

MEMS에서의 마이크로 가공기술

김 창 진

Micromachining Technologies of MEMS

Chang-Jin Kim



- 김창진 (캘리포니아주립대 로스앤젤레스대학)
- 1958년생.
- MEMS를 전공하였으며, 마이크로구조물 액츄에이터, 센서 등의 설계와 제작, 특히 마이크로가공 기술과 기계공학에의 응용에 관심이 있다.

1. 머리말

현 미경에 의하지 않고서는 형체를 알 수 없을 정도로 작은 기계(마이크로머신(micromachine))가 공상과학소설의 영역에서 벗어나 이제 현실 공학의 새로운 분야로 정착되었다. 집적회로(IC) 가공기술에서 태동된, 전문용어로는 MEMS(microelectromechanical systems)라고 불리는 이 영역에서 사실은 상식으로 상상하는 마이크로머신 보다는 훨씬 실질적이고 전문화된 연구들이 주종을 이룬다. 몸 속에 축소되어 들어가 병과 사투를 벌이는 마이크로 결사대 등이 매스컴이 즐겨 꿈꾸는 마이크로머신이지만, 실상은 올해 처음 시판되는 고성능 초저가의 자동차 Air-bag Triggering System(단순 센서가 아닌 시스템)이 본격 MEMS 첨단기술에 의한 첫 번째의 대량상품임을 아는 것이 도움이 되겠다. 한 두 개의 트랜지스터를 반도체 표면에 만들 수 있게 되었던 30여 년 전 아무도 현재의 소형컴퓨터와 정보화 시대

를 예견할 수 없었던 것처럼, 현재의 마이크로머신 연구를 바탕으로 그 미래를 예측하려는 것은 부질없는 일인지도 모른다. 그러나 분명한 것은 미국, 일본, 유럽이 이미 치열한 경쟁에 돌입했다는 사실과 그 파급효과가 자못 심대하리라는 예측이다.

이 MEMS연구는 상당히 넓은 분야를 포함하나, 그 핵심은 바로 마이크로가공 기술(micromachining technology)에 있다. (막연히 작은 것이 아닌 마이크로미터 단위의 가공이라는 점을 살리기 위해, “마이크로” 가공이라 부르겠다.) 이 글에서는 우선 MEMS란 무엇인가에 대해 언급한 후, MEMS에 있어서의 마이크로가공(micromachining)이 어떤 것인지를 소개, 설명함에 주력한다. 마이크로가공 기본개념의 전달에 있어서는, 처음 대하는 이들의 이해를 돕기 위해 되도록 인용을 줄이고 핵심개념만 담아 최대한 단순화시켜 설명하였다. 이러한 핵심개념을 바탕으로 하여 설명되는, 뒤 따르는 실제 예로는 기계공학적으로 관련이 있어 보이는 몇 가지를 인용하였다.

2. MEMS

Microdynamics, Micromechanics 등으로 불리던 이 새로운 연구분야가 Micro-motor 등의 성공^(1~4)으로 세계의 주목을 받기 시작한 지는 이제 겨우 5년, 더욱이 Microelectromechanical Systems(줄여서 MEMS)라는 이름으로 정착⁽⁵⁾된 지 이제 한 두 해 남짓한 현 시점에서 “MEMS란 무엇인가?”를 정의하는 것은 아직 이른 감이 있어 보인다. 그러나 그 단어 자체의 의미만으로도 어느 정도 테두리는 잡혀질 것이며, 여기서는 그 외에도 몇 가지를 첨언하고자 한다.

Microelectromechanical Systems라는 말에는 문자 그대로 작다는 말(micro), 전기기계적이라는 말(electromechanical)과 여러 요소가 맞물려 기능한다는(system) 뜻이 내포되어 있으나, 몇 가지의 설명이 더 필요함을 느낀다. 우선, MEMS에서 Micro라 함은 단순히 작다는 상대적 의미 이상으로 마이크로미터(micrometer)라는 절대치수에서의 Micro를 가리킨다. 즉 MEMS에서의 관심은 중요치수(feature size)가 마이크로미터 단위인 기계전자 시스템이다. MEMS에서의 기계를 마이크로머신(micromachine)이라 한다면, 정교한 손목시계는 밀리머신(millimachine), 분자생물학에서의 Biosystem에 비견될 기계가 있다면 나노머신(nanomachine)이라고 구별할 수 있겠다. 기구를 빌지 않은 인간의 영역(시각, 촉각 등)은 아래로 밀리미터 정도가 그 한계를 이루며 그 이하로 작은 세계를 이해하는 것이 쉬운 일은 아니다. 작은것은 다 MEMS에 속한다는 막연한 인식에서 탈피해 그 절대 단위를 파악하는 것이 도움이 된다. (예를 들어 5 μ m 크기의 기계와 5mm 크기의 기계가 처하는 물리현상의 차이는 5mm 크기의 개미와 5m 크기의 코끼리가 걷는 세계의 차이만큼 크나, 인간

의 느낌으로는 그렇게 확연하지 못하다). MEMS의 연구가 급속히 진행되고, 보고되는 연구결과가 급증함에 따라 밀리미터, 마이크로미터, 마이크로미터 이하 단위의 미세물들이 같이 섞여 보고됨에 따라 생기는 혼돈의 확산을 막기 위해, MEMS 연구사회의 중심에서는 앞으로 이 크기의 구별을 엄격하게 할 움직임이다.

다음으로, 전기기계(electromechanical)라는 말과 시스템이라는 말은 상대적으로 느슨한 의미를 지닌다. 꼭 전기기계적이 아닌 순수 기계시스템도 MEMS에서 큰 영역을 차지하며(반대로 순수 전기시스템(microelectronics)을 MEMS에 포함할 순 없겠지만), 또한 시스템이 아닌 단일요소도 MEMS에서의 큰 테마다. 기계를 강조하기 위해 미국 기계학회(ASME) 동계학술대회(winter annual meeting)에서의 MEMS연구 심포지움을 Micromechanical Systems라고 칭하기도 한다.⁽⁶⁾ 실제로 기계적인 면이 없는 MEMS 연구란 없다 해도 과언이 아닌 것은, 기계적 응용과 무관하게 전기회로를 위해 고도로 발달된 IC 제작기술이 드디어 기계적 응용의 가능성을 발견한 것이 바로 MEMS의 시작이기 때문이다.

시스템의 강조는 MEMS연구가 지향하는 바를 잘 나타낸다. 마이크로 세계는 인간 세계와 물리적으로 상호작용하기 어려우니 “너희들끼리 시스템을 이루어 기능하고 인간에게는 결과만 보고하라”는 것이라거나 할까. 그러나 현재 대부분의 MEMS연구는 아직 새로운 마이크로 구조물(microstructure), 액츄에이터(microactuator) 등 개개 요소의 개발에 치중되어 있으며, 시스템을 향한 노력은 상대적으로 완속된 몇몇 경우에 한정되어 있다. 사실, 요소의 집합으로 시스템을 이루는 것은 마이크로가공의 특성상 대단히 경제적이며 MEMS의 최대 이점이므로, 정립된 마이크로 요소가 충분히 마련되는 시기에 시스템을 향한 노력은 본격화될

것이며 대량의 상품화가 이루어 질 것이다. 현재로서 시스템화는 산업체를 중심으로 집적 센서(integrated sensor) 분야에서 이루어지고 있으며, 앞에서 언급한 Air-bag System을 선두로 항법 시스템(navigation system) 등 초소형, 저가의 여러 센서 시스템들의 상품화를 위한 개발이 이미 시작되었다.

3. 마이크로가공의 기초 개념과 기본 기술

MEMS에서 행해지는 거의 대부분의 마이크로가공은 IC의 제작 공정들에 뿌리를 두고 있으며, 통상의 기계가공과는 전혀 다르다. 이 장에서는 마이크로가공의 대표적 기본 기술들을 최대한 단순화시켜 소개함으로써 마이크로가공의 기초 개념을 전하고자 한다.

