

UV-LIGA 표면 미세 가공 기술과 (110) 실리콘 몸체 미세 가공 기술을 이용한 큰 종횡비의 빗모양 구동기 제작에 관한 연구

論 文
49C - 2 - 13

A HIGH-ASPECT-RATIO COMB ACTUATOR USING UV-LIGA SURFACE MICROMACHINING AND (110) SILICON BULK MICROMACHINING

金 聲 赫* · 李 相 勳** · 金 容 權***

(Seong-Hyok Kim · Sang-Hun Lee · Yong-Kweon Kim)

Abstract - This paper reports a novel micromachining process based on UV-LIGA process and (110) silicon anisotropic etching for fabrication of a high-aspect-ratio comb actuator. The comb electrodes are fabricated by (110) silicon anisotropic etching and the spring structures are fabricated by UV-LIGA micromachining process. We designed the (110) silicon comb structure considering the etch-rate-ratio between (110) and (111) planes and lateral etch rate of a beam-type structure. The fabricated structure was 400 μm thick and 18 μm wide comb electrodes separated by 7 μm so that the height-gap ratio was about 57. Also considering resonant frequency of the comb actuator and the frequency-matching between sensing and driving mode for gyroscope application, we designed the number, width, height and length of the spring structures. Electroplated gold springs on both sides of the seismic mass were 15 μm wide, 14 μm thick and 500 μm long. The fabricated comb actuator had resonant frequency at 1430Hz, which was calculated to be 1441Hz. The proposed fabrication process can be applicable to the fabrication of a high-aspect-ratio comb actuator for a large displacement actuator and precision sensors. Moreover, this combined process enables to fabricate a more complex structure which cannot be fabricated only by surface or bulk micromachining.

Key Words : Comb actuator, High-aspect-ratio, (110) silicon, UV-LIGA

1. 서 론

최근 집적화된 산업 시스템에 대한 요구가 증가하게 됨에 따라 미세 전기 기계 시스템(Micro Electro-Mechanical System; MEMS) 기술은 여러 산업 분야에서 주목받는 기술 중의 하나로 자리잡게 되었다. MEMS 기술은 실리콘이나 다른 기반층을 이용한 반도체 공정 기술을 이용하므로 기존의 시스템에 비해 작고 저가인 초소형 시스템을 대량으로 일괄 생산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 기존의 여러가지 MEMS 미세 가공 기술은 MEMS 기술을 이용한 센서나 구동기를 제작함에 있어서 아직 많은 제한점이 존재한다. 표 1은 여러가지 미세 가공 기술의 특징 및 장단점을 비교한 표이다.

본 논문에서는 기존의 몸체 미세 가공 기술과 표면 미세 가공 기술의 장점을 결합한 복합 미세 가공 기술로 빗모양 구동기를 제작하기 위하여, 그림 1과 같이 빗모양 전극부 및 질량체 부분을 제작하기 위해서 (110) 실리콘을 이용하며, 질량체 부를 지지하는 스프링 부분은 도금 공정으로 제작하는 방법을 제안한다. (110) 실리콘으로 제작되는 빗모양의 전극 구조물은 (110) 실리콘 기판과 같은 두께를 가지며, 실리콘의 이방성 습

식 식각 특성상 종횡비를 매우 크게 제작할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 빗모양 전극 구조물에서의 폭-높이 종횡비와 높이-간극 종횡비는 제작된 빗모양 구동기의 성능을 결정짓는 중요한 요소이므로, 이를 크게 할수록 제작된 소자의 성능이 좋아진다. UV-LIGA 공정은 (110) 실리콘의 결정 구조의 제약으로 제작이 어려웠던 구조물 형상을 제작 가능하게 할 뿐 아니라, 최대 수십 μm 두께의 금속 구조물 제작을 가능하게 한다. 특히, 금, 니켈같은 금속 물질은 실리콘의 습식 식각 용액인 수산화칼륨(KOH) 수용액에서 거의 식각되지 않으므로, 다결정 실리콘을 표면 미세 가공 기술로 채택하는 다른 복합 미세 가공 기술에서 반드시 필요한, 추가적인 보호 과정이 필요치 않게 되어 공정을 단순화할 수 있다.

