

실리콘 마이크로 소자와 의용 공학

양 상 식
아주대학교, 제어계측공학과

SILICON MICRO-DEVICES AND BIOMEDICAL ENGINEERING

Sangsik Yang
Department of Control and Instrumentation Engineering, Ajou University

1. 서론

실리콘은 지난 30 여년 간 반도체의 대명사로 불리워질 정도로 마이크로 일렉트로닉 칩의 중요한 재료로 사용되어왔다. 실리콘은 단순히 집적 회로의 재료로 뿐만아니라, 1960년대 초반에 실리콘으로 만든 소형 압력 센서^[1]의 개발 이후로 스트레인 게이지^[2] 및 이온 측정기 등의 센서 재료로서도 중요한 위치를 차지하고 있다. 1970년대 후반부터 1980년대에 이르기까지는 센서와 신호 처리 회로를 단일 실리콘 칩에 제조한 집적 센서 개발에 관한 연구가 활발히 진행되었다.

최근 의학용으로 센서의 소형화가 필요하고, 자동차용 센서의 대량 생산에 의한 저렴화, 공정 제어용 센서의 정확성이 요구되어 실리콘 공정 기술을 이용한 센서 개발에 관한 연구가 활발해지면서, 재료와 공정기술의 혁신으로 센서와 신호 처리 및 인터페이스를 위한 전자 회로를 단일 실리콘 칩에 집적하여 제조할 수 있는 단계에 이르렀다. 이러한 집적 센서를 '집적 스마트 센서(integrated smart sensor)'라 부르고, 단지 센서와 전자 회로를 한 하우징에 넣은 것은 하이브리드 스마트 센서(hybrid smart sensor)'라 부른다.

이와 같이 실리콘이 널리 사용됨에 따라 집적회로 공정 기술이 발달되었고, 특히, 마이크로 머시닝이라 불리는 실리콘 가공 기술로 초소형 기계 소자(micromechanical device)의 제작이 가능하게 되었다. 이 소자들의 크기는 수 마이크로에서 수 백 마이크로에 이른다. 연구 초기에는 각기 제조된 부품을 조립할 때 손으로 조작하였으나, 최근에는 조립을 거치지 않고 일련의 제조 공정을 통하여 장치를 완성할 수 있을 정도로 재료와 공정기술이 혁신되고 있다. 따라서, 센서와 구동기(동력 전환기)를 위한 전자 기계 장치, 신호 처리와 제어를 위한 전자 회로 및 동력 전달을 위한 기계 장치 등을 단일 실리콘 칩에 집적하여 제조할 수 있는 단계에 이르렀다. 이러한 집적 장치를 초소형 전자 기계 소자(microelectromechanical device)라 부른다.

2 장에서는 초소형 전자 기계 소자에 관한 최근의 연구 동향을, 3 장에서는 해결해야 할 문제점 및 연구 방향 등을 제시하고자 한다.

2. 최근의 연구 동향

2.1 실리콘의 성질

실리콘은 원소 주기율표에서 금속과 비금속 사이에 있는 반도체 원소로서 표면에 실리콘 산화막이 쉽게 생성된다는 점에서 다른 반도체들과 대별된다.^[3] 실리콘 산화막은 화학적으로 불활성이고 전기적으로 절연성을 띄므로 마이크로 일렉트로닉 디바이스 제조 중에 보호막으로 쓰이고, 이 때문에 실리콘이 다른 반도체보다 널리 사용된다. 마이크로 머시닝에서도 실리콘 산화막이 널리 쓰이는 것은 같은 이유 때문이다.

단결정 실리콘은 집적 회로에서 요구되는 전기적 성질을 갖추고 있을 뿐만 아니라, 기계적인 성질^[4] 면에서도 바람직하다. 단결정 실리콘은 취성이 있고 결정 방향으로 쪼개지나, 대부분의 금속보다 경도가 높다. 게다가, 단결정 실리콘은 기계적 응력에 잘 견딘다. 즉, 인장이나 압축의 경우 탄성 한계가 강철보다 더 높다. 한계에 다다르면 강철은 소성 변형을 하는 반면, 단결정 실리콘은 깨어진다. 마지막으로, 다결정 금속은 반복되는 인장과 압축에 응력이 쌓여 깨어지는 경향이 있으나, 단결정 실리콘은 반복 응력에 강하다.

