

# 관성 항법 장치급 서보 가속도계용 다단차 3차원 실리콘 미세 구조물 제작

이 영주<sup>\*,\*</sup>, 이 상훈<sup>\*</sup>, 전 국진<sup>\*</sup>, 김 용권<sup>\*</sup>, 조 동일<sup>\*</sup>  
\*서울대학교 전기공학부

## Fabrication of Multi-stepped Three Dimensional Silicon Microstructure for INS Grade Servo Accelerometer

Youngjoo Yee<sup>\*,\*</sup>, Sang Hoon Lee<sup>\*</sup>,  
Kukjin Chun<sup>\*</sup>, Yong Kwon Kim<sup>\*</sup>, Dong-il Cho<sup>\*</sup>  
\*School of Electrical Engineering, Seoul National University

### Abstract

New fabrication technique was developed to make three dimensional silicon microstructure with five fold vertical steps through entire wafer thickness. Each step is pre-defined on multiply stacked thermal oxide and silicon nitride (O/N) layers by photolithographies. Multi-stepped silicon microstructure is formed by anisotropic etch in aqueous KOH solution with the patterned nitride film as masking layer. Fabricated microstructure consists of four 16 $\mu$ m thick flexural spring beams, 290 $\mu$ m thick proof mass, mesas for overrange stop with 10 $\mu$ m height from the surface of the proof mass, and the other mesas and V grooves used for assembling this structure to the packaging frame of pendulous servo accelerometer. Using the numerical finite element method (FEM) simulator, ABAQUS, mechanical characteristics of the fabricated microstructure by the developed technique was compared with those of the same structure processed by one step silicon bulk etch followed by oxidation and patterning the etched region.

### I. 서론

각종 센서와 액츄에이터의 응용 범위가 확대되고, 다양한 감지 및 구동 원리에 따른 복잡한 미세 구조물의 형상이 요구됨에 따라 입체적인 3차원 구조를 구현 할 수 있는 공정 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 단결정 실리콘 기판(wafer)을 이방성 식각(anisotropic etch)을 이용하여 여러 개의 단차를 가지는 3차원 미세 구조물을 제작하는 새로운 마이크로머시닝 기술을 제안한다.

이 기술은 실리콘 식각을 행할 때 식각 방지막으로 사용되는 실리콘 질화막을 형성될 단차 수만큼 증착하고, 사진 묘화(photolithography) 공정 및 건식 식각(dry etch)으로 식각될 단차들의 영역들을 미리 정의한 후 실리콘 식각을 단계적으로 수행하는 특징을 가지고 있다. 이 기술을 적용하여 관성 항법 장치(inertial navigation system)의 핵심 부품인 초정밀 서보(servo) 가속도계용 다단차 실리콘 펜듈럼(pendulum) 부품 제작을 통하여 제안하는 기술의 실효성을 검증하였으며, 새롭게 제안된 공정과 기존의 펜듈럼 제작 공정으로 만들어진 미세 구

조물의 기계적 특성을 유한 요소법 시뮬레이터를 통하여 분석하고, 새로운 공정으로 제작되는 다단차 미세 구조물의 설계시 고려하여야 할 점에 대해 검토하였다.

### II. 다단차 실리콘 구조물 제작 기술

(100) 결정 방향의 단일한 실리콘 기판에 높은 단차를 가지는 미세 구조물을 형성하는 기술에는 이방성 습식 식각 기술이 널리 활용되고 있다. 그런데, 수십 마이크로미터 이상 되는 두 가지 이상의 식각 깊이(단차)를 가지는 미세 구조물을 제작하기 위해서는 깊은 식각을 진행한 후 다음 단차를 식각하기 위한 형상을 사진 묘화 공정으로 정의하기가 통상적인 반도체 제조 공정으로는 어렵게 된다. 즉, 높은 단차로 인하여 단차 구조의 가장자리 부분에 감광막의 도포가 균일하지 못하게 되고, 심한 경우 가장자리 주변에는 감광막 자체가 도포 되지 않는 경우도 관찰된다.