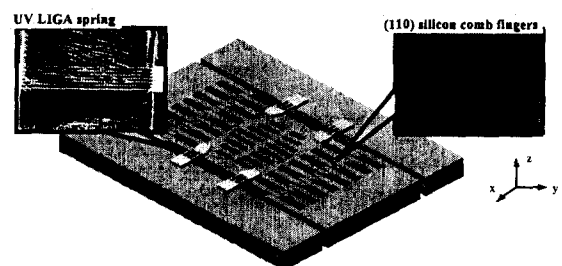


그림 1 복합 미세 가공 기술을 이용하여 제작된 빗모양 구조물의 개략도

Fig. 1 Schematic of the comb structure fabricated by combined micromachining

* 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 :三星電子 光메카 研究所

*** 正 會 員 : 서울대 電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 9月 20日

最終完了 : 2000年 1月 13日

표 1 여러가지 미세 가공 기술의 특징 및 장단점 비교표

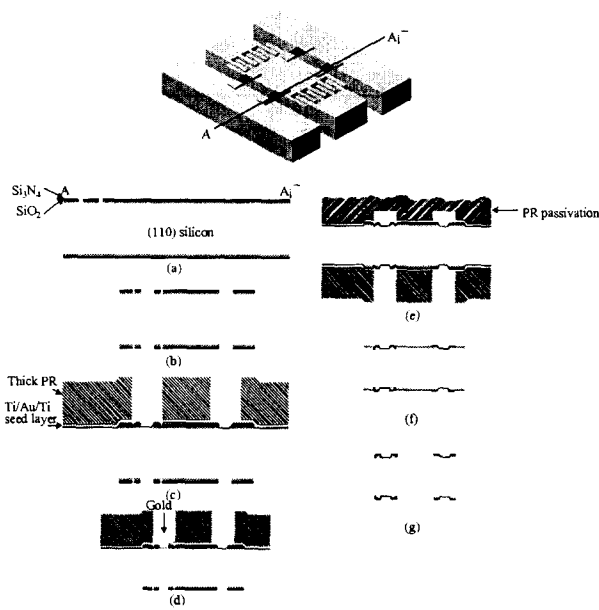
Table 1 Comparison of various micromachining processes

	공정 기술	특징	장점	단점	비고	
표면 미세 가공 기술	다결정 실리콘 미세 가공 기술	· 구조물층과 희생층의 증착	· 기존의 IC 공정 이용 · 미세 구조물 제작	· 박막 두께 제한 · 박막의 응력 및 응력 기울기 조절 공정 필요 · 구조물의 접착	[1]	
	LIGA	X-ray	· X-ray 이용 · PMMA 이용	· 100 이상의 매우 큰 종횡비 구조물 제작 가능	· 싱크로트론이 필요한 고가의 공정	[2]
		UV	· UV 이용 · 일반 감광제 이용	· 비교적 큰 종횡비 구조물 제작 가능 · X-ray LIGA에 비해 간단하고 저가의 공정	· 50 이상의 큰 종횡비를 갖는 수직한 구조물 구현 어려움	[3]
몸체 미세 가공 기술	실리콘 습식 식각법	· 결정면에 따라 다른 식각 속도의 차이 이용	· 매우 간단한 저가 공정	· 복잡한 구조물 제작 어려움	[4]	
	(110) 실리콘 습식 식각	· (110) 면과 (111) 면의 식각 속도 차이 이용 · 응용 : 가속도계[10], 미세 광학 기구[11], 각속도계[12], 미세 채널[13,14], 빗모양 구조물[15,16]	· 깨끗한 식각 단면 · 매우 큰 종횡비를 갖는 수직한 구조물	· 결정 방향에 따른 제약으로 복잡한 구조물의 제작 어려움 · 서로 다른 두께를 갖는 다층 구조물 제작 어려움	[5-16]	
	BOSCH process(1)	· 실리콘 기판의 직접 이방성 건식 식각	· 매우 큰 종횡비의 구조물 제작 가능 · 균일도 향상 · 비교적 빠른 식각 속도	· 조개 겹질 모양(scallop)의 식각 단면 · 서로 다른 두께의 다층 구조물 제작 힘들	[17]	
	RIE & XeF ₂ Etching	· RIE 이방성 식각과 XeF ₂ 등방성 식각 이용	· 매우 큰 종횡비의 구조물 제작 가능 · 서로 다른 두께의 다층 구조물 제작 가능	· 스프링 보호 공정 필요 · XeF ₂ 식각 장치 필요 · 다층 구조물 각각의 정밀한 두께 조절 어려움	[18]	
	BOSCH process(2)	· 기존의 BOSCH 공정에 등방성 식각 공정 추가	· 매우 큰 종횡비의 구조물 제작 가능 · 서로 다른 두께의 다층 구조물 제작 가능	· 스프링 보호 공정 필요 · 다층 구조물 각각의 정밀한 두께 조절 어려움	[19]	
복합 미세 가공 기술	붕소 확산을 이용한 미세 가공 기술	· 붕소 확산을 이용한 식각 정지면의 형성 및 구조물 이용 · 응용 : 마이크로폰[20], 미세 정전형 거울[21], 정밀 가속도계[22]	· 식각 정지로 얇은 구조물 두께의 정확한 구현 · 얇은 박막 및 스프링 과 큰 질량체 구현 가능	· 붕소 확산 두께의 제한으로 구조물 두께 제한 · 잔류 응력 조절 필요 · IC 공정과 집적화 힘들	[20-22]	
	SOI를 이용한 미세 가공 기술	· SOI 자체의 절연막을 식각 정지면으로 이용	· 얇은 박막 및 스프링 과 큰 질량체 구현 가능	· 구조물의 두께 제한 · 접합 공정 필요	[23]	
	(110) 실리콘과 다결정 실리콘을 이용한 미세 가공 기술	· 각 공정의 장점 결합 · (110) 실리콘을 이용한 빗모양 전극 및 질량체 구현 · 다결정 실리콘을 이용한 스프링부 구현	· 큰 종횡비의 빗모양 구조물과 얇은 다결정 스프링 제작 가능	· 다결정 실리콘의 보호 공정 필요 · 다결정 실리콘 미세 가공 기술의 단점	[24]	

이러한 복합 미세 가공 기술로 제작되는 구조물은 매우 큰 질량체와 함께 스프링 상수와 형상의 조절이 가능한 스프링을 갖게 되어, 고정밀 관성 센서나 큰 변위를 갖는 구동기와 같은 기존의 빗모양 구조물이 응용되는 분야에 폭넓게 응용될 수 있을 것이다.