3.1 집적회로(IC) 제작 공정의 기본개념

실리콘 웨이퍼로부터 시작되는 IC 제작공정이 끝나면 한 개의 웨이퍼에는 수 많은 다이(die)가 생겨나고 이들을 잘라 분리함으로써 IC칩들이 만들어진다. 마이크로가공을 처음 접하는 기계공학자에게는 그 뿌리가 되는 이 IC 제작공정의 기본 원리를 먼저 이해하는 것이 도움이 되므로, 여기서는 실리콘 웨이퍼 상에 도선이 만들어지는 한 과정을 통해 마스크에 그려진 형상(pattern)이 웨이퍼 표면에 전해져 만들어지는 중요 단계를 짚어 본다.

그림 1은 실리콘 웨이퍼의 단면도들이다. (a) 우선, 웨이퍼 표면에 도전층(conductive layer)을 입힌다. (b) 그 표면에 PR(photoresist-감광제)을 바른 후 별도로 만들어진 마스크를 통해 강한 자외선을 쬐인다. 이 마스크는 크롬 등이 선택적으로 입혀 있어 그 부분은 빛이 차단된다. (c) 이어지는 현상과정에서 빛을 쬐 PR부분은 녹아 나가고 마스크 위의 형상이 PR의 상으로 재생

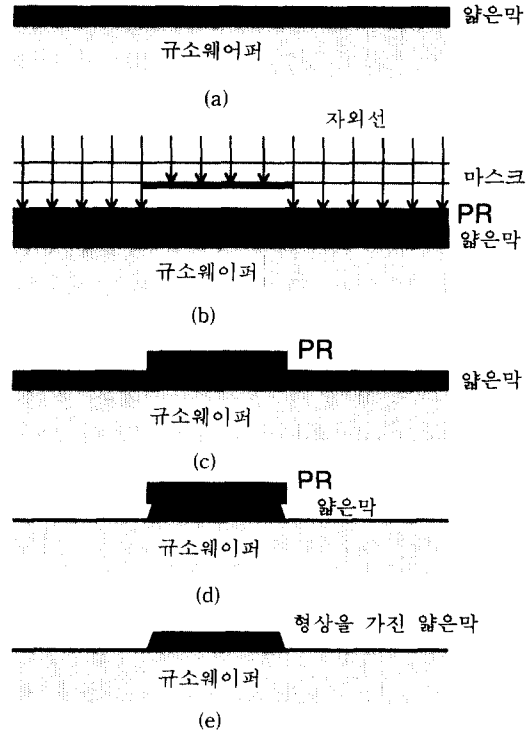


그림 1 리소그라피에 의한 형상 재현 과정

된다. (d) 다음, 이 PR을 차단재로 아래 부분의 도전층을 에칭(etching)한 후, (e) PR을 제거하면 마스크의 상이 결국 도전층의 상으로 재생되어 마스크의 상과 같은 모양의 도선이 만들어진다. 이러한 리소그라피(lithography) 기술에 의한 상의 재현(pattern transfer)이 대부분 마이크로가공 기술의 기본이 되고 있다. IC 제작에서 웨이퍼 표면에 형성되거나 입혀지는 박층(thin film)으로는 산화층(silicon dioxide), 질화층(silicon nitride), 다결정 실리콘(polycrystalline silicon), 알루미늄 등이 주를 이루며, 식각으로는 화학액을 사용하는 습식에칭(wet etching)과 플라즈마를 이용하는 건식 에칭(dry etching)으로 대별할 수 있다.

3.2 표면 마이크로가공

표면 마이크로가공(surface micromachin-

ing)은 웨이퍼 표면에 더해진 얇은 층(박층)을 가공함으로써 원하는 구조를 만들어 내는 기술이며 희생층 개념이 그 핵을 이룬다. 여기서 가장 간단한 (그러나 대표적인) 예로서 다결정 실리콘으로 만들어지는 미세 외팔보의 제작 과정을 그림 2를 통해 보이겠다. (a) 웨이퍼 표면에 희생층이 될 박층을 입힌 후 그림 1에서와 같은 리소그라피와 에칭으로 표면 한 곳을 노출시킨다. 다결정 실리콘이 구조물로 사용되는 경우에는, 그 아래의 희생층으로 1~2 마이크로 두께의 PSG(phosphosilicate glass)가 많이 쓰인다. (b) 다음으로, 구조층이 될 1~3 마이크로 두께의 다결정 실리콘을 그 위에 입히고, 리소그라피와 에칭으로 보의 형상을 이룬다. 대부분의 경우, 이 구조층의 에칭은 수직벽을 얻기 위해 습식에칭이 아닌 RIE(reactive ion etching)가 쓰인다. 이 구조층은 희생층이 부식되어 표면이 노출된 부분에서 기판에 직접 접합하게 된다. (c) 마지막으로 리소그라피 필요없이 희생층만 선택 제거하면 그림에서와 같은 다결정 실리콘의 미세 외팔보가 완성된다.

표면가공은 IC 제작공정과 밀접하게 연결

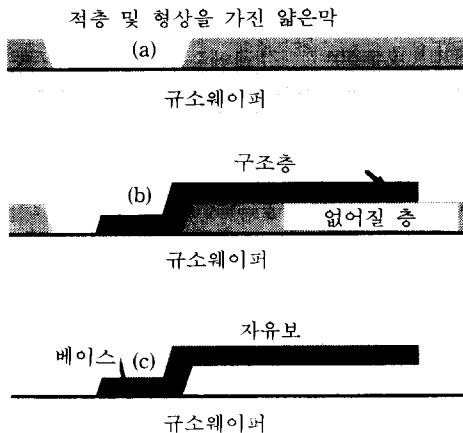


그림 2 표면 마이크로가공에 의한 미세 외팔보의 제작

되어 있어 IC 제작밀도에 근접하고, 따라서 다음 절부터 설명하는 다른 마이크로가공들에 비해 훨씬 미세한 구조물들을 만들 수 있다. 또한 평면 방향으로의 복잡성은 제작공정에 거의 영향을 미치지 않아 이 간단한 공정만으로도 얼마든지 다양한 기계 소자를 만들 수 있다. 방금 소개한 기본 공정에 한 두 가지 과정을 더해 그림 3과 같은 선형공진모터가 만들어 지고,⁽⁷⁾ 더 응용하면 그림 4에서 보는 회전모터가 만들어진다.⁽⁸⁾ 표면 마이크로가공으로 제작되는 모든 움직이는 기계소자들은 그 공정의 다양함에도 불구하고 모두 그림 2의 희생층 개념^(9,10)에 그 뿌리를 두고 있다. 그러나 평면방향의 무한한 자유에 비해, 평면기술(planar technology)에 바탕을 두는 이 표면 가공은 수직방향으로는 자유로운 제작에 근본적 한계가 있다. 이러

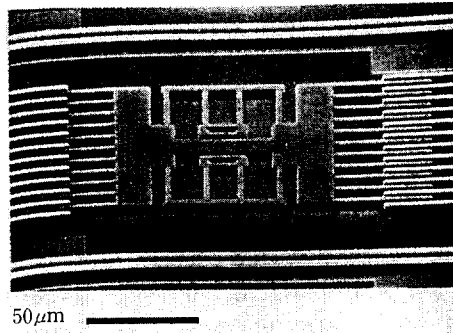


그림 3 다결정 실리콘 선형 공진모터⁽⁷⁾

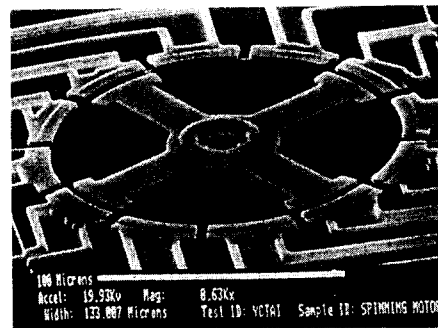


그림 4 다결정 실리콘 회전모터⁽⁸⁾

한 한계의 극복이 표면 가공기술을 사용한 삼차원 소자 개발에 있어서 항상 따르는 문제이다. 표면 가공기술이란 한 마디로 “이차원 기술로 어떻게 삼차원 기계소자를 만들까?”를 추구하는 것이라고도 볼 수 있다. 이것이 또한 여러가지 다른 가공기술의 개발을 필요로 하는 큰 이유가 된다.

