사실 한가지라도 놓치지 않고 축적시켜 온데서 기인함을 간과해서는 안된다. 따라서 이제 연구를 시작하고 있는 단계인 국내의 경우, 미세 가공기술의 신속하고도 효율적인

축적을 위해서는 실제적인 실험적 경험을 소중히 하고 이를 상호교환, 활용할 수 있는 분위기의 조성이 중요하다고 할 수 있다.

미세 가공기술은 센서 및 액츄에이터의 분야에서 반드시 필요한 기반 기술이며 매우 다양한 응용 범위를 갖고 있음을, 본 稿의 간략한 소개를 통해 좀 더 널리 인식될 수 있기를 바란다.



이승기(李承起)

1963년 5월 15일생. 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1992-1993년 일본 Tohoku University 특별 연구원(JSPS fellow). 현재 단국대학교 전기공학과 전임강사