본 논문에서는 이와 같은 문제를 극복하기 위하여, 다단차 구조를 형성하기 위한 모든 식각 방지막의 형상을 실리콘 이방성 습식 식각 공정 전에 사진 묘화 공정에 의해 정의하고, 미리 정의된 영역을 통해 이방성 식각을 행함으로써 다단차 구조의 실리콘 미세 구조물을 제작하는 기술을 제안한다. 다음의 그림 1에 제안하는 미세 구조물 제작 기술의 개념도를 도시하였다. 제안하는 제작 공정은 각각의 단차를 구성할 때 식각 방지막으로 사용되는 박막 층을 형성된 단차 수만큼 동일한 두께로 미리 증착한다(a). 이 때, 각각의 식각 방지막 사이에 방지막 식각시 식각 정지층으로 사용되는 버퍼층(buffer layer) 박막을 교대로 삽입한다. 이 식각 방지용 박막 및 버퍼층을 사진 묘화 공정으로 미리 형성한다(b). 형성된 박막의 모양에 따라 단계적으로 실리콘을 수산화칼륨(KOH) 용액 등의 이방성 식각액에서 식각 한다(c-f). 요구되는 식각 깊이는 식각 시간을 조절하여 형성한다. 전 단계에 식각된 단차 형상에 사용된 식각 방지막은 식각 방지막만을 선택적으로 식각하여 제거하며, 이 과정에서 식각액에 노출된 식각 방지 막막은 동일한 두께만큼 식각되어, 결과적으로 이후 생성될 단차들의 실리콘 이방성 식각영역을 정의하는 식각 방지막 형상들이 자체 정렬되어 실리콘 표면 쪽으로 전달(transfer)된다(c-d→e→f).

실리콘의 이방성 식각에서 가장 높은 식각 선택도를 나타내는 저압 화학 기상 증착(LPCVD)된 실리콘 질화

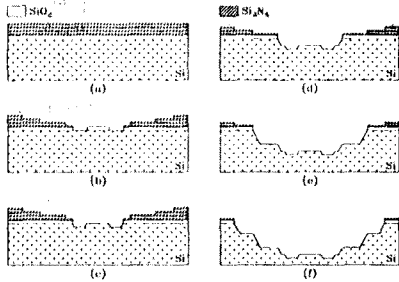


그림 1. 다단차 실리콘 미세 구조를 제작을 위한 공정 개념도

막을 식각 방지막으로 이용하며<sup>[1]</sup>, 식각 방지막을 단계적으로 제거할 때 사용되는 버퍼층으로는 실리콘 산화막을 사용한다. 버퍼층으로 쓰이는 산화막은 식각 방지막을 제거할 때 식각 정지층으로 쓰일 뿐만 아니라, 저압 화학 기상 증착된 질화막의 큰 잔류 응력을 보상해 주는 역할을 하게되어 어떤 산화막을 선택하느냐가 중요하다. 본 연구에서는 버퍼층으로 사용될 산화막으로 삼양 화학 기상 증착(APCVD)된 저온 산화막, 액체 TEOS로부터 플라즈마 촉진 화학 기상 증착(PECVD)법에 의해 증착되는 저온 산화막, 다결정 실리콘을 증착한 후 열 산화에 의해 형성하는 열 산화막의 세 가지 경우를 선택하여 제안하는 공정에서 나타나는 문제점을 비교하였다. 아래의 표 1에 각각의 산화막이 버퍼층으로 사용되었을 때 제안하는 공정에서 나타나는 특성을 실험을 통하여 비교하였다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 저온 산화막인 APCVD 산화막이나 TEOS 산화막의 경우는 미세 구멍(pinhole)이나 크랙(crack) 등의 결함들이 박막에 다수 분포하게 된다. 이 경우 실리콘 단차를 식각하고 질화막을 제거하는 식각 공정 과정에서 이 결함이 식각 방지막인 질화막에 전이되어, 식각시 보호되어야 할 실리콘 표면에 피라미드 형태의 식각 자국(etch pit)을 형성하는 나쁜 결과를 보여준다.

표 1. 버퍼층으로 사용되는 각 산화막의 특성 비교

Oxide	pinhole density	residual stress	etch selectivity to LPCVD Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	
			dry etch	wet etch
APCVD	high	compressive	low	high
TEOS	medium	controllable	medium	very high
thermal	very low	compressive	high	very high

### III. 초정밀 가속도계용 실리콘 펜듈럼 제작

제안하는 다단차 실리콘 미세 구조 제작 기술을 이용하여 관성 항법 장치(inertial navigation system)의 구성요소인 초정밀 서보 가속도계<sup>[2]</sup>의 핵심 부품인 실리콘 펜듈럼 미세 구조물을 제작하였다. 실리콘 펜듈럼은 290 μm 두께의 관성 질량(pendulum)과 관성 질량 부분의 두께 방향의 중심에 위치하는 16 μm 두께의 탄성 스프링(flexure) 및 관성 질량체의 과도 운동을 제한하는 메사(mesa)구조의 10 μm 높이를 갖는 단차(stopper) 및 제작된 펜듈럼 부품을 조립할 때 필요한 50 μm 높이의 단차(coil locator, frame spacer) 등 총 5개의 두께를 갖는 복잡한 3차원 형상을 띠고 있다. 실리콘 펜듈럼의 형상 및 각부 명칭을 그림 2에 개략적으로 도시하였으며, 그림에서 보인 각 부분들은 동일한 기관 상에서 아래면에

도 대칭적으로 제작된다.

