

MEMS 기반의 새로운 기술적 패러다임에 대비한 공정 기술 분석 및 적용에 대한 고찰

고윤석*

A Consideration on the Process Technology and Application of MEMS to prepare for
upcoming MEMS-based technological paradigm

Yun-Seok Ko*

요 약

최근, 전기, 전자, 로봇, 의료 산업 등 전 분야에서 소형화된 크기로 고도의 지적인 기능을 가지는 MEMS 기반의 스마트 디바이스 개발에 큰 관심이 집중되고 있다. MEMS 기술은 스마트 디바이스에서 요구되는 복잡한 전기적, 기계적, 화학적 그리고 생물학적 기능들을 하나로 결합하여, 초소형, 초경량으로 설계하고, 동시에 이들 디바이스들을 대량으로 일괄 제조할 수 있기 때문에 생산성 및 실용성, 경제성 측면에서 매우 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 다가올 MEMS 기반의 새로운 기술적 패러다임에 대비하기 위해 MEMS의 공정들을 분석하고 그 적용 사례들을 고찰함으로써 기본적인 적용 방법론을 확립한다.

ABSTRACT

Recently, in the electric, electronic, robotic, and medical industries, a great attention has been paid to the development of MEMS-based smart devices with a compact size and highly intelligency. The MEMS technology is very effective in designing into a compact size and lightweight by combining into one the complex electrical, mechanical, chemical, and biological features which are required by smart devices, and at the same time, in bulk batch manufacturing. Therefore, this study, to prepare for upcoming new MEMS-based technological paradigm, analyzes MEMS processes and then considers its Applications

키워드

MEMS(Micro Electro Mechanical System), Smart Device, Inertia Sensor, Lap On A Chip
미세 전자 기계 시스템, 관성 센서, 랩온어칩, 스마트 디바이스

1. 서 론

MEMS(Micro Electro Mechanical System)는 반도체 제조, 전기회로 그리고 기계 기술을 기반으로 나노 기술과 기존의 기계 기술의 중간 영역에 해당하는 마이크로미터에서 수십 밀리미터 크기를 가지는 전기적,

기계적 요소들이 결합된 초소형 디바이스 또는 시스템을 말한다[1]. MEMS는 1960년대 말에 시작되어 빠르게 발전하여 왔는데 특히 90년대 초, 센서, 액추에이터, 그리고 제어 기능을 실리콘으로 통합 제조할 수 있는 집적 회로 (IC) 제조 공정들이 개발됨으로써 주목받기 시작하였으며 이후 정부와 산업계 모두로부터

* 교신저자(corresponding author) : 남서울대학교 전자공학과(ysko@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2013. 04. 20

심사(수정)일자 : 2013. 05. 20

게재 확정일자 : 2013. 07. 23

의 활발한 자본투자로 개화기를 맞이하였다. 특히 최근, 전기, 전자, 로봇, 의료 산업 등 전 분야에서 소형화된 크기로 고도의 지적인 기능을 가지는 스마트 디바이스를 개발하기 위해 MEMS에 큰 관심이 집중되고 있다. 스마트 디바이스에서는 다양한 입력 신호를 전기 신호로 변환하는 센서, 전기신호를 기계적인 변위로 변환하는 액추에이터, 제어 및 통신 기능이 통합적으로 요구되는데, 이를 위해서는 복잡한 전기적, 기계적, 화학적 그리고 생물학적 기능들이 하나로 결합, 구현돼야 하며, 특히 실용성과 경제성을 가지기 위해서는 고 성능, 고 정밀, 저비용, 저소비전력, 내진동성, 내충격성을 만족하면서도 초소형화, 초경량화로 설계, 제작돼야 한다. MEMS는 마이크로 크기로 다수의 전기적, 기계적, 기능들을 하나의 디바이스로 통합하고 이들 디바이스를 대량으로 일괄 제조할 수 있는 장점을 가지기 때문에 다가올 고도화된 사업사회에서 요구되는 스마트 디바이스를 제작하는데 매우 효과적이라 할 수 있다[1-3, 18-20].