GaAs를 제외한 다른 반도체에 비해 실리콘이 집적센서의 재료로 널리 쓰일 수 있는 이유는 트랜스듀서로서 적합한 물리적 효과들 표 1 과 같이 다양하게 갖추고 있기 때문이다. 실리콘이 갖지 못한 물리적 효과가 필요하거나, 갖고 있다하더라도 다른 재료에 비해 그 효과가 미약할 경우 실리콘 기판에 적당한 재료의 층을 증착하여 널리 사용된다. 예를 들어, 피조일렉트릭 트랜스듀서로는 ZnO 필름을, 온도 센서로는 Ni-Cr 필름을, 가스 센서로는 polymer 필름을, 자기 녹음 헤드로는 자성층을 증착한다. 다른 재료의 층을 증착하는 공정뿐만 아니라 실리콘 기판에 초소형 구조를 제조가능케 하는 식각공정이 현재 사용되는 실리콘 제조 공정과 크게 다를 바가 없다는 장점때문에 실리콘이 집적센서로 널리 쓰일 수 있는 잠재력을 갖고 있다.

표 1 실리콘의 물리·화학적 효과

신호 영역	농동 효과	수동 효과
Radiant	Photovoltaic effect	Photoconductivity
Mechanical	Piezoelectric effect	Piezoresistivity
Thermal	Seebeck effect Peltier effect	Thermoresistive effect
Magnetic		Hall effect Magnetoresistance
Chemical		Electrolytic conduction

2.2 마이크로 머시닝 (micromachining)

실리콘 집적회로 공정 기술에는 산화, 확산, 이온 주입, 화학 기상 증착, 사진 식각, 금속 공정 등이 있는데, 이 모든 공정이 마이크로 머시닝에 이용된다. 초소형 기계 소자에서는 3 차원적인 구조물과 이의 진동 혹은 유체의 이동을 위한 공간을 만들기 위하여 식각 공정이 중요시되며, 2 장 이상의 웨이퍼를 쌓아 3 차원적 구조를 만들 필요가 있을 때는 열접합 방법^[5]을 사용한다. 실리콘과 실리콘, 혹은 실리콘과 유리, 유리와 금속 면을 서로 맞대고 포개어 열을 가하면서 양단에 고저압 (800 ~ 1200 V)을 걸어주면 접합되면서 밀봉의 효과도 얻게 된다.