그러나 표면 마이크로가공의 가장 큰 의의는 그 가공 과정이 보통의 IC 제작공정 일부와 일치한다는 데 있다. 다시 말해 표면가공으로 만들어지는 미세 구조물은 IC와 일관공정을 통해 함께 제작될 수 있다는 말이며, 이것은 크나큰 경제적, 기능적 의미를 지닌다. 또 다른 큰 이점은 이미 고도로 발달된 IC 제작기술을 쉽게 이용할 수 있고, 앞으로도 계속 편승해 사용한다는 것이다. 일찍이 60년대부터 시작된 기판 마이크로가공술이 이미 상용화되어 있었고, 다른 여러 마이크로 가공들이 존재함에도 불구하고 이 실리콘 표면 마이크로가공이 그 충격과 함께 MEMS 연구의 태동⁽¹¹⁾이 된 것은 이런 실질적인 이유들 때문이다.

3.3 기판 마이크로가공

대부분의 일반 IC 제작이나 앞의 표면 마이크로가공에서 웨이퍼 자체는 기판 역할만 할 뿐 물리적 가공의 대상은 아님에 비해 기판 마이크로가공은 웨이퍼(기판) 자체를 가공하는 기술이다. 그 역사는 일반 IC와 크게

다르지 않아, 이미 상용화된 실리콘 마이크로 가공물들은 거의 모두 이 기판 가공에 기초하며(압력 센서, 가속도 센서 등), 이방성(anisotropic) 습식에칭이 주를 이룬다.

몇몇 실리콘 식각액의 경우, 에칭속도는 실리콘의 결정방향에 따라 크게 다를 수 있다. 웨이퍼는 실리콘의 결정체이므로 이 이방성에칭을 이용해 웨이퍼를 조각(sculpting)하는 것이 기판 마이크로 가공의 대표적 방법이다. 실리콘 웨이퍼의 두께는 여러가지나, 지름 $\langle 100 \rangle$ 밀리미터의 경우 500마이크론(0.5밀리미터) 정도가 많다. 그림 5의 단면도는 100방향 실리콘 웨이퍼의 기판 마이크로가공 예를 보여준다.

먼저 웨이퍼 표면에 산화층 혹은 질화층의 에칭 마스크를 형성한다. 그림 5는 $\langle 111 \rangle$ 방향의 에칭 속도가 웨이퍼 두께 방향인 $\langle 100 \rangle$ 방향에 비해 무시할 정도인 에칭액이 쓰인 경우이다. 그림에서의 숫자는 시간에 따라 진행되는 에칭 전면의 이동이다. 에칭 마스크의 열린 폭이 작으면(그림 왼쪽) 어느 시점에서 에칭은 거의 멈추게 되어 V형의 홈이 만들어지며, 그 폭이 크면(그림 오른쪽) 웨이퍼의 반대 쪽까지 에칭이 진행되어 거기에 박막이 형성된다. 이러한 박막이 압력계의 기본구조로 이용됨은 쉽게 이해될 것이다. 또한 박막을 제거하면 아주 작은 구멍이 만들어지고, 수 많은 구멍을 배열하여 잉크젯 프린터의 헤드(head)로 사용되기도 한

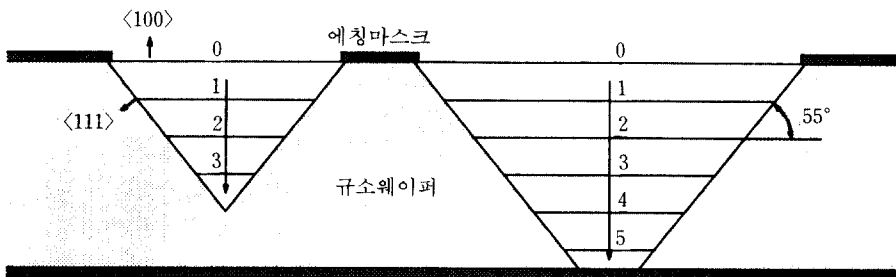


그림 5 $\langle 100 \rangle$ 방향 실리콘 웨이퍼의 기판 마이크로가공

다.⁽¹²⁾ 결정학(crystallography)을 조금 더 응용하면 웨이퍼 표면에 미세보를 형성하거나 더욱 복잡한 구조를 만들 수도 있고, 또, <110>방향 웨이퍼를 사용하면 아주 좁고 깊은(수 마이크론 너비에 수백 마이크론 깊이의) 홈을 파낼 수도 있다. 컴퓨터 칩의 냉각 연구분야에서 유명한 마이크로 채널은 이 방법으로 만들어 졌다.⁽¹³⁾

기판 마이크로가공에는 위에서 예로 든 웨이퍼 결정방향을 이용한 이방성 에칭뿐 아니라, 불순물 농도에 따른 에칭 멈춤(etch stop) 기술과 p-n junction을 이용한 전기 화학적 에칭 멈춤기술 등이 있다. 많이 쓰이는 이방성 에칭액으로는 KOH, EDP(ethylenediamine + pyrocatechol) 등이 있으며, 최근에는 TMAH(tetramethyl ammonium hydroxide)가 이들의 대체물로 고려되고 있다. 기판 마이크로가공의 재료는 거의 대부분 실리콘이나, 특이하게는 수정 웨이퍼도 쓰인다.⁽¹⁴⁾

3.4 웨이퍼 접합기술

웨이퍼 접합술은 실리콘 웨이퍼끼리 혹은 실리콘 웨이퍼와 다른(주로 수정) 웨이퍼를 밀봉접합(hermetic bonding)시키는 기술로서, 패키징 기술의 일부로 볼 수도 있겠으나 일반적인 IC 생산의 영역은 아니므로 반도체 마이크로가공의 주변기술로 여기에 언급하겠다. 크게 보아 고온(1000°C 이상)을 가하는 융합접합(fusion bonding)과 고전압(수백 볼트)을 거는 양극접합(anodic bonding)이 있다. 또한 이 둘의 조합으로 필요온도와 전압을 줄이는 방법들이 연구되고 있다. 웨이퍼 접합술은 두 개의 각각 마이크로가공된 웨이퍼들을 접합해 일체를 만듦으로써 한 개체의 가공만으로 해결할 수 없는 한계들을 극복하게 해준다. 물론 고온, 고전압에서 비롯되는 새로운 문제점과 정렬(alignment)의 어려움 등이 문제되지 않아야 한다.

여기서는 간단한 예로서, 실리콘 접합으로

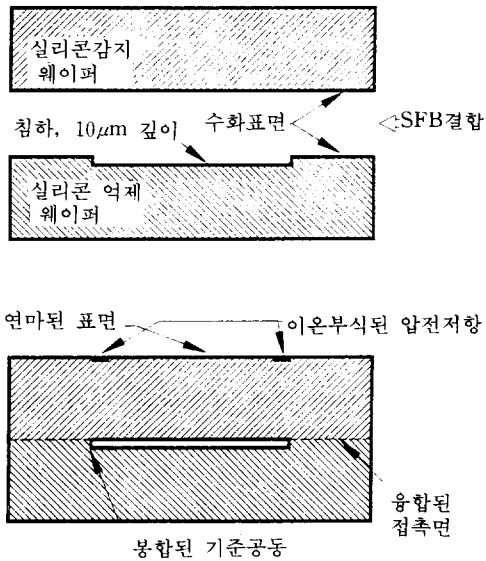


그림 6 웨이퍼 접합의 예⁽¹⁵⁾

밀봉공동을 만드는 과정을 보자. 그림 6에서 접합되기 전 아래의 웨이퍼는 표면의 한 부분이 에칭되어 들어가 있다. 그 위에 다른 웨이퍼를 놓고 접합하면 밀봉된 공동이 한가운데 만들어진다. 이것과 같은 실제 예로는 고압센서를 들 수 있는데, 상부 웨이퍼의 표면은 응력변형 센서와 회로를 지니고 있어 한 시스템을 이룬다.⁽¹⁵⁾ 여기서 든 예는 특별히 간단한 경우이고, 실제로 웨이퍼 접합이 사용되는 경우는 삼차원적으로 모양이 꽤 복잡해지며 응용도 압력센서를 중심으로 다양하다.