따라서 본 연구에서는 MEMS 기반의 새로운 기술적 패러다임에 대비하기 위해 MEMS의 공정들을 분석하고 그 적용 사례들을 고찰해 보고자 한다. 먼저 MEMS 제작 공정 기술들을 분석하고, 다음 MEMS의 적용 성공사례로서 관성항법 장치, 의료 기기, 마이크로 토털 해석 시스템(Micro TAS) 그리고 마이크로 광 전기기계 시스템(MOEMS : Micro Opto Electro Mechanical System) 등을 고찰한다. 그리고 이를 기반으로 차세대 스마트 디바이스 제작을 위한 MEMS의 적용 방법론을 확립하고자 한다.

II. MEMS 기술 분석

MEMS의 주요기술로는 실리콘 마이크로머시닝, 웨이퍼 본딩, LIGA (Lithography, Galvanoforming, Moulding) 및 3D 마이크로 제조기술을 들 수 있다. 특히, 실리콘 마이크로머시닝은 리소그래피 기술을 이용하여 MEMS의 발전에 큰 기여를 한 기술로서 실리콘 기판 또는 실리콘 기판 상에 서브 밀리미터 급의 크기를 가지는 미세 기계 부품을 3차원 입체 구조로 제작하기 위한 공정들이다. 그리고, 실리콘 마이크로머시닝은 벌크 마이크로 머시닝, 표면 마이크로 머시

닝 기술로 구성된다.

2.1 벌크 마이크로머시닝

벌크 마이크로머시닝 기술은 기판 자체를 가공하여 미세 전자 기계 구조물을 만드는 기술이다. 그림 1은 특수한 경우에 대한 벌크 마이크로머시닝 공정을 보인다[4]. 먼저, 실리콘 웨이퍼에 실리콘 산화물(SiO_2)을 증착한 후, 감광액을 도포하여 감광막을 형성한다. 그리고 회로패턴이 형성된 마스크에 자외선을 조사, 빛에 노출된 감광막 부분을 현상 처리하여 제거한다. 이 과정이 끝나면 감광막을 마스크로 하여 실리콘 산화막을 제거한 후 남은 실리콘 산화막을 마스크로 하여 2차 식각처리를 실시한다. 다시 선택영역에 실리콘 산화막을 증착한 후, 식각작업을 반복 수행하여 원하는 한 면에 구조가 형성되도록 한다. 그리고 아래 쪽에도 같은 절차를 적용하면 최종적으로 그림 1에 보인바와 같이 실리콘 기판은 요구된 형상으로 남게 된다. 이와 같이 벌크 마이크로머시닝은 기판자체를 요구된 구조물로 형상화하는 기술이다.

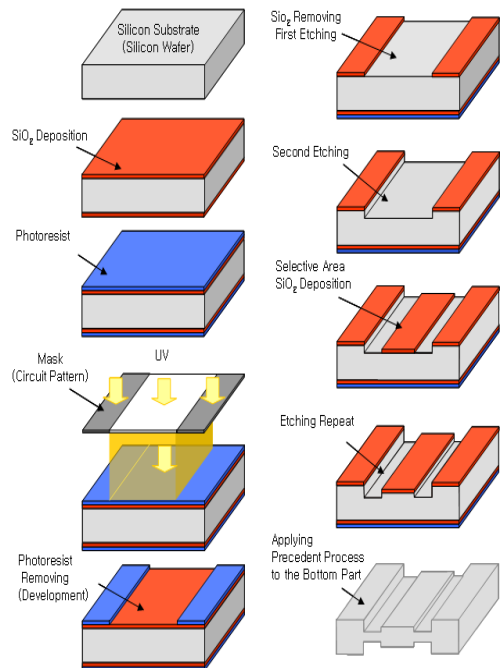


그림 1. 벌크 마이크로머시닝 기술
Fig. 1 Bulk micro-machining technology

2.2 표면 마이크로 머시닝

표면 마이크로 머시닝은 벌크 실리콘을 형상화하지 않는 대신 실리콘 표면위에 희생 층과 구조 층의 박막을 증착한 후, 구조물을 형상화 한 후, 최종적으로 희생 층을 제거함으로써 기계적인 구조물을 얻는 기술이다. 그림 2는 표면 마이크로머시닝 공정을 보인다 [5]. 먼저 실리콘 기판 위의 희생 층에 실리콘 산화물을 증착하고 감광액을 도포하여 감광막을 형성함으로써 코팅과정이 완료되면 리소그래피 과정을 적용한다. 자외선을 회로패턴이 새겨진 마스크에 조사하면, 마스크 아래에 있는 실리콘 기판의 감광막이 빛에 노출되는데, 이때 노출된 부분은 화학적으로 변화되어 현상처리를 하면 녹아 제거된다. 이 노광과정이 완료되면 다시 식각처리를 통해 실리콘 산화물을 제거한 후 그 위에 원하는 형상을 얻기 위한 박막을 증착하고 감광막을 도포한 후, 리소그래피 기술을 적용한다.