2. 제작 공정 및 기초 실험 결과

2.1. 전체 제작 공정



- (a) 산화막 및 질화막에 정렬 표시자 정의
- (b) 정렬 표시자에 맞추어 빗모양 구조물 정의
- (c) 앞면 후막 감광제 도금 형성
- (d) 앞면 도금 스프링 형성
- (e) 뒷면 도금 형성 및 도금
- (f) 후막 감광제 및 도금 기반 제거
- (g) (110) 실리콘 습식 식각

그림 2 빗모양 구동기의 전체 제작 공정

Fig. 2 Fabrication process of the comb actuator

본 논문에서 제안한 빗모양 구동기의 제작 공정 순서는 그림 2와 같다.

빗모양 구동기의 제작에는 400 μ m 두께의 n형 (110) 실리콘 웨이퍼가 사용되었다. 우선 (110) 실리콘 위에 습식 식각 마스크로서 1000Å의 열 산화막과 3000Å 두께의 질화막을 저압 화학 기상 증착법(low pressure chemical vapor deposition : LPCVD)으로 증착한 후, (110) 실리콘 습식 식각에서 보다 높은 식각 선택비를 얻기 위하여 정확한 <111> 방향을 찾아내기 위한 부채꼴 모양의 정렬 표시자(alignment target)를 질화막과 산화막에 정의하였다(그림 2(a)). 빗모양 구조물을 형성하기 위한 조건과 같은 식각 조건에서 정렬 표시자를 식각한 후, 빔의 폭 방향으로의 식각이 제일 작게 관찰된 빔에 맞추어 빗모양 전극 및 질량체 형상을 실리콘 기판 양면에 패터닝하였다(그림 2(b)). 이 후, 도금을 위한 도금 기반층을 실리콘 웨이퍼 앞면에 열증착(thermal evaporation) 후, 금속 스프링 구조물을 형성하기 위한 후막 감광제를 실리콘 기판 앞면에 도포하고, 스프링의 형상과 반대 모양인 도금층을 형성하였다(그림 2(c)). 이때 얻어지는 도금층의 형상 및 두께에 따라 스프링 부분의 형상 및 두께가 결정되므로 도금층을 형성하는 후막 감광제를 용도에 따라 선택하여야 한다. 그림 2(d)는 형성된 도금층을 이용하여 금속 스프링을 형성하기 위한 도금 공정을 나타낸다. 그림 2(e)-(f)는 앞면에 스프링을 형성하는 방법과 같은 방법을 이용하여 뒷면에 스프링을 형성하는 공정이며, 이미 형성되어 있는 앞면의 스프링 구조물은 일반 감광제를 이용하여 보호하

였다(그림 2(e)). 최종적으로 도금층과 도금 기반층이 제거된 시편은 KOH 수용액에서 습식 식각하여 관통하게 된다(그림 2(g)).

2.2. 빗모양 구조물을 제작하기 위한 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각

빗모양 전극을 형성하기 위하여 본 논문에서는 (110) 실리콘의 습식 식각법을 이용하였다. 실리콘의 습식 식각은 결정면에 따라 다른 식각 속도를 이용하며, 특히 (110) 실리콘 기판을 이용하여 빗모양 전극 구조물을 제작하기 위해서는 (110)/(111) 실리콘 결정면의 매우 큰 식각 속도 차이가 필요하다. 매우 큰 식각 속도차를 이용하기 위해서는 정확한 결정방향을 알아내기 위한 정렬 표시자가 필요하며, 본 논문에서는 그림 3과 같은 부채꼴 모양의 정렬 표시자를 사용하였다.

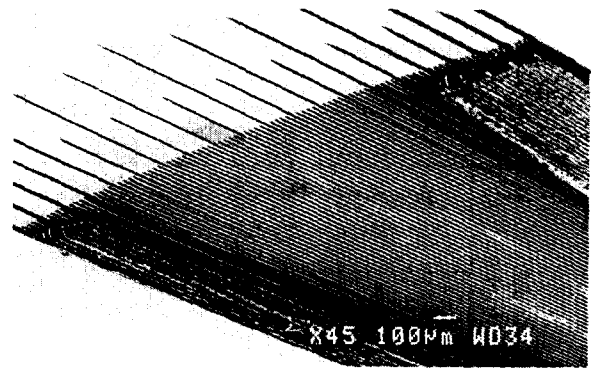


그림 3 200분간 KOH 수용액에서 식각한 후의 부채살 모양 정렬 표시자 SEM 사진

Fig. 3 SEM photograph of the fan-shaped alignment target after 200min. etching in KOH solution

정렬 표시자는 8mm 길이의 빔을 실리콘 웨이퍼의 프라이머리 플랫(primary flat)을 기준으로 $\pm 5^\circ$ 의 범위 내에 0.1° 간격으로 부채살 모양으로 배열한 구조물이며, 이를 이용하여 빗모양 전극 구조물을 정확한 <111> 방향에서 $\pm 0.05^\circ$ 의 정렬 오차 이내로 형성할 수 있었다.