3.5 마이크로 전기도금

표면 마이크로가공에 의해 만들어지는 미세 기계소자들은 웨이퍼면과 평면방향으로 운동하게 만들어지는 경우가 많다. 이런 경우, 보를 예로 들자면, 수직벽 형태의, 두께는 두껍고 너비는 가는(높은 세로 가로비(high aspect ration)의) 단면형상이 바람직할 것이다. 그러나 순수 IC 제작공정에 기초한 표면가공기술로 얻을 수 있는 세로 가로비

(세로/가로)는 실제 1~2 정도이며 3~4 이상은 매우 힘들어진다. (현재 보편적 VLSI 기술이 1~2 마이크로론 너비의 선을 만들어내며, 두께 2~3 마이크로론 이상층의 건식에칭에는 실제적 어려움이 있다.) 마이크로 전기도금을 사용하면 이 두께(높이)의 한계를 어느 정도 극복할 수 있다.

마이크로 전기도금은, 구조층의 불필요한 부분을 제거해 원하는 구조를 만드는(building by subtraction) 다른 마이크로 가공들과 달리, 만들어진 틀에 구조층을 전기도금에 의한 외팔보 제작을 그림 7을 통해 살펴보

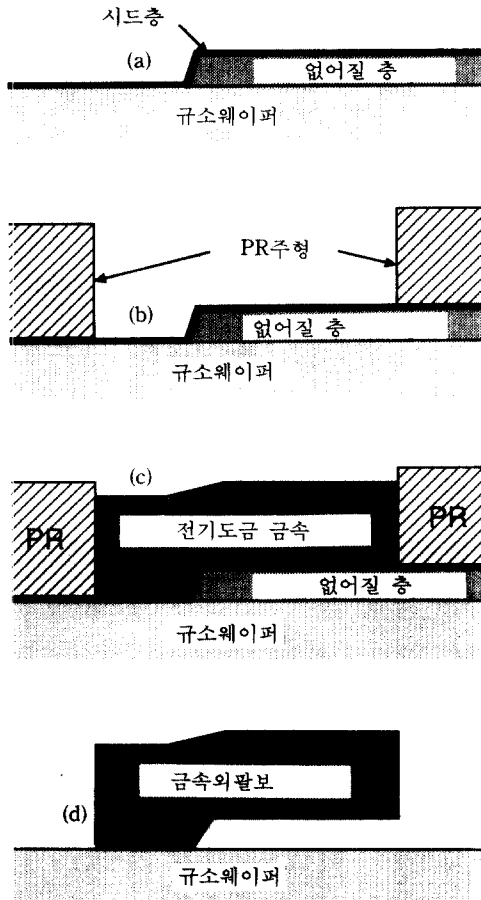


그림 7 마이크로전기도금에 의한 외팔보의 제작

자. (a) 우선 희생층을 완성한 후 그 위에 도금의 전극이 될 아주 얇은 금속층(seed layer)을 입힌다. (b) 다음, 두꺼운 감광제를 입히고 마스크를 통해 강한 빛을 쬐면 후 현상하면 감광제의 틀이 완성된다. (c) 전기도금으로 이 틀에 금속을 채운 후, (d) 틀과 희생층을 제거하면 원하는 구조를 얻는다. 사용되는 감광제로는, 강 자외선 광원을 위해서는 일반 PR나 감광 폴리머가, X-ray 광원을 위해서는 PMMA (polymethylmethacrylate) 등이 쓰인다.

특히 X-ray를 사용할 때는 100마이크론 이상 두께의 수직벽도 만들 수 있으며 LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung : 독일어)라고 불리는 이 방법⁽¹⁶⁾이 마이크로 전기도금의 시초이기도 하다. 그러나 엄청난 가격문제로 인해 사용이 극히 제한될 수 밖에 없어, 그 대체용으로 강 자외선을 이용한 방법들이 최근 개발되었다. 싸구려 LIGA (cheap LIGA)라고도 불리는 이러한 방법들로도 10~20 마이크로론 두께는 가능해진다.^(17,18) 마이크로 전기도금으로는 주로 Ni, Cu 등 금속의 기계소자가 만들어지나, 이 금속구조를 다시 틀로 해 플라스틱 구조를 대량으로 찍어 낼 수도 있다. 그러나 마이크로 전기도금은 IC 제작공정과 달라, 실리콘 표면 미크로가공이 가지는 “직접회로와의 일관공정”이라는 큰 이점을 살리기 어려우며, 그 대신 회로와의 집적보다 높은 세로 가로비의 수직벽이 더 중요할 때 유용하다.

3.6 기타 관련기술들

현재 MEMS에서는 표면 미크로가공이 공진 액츄에이터(resonator)와 집적센서(integrated sensor) 등을 중심으로, 기판 마이크로가공이 혼성센서(hybrid sensor)를 중심으로 하여 가장 널리 쓰인다. 재료로는 실리콘이 거의 전부지만, Ge-As 복합물 등도 선보이고 있다. 또한 반도체도 아니고 IC 공정

과도 차이가 나는 마이크로 도금기술이 이제
는 단지 새로운 하나의 기술이라는 단계를
넘어 그 유용성을 인정받기 시작한 것으로
보인다. 그러나 지금까지 소개한 이들 기술
은 그 차이점에도 불구하고 모두 리소그러피
에 그 뿌리를 두고 있다 하겠다.

이 절에서는 일본을 중심으로 시도되는 버
리소그러피방식의 가공들을 소개한다. 이들
은 대부분 MEMS연구의 결과로 개발된 마
이크로 가공기술이 아니라, 존재하던 비전통
미세 가공법들이 MEMS 연구에 응용, 소개
되기 시작한 것이라고 보는 게 옳겠다. 이들
에 의해 만들어지는 미세구조물은 일반적으
로 MEMS에서 보는 것들보다 훨씬 크며,
마이크로머시닝과 밀리머시닝의 경계부에 위
치할 때가 많다. 이러한 관점에서 볼 때, 새
로이 열리는 MEMS의 마이크로가공과 밀리
미터 단위의 전통가공과의 가교 역할은 가능
하지 않을까 하는 가능성으로 언급의 필요를
느낀다. 여기서는 그 중, 여러 연구자들에
의해 이용되는 전기 방전가공과 극히 최근에
시도되기 시작했지만 큰 가능성이 보이는
Micro Rapid Prototyping(혹은 Micro
Stereo-Lithography)을 간략히 소개한 후 다
른 여러 가지는 나열만 하겠다.

(1) 전기 방전가공

방전가공의 원리는 그림 8로 설명된다. 전
극으로 된 공구와 공작물 사이에 고전압을
가하면서 접근시키면 그 사이가 충분히 좁혀
진 후부터 방전이 일어나기 시작해 공작물이
깎여진다. 전류를 펄스(pulse)로 공급하여
방전열을 조절하면서 공구를 공작물내로 침
투시키면 공구모양의 구멍이 뚫어진다. 예로
든 금속뿐 아니라, 약간의 변형으로 귀금속
류와 세라믹(ceramic)의 가공에도 쓰인다.
이와 같은 방전가공을 쓰되 공구의 크기를
아주 미세화한다거나 혹은 전기도금을 도입
하거나 하여, MEMS의 마이크로가공에 근
접하는 재미있는 결과를 얻기도 한다.⁽¹⁹⁾ 그
림 9를 참고하기 바란다.