공정 기술 중 식각 공정은 3 차원적 구조를 만들기 가장 핵심적인 공정이라 할 수 있다. 실리콘 결정 방향, 감광제 및 식각액

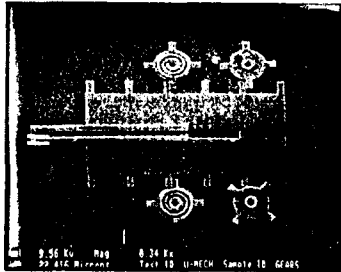


그림 1. 기어와 슬라이더를 조합한 동력전달 소자

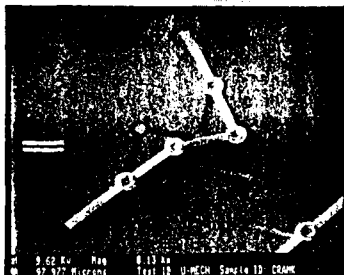


그림 2. 크랭크에 의한 동력전달

의 종류 등을 선택하여 시간과 양을 적당히 조절하고, 식각 공정 중에 산화막 형성 및 실리콘 결정층 성장이나 붕소이온 주입 등의 공정을 적절히 배합함으로써 초소형 기계 장치 구성에 기본적인 요소가 되는 구멍이, 컨틸레버, 구멍, 홈, 박막 등을 제조할 수 있다.^[6] 컨틸레버나 스피어럴 모양의 스프링들은 진동 및 가속도 측정용 센서^[7,8]로 쓰이거나, 유체의 흐름을 조절하는 밸브 역할을 할 수 있다. 또, 구멍이나 홈, 박막 등을 적절히 배치하고 웨이퍼 한 장으로 혹은 여러장을 겹쳐서 노즐이나 모세관,^[9] 비틀림 거울^[10] 등의 초소형 기계 요소를 제작한다. 최근 몇 년 간에 걸쳐서는 기어(그림 1), 레버, 크랭크(그림 2), 링크 장치 등^[6]의 동력 전달 소자 제작도 시도되고 있다.

2.3 초소형 구동기

초소형 구동기는 에너지 전환 방법에 따라 압전 구동기 및 전자 구동기 (electromagnetic driver), 압축 공기 구동기 (pneumatic driver), 전기(정전기) 모터 등 크게 4 가지 종류로 구분할 수 있다. Kuhn^[11]은 그림 3과 같이 피조일렉트릭 펌프를 이용하여 잉크젯트 인쇄기를 제작하였고, Terry와 Jerman, Angel^[12]은 그림 4와 같은 솔레노이드 밸브를 이용한 2 in 웨이퍼 크기의 개스 크로마토 그래피 장치를 개발했다. 이와 같은 구동기는 1 차원적이며 대개 작은 변위에 국한되어 있다. 최근에 주로 연구되고 있는 초소형 구동기는 전기 모터 (electric microactuator)이다. 기존의 모터에서는 자장에 의해 토크가 발생되는 데 비해 초소형 모터에서는 전장에 의해 더 효율적으로 토크가 발생될 수 있다고 한다.^[13] 초소형 전기 모터는 고정자와 회전자로 구성되며, 형태에 따라 회전형과 선형 모터로 구분할 수 있다. 그림 5는 Tai^[14]가 제작한 회전형 정전 모터의 사진이다. 정전 모터에 관한 연구는 이제 시작 단계이고 이를 실제로 사용할 수 있기까지는 3 장에서 언급될 전기적, 기계적인 제한 문제가 먼저 해결되어야 한다.

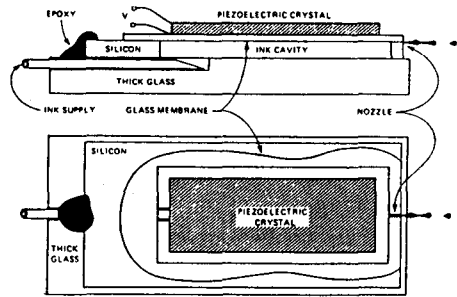


그림 3. 압전 펌프를 이용한 잉크젯트 인쇄기

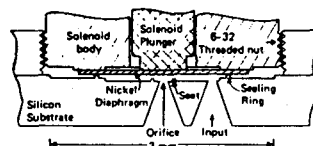


그림 4. 솔레노이드와 금속박막을 이용한 밸브

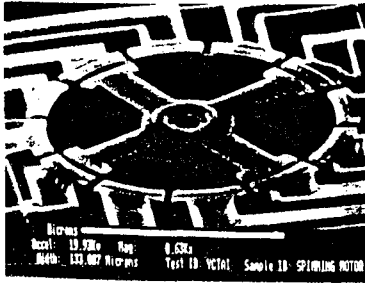


그림 5. 회전형 정전 모터 (회전자 직경 120 μm)

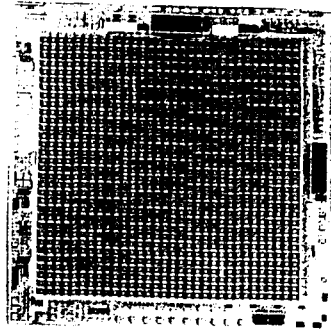
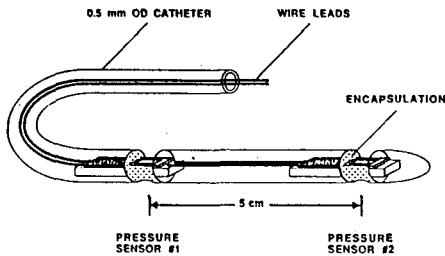