습식 식각액으로는 KOH 수용액을 사용하였으며, KOH 수용액을 사용하여 (110) 실리콘을 습식 식각할 경우, 식각 특성을 결정짓는 가장 중요한 요소인 식각액의 온도와 농도를 고려하였다[6]. 본 논문에서 제안한 빗모양 전극을 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각으로 제작하기 위해서는 매우 큰 (110)/(111) 결정면의 식각 속도비가 필요하다[7]. 그러므로, 본 논문에서는 41wt.%의 KOH 수용액을 사용하여 빗모양 구조물을 제작하였으며, 식각액의 온도는 $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 이었다. 이와 같은 식각 조건에서 폭 22 μ m, 전극간의 간격 3 μ m로 설계한 빗모양 구조물은 두께 200 μ m, 폭 20 μ m, 전극간의 간격은 5 μ m인 매우 높은 종횡비로 제작되었으며(그림 4), 이 때 (110)/(111) 결정면의 식각 선택비는 200 이상이였다. 또한, 빗모양 전극 구조물을 제작하기 위해서는 (110)/(111) 결정면의 식각 선택비를 결정짓는 깊이 방향과 폭 방향의 식각과 함께, 빗모양 전극의 길이 방향으로의 식각도 이루어지게 되므로, 길이 방향의 식각 속도 또한 고려되어야 한다[7].

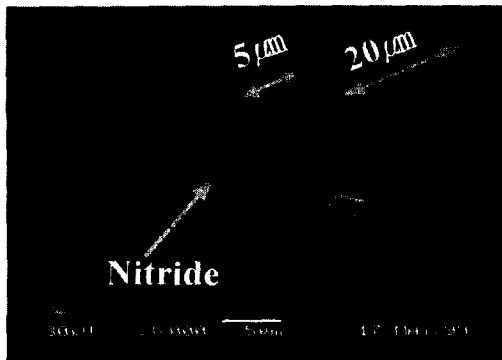


그림 4 제작된 빗모양 전극 구조물
Fig. 4 Fabricated comb finger structure

2.3. 스프링 구조물의 제작을 위한 도금 공정

(110) 실리콘의 습식 식각으로 제작할 수 없는 스프링 구조물은 도금 공정을 이용하여 제작한다. 도금에 사용되는 재료 가운데 금과 같은 귀(novel)한 금속과 니켈은 본 논문에서 사용하는 실리콘 습식 식각액인 KOH에서 식각되거나 손상되지 않으므로, 도금과 실리콘 습식 식각을 결합한 복합 미세 가공 공정에서 손쉽게 이용할 수 있다[25].

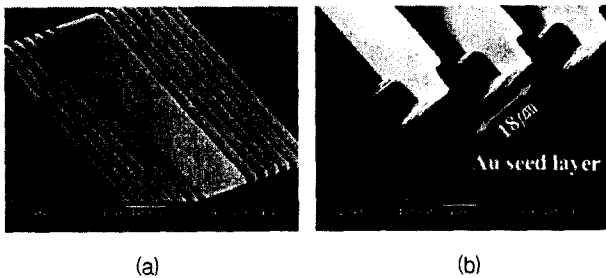


그림 5 도금 공정을 위한 후막 감광제 도금틀(a)과 확대된 SEM 사진(b)
Fig. 5 SEM photographs of the thick photoresist mold for electroplating(a) and close-up(b)

도금 스프링을 제작하기 위하여 우선, 식각 마스크가 증착되어 있는 (110) 실리콘 기판 위에 티타늄(Ti)-금(Au)-티타늄(Ti)을 각각 200Å, 1000Å, 200Å 열증착하여 도금 기반층을 형성한다. 금 위의 추가적인 티타늄 층은 도금틀 형성 후 남아 있는 후막 감광제 및 오염 물질을 제거하여 깨끗한 도금 기반층 표면을 만들기 위해 증착하며, 이는 도금 직전에 100:1의 비율로 탈이온수로 희석한 불산 용액으로 제거한다. 후막 감광제로는 일본 TOK 사의 PMER P-LA 900을 사용하였으며, 700rpm에서 10초, 1800rpm에서 5초간 회전 도포한 후, 110°C의 Hot plate에서 6분간 열처리하였다. 이렇게 코팅된 후막 감광제는 UV 사진 식각 장치(MA-6 double side mask aligner, Kalsüss)를 이용하여 노광하였고, 전용 현상액인 P-7G에서 5분간 현상 후, 최종적으로 18μm 두께의 도금틀을 형성하였다(그림 5).

제작된 도금틀을 이용하여 금도금을 수행하였으며, 사용된 용액은 EEJA 사의 Neutronex 210으로, Hot plate에서 65°C로

유지하였고, 시편에 도금액이 원활하게 공급될 수 있도록 교반(stirring)을 하였다[26]. 전류 밀도는 4mA/cm²로 유지하였으며, 이러한 도금 조건에서 60분간 도금을 수행하여 15μm 두께의 금 구조물을 제작하였다(그림 6).

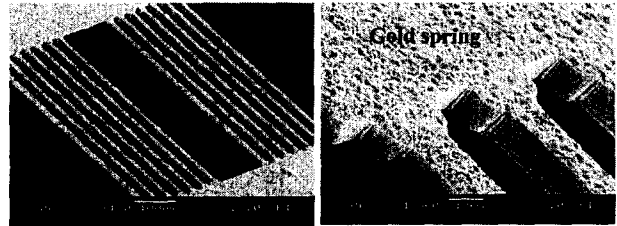


그림 6 그림 5의 도금틀을 이용하여 제작한 스프링 구조물 (a) 과 확대된 SEM 사진(b)
Fig. 6 SEM photographs of the fabricated spring structure(a) using the mold shown in Fig. 5 and close-up(b)

금도금을 이용하여 제작된 구조물은 빗모양 구조물의 스프링 역할을 하며, 폭은 15μm, 높이는 15μm이고, 실리콘 기판의 앞면과 뒷면에 각각 56개의 스프링이 형성된다.