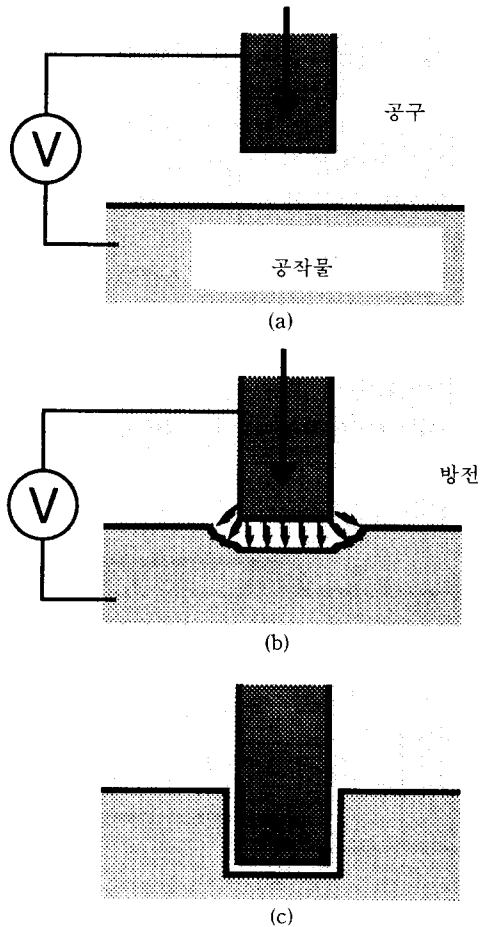


그림 8 전기 방전가공의 원리

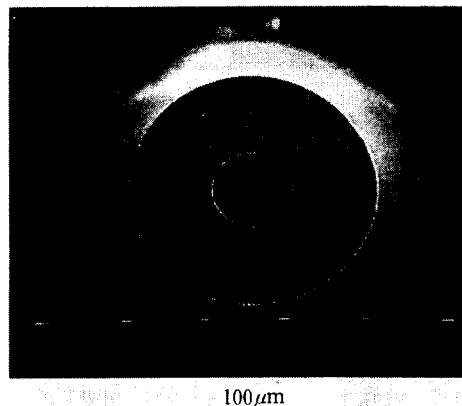


그림 9 전기방전가공에 의해 제작된 마이크로관⁽¹⁹⁾

(2) Micro Rapid Prototyping

Rapid Prototyping은 그림 10에서 보듯이 CAD로 설계된 삼차원 형상을 감광 폴리머를 재료로 해 통상의 기계공작을 거치지 않고 곧바로 실물로 만들어 내는 일반(마이크로가 아닌) 기술이다. 설계된 형상을 평면방향으로 무수히 자른 이차원 정보들을 컴퓨터에서 받아 폴리머 액을 한 층씩 그에 따라 고체화시키며 쌓아나간다. 그래서 스테레오 리스그라피(stereo lithography)라고도 불린다. 일반적으로 여러 달 걸리는 시작품 제작에 비해 불과 하루밤에 완성되며 현재 여러 전문회사들이 있다. 이와 동일한 원리로, 그러나 폴리머에 가해지는 광점과 스텝 크기를 최대한 줄여, 미세가공물을 만들도록 하는 Micro Rapid Prototyping이 최근 MEMS분야의 연구자들에 의해 시도되었다.^(20,21)

이 외에도 마이크로가공에 기여할 가능성이 으로는, 다른 비전통 가공법중 레이저 가공, 분자와 원자빔 가공, 전자빔 가공, 이온 가공 등을 들 수 있으며, 통상의 정밀가공법으로도 연구하기에 따라서는 어느 정도의 마이크로가공물 제작이 가능하다. 다이어몬드 절삭을 기초로 한 미세 열교환기의 제작이 하

나의 예이다.⁽²²⁾

이 절에서는 마이크로에서 밀리쪽으로 바라보며 MEMS의 외곽기술을 언급했으나, 그 반대쪽의 더 작은 나노미터 단위에는 나노가공(nanomachining)도 얘기되고 있다. 나노가공의 개념으로는 분자단위의 조립이 꿈꾸어지고 있으며,⁽²³⁾ 잘 알려진 개개 원자에 대한 이동의 성공은 단원자 트랜지스터의 제작이 불가능이 아님을 보여주고 있다. 그러나 공학적 의미에서 가공이라 칭할 수 있을 정도의 나노가공이 시도되기까지는 아직 많은 거리가 있어 보인다.

4. 마이크로가공의 발전기술

이 장에서는 마이크로가공이 지니는 특유의 어려움과 이점을 설명하고, 앞 절에서 보인 기본기술을 바탕으로 하여 다양하게 이루어지는 마이크로가공의 발전기술을 몇 가지 예를 중심으로 소개해 본다.

4.1 마이크로가공 기술의 특성

앞에서의 MEMS에서의 기본 가공기술들을 기초개념의 설명을 위해 각각 가장 이해하기 쉬운 예로만 설명하였으나, 실제로는 이를 바탕으로 무궁무진한 수정, 조합, 응용의 가능성이 펼쳐진다. 그 다양성을 조금이나마 이해하기 위해서는 약간의 설명이 필요하다. 우선 앞 장에서 소개한 기술중 표면가공만으로 논의를 한정하고, 게다가 선택할 수 있는 박층도 다결정 실리콘과 산화막 두 가지로만 한정해 보자. 이것은 그림 2의 미세 외팔보 제작을 위해 필요한 최소의 조건이다. 우선 다결정 실리콘은 불순물 유무에 따라 도체나 반도체로 결정된다는 기본 전기적 특성 외에, 다결정 실리콘 자체의 증착 환경뿐 아니라 불순물의 종류, 함량, 투입온도 및, 후속 열처리에 따라 그 박층의 기계적 특성이 달라진다. 다음, 이 다결정 실리콘의 형상을 떠내기 위해서는 습식에칭을 해

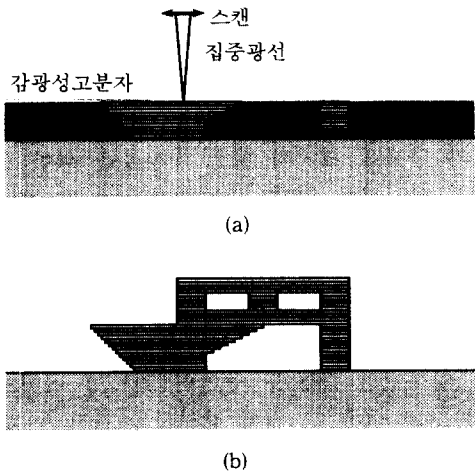


그림 10 (Micro) Rapid Prototyping의 원리

야 할 것인가? 한다면 무슨 에칭액을 사용할 것인가? 아니면 전식에칭을 해야 할 것인가? 전식이면 에칭 마스크로 감광제를 쓸 것인가, 아니면 산화막을 써야 할 것인가? 또 무슨 기체의 플라즈마를 사용하여 어떤 조건하에서 식각할 것인가? 또한, 회생층이 되는 산화층은 어떤 종류의 것으로 할 것이며, 그 제거는 어떤 방법으로 할 것인가? 게다가 앞서의 예와는 반대로 산화막이 구조층이 되고 다결정 실리콘이 회생층이 될 수도 있다는 것도 생각해본다면?

극히 제한된 한 예를 들면서도 이렇게 많은 판단의 단계들이 필요했다. 이제는 그 제한이 얼마나 속박된 가정이었는지를 이해함으로써, 실제의 가공공정 설계 상황을 상상해보자. 많이 쓰이는 박층으로는 예의 다결정 실리콘과 산화층 외에, 질화층과 알루미늄이 있으며, 이들은 가장 기본적인 IC제작공정의 재료들이다. 질화층 구조물이나 알루미늄 구조물도 가능하다는 의미이며, 구조·회생층 조합의 경우의 수가 기하급수적으로 늘어난다는 뜻이다. 더욱이 이들 이 외에도 결정체 실리콘 박층(SOG; silicon on glass), 텅스텐, 폴리이미드가 사용가능한 물질로 더 주어진다. 마지막으로 지금까지 든 박층 재료들은 모두 VLSI공정에서 사용되는 것이었다는 말로, IC 제작과의 일관공정이 가능한 표면 마이크로가공의 경우로만 논의가 한정되었다는 것을 상기시키고자 한다.

극히 고도화된 IC 제작기술이 존재함에도 불구하고 가공물이 회로로서의 역할을 벗어나 기계요소로서 역할하기 위해서는 상당히 새로운 노력이 요구된다. 이미 만들어지고 특성이 잘 알려진 금속을 가공하고 규격화된 부품들을 조합하는 일반적 기계구조물의 설계 제작에 비한다면, 우리는 마이크로가공을 위해서 쇠의 세련부터 최후의 조립까지를 다 한다고 해도 과언이 아니다. 그러나 시작점에서의 이런 어려움에도 불구하고 일단 알맞은 가공공정이 세워지면, 수평방향으로의 확

대응용은 공정개발에 더 이상의 노력이 필요치 않으며, 수량이 늘어도 총 가격이 거의 변치 않는 반도체 제품의 경제성이 물론 적용된다. 또한 고도화된 IC 제작기술이 그 마이크로가공 기술의 출발을 도운다.