그림 7. 32×32 개의 압력 센서를 1 cm² 내에 집적한 촉각 센서

2.4 마이크로 센서

마이크로 센서는 표 1과 같은 실리콘 자체의 물리적 성질을 이용하거나, 감도가 좋은 다른 금속 또는 유기막을 실리콘 기판위에 증착하여 제작한다. 센서는 의학용으로 뿐만 아니라 공학과 산업의 전 분야에서 시스템의 관측 및 제어에 필수적인 요소이다. 표 2는 연구 보고되거나 개발 중인 마이크로 센서와 그 원리, 측정 용도 및 분야를 요약한 것이다. 그림 6은 Catheter에 내장가능한 소형 압력 센서를 보여준다. 그림 7은 32 × 32 개의 압력 센서를 1 cm² 내에 집적한 촉각 센서^[15]의 사진이다. 그림 8은 세 가지 이온 센서를 한 칩에 집적한 ISFET의 구조를 보여준다. [16]



(a) 압력 측정용 Catheter

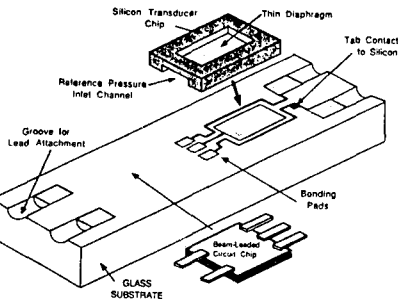


그림 6. (b) Catheter에 내장한 소형 압력 센서

표 2 각종 마이크로 센서와 그 원리, 측정 용도 및 분야

신호영역	측정 소자	원리	측정용도 및 분야
광	광도전체	광도전효과	가시광선,
	pn접합, Tr	광기전력효과	적외선, 레이저
	PSD	광기전력효과	위치, 각도
	CCD	전하 이송	영상
	SSD, SDC	쿨롱 상호작용	핵입자
변형	압저항	압저항효과	변형, 압력, 힘,
	커패시터	용량 변화	가속도, 토오크,
	압전소자	압전효과	촉각, 초음파 등
온도	열전피	제베크효과	온도, 유량, 진공
	열전소자	펠티어효과	적외선, 열전도율
	pn접합, Tr	특성변화	heat flux 등
자기	홀소자 자기Tr	홀효과	혈류
	자기저항소자	자기저항효과	
화학	금속산화막	화학반응(전도율)	CO, O ₂
	유기화학막	전도율, 유전율	각종 가스
	MOSFET	쌍극자의 영향	NH ₃ , HCl, CO, H ₂ O
	pn접합, 전극	ISM 이용, 전하에 의한 특성 변화	H ⁺ , K ⁺ 등 이온
	ISFET, 전극		pH, Na ⁺ , K ⁺
	Clark전지	전해전도율	O ₂
	유기막	유전율	습도
	이슬센서	이슬점온도 측정	
	ENFET	촉매작용	글루코스, 요소