3. 빗모양 구동기의 설계

본 논문에서 제안한 빗모양 구동기를 설계하기에 앞서 제시한 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각과 금도금 실험 결과를 고려하였다. 빗모양 전극 구조물의 형성을 위한 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각 시, (110)/(111)면의 식각 선택비와 길이 방향의 식각 속도가 성능을 결정짓는 가장 큰 결정 요인이다. 또한, (110) 실리콘의 습식 식각에서 좁은 부분과 넓은 부분은 식각 속도가 다르며, 이를 해결하기 위한 방법으로 초음파를 이용하는 연구가 발표되었다[16]. 하지만, 본 논문에서와 같이 (110)/(111) 결정면의 식각 선택비가 매우 크고, 실리콘 웨이퍼를 관통하여 구조물을 제작할 경우 충분히 오랜 시간 동안 식각액에 노출하면, 원하는 성능을 갖는 빗모양 전극 구조물을 제작할 수 있다. 이 때, 식각 시간에 따른 (110), (111) 면의 식각 속도와 빗모양 구조물의 길이 방향의 식각 속도를 고려하여 구조물을 설계하여야 한다.

스프링은 도금을 이용하여 제작하고, 전체적인 대칭 구조를 이루도록 실리콘 기판의 윗면과 아랫면에 형성하여 원하지 않는 동작 모드를 배제하도록 설계하였다. 설계한 빗모양 구동기는 수평 방향의 구동과 수직 방향의 감지 모드를 갖는 각속도 계의 응용을 염두에 두었으며, 이를 위해 빗모양 구동기의 구동과 검출 공진 주파수는 도금 공정을 이용한 스프링의 제작 시 폭과 높이, 길이와 갭수를 조절하여 원하는 공진 주파수 대역에 고정하였다. 설계한 공진 주파수는 수평 방향의 구동 주파수와 수직 방향의 검출 주파수 모두 1441 Hz이다. 표 2는 빗모양 구동기의 전극부와 스프링 부의 설계값을 나타낸다.

표 2 빗모양 구동기의 설계값

Table 2 Design parameters of the comb actuator

		설계값	제작 결과 예상값	결정 요인
빗모양 전극	빗모양 전극의 갯수	206	206	-
	두께(μm)	400	400	웨이퍼 두께
	폭(μm)	22	18	(110)/(111) 면의 식각 선택비[7]
	전극간의 간극(μm)	3	7	
	길이(μm)	1250	650	길이 방향의 식각 속도[7]
금도금 스프링	스프링의 갯수	112	112	공진 주파수
	폭(μm)	15	15	
	높이(μm)	15	15	도금 조건 및 시간[26], 공진 주파수
	길이(μm)	500	500	공진 주파수

4. 빗모양 구동기의 제작 결과

빗모양 구동기의 전극부를 제작하기 위한 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각은 앞서 언급한 대로 41wt.% 60°C의 KOH 수용액을 사용하였으며, 이 때 넓은 영역에서 길이 방향의 식각 속도는 대략 0.6μm/분이고, 빗모양 전극의 길이 방향 식각 속도는 대략 0.8 μm/분이다. 그러므로, 넓은 영역이 관통되는 시간은 대략 350분이지만, 좁은 영역에서의 느린 식각 속도를 감안하여, 좁은 영역이 관통될 때까지 충분히 과도 식각을 하여야 한다. 본 실험에서 가장 좁은 영역인 빗모양 전극의 간극부가 관통될 때까지의 과도식각을 포함한 최종적인 관통 식각 시간은 750분이었다. 앞서 서술하였듯이, (110)/(111) 식각 속도비가 매우 큰 식각 조건에서는, 본 논문에서 제작하는 빗모양 구조물과 같이 실리콘 기판을 관통하는 경우, 과도 식각 시간이 길어도 제작된 빗모양 구조물의 성능에는 큰 영향을 미치지 않는다. 본 논문에서는 빗모양 구조물 전극간의 간극을 3μm로 설계하였으며, 최종적으로 제작된 구조물의 높이/간극 비는 57정도의 매우 큰 값을 보였다. 제작된 빗모양 구조물은 전극의 폭이 18μm, 간극이 7μm 이며, 두께는 실리콘 기판 두께인 400μm이다. 이는 설계 시 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각 실험 결과를 바탕으로 예측한 표 2의 결과와 일치하는 값이다.

그림 7(a)는 550분동안 식각한 후의 빗모양 구동기의 주사전자 현미경(SEM) 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이, 식각되는 부분 중 넓은 부분은 이미 관통이 되어 있지만, 좁은 영역인 빗모양 전극 사이는 아직 관통되지 않은 것을 알 수 있다. 이는 과도 식각으로 해결할 수 있으며, 최종적으로 750분의 식각 후, 모든 영역이 관통되어 릴리즈된 구조물을 제작할 수 있다.(그림 7(b)).