4.2 표면-기판 병용 마이크로가공 기술

일반적으로 표면 마이크로가공물들은 서로 간에 작용하여 하나의 시스템을 이루며, 외부와의 물리적 연결을 이루는 소자의 제작에는 아직 드물다. 그 첫째 이유는 근본적인 것으로, 미세 구조물과 물리적으로 연결접촉이 가능한 경우는 상대물도 역시 미세 구조물인 경우가 일반적이라는 것이다. 둘째 이유는 기술적인 것으로, 평면방향 움직임이 주가 되는 표면 마이크로가공물이 외부와 근접하기 위해서는 대부분 기판가공이 따라야 하는데 반해, 표면가공과 기판가공이 병용되는 공정에는 기술적으로 어려움이 많기 때문이다. 여기서, 기판가공을 주로 하면서 약간의 미세 구조물이 표면에 형성되는 특별한 예들은 논의에서 제외한다. 그런 예들은 미소밸브 등에서 볼 수 있으나 특별한 병용기술이 요구되지는 않기 때문이다.

현재 들 수 있는 가장 대표적인 예는 기판 끝에서 밖으로 뻗는 미세 돌출물의 가공이다. 삼차원 공간에서 작업지역으로 접근해야 할 미세구조의 경우에 필수적임은 짐작이 갈 것이다. STM(scanning tunneling microscope)의 말단부분이 되는 돌출 외팔보의 가공예와 단세포 크기의 미소 대상물을 위한 돌출형 마이크로 집게(overhanging microgripper)의 가공예를 소개한다.

그림 11은 압전(piezo) 액츄에이터인 STM용 돌출 외팔보의 가공을 보인다.⁽²⁴⁾ (a) 먼저 웨이퍼의 뒷면을 통한 기판가공으로 일부면의 두께를 줄인다(50~70 마이크론). (b)~(d) 그 위에 압전성을 가진 두 겹의 박층과 필요한 전극들을 입히고 리소그라피와 에칭을 통해 외팔보 형상을 만든다.

(e) 이 외팔보를 기관으로부터 돌출시키기 위해 그 아래의 기관막을 에칭해 제거한다. 그림 12는 완성된 돌출 외팔보의 광학현미경 사진이다. 두께 $8\mu\text{m}$, 폭 $200\mu\text{m}$, 길이 $1000\mu\text{m}$ 이며, 실제로 그래파이트(graphite) 표면을 원자해상도로 보는데 성공했다.

앞의 경우는 STM용 돌출 외팔보를 일반적인 표면 마이크로가공에 의한 구조물보다 수십배 크게 만들고, 또 구조물의 재료가 비실리콘인 점을 이용해 표면-기관 가공이 병용되는 일관공정을 이루었다. 그러나 이번에는 이런 특수 상황을 요구하지 않고, 일반적인 다결정 실리콘의 표면가공물로 목적을 이룬

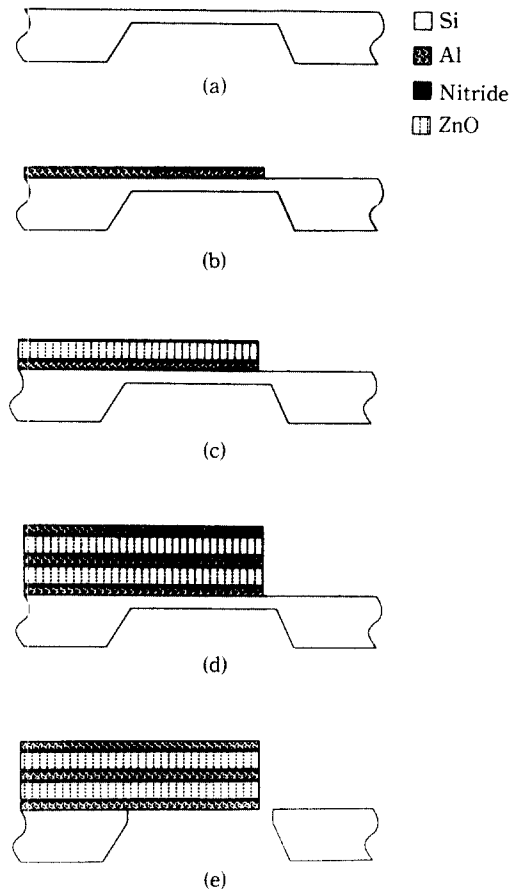


그림 11 STM용 돌출압전 액츄에이터의 가공⁽²⁴⁾

예로서, 정전 액츄에이터인 돌출형 마이크로 집게(두께 $2.5\mu\text{m}$, 폭 $2\mu\text{m}$, 길이 $400\mu\text{m}$)의 가공을 그림 13을 통해 설명한다.⁽²⁵⁾

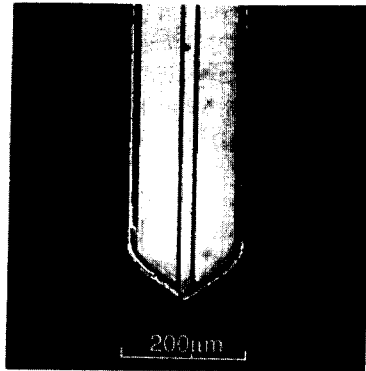


그림 12 완성된 돌출압전 액츄에이터의 사진⁽²⁴⁾

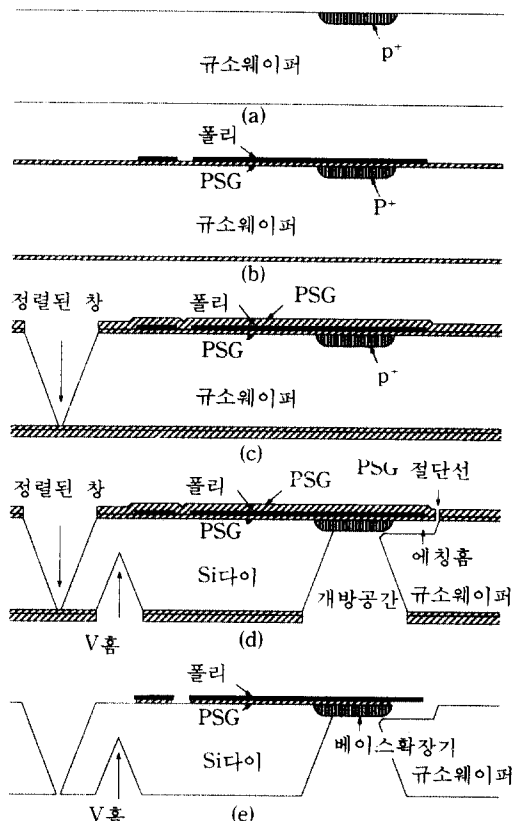


그림 13 다결정 실리콘 돌출 마이크로 집게의 가공

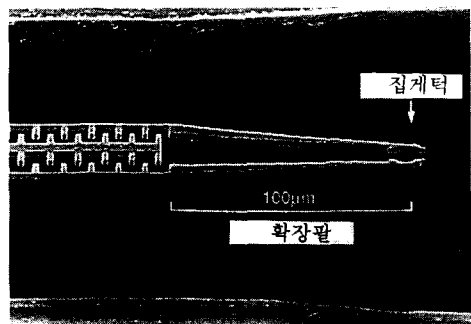


그림 14 돌출마이크로 칩케 끝 부분의 전자 현미경 사진

(a) 먼저 웨이퍼 표면에 보론(B)을 선택적으로 확산시킨다. (b)~(c) 다음은 3.2절에서 설명한 표면 마이크로가공과 비슷한 방법으로 PSG, 다결정 실리콘 PSG를 차례로 입힌다. (d) 이 PSG층들을 보호막으로 해서 칩에 아래의 기관 실리콘을 에칭하여 제거하고, 이어 PSG층을 선택적으로 제거하면 (e)에서 보는 돌출형 외팔보를 얻는다. PSG층을 선택적으로 제거하면 (e)에서 보는 돌출형 외팔보를 얻는다. PSG Break Line은 내부응력 불일치에서 오는 문제점 해결을 위해, Etch Channel은 습식에칭과 행굼에서 돌출 마이크로 구조가 쉽게 파괴되는 문제의 해결을 위해 각각 개발되었다. 공정이 끝난 후 V-groove을 이용해 Si-die를 떼어내어 패키징한다. 그림 14는 완성된 마이크로 칩케 끝 부분의 전자 현미경 사진이다.