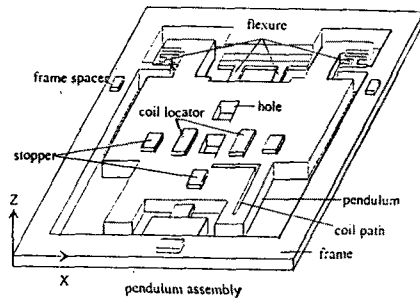


그림 2. 서보 가속도계용 실리콘 펜듈럼의 개략도

펜듈럼 미세 구조를 제작하기 위하여 390 μm 두께를 갖는 인(phosphorus)으로 도핑(doping)된 N형의 4인치 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 질화막 간의 버퍼층 산화막은 열 산화막이 가장 우수하므로, 펜듈럼 제작 공정에서는 다결정 실리콘을 증착한 후 이를 산화시키는 방법으로 버퍼층을 형성하였다. 첫 번째 버퍼 산화막을 열 산화에 의해 2000 Å 성장시켰다. LPCVD 질화막을 700 Å 증착한 후 450 Å의 다결정 실리콘을 증착하고 이 다결정 실리콘 두께 전체를 습식 산화시켰다. 산화 후 측정된 산화막의 두께는 1000 Å 이었다. 동일한 방법으로 질화막과 버퍼층의 열 산화막을 증착 및 산화법에 의해 형성하여 4개의 질화막/산화막 쌍을 형성하였다(그림 1.(a) 참조). 4쌍의 질화막/산화막 층은 웨이퍼의 양면에 동일하게 형성되며, 사진 묘화 공정으로 식각될 각각의 영역을 웨이퍼의 양면에 정의하고 질화막을 건식 식각하며, 식각된 각각의 질화막 아래에 드러난 산화막을 불산 용액(BHF)에서 제거한다. 가장 나중에 이방성 식각으로 형성될 단차의 형상이 가장 위층의 질화막에 먼저 정의되며, 첫 번째로 이방성 식각되는 패턴은 가장 아래층의 질화막에 형성 된다. 형성된 질화막 패턴에 따라 실리콘을 35% 수산화 칼륨 용액(KOH)에서 식각하였다. 하나의 단차 형성을 위한 실리콘 식각 후 실리콘 질화막을 160°C의 인산(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) 용액에서 제거하고, 드러난 버퍼층의 산화막을 불산 용액에서 제거하였다. 이와 같은 식각 공정을 반복하여 앞뒷면에 각각 5개의 단차를 갖는 실리콘 펜듈럼을 제작하였다. 그림 3에는 실리콘 펜듈럼 제작을 위한 공정 흐름도를 도시하였으며, 그림 4는 제작된 실리콘 펜듈럼의 사진이다.

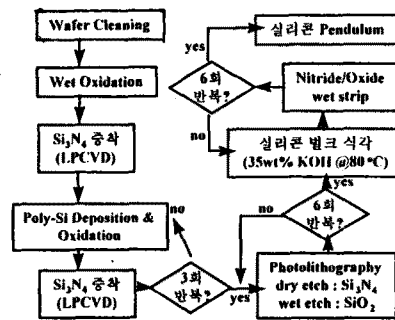


그림 3. 관성 항법 장치용 초정밀 가속도계용 다단차 실리콘 펜듈럼 제작 공정 흐름도



그림 4. 제작된 펜듈럼의 전체 사진(a) 및 탄성 스프링 부분의 전자 현미경(SEM) 사진

공정 결과 하나의 웨이퍼 내에 제작된 펜듈럼의 탄성 스프링(flexure) 두께의 오차는  $1\mu\text{m}$  이하였다.

#### IV. 펜듈럼 구조물의 유한 요소법 해석

이 장에서는 새로 개발된 공정과 기존의 공정으로 제작된 실리콘 펜듈럼 구조를 유한 요소법을 이용하여 해석하여 비교하였다. 사용된 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 FEM(B) (Finite Element Model Builder)와 상용 기계해석 프로그램인 ABAQUS이다. FEM(B) 프로그램은 복잡한 형상을 가지는 모델의 요소를 간편하게 생성하여 주고, ABAQUS의 입력파일을 생성하여 준다. ABAQUS를 이용하여 두 가지 공정으로 제작된 실리콘 펜듈럼 