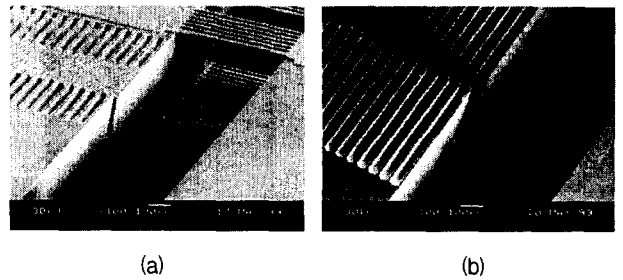


그림 7 관통 전(a)과 관통 후(b)의 빗모양 구동기의 SEM 사진

Fig. 7 SEM photographs of the comb actuator before etch through(a) and after etch through(b)

본 논문에서 구조물은 양면에서 정의하여 제작되며, 이로 인해 정렬 오차가 발생한다. 일반적으로 양면 정렬에서 발생하게 되는 수μm의 정렬 오차는 그림 8(a)에 나타나듯이 빗모양 전극 옆면에 계단 모양의 단차를 형성하게 된다. 하지만, 이러한 정렬 오차는 과도 식각을 하면, 빠르게 식각되는 계단 모양의 모서리 부분이 식각되어 자연스럽게 평탄화되며 (self-planarization) 최종적으로 빗모양 구조물의 성능에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 그림 8은 빗모양 전극의 과도 식각 전과 후의 SEM 사진이며, 그림 8(b)에서 볼 수 있듯이, 과도 식각 후 완전하게 릴리즈된 빗모양 전극 구조물의 옆면은 매끄러운 면을 이루고 있는 것을 알 수 있다.

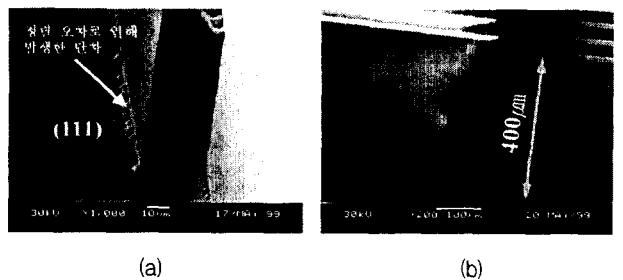


그림 8 과도 식각 전(a)과 후(b)의 빗모양 구조물 전극 부분 확대 사진

Fig. 8 Close-up SEM photographs of the comb finger before overetch(a) and after overetch(b)

그림 7에서 빗모양 전극 구조물과 함께 보이는 양면의 금도금 스프링 구조물은 관통 식각 후에도 KOH 수용액에 의한 별다른 오염 및 파괴를 보이지 않았으며, 이는 그림 9의 관통 식각 후 앞면(그림 9(a))과 뒷면(그림 9(b))의 스프링 형상 SEM 사진에서 더욱 잘 확인할 수 있다. 이는 본 논문에서 사용된 금 구조물이 KOH 수용액에 의해 아무런 영향을 받지 않는다는 것을 의미하며, 이로 인해 관통 식각 전에 추가적인 금속 스프링 보호 공정이 필요치 않으므로, 전체 공정이 단순해진다. 제작된 스프링 구조물은 길이 500μm, 폭 15μm 이며 높이는 14μm이었다.

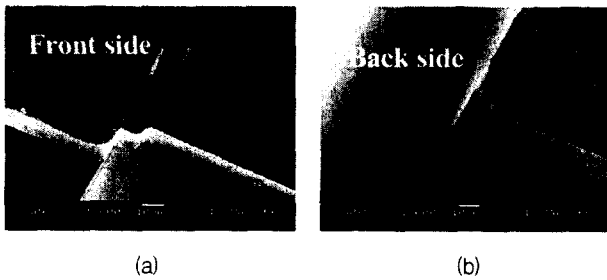


그림 9 관통 식각 후, 앞면(a)과 뒷면(b) 금도금 스프링의 SEM 사진

Fig. 9 SEM photographs of the electroplated gold spring after etch through. (a) front side (b) back side

그림 10은 관통 식각이 끝난 후의 (110) 실리콘으로 제작된 빗모양 전극 구조물 및 질량체 부분과 양면에서 (110) 실리콘을 지지하는 금도금 스프링을 갖도록 관통 식각을 수행한 빗모양 구동기의 전체 형상을 나타내는 SEM 사진이다.