이 공정은 물질간 내부응력의 불일치와 표면 마이크로가공물의 연약성이라는 마이크로가공의 큰 두 문제점이 극대화된 상황에서, 처음으로 가공 공정에 기계적인 해결책을 도입함으로써, IC 공정을 벗어나지 않고 목적을 이루었다는데 가장 큰 의의가 있다. 이 마이크로 칩케는 실험을 통해 단일 세포 크기의 개체를 집을 수 있음을 보였다.

4.3 밀봉공간 제작기술

표면 마이크로가공 기술로 이룰 수 있는

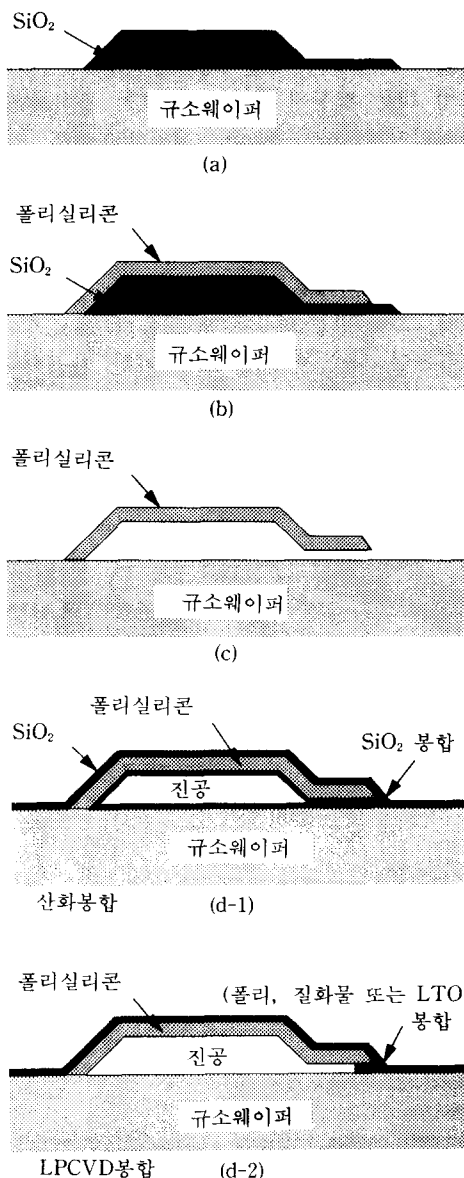


그림 15 표면 마이크로가공에 의한 진공 밀봉공간 제작

밀봉공간 제작의 원리를 알아본다. 이미 3.4절의 웨이퍼 접합예에서 밀봉공간이 만들어지는 것을 보았으나, 여기서는 표면가공을 벗어나지 않고 일관공정으로 실현하는 발전 기술의 두 가지 예를 보이겠다. 그림 15에

서, (a)~(c) 산화층을 희생층으로 해 다결정 실리콘으로 된 구조를 만든 후, (d) 구조 내의 산화층을 에칭해 내는 데 필요했던 틈을 메꾸면 구조물 내에 밀봉공간이 만들어진다. (d-1)은 실리콘이 산화로 내에서 산화되면서 부피가 팽창하여 에칭통로를 메꾸는 예이다. 공정은 산화로에서 이루어지기 때문에 밀봉 후에도 공간 내의 산소가 계속 산화에 소모되어 결국 진공공간이 이루어진다. (d-2)는 박층을 한번 더 입혀 에칭통로를 메꾸는 예이다. 이 공정이 저압 화학증착로(LPCVD; low-pressure chemical vapor deposition) 내에서 이루어지면 그 밀봉공간도 진공이 된다.

밀봉공간 기술(encapsulation technique)로는 절대압력계를 만들기도 하고,⁽²⁶⁾ 조금더 응용하여 마이크로 전등을 만들기도 한다.⁽²⁷⁾ 그러나 이런 특수목적 이외에, 일반 마이크로 가공물들을 커다란 밀봉공간 내부에 만들 수 있다면 그 의의는 자못 커진다. 미세 구조물을 외부(접촉, 먼지 등)로부터 보호하는 역할과 마이크로 구조물이 진공내에서 운동하게도 할 수 있는 것은 큰 이득이 된다. On-chip Packaging이라 부를 수 있는 이 기술은 가공공정에 상당한 어려움이 따르나, 그간의 노력으로 조만간 어느 정도 해결될 것으로 보인다.⁽²⁸⁾

4.4 탐침 제작기술

원자 해상도(atomic resolution)를 가지는 STM(scanning tunneling microscope)와 AFM(atomic force microscope) 등은 끝이 뾰족한 탐침(scanning tip)으로 시편 위를 주사(scan)한다. 이를 위한 가공으로는 마이크로가공을 응용한 간단하면서도 재미있는 기술들이 많이 이용된다. 현재 시판되고 있는 대부분의 AFM은 피라미트형의 질화실리콘 탐침을 사용하는데, 그림 16(a)에서 보듯이 3.3절에서 소개한 기관 마이크로가공이 그 기초로 이루고 있다. 이방성 에칭을 이용해

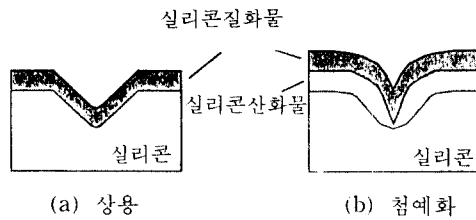


그림 16 AFM용 질화실리콘 탐침 제작⁽²⁹⁾

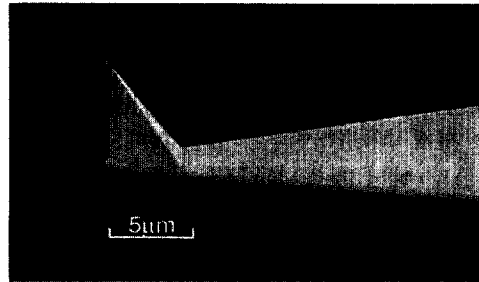


그림 17 AFM용 결정실리콘 탐침의 전자 현미경 사진⁽³⁰⁾

실리콘 웨이퍼 표면에 피라미트형의 홈을 만들고 그 위에 질화층을 입힌다. 이 질화층을 별도의 기관에 접합한 후 원래의 실리콘 기관을 제거하면 새 기관 위에 피라미트형 질화실리콘의 날카로운 침이 완성된다.

상용 탐침은 끝 부분의 곡률반경이 50 내지 100나노미터 정도이며 매끄러운 표면의 관찰에는 문제가 없으나, IC나 생물학에서의 시편 등 매끄럽지 못한 표면에는 더욱 날카로운 탐침이 바람직하게 된다. 이를 위한 시도에 여러 가공법이 발견, 이용되었으나, 그림 16(b)는 그 중 (a)의 예를 간단히 개량하는 방법이다.⁽²⁹⁾ 이방성 에칭을 이용하여 피라미트형 홈을 만드는 것은 동일하다. 그러나 질화층을 증착하기 전에 표면을 산화시키면 홈 끝과 바깥면의 차이로 불균일 산화가 이루어지고 홈은 더욱 날카로워진다. 그 후의 과정은 전과 동일하다. 이 간단한 개량으로 50나노미터던 곡률반경을 10나노미터 이하로 줄일 수 있었다. 그림 17에서 보는 것은 또

다른 한 방법에 의한 AFM용 탐침의 전자현미경 사진이다.⁽³⁰⁾ 질화실리콘의 외팔보 끝에 결정체 실리콘의 탐침이 만들어져 있다.

5. 맺음말

IC와 필적할 기계의 소형화가 과연 가능할까 하는 것이 MEMS를 보는 하나의 시각이다. 그러나 우리가 알고 있는 삼차원 기계의 단순한 축소란 그 실현의 기술적 어려움뿐 아니라 근본 물리법칙에 의해서 바람직하지도 않다. 사실 일반적 의미의 기계의 소형화가 현재 MEMS연구가 추구해야 할 궁극적 목표가 아닌 것은 MEMS 사회에서는 잘 이해되어 있다. 그렇다고 전체 MEMS가 도달하려는 목적지를 지금 알고 있는 것은 아니며, 각자 자기에게 맞는 방향으로 MEMS를 발전시키거나 이용하는 것이 현실이며 또한 바람직할 것이다.