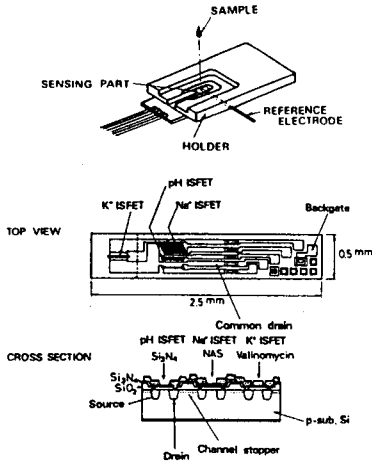


그림 8 세 가지 이온 센서를 한 칩에 집적한 ISFET의 구조

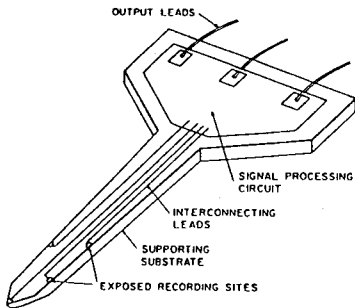
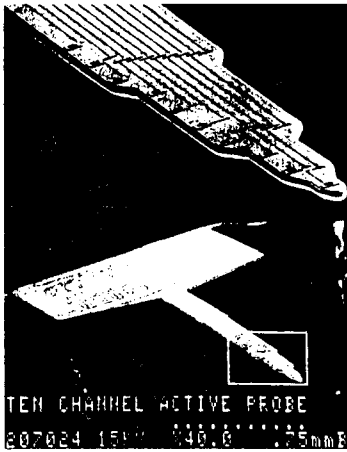


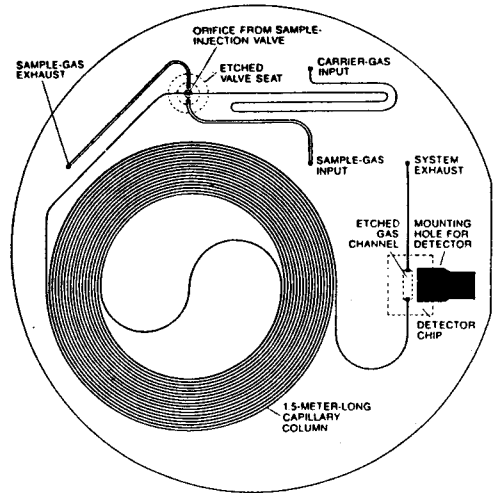
그림 9. 마이크로 프로브

2.5 마이크로 프로브

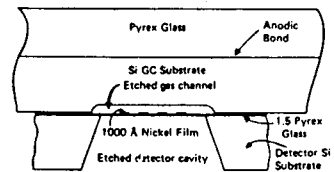
마이크로 프로브는 그림 9와 같이 수 개의 초소형 전극과 신호 처리부를 한 개의 칩에 집적함으로써 잡음을 줄이고 여러 신호를 동시에 기록할 수 있게 한다. 신호처리부에는 증폭회로와 멀티플렉서 등으로 구성된다. 이 프로브는 조직 내로 침투되어 신경계의 전기적 신호(EEG, ECG)를 측정하기 위한 것으로, 조직을 손상하지 않도록 작으면서도, 동시에 충분한 강도를 가져서 90° 이상 휘어져도 부러지지 않는다.

2.6 마이크로 소자의 응용 예

초소형 전자 기계장치의 다양한 예 중에서 단순하면서도 상업성이 있는 장치를 든다면 앞 절에서 소개한 잉크젯 인쇄이다. Terry와 Jerman, Angell[7]은 그림 10과 같은 실용성이 있는 가스 크로마토 그래피 장치를 개발했다. 길이가 1.5 m 인 모세관과 가스 조절 밸브, 검출기 등을 사진식각 공정으로 2 in 실리콘 웨이퍼에 집적하였다. 샘플 가스가 모세관을 지날때 각 성분마다 속도가 다르므로 시간의 경과에 따른 열전도율의 변화를 측정하여 가스의 성분을 분석할수 있다. 이 외에도 다음과 같은 장치들이 개발 되었다.



(a) Si 웨이퍼의 전체적인 배치도



(b) 열전도를 검출기

그림 10. 가스 크로마토그래피 장치

- Microminiature Cryogenic Refrigerators
- Microminiature Heat Sink for VLSI
- Torsional Scanning Mirror
- Resonant Gate Transistor
- Light Modulator Array
- Cantilever Beam Resonators
- Integrated Accelerometer
- Electromechanical Switches
- Thermal Printer
- Pressure Transducer and Catheter-Tip
- pH Sensor
- Ion-Sensitive Gas Sensor
- Miniature Optical Benches and Integrated optics
- Microactuator

3. 추후 연구 분야 및 방향

3.1 문제점과 그 해결 방안

2 장에서 소개한 바와 같은 다양한 초소형 전자 기계 소자들이 개발되었으나, 장치의 성능, 신뢰도, 수명, 재료의 적합성 등의 문제들을 내포하고 있어 아직 부분적으로만 실용화되고 있다. 다양한 소자의 개발과 활용을 위하여 다음과 같은 문제점 해결이 선행되어야 한다.