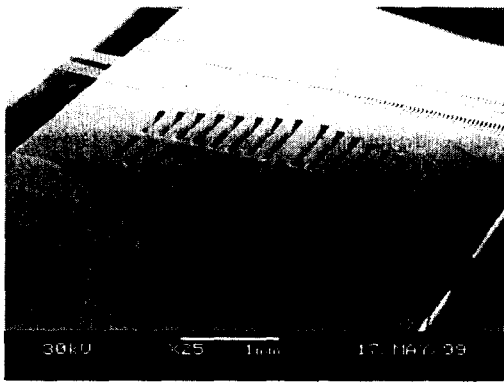


그림 10 제작된 빗모양 구동기의 전체 형상을 나타내는 SEM 사진

Fig. 10 SEM photograph of the fabricated comb actuator

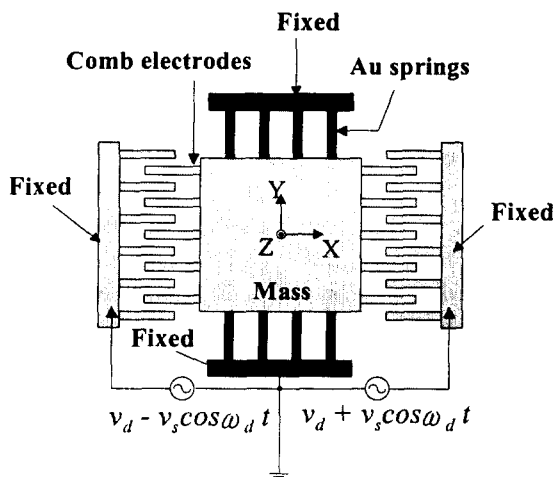


그림 11 빗모양 구동기의 구동 실험 방법을 나타내는 개략도

Fig. 11 Schematic of the experimental setup for a comb actuator

제작된 빗모양 구동기는 그림 11과 같이 전압을 인가하여 광학 현미경 상에서 공진 주파수를 측정하였다. 구동을 위해 직류 바이어스 전압 v_d 와 180도 위상차가 나는 정현파 교류전압 v_s 가 더해진 전압을 빗모양 전극 양쪽에 인가하였다. 구동 전압을 인가하면서, 광학 현미경을 통해 빗모양 구동기를 관찰하면, 공진 주파수 영역 부근에서 공진이 일어나는 것을 관찰할 수 있으며, 이 때 공진이 최대로 일어나는 점을 관찰하면, 구동기의 공진 주파수를 알아낼 수 있다. 본 실험에서 제작된 빗모양 구동기의 구동 주파수는 1430Hz이었고, 광학 현미경으로 관찰 시 오차는 10Hz 이내이다. 그림 12는 정지 모드와 공진 모드에서의 빗모양 전극부와 스프링 부분의 광학 현미경 사진이다.

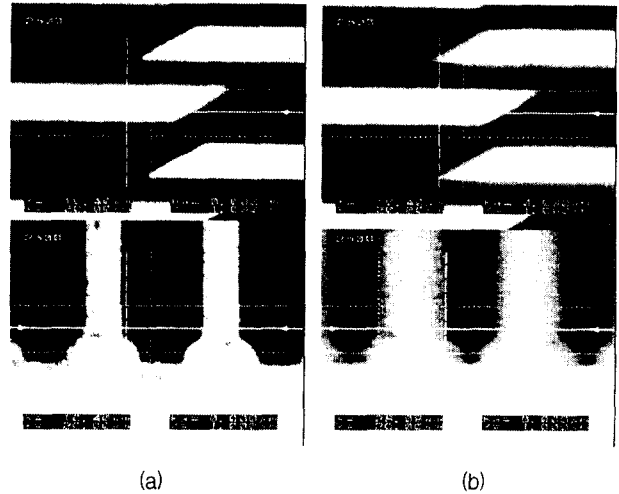


그림 12 정지 모드(a)와 공진 모드(b)에서의 빗모양 구동기의 전극(상)과 스프링(하)부의 광학 현미경 사진

Fig. 12 Photographs of comb fingers(top) and springs(bottom) at initial state(a) and at resonance(b)

5. 결론

본 논문에서는 표면 미세 가공 기술로는 UV-LIGA 공정을, 몸체 가공 기술로는 (110) 실리콘의 이방성 습식 식각을 채택한 복합 미세 가공 기술을 이용하여 빗모양 구동기를 제작하였다. 제작된 (110) 실리콘 빗모양 전극 구조물은 높이 $400\mu\text{m}$, 간극 $7\mu\text{m}$, 높이-간극 비 57의 매우 큰 값을 가지며, 금도금으로 제작된 스프링의 폭과 높이, 길이 및 갯수를 조절하여 구동기의 공진 주파수를 원하는 영역으로 조절할 수 있었다. 본 논문에서 제작된 빗모양 구동기는 수평 방향의 구동 및 수직 방향의 검출 모드를 갖는 가속도계 응용을 목표로 제작되었으며, 가속도계의 성능을 향상하기 위해 도금 스프링 부분의 폭과 높이의 형상을 조절하여 구동부와 검출부의 공진 주파수를 일치하도록 설계하였다. 제작된 빗모양 구동기의 공진 주파수는 1441Hz로 설계되었으며, 측정된 공진 주파수는 1430Hz이다.

기존의 표면 미세 가공 기술과 몸체 미세 가공 기술을 결합한 복합 미세 가공 기술은, (110) 실리콘의 이방성 습식 식각으로 빗모양 전극을 구현하고, UV-LIGA 공정을 이용하여 스프링을 제작하여 빗모양 구동기를 구현한 본 논문의 예처럼 매우 큰 높이-간극 종횡비를 갖는 빗모양 구동기를 제작할 수 있

어, 매우 정밀한 센서나 대변위 구동기에 응용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력 공학공동연구소 주관으로 수행되었음(과제번호 98-031).