반도체 상의 마이크로가공 기술은 IC를 위해 발달되었지만 움직이는 요소도 만들 수 있다는 사실을 인식하면서 MEMS는 본격화되었다. 이 움직이는 마이크로 요소를 일반적 기계요소의 대응으로 단순 인식하는 것이 밖에서 보는 MEMS의 전형이나, 실제로는 구분이 힘들 정도로 복합전공(inter-disciplinary)인 경우가 대부분이며 MEMS의 핵이라 할 "기계적"인 점이 아직 예상 외로 적다. 이는, 전자, 재료, 화학을 비롯한 타 분야에 비해, IC제작 기술에 기계공학이 동떨어져 있었기 때문인데, 일찍부터 센서 등으로 관련되었던 타 분야에 비한다면 기계 쪽으로는 거의 진공상태였다. 기계 분야에서의 참여가 늘고 기술이 쌓임에 따라 MEMS의 연구에 기계공학적 기여는 급격히 늘고 있는데, 사실 이미 정립된 마이크로가공만으로도 기계공학에 응용할 방법은 끝없이 많다. 더 나아가 MEMS의 마이크로가공 기술 자체의 발전에도 기계공학이 기여할 여지는 많을 것으로 보인다.

일천한 역사에도 불구하고 MEMS는 이미 뿌리를 내렸다고 보나 앞으로의 가능성에 비하면 아직은 시작에 불과하다. 더욱이 기계공학적으로는 상대적으로 더욱 미개척인 상태이다. 이런 MEMS에서의 기계공학적 잠재력을 일깨우기 위해서 먼저 필요한 것은 마이크로가공 기술을 가지는 기계공학자를 늘이는 것이다. 이것은 누구나 인식하면서도 현실적으로 그다지 쉬운 일은 아니다(상대적으로 일본의 대응이 빠른 편이다). 이 글에서는 이러한 요청에 조금이나마 도움이 되고자, 피상적 인용을 줄이고 기계공학자의 입장에서 마이크로가공의 기본 개념을 모아 쉽게 전달하는데 치중하였다. 이로서 MEMS의 올바른 이해를 위해 그 바탕인 마이크로가공이 어떤 것인지 아는 데 도움이 되었으면 하며, 특히 MEMS에 관심을 가지는 우리나라 학생들에게 시작을 위한 도움이 되었으면 한다.

후 기

이 글에 인용되어 쓰인 사진들을 보내 주고 게재를 허락해준 Dr. Shinya Akamine와 다른 저자들에게 감사하며, 한글 워드프로세서의 사용을 도와준 도덕희 씨께도 고마움을 전한다.

참고문헌

- (1) Fan, L. S., Tai, Y. C. and Muller, R. S., 1988, "Integrated Movable Micromechanical Structures for Sensors and Actuators," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 35, No. 6, pp. 724~730.
- (2) Mehregany, M., Gabriel, K. J. and Trimmer, W. S., 1988, "Integrated Fabrication of Polysilicon Mechanisms," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 35, No. 6, pp. 719~723.

- (3) Fan, L. S., Tai, Y. C. and Muller, R. S., 1988, "IC-Processed Electrostatic Micromotors," Technical Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, U.S.A., pp. 666~669.
- (4) Mehregany, M., Nagarkar, P., Senturia, S. D. and Lang, J. H., 1990, "Operation of Microfabricated Harmonic and Ordinary Side-Drive Motors," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nappa Valley, CA, U.S.A., pp. 1~8.
- (5) IEEE/ASME J. Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 1, March 1992.
- (6) Micromechanical Systems, DSC-Vol. 40, ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA, U.S.A., Nov. 1992.
- (7) Tang, W. C., Nguyen, T. H. and Howe, R. T., 1989, "Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures," Sensors and Actuators, Vol. 20, No. 1 & 2, pp. 25~32.
- (8) Tai, Y. C., Fan, L. S. and Muller, R.S., 1989, "IC-Processed Micro-Motors : Design, Technology, and Testing," Proc. IEEE Micro Electromechanical Systems Workshop, Salt Lake City, UT, U.S.A., pp. 1~6.
- (9) Nathanson, H. C., Newell, W. E. and Wickstrom, R. A., 1967, "The Resonant Gate Transistor," IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-14, pp. 117~133.
- (10) Howe, R. T. and Muller, R. S., 1983, "Polycrystalline Silicon Micromechanical Beams," J. Electrochemical Society, Vol. 130, pp. 1420~1423.
- (11) Small Machines, Large Opportunities : A Report on the Emerging Field of Microdynamics, Edited by Gabriel, K., Jarvis, J. and Trimmer, W., 1988, National Science Foundation, U.S.A.
- (12) Petersen, K. E., 1982, "Silicon as a Mechanical Material," Proceedings of the IEEE, Vol. 70, No. 5, pp. 420~457.
- (13) Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. W., 1981, "High-Performance Heat Sinking for VLSI," IEEE Trans. Electron Device Letter, Vol. EDL-2, p. 126.
- (14) Toshiyoshi, H., Fujita, H., Kawai, T. and Ueda, T., 1993, "Piezoelectrically Operated Actuators by Quartz Micromachining for Optical Application," Proc. IEEE Micro Electromechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, FL, U.S.A., pp. 133~138.
- (15) Petersen, K., Barth, P., Poydock, J., Brown, J., Mallon Jr., J. and Bryzek, J., 1988, "Silicon Fusion Bonding for Pressure Sensors," IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, U.S.A., pp. 144~147.
- (16) Ehrfeld, W., Götz, F., Münchmeyer, D. and Schelb, W. and Schmidt, D., 1988, "LIGA Process : Sensor Construction Techniques via X-Ray Lithography," Tech. Digest, IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, U.S.A., pp. 1~4.
- (17) Frazier, B., Babb, J. W., Allen, M. G. and Taylor, D. G., 1991, "Design and Fabrication of Electroplated Micromotor Structures," Micromechanical Sensors, Actuators, and Systems, DSC-Vol. 32, ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, GA, U.S. A., pp. 135~146.
- (18) Hirano, T., Furuhashi, T. and Fujita, H., 1993, "Dry Releasing of Electroplated Rotational and Overhanging Structures," Proc. IEEE Micro Electromechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, FL, U. S.A., pp. 278~283.
- (19) Kuo, C. L., Masuzawa, T. and Fujino,

- M., 1991, "A Micropipe Fabrication Process," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Nara, Japan, pp. 80~85.
- (20) Ikuta, K. and Hirowatari, K., 1993, "Real Three Dimensional Micro Fabrication Using Stereo Lithography and Metal Molding," Proc. IEEE Micro Electromechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, FL, U.S.A., pp. 42~47.
- (21) Takagi, T. and Nakajima, N., 1993, "Photoforming Applied to Fine Machining," Proc. IEEE Micro Electromechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, FL, U.S.A., pp. 173~178.
- (22) Friedrich, C., Louisiana Tech University, Personal Communication.
- (23) Drexler, K. E., 1986, "Engines of Creation," Anchor Press, New York, NY, U.S. A..
- (24) Akamine, S., Albrecht, T. R., Zdeblick, M. J. and Quate, C. F., 1989, "A Planar Process for Microfabrication of STM," Proc. 5th Int. Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors III (Transducers '89), Montreux, Switzerland, pp. 964~970.
- (25) Kim, C. J., Pisano, A. P. and Muller, R. S., 1992, "Silicon-Processed Overhanging Microgripper," J. Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 31~36.
- (26) Guckel, H. and Burns, D. W., 1984, "Planar Processed Polysilicon Sealed Cavities for Pressure Transducer Arrays," Technical Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, U.S. A., pp. 223~227.
- (27) Mastrangelo, C. H. and Muller, R. S., 1989, "Vacuum-Sealed Silicon Micromachined Incandescent Light Source," Technical Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting, pp. 503~506.
- (28) Lin, L., et al. to Appear at Transducers '93.
- (29) Akamine, S. and Quate, C. F., 1992, "Low Temperature Thermal Oxidation Sharpening of Microcast Tips," J. Vac. Sci. Technol., B 10(5), pp. 2307~2310.
- (30) Akamine, S., Stanford University, Personal Communication. 