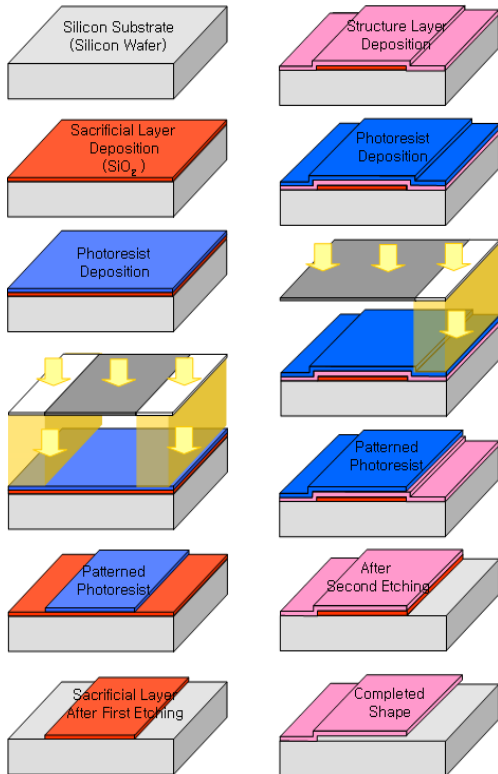


그림 2. 표면 마이크로머시닝 기술
Fig. 2 Surface micro-machining technology

2차 마스크에 자외선을 조사하여 현상처리한 후 식각처리하면 빛에 노출되지 않은 부분의 막들이 제거되고 최종적으로 희생 층을 제거하면 그림 2에 보인 바와 같이 실리콘 기판위에 요구된 형상이 남게 된다.

2.3 LIGA 공정

일반적으로 MEMS는 굵고 3차원적인 복잡한 구조물을 요구하기 때문에 높은 가로세로 비(Aspect-ratio)와 3D 디바이스를 구현하기 위한 많은 마이크로 제조기술 (Micro-fabrication)들이 요구되었는데, LIGA는 이 요구조건을 만족시키기 위해서 개발된 방법들 중 하나이다.

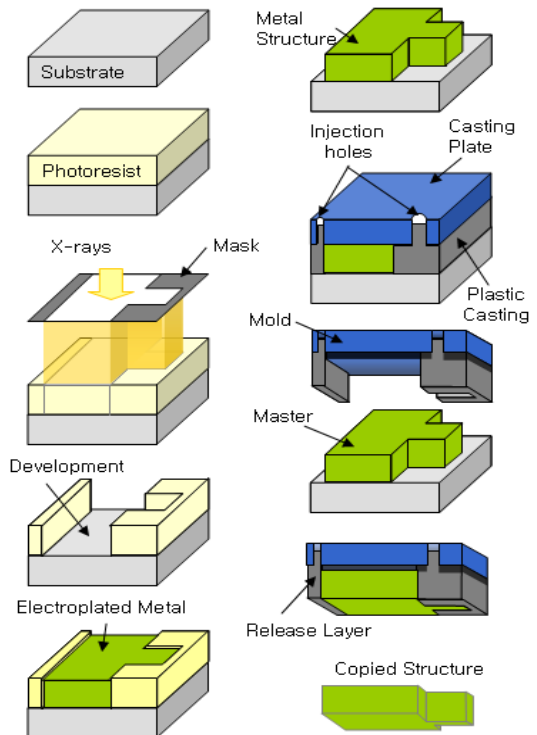


그림 3. 리가 공정
Fig. 3 LIGA processes

LIGA는 마스크 노출을 위한 X선 리소그래피, 금속 부분을 형상화하기 위한 Galvanofornung, 그리고 플라스틱, 금속, 세라믹이나 그들의 조합들을 가지는 미세구조부분들을 생성하기 위한 Molding을 이용하여 1980년대 초 독일의 Karlsruhe 연구센터에서 개발되

었다. 그림 3은 리가 공정들을 보인다[6].

2.4 웨이퍼 접합(Wafer Bonding)[6]

실리콘 마이크로머시닝은 모노리틱 형식으로 복잡한 3D 미세 구조물을 만드는데 한계를 가진다. 따라서 웨이퍼 간 접합이 포메이션에 결정적으로 중요한 역할을 하게 되는 진화된 MEMS를 위한 멀티 칩 구조들이 제안된다. MEMS를 위한 웨이퍼 접합은 양극 접합 (anodic bonding), intermediate layer 접합-assisted 접합, 직접 접합(direct bonding)으로 구분된다. 그림 4는 접합 방법들 중 anodic 접합을 보인다. 양극접합(Anodic bonding)은 대개 MEMS를 위한 나트륨(Sodium) 유리와 실리콘 사이에 시행된다. 이 양극접합에서는 하나의 양극과 음극이 실리콘 웨이퍼와 유리에 각각 접촉되며 약 200-1000V의 전압이 인가된다. 동시에 양극은 180-500°C의 접합온도를 제공하는 히터위에 놓이게 된다. 접합동안 유리로부터의 산소이온이 실리콘과 유리 웨이퍼 사이의 실리콘 산화물 층의 형성으로 생기는 실리콘으로 옮겨가서 강력하고 밀폐된 화학적 접합이 이루어지게 된다.

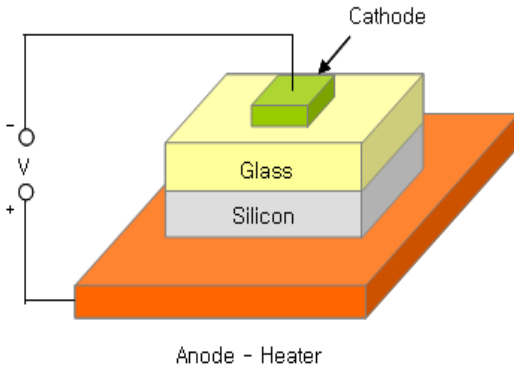


그림 4. 리가 마이크로머시닝 공정
Fig. 4 LIGA micromachining processes

III. MEMS 적용 사례 분석

MEMS 기술들은 마이크로 가속도계, 잉크젯 프린터 헤드, 프로젝션 마이크로 미러 등 부분적으로 기능을 통합하기 위한 경우 외에, 마이크로 유체공학 (Microfluidics), 우주 항공, 생명 의학, 화학 분석, 무

선 통신, 데이터 저장, 디스플레이, 광학 등 다양한 분야에서 보다 복잡한 경우들에 대해 적용이 시도되어 좋은 결과를 보이고 있다. 최근에는 광학부품과 MEMS를 결합한 MOEMS, 그리고 화학, 또는 생화학 분석 및 합성에 관련된 마이크로 토털 분석 시스템 (μ TAS) 등이 그들의 상업적 잠재 가능성 때문에 큰 관심을 받고 있다[3].

3.1 의료기기

MEMS는 인공장기, 혈압센서, 바이오센서, 약물전달 장치, 체내이식 의료 및 감시 장치 등 의학 분야에서 마이크로 의료기기 제작을 위한 핵심 기술로 그 중요성이 점차 증대되고 있다. 그림 5는 MEMS 기술을 이용하여 제작된 혈압 센서를 보인다[7]. 체내이식 무선 의료기기는 401-406Mhz 사이의 주파수 대역을 이용해서 외부와 통신할 수 있는 체내에 이식된 디바이스를 말하는데, 체내이식 심장박동조절기가 그 대표적인 예이다.

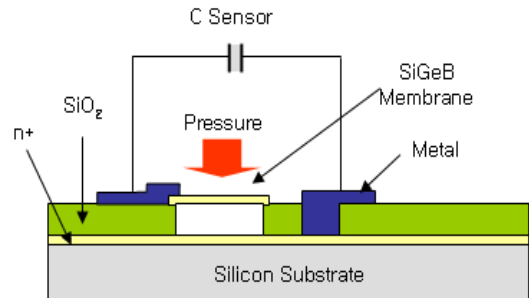


그림 5. 혈압 센서
Fig. 5 Blood pressure sensor

또한 최근, 뇌 과학 분야에서 뇌의 신경학적 감시를 위해 소형 무선 의료기기를 기반으로 하는 새로운 도구의 개발이 시도되고 있다. 그림 6은 신경학적 감시 용류 사례를 보인다[8-9]. 수개의 이식 센서 (N1-N5)들이 뇌나 척추 조직으로 주입되고 특정한 주파수들로 조절되어 개별적으로 어드레싱이 될 수 있도록 한다. 웨이스테이션은 리시버로서 수개의 이식 센서들과 외부 디바이스 간에 통신이 가능하도록 지원하며 특히, 체내에 이식되기 때문에 높은 송신 효율을 얻을 수 있다.

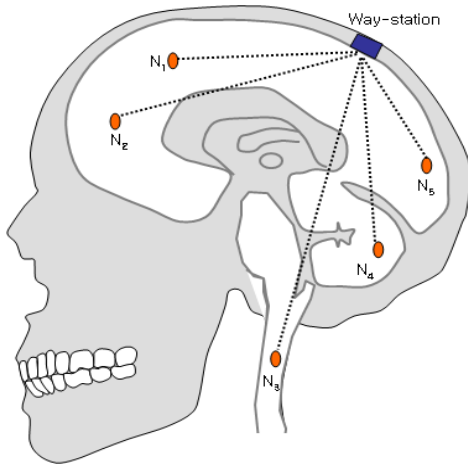


그림 6. 신경계 감시 메커니즘
Fig. 6 Neurological monitoring mechanism

3.2 관성항법 장치

MEMS 관성 센서는 기준좌표를 기준으로 진행 방향을 측정하기 위한 자이로스코프와 진행 방향으로의 이동 가속도를 측정하기 위한 가속도 센서로 구성된다. 최근 보고된 MEMS 자이로스코프들은 기존의 전통적인 회전 디바이스 (spinning device)를 직접 이용하는 대신에 회전을 감지하기 위해서 진동하는 기계적 요소(검증 질량)를 이용한다.

그들은 베어링을 필요로 하는 회전부들을 가지지 않기 때문에 마이크로머시닝 기술을 이용하여 쉽게 소형화하여 일괄생산 방식으로 제조할 수 있다. 모든 진동 자이로스코프들은 Coriolis 가속에 기인하는 한 구조내의 두 가지 진동모드들 간의 에너지 전달을 근거로 한다. Coriolis 가속은 프랑스의 과학자이자 공학자인 G. G. de Coriolis의 이름으로부터 유래되었으며, 회전 프레임에서 일어나는 하나의 피상적 가속으로서, 회전속도에 비례한다. 그림 7은 Coriolis 가속도계의 개념과 소리굽쇠 (Tuning Fork) 진동 자이로스코프의 원리를 보인다[10].

초창기 성공적으로 개발된 MEMS 자이로스코프들은 소리굽쇠(Tuning Fork) 자이로스코프, 진동 고리(vibrating ring) 자이로스코프 등을 들 수 있는데, 이들은 현재도 여전히 폭넓게 이용되고 있다. 표 1은 대표적인 진동 자이로스코프 제조사들로부터 생산되는 제품들의 기능들을 비교한다[11].

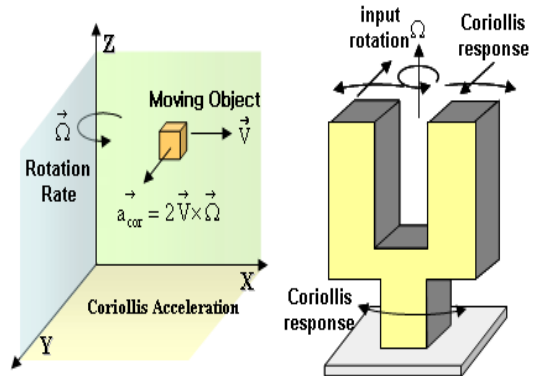


그림 7. Coriolis 가속도계 개념
Fig. 7 Coriolis accelerometer concept

표 1. 대표적인 진동 자이로스코프들의 비교
Table. 1. The comparisons of typical vibratory gyroscopes

Company	Speed Axis	MEMS	Drive	Sense	패키지 타입	Seal Ambient
Bosch	Z	Bulk	Electro Magnetic	Capacitance	Metal Header	Air
Bosch	X/Y	Poly Silicon	Static Electricity	Capacitance	Metal Header	Vacuum
BEI	Z	Quartz	Piezoelectric	Piezoelectric	Metal Header	Air
Silicon Sensing	Z	Bulk	Electro Magnetic	Electro Magnetic	Metal Header	Vacuum
ADI	Z	Poly	Static Electricity	Capacitance	Ceramic	Air

그리고 이후 개발된 MEMS 자이로스코프들 중의 하나가 그림 8에 보인 앞전 판(piezoelectric plate) 자이로스코프이다[12].

앞전 판 자이로스코프는 다른 타입의 자이로스코프들보다 훨씬 간단해서 설계하기가 쉽다. 앞전 판 자이로스코프는 깊이보다 훨씬 큰 길이와 폭을 가지는 앞전 판을 가진다. 앞전 판은 모두 6개의 면들에 연결되는 전기리드를 가지며, 실리콘 웨이퍼의 공동(cavity) 위에 있는 얇은 막 위에 놓인다.

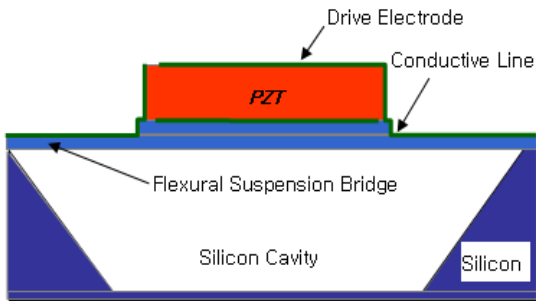


그림 8. 앞전 판 자이로스코프의 단면도
 Fig. 8 The cross section of the piezoelectric plate gyroscope

PZT는 아래 놓인 공동을 기반으로 보다 잘 진동하고 변형된다. 전기 리드들은 구동전압을 제공하고 각 속도에 비례하는 전압을 출력으로 제공한다. 그림 9는 그림 1에 보인 벌크 마이크로머시닝 기술을 적용한 일축 가속도 센서 제작공정들을 기반으로 제작된 1축 가속도 센서를 보인다[4].

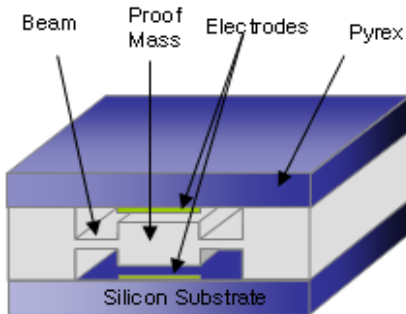


그림 9. 일 축 가속도 센서
 Fig. 9 single axis accelerometer

3.3 마이크로 토털해석시스템(Micro-TAS)

마이크로 토털 해석 시스템은 MEMS의 일부로서 최근 상업적 가능성 때문에 관심이 집중되고 있는 분야이다. 실험실에서 행해지는 전처리, 합성, 반응, 분리, 분석 기능들이 수 평방 밀리미터에서 수 평방 센티미터 크기를 가지는 하나의 칩에 통합 구현된 마이크로 실험실을 말하며, 랩온어칩이라고도 불린다[13-15]. 이 디바이스는 피코 리터이하의 작은 유체볼륨을 처리할 수 있다. 그림 10은 랩온어칩의 대표적인

예로서 MEMS기술로 제작된 유체 채널, 히터, 온도 센서 및 형광 검출기를 사용하는 나노 리터 크기의 DNA 샘플 분석 장치이다[13]. 특히 그림 10은 두개의 액체 샘플 및 전기영동 젤을 가지는 통합된 디바이스의 개략도를 보이는데, 제어 및 데이터 처리 전자 부품들을 제외하고 실리콘 기판 상에 가공하지 유일한 전자 부품은 전기영동 채널 위에 배치된 여기 광원이다. 여기광원의 색상 코드는 파랑이 액체 샘플(계량 준비), 녹색이 소수성 표면, 보라색이 폴리아크릴아미드 젤을 표시한다.

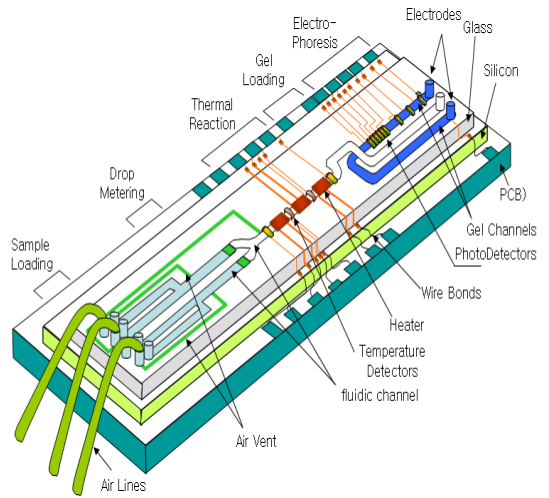


그림 10. 랩온어칩의 예
 Fig. 10 An example of lab on a chip

3.4 마이크로 광전자기계시스템(MOEMS)

MOEMS는 마이크로전자와 마이크로기계기술에 바탕을 두으로써 광 통신 네트워크를 위한 광센서와 광디바이스를 매우 미세하고 콤팩트한 구조로 구현할 수 있는 설계, 제조 방법론이다. MOEMS는 도파관, 광섬유 등과 같은 광 요소들과 얼라인먼트 구조, 센서 액추에이터 등이 같은 기계요소들이 결합되어 만들어진다[16]. 광통신 시장에서 광 디바이스 들 중 그들의 폭 넓은 이용 가능성 때문에 가장 매력적인 MEMS 기반의 핵심 디바이스 들 중 하나로 꼽히는 것이 MEMS 가변 광학 감쇠기(VOA : Variable Optical Attenuator)이다. 따라서 2D 및 3D 광학으로 조립되

는 마이크로머신드 서터와 굴절 거울에 대한 연구는 가장 많은 관심을 받고 있는 영역 중의 하나이다. 지금까지의 제조 공정, 광학 디자인, 액추에이터, 그리고 시스템과 같은 기술에 대한 포괄적인 문헌 조사에 근거하면 MEMS VOA 기술은 여전히 단계적으로 성숙된 기술로 발전되고 있으며, 미래의 광통신 기술을 지원할 초석일 뿐만 아니라, MOEMS 기술의 발전 및 MOEMS 디바이스의 상업화를 이해하는데 최고의 예로서 평가된다[17-18]. 따라서 본 장에서는 MOEMS의 대표적인 한 예로써 MEMS VOA를 설명한다.

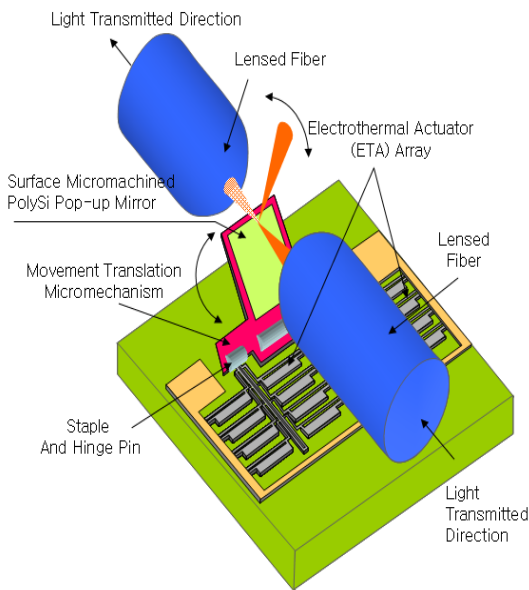


그림 11. MEMS 가변광학감쇠기
Fig. 11 MEMS VOA(variable optical attenuator)

그림 11은 표면 마이크로머시닝에 기반한 팝-업 거울, 입력과 출력 광섬유로 구성되는 MEMS VOA의 개략도를 보인다[17]. 습식 식각 공정 후 렌즈형 광섬유(Lensed Fiber)들은 최소 삽입손실(insertion loss)를 얻기 위해 우선적으로 정렬된다. 약화된 광은 직류 전압이 ETA 어레이에 인가될 때 out-of-plane 쪽으로 반사된다.

IV. 결론

본 연구에서는 미래의 스마트 디바이스를 설계, 제작하는데 핵심 기술인 MEMS 기술을 살펴보았다. MEMS 제작 기술로서 벌크 실리콘 마이크로 머시닝, 표면 마이크로머시닝 그리고 LIGA 공정들을 조사, 분석하였으며, 적용 사례로서 자동운행이나 로봇의 핵심 요소인 관성항법장치 분야, 혈압센서 및 신경계 감시 분야 등을 포함하는 의학 분야, 나노리터의 DNA 샘플로 DNA를 분석하는 랩온어칩. 그리고 끝으로 MOEMS의 한 예로써 MEMS 가변광학 감쇠기 등에 대해서 분석하였다. 분석된 자료에 의하면 MEMS 적용 및 제조기술에서 우리가 매우 뒤쳐져 있는 것이 현실이다. 그러나 MEMS의 핵심 공정들이 반도체 공정들을 기반으로 하고 있고, 최근 중요성을 인식하고 노력한 결과로서 새로운 랩온어칩이 개발되는 등, 급속한 발전을 이루고 있어, 지속적인 투자 및 연구개발 노력이 이루어진다면 독창적이고 우수한 MEMS 개발 능력이 확보될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] <http://www.ritsumei.ac.jp/~sugiyama/English/research.htm>
- [2] http://www.wtec.org/loyola/mems/c7_s3.htm
- [3] http://www.inems.com/mems_course_area/01_introduction/MEMS_History.htm
- [4] <http://www.memsuniverse.com/1548-2>
- [5] Microelectromechanical System (MEMS), http://www.wiley-vch.de/vch/journals/2081/books/2081_rel_title_varadan.pdf
- [6] S. Pital, G. Aggarwal, N. Chandra, and K. Patil, Blood Pressure Sensor and Drug Delivery Device, Presentation Material.
- [7] N. Yazdi, F. Ayazi and K. Najafi, "Micromachined Inertial Sensors", Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 8, pp. 1640-1659, 1998.
- [8] S. Nasiri, A Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status, <http://invensense.com/mems/gyro/documents/whitepapers/MEMSGyroComp.pdf>
- [9] Guohong He, Christopher C T Nguyen, Jane C M Hui, S-W Ricky Lee and Howard C Luong, "Design and Analysis of a Micro-gyroscope with sol-gel Piezoelectric Plate", Smart Materials and Structures, Vol. 8, pp.

212-217, 1999.

- [10] M. A. Burns, B. N. Johnson, S. N. Brahmasandra, K. Handique, J. R. Webster, M. Krishnan, T. S. Sammarco, P. M. Man, D. Jones, D. Heldsinger, C. H. Mastrangelo, and D. T. Burke, "An Integrated Nanoliter DNA Analysis Device", Science 16 pp. 484-487, October 1998.
- [11] Lap on a chip platforms for cancer research, <http://lsi.epfl.ch/page-13122-en.html>
- [12] What is a lap on a chip, <http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3081>
- [13] Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems(MOEMS), <http://www.hft.e-technik.tu-dortmund.de/forschung/projekt.php?id=9 &lang=en>
- [14] C. Lee and J. A. Yeh, "Development and evolution of MOEMS technology in variable optical attenuators", Journal of Micro/Nano Lithography, MEMS, and MOMES, Vol 7, No. 2, 021003(2008) July 2007.
- [15] K. H. Koh, B. W. Soon, J. M. Tsai, A. J. Danner, and C. Lee, "Study of hybrid driven micromirrors for 3-D variable optical attenuator applications", The International Online Journal Of Optics, Vol. 20, No. 19, pp. 21598-21611, Sep. 2012.
- [16] Young-Chul Bae, "Chaotic Phenomena in MEMS with Duffing Equation", The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 6, No. 5, pp. 709-716, 2011.
- [17] Gwang-Jun Kim. Hyoung-Keun Lee, "The Development of Liver Cancer Vital Sign Information Prediction System using Aptamer Protein Biochip", The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 6, No. 6, pp. 965-971, 2011.
- [18] Ju-Wan Kim. Young-Duk Koo. and Young-Chul Bae, "Nonlinear Phenomena in MEMS Device", The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 7, No. 5, pp. 1073-1078, 2012.

저자 소개



고윤석(Yun-Seok Ko)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업(공학사)

1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사)

1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1986년~1996년 한국전기연구소 선임연구원

1996년~1997년 포스코 경영연구소 연구위원

1997년~현재 남서울대학교 전자공학과 교수

2012년~2013년 University of Utah 방문교수

※ 관심분야 : 전력시스템 자동화, 배전자동화, 로봇제어, 의료기기, MEMS 적용