참 고 문 헌

- [1] J. M. Bustillo, R. T. Howe, and R. S. Muller, "Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8, pp. 1552-1574, 1998
- [2] H. Guckel, "High-Aspect-Ratio Micromachining Via Deep X-Ray Lithography," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8, pp. 1586-1593, 1998
- [3] H. Miyajima, and M. Mehregany, "High-Aspect-Ratio Photolithography for MEMS Applications," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 220-229, 1995
- [4] G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, and K. E. Petersen, "Bulk Micromachining of Silicon," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8, pp. 1536-1551, 1998
- [5] K. E. Bean, "Anisotropic Etching of Silicon," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-25, No. 10, pp. 1185-1193, 1978
- [6] K. Sato, M. Shikida, and Y. Matsushima, "Characterization of Anisotropic Etching Properties of Single-Crystal Silicon: Effects of KOH Concentration on Etching Profiles," *IEEE MEMS Workshop*, pp. 406-411, 1997
- [7] S. H. Kim, S. H. Lee, H. T. Lim, Y. K. Kim, and S. K. Lee, "Anisotropic Bulk Etching of (110) Silicon with High Aspect Ratio," *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, Vol. 118-E, No. 1, pp. 32-36, 1998
- [8] P. Krause, and E. Obermeier, "Etch Rate and Surface Roughness of Deep Narrow U-grooves in (110)-oriented Silicon," *Journal of Micromechanics & Microengineering*, Vol. 5, pp. 112-114, 1995
- [9] E. Bassous, "Fabrication of Novel Three-Dimensional Microstructures by the Anisotropic Etching of (100) and (110) Silicon," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-25, No. 10, pp. 1178-1185, 1978
- [10] D. R. Ciarlo, "A Latching Accelerometer Fabricated by the Anisotropic Etching of (110) Oriented Silicon Wafers," *Journal of Micromechanics & Microengineering*, Vol. 2, pp. 10-13, 1992
- [11] Y. Uenishi, M. Tsugai, and M. Mehregany, "Micro-Opto-Mechanical Devices Fabricated by Anisotropic Etching of (110) Silicon," *IEEE MEMS Workshop '94*, pp. 319-324, 1994
- [12] J. Mizuno, K. Nottmeyer, T. Kabayashi, K. Minami and M. Esashi, "Silicon Bulk Micromachined Accelerometer with Simultaneous Linear and Angular Sensitivity," *The 9th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, pp. 1197-1200, 1997
- [13] P. Krause, E. Obermeier, and W. Wehl, "Backshooter-A New Smart Micromachined Single-Chip Inkjet Printhead," *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*, pp. 325-328, 1995
- [14] T. M. Harms, M. Kazmierczak, and F. M. Gerner, "Experimental Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop through Deep Microchannels in a (110) Silicon Substrate," *Proceedings of the ASME Heat Transfer Division*, Vol. 1, pp. 347-357, 1997
- [15] R. S. Huang, E. A. Sani, and C. Y. Kwok, "A Novel Accelerometer Using Silicon Micromachined Cantilever Supported Optical Grid and PIN Photodetector," *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*, pp. 663-666, 1995
- [16] K. Ohwada, Y. Negoro, Y. Konaka, and T. Oguchi, "Uniform groove-depths in (110) /--Si anisotropic etching by ultrasonic waves and application to accelerometer fabrication," *Sensors and Actuators*, Vol. A50, pp. 93-98, 1995
- [17] F. Laermer, A. Schilp, K. Funk, and M. Offenberg, "BOSCH Deep Silicon Etching: Improving Uniformity and Etch Rate for Advanced MEMS Applications," *IEEE MEMS Workshop*, pp. 211-216, 1999
- [18] R. Toda, K. Minami, and M. Esashi, "Thin Beam Bulk Micromachining Based on RIE and Xenon Difluoride Silicon Etching," *The 9th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, pp. 671-674, 1997
- [19] C. S. B. Lee, S. J. Han, and N. C. MacDonald, "Multiple Depth, Single Crystal Silicon Microactuators For Large Displacement Fabricated by Deep Reactive Ion Etching," *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 45-50, 1998
- [20] P. C. Hsu, C. H. Mastrangelo, and K. D. Wise, "A High Sensitivity Polysilicon Diaphragm Condenser Microphone," *IEEE MEMS Workshop*, pp. 580-585, 1998
- [21] K. S. Seo, Y. H. Cho, and S. K. Youn, "An Electrostatically-Tunable Switching Micromirror using (110) Silicon Wafers," *Digest of the LEOS Summer Topical Meeting*, pp. 41-42, 1996
- [22] N. Yazdi, and K. Najafi, "An All-Silicon Single-Wafer Fabrication Technology for Precision Microaccelerometers," *The 9th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, pp. 1181-1184, 1997
- [23] C. Burrer, and J. Esteve, "High-precision BESOI-based

resonant accelerometer," *Sensors and Actuators*, A50, pp. 7-12, 1995

[24] H. T. Lim, and Y. K. Kim, "Novel Fabrication of Comb Actuator Using Reactive Ion Etching of Polysilicon and (110) Si Anisotropic Bulk Etching in KOH," *Japan Journal of Applied Physics*, Vol. 37, pp. 7086-7092, 1998

[25] S. H. Kim, S. H. Lee, and Y. K. Kim, "A Novel Fabrication Process for High-Aspect Ratio Comb Actuator Combining (110) Silicon Anisotropic Etching with Electroplating," *The 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 110-113, 1999

[26] C. -W. Baek and Y. -K. Kim, "Novel fabrication process of freestanding metallic microstructures using double electroplating," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 37, Part 1, No. 12B, pp. 7104-7109, 1998

저 자 소 개



김 성 혁 (金 聲 赫)

1996년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 졸업(석사). 1998~현재 동 대학원 전기공학부 박사과정

Tel : 02-888-5017, Fax : 02-873-9953

E-mail : popinjay@plaza1.snu.ac.kr



김 용 권 (金 容 權)

1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 졸업(석사). 1990년 동경대 대학원 졸업(공학박). 1990년 히다찌 중앙 연구소 연구원. 1992년~현재 서울대 전기공학부 부교수

Tel : 02-880-7440, Fax : 02-873-9953

E-mail : yongkkim@plaza.snu.ac.kr



이 상 훈 (李 相 勳)

1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 졸업(석사). 1998년 동 대학원 졸업(공학박). 1998~현재 삼성 전자 광메카 연구소 근무

Tel : 0331-200-3099 Fax : 0331-200-3307

E-mail : ligyro@samsung.co.kr