집적회로 공정 기술의 발달과 함께 각 단계의 공정을 거친 후의 시스템의 회로 해석에 관하여는 많은 연구가 되어 있으나, 각 요소의 형상과 기계적 성질의 변화를 예측하기 위한 이론적인 방법, 혹은 컴퓨터 시뮬레이션 방법에 관한 연구는 현재 전무하다 할 수 있다. 각 공정 후의 기계요소 내부와 경계면의 열적 응력 분포 해석, 장치의 작동 중에 중력, 정전력 및 전자기력 등의 정적 혹은 동적 하중으로 인한 기계적 응력 분포 및 진동 해석, 유체가 흐르는 부분의 유체역학적 해석, 접촉이 있는 부분의 마찰로 인한 마모 및 윤활에 관한 해석, 접촉 면에서 분자간의 인력으로 인한 부착 현상 등 장치의 제조 및 작동 중 발생하는 제반 문제에 관한 물리 및 기계공학적 분석이 필수적이다.

제조와 작동 중의 모든 현상은 micro-world에서 일어난다. 기존의 기계요소를 단순히 크기만 축소하여 제작할 경우, macro-world에서 예측한 현상과는 다른 micro-world의 현상이 두드러지게 나타난다. 예를 들어, 초소형 구동기의 변위가 가스 분자의 평균 자유 행로 (mean free path)에 점점 접근할수록 공기와 마찰로 인한 점성 저항이 작아진다. macro-world에서는 점성 저항이 속도의 제곱에 비례하는 근사식을 주로 이용하나 micro-world에서는 그 관계식을 그대로 적용할 수 없다. 이와 같이 물리적 혹은 전기적인 현상을 지배하는 주된 요인이 바뀌는 경계를 확인하고, micro-world에서의 해석에 근거하여 제조 및 작동 중의 시스템의 상태를 예측하고 이를 설계시에 고려함은 물론, 모든 설계 조건을 통합하고 조정하는 design tool의 개발이 요구된다.

그러나, 위와 같은 설계 방식만으로는 형태상 제한된 크기의 기계요소 설계에 그치게 되고, macro-world의 기계요소와 구동기 형태가 효과적으로 적용될 수 없다. 이를 보완하기 위해서는 새로운 시스템 개념의 개발이 필요하다. micro-world의 시스템 구성에 적합한 새로운 기계요소와 구동기의 개발을 위해서는 창의적인 연구가 수행되어야 하며, 특히 인간을 비롯한 각종 생물의 기관들의 생물학적 구조로부터 풍부한 지혜를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 새로운 시스템 개념은 설계상의 새로운 접근 방향을 제시하고, 또 새로운 설계 이론을 창출하게 될 것이다.

초소형 전자 기계 소자의 개발과 함께 병행되어야 할 대표적인 분야들 중 하나는 정보 전달과 처리 시스템이다. 초소형 장치는 array 구조로 다량의 신호 측정 및 처리가 가능하므로, 인간과 기계 간에, 혹은 micro-world와 macro-world 간에 전기적으로나 기계적으로 대량 정보 교환이 이루어지도록 인터페이스를 갖추어야 한다. 전기적 절연으로 잡음없이 신호를 전송할 수 있는 광섬유 통신은 이 문제를 해결할 수 있는 한 방법일 수 있다. 또, 단시간에 많은 정보를 병렬 처리할 수 있는 신경회로망을 이용하여 인간이 하는 분류, 판단 및 학습 능력을 부여함으로써 생체 내의 급작스러운 변화에 즉각적으로 대처할 수 있는 인공 장기의 개발이 가능하리라 본다.

이 외에도 생체 내의 여러가지 이온이나 물질들의 농도를 측정하기 위해서는 그에 적당한 고분자화합물 개발이 요구된다. 또, 압전 세라믹 모터의 개발이나, 전압 혹은 유압을 이용하여 근육과 유사한 유연한 구동 시스템의 개발을 위해서도 특수한 물질이 개발이 따라야 한다. 초소형 소자를 대체 인공 장치로 이용하기 위해서는 인체의 거부반응이 없고, 인체 내의 물리화학적 환경에 대해 내구성능을 가져야하므로 이에 적합한 신 소재의 개발이 뒷받침되어야 한다.

3.2 실용 가능성과 그 분야

초소형 전자 기계 소자는 앞 절에 소개된 바와 같이 해결되어야 할 문제점을 갖고 있는 반면에, 기존의 전자 기계 장치가 가질 수 없는 몇 가지 잇점이 있다. 실리콘 집적 회로 제작시 batch fabrication으로 칩의 생산 단가가 저렴해지듯이 초소형 전자 기계 소자의 생산 단가도 저렴하게 할 수 있다. 초소형 전자 기계 소자는 그 크기가 작은 잇점때문에 작은 양의 표본만으로도 작동 가능한 분석 기기, 혹은 작은 양을 측정하는 미세 측정기에 적합하고, 생체 내에 용이하게 투입되어 질병의 진단과 치료뿐만 아니라, 미세 조작이 요구되는 수술 등의 의료 장비에 그 이용 가능성이 높다. 표 3은 각종 질병의 치료에 쓰이는 센서와 기구를 도표화한 것이다.

초소형 전자 기계 장치의 또 다른 잇점은 단일 칩 내에 많은 똑같은 측정 장치들을 집적하여 신호를 통계적으로 처리함으로써 측정 정밀도를 높이거나, 일련의 유사한 측정 장치들을 집적하여 분석 시간을 줄임으로써 실시간 신호 처리가 가능해질 수 있고, 신호 처리 회로가 함께 내장됨으로 인해 잡음이 적은 측정이 가능하다는 점이다. 이와 같은 장점때문에 아래와 같은 의학 및 이와 관련되는 과학, 공학 및 전 산업분야에 걸쳐 활용 가능성이 크다.

- 검사 및 진단용 미세 조작기
- 소형 치료 기구
- Microsurgery
- 대체 인공 기관
- 광섬유 통신 분야
- 정밀 계측 및 분석 기기
- Microrobot

장차, 초소형 전자 기계 소자는 새로운 소자의 개발과 함께 그 활용 분야가 더 넓어질 것이며 소자들의 활용은 다시 소자 개발을 가속화 할 것으로 예상된다.

표 3 각종 질병의 치료에 쓰이는 센서 및 기구

질병	치료 방법	센서	기구
심장질환	인공박동	압력, 유량, 가스	혈액 펌프
당뇨	안슐린 주입,	포도당	펌프
간질	소뇌 자극	전위	스티뮬레이터
고혈압	혈압 제어	혈압	
뇌수종	ICP, 뇌실제어	압력, 부피	밸브
반신불수	근육 신경제어	위치, 접촉, 각도	전극
호흡장애	횡경막 제어	공기압, 유량	구동기
요실금	신장 제어	압력	밸브
정신병	투약, 전기자극	각 종	전극, 밸브, 펌프
신장병	인공 투석	요산, 유량	펌프, 여과기

4. 결론

현재 초소형 전자 기계 장치 분야에 관한 이해는 1940 년대에 실리콘에 많은 전자회로를 집적하여 현재의 컴퓨터를 만들 수 있으리라고는 거의 상상하지 못했고, 또 그 공정 기술이 미숙했던 것과 같은 수준에 머물러 있다. 그러나, 많은 센서와 구동기(actuator)를 갖춘 마이크로 로봇은 우리가 지금 상상할 수 있는 범위 밖의 세밀한 작업을 할 수 있게 될 것이다.

실리콘 집적 회로 기술의 발달이 전자 산업 분야 뿐만 아니라 전 과학 및 공학에 끼친 영향을 볼 때, 과학 문명의 혁명이라 일컬을 수 있듯이, 초소형 전자 기계 장치의 개발은 과학 문명사에 또다른 전환점이 될 것으로 크게 기대된다. 초소형 전자 기계 장치의 개발과 실용화는 첨단 과학 기술의 발달에 의존하며, 또 역으로 첨단 과학 기술의 발달을 촉진하는 신 기술 분야임이 분명하다. 이 장치의 개발과 발달을 위하여서는 과학 및 공학 전반에 걸친 분야에서 타 분야와의 긴밀한 협조가 필수적이다.

참고 문헌

[1] O. N. Tufte, P. W. Chapman and D. Long, "Silicon Diffused-Element Piezoresistive Diaphragms," *J. of Appl. Phys.*, Vol. 33, No. 11, pp. 3322-3327, Nov. 1962.

[2] H. C. Tuan, J. S. Yanacopoulos and T. A. Nunn, "Piezoresistive Force Sensors for Observing muscle Contraction," *Stanford Univ. Electron. Res. Rev.*, p. 102, 1975.

[3] J. B. Angell, S. C. Terry and P. W. Barth, "Silicon Micromechanical Devices," *Scientific American*, pp. 44-55, April 1983.

[4] K. E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material," *Proc. of IEEE*, Vol. 70, No. 5, pp. 420-457, May 1982.

[5] P. B. DeNee, "Low Energy Metal-Glass Bonding," *J. Appl. Phys.*, Vol. 40, p. 5396, 1969.

[6] E. Bassous, "Fabrication of Novel Three-Dimensional Microstructures by the Anisotropic Etching of (100) and (110) Silicon," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-25, No. 10, pp. 1178-1185, 1978.

[7] P. L. Chen, R. S. Muller, R. D. Jolly, G. L. Halac, R. M. White, A. P. Andrews, T. C. Lim and M. E. Motamedi, "Integrated Silicon Microbeam PI-FET Accelerometer," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-29, No. 1, pp. 27-33, Jan. 1982.

[8] L. M. Roylance and J. B. Angell, "A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer," *IEEE Trans., Electron Devices*, Vol. ED-26, No. 12, pp. 1911-1917, Dec. 1979.

[9] L. S. Fan, Y. C. Tai and R. S. Muller, "Pin Joints, Gears, Springs, Cranks, and Other Novel Micromechanical Structures," *Tech. Digest, Transducers*, Tokyo, Japan, pp. 849-852, June 1987.

[10] K. E. Petersen, "Silicon Torsional Scanning Mirror," *IBM J. Res. Dev.*, Vol. 24, No. 5, pp. 631-637, Sep. 1980.

[11] L. Kuhn, E. Bassous and R. Lane, "Silicon Charge Electrode Array for Ink-Jet Structure," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-25, p. 1257, 1978.

[12] S. C. Terry, J. H. Jerman and J. B. Angell, "A Gas Chromatographic Air Analyzer Fabricated on a Silicon Wafer," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, No. 12, pp. 1880-1886, Dec. 1979.

[13] S. F. Bart, T. A. Lober, R. T. Howe, J. H. Lang and M. F. Schlecht, "Design Considerations for Micromachined Electric Actuators," *Sensors and Actuators*, 14, pp. 269-292, 1988.

[14] L.-S. Fan, Y.-C. Tai, and R. S. Muller, "IC-processed micromotors: Design, Technology and Testing," *Sensors and Actuators*, Vol. 20, pp. 41-47, 1989.

[15] S. Sugiyama, K. Kawahata, M. Yoneda and I. Igarashi, "Tactile Image Detection Using a 1k-element Silicon Pressure Sensor Array," *Sensors and Actuators*, Vol. A21-A23, pp. 397-400, 1990.

[16] I. Igarashi, T. Ito, T. Taguchi, O. Tabata and H. Inagaki, "Multiple Ion Sensor Array," *Sensors and Actuators*, Vol. B1, pp. 8-11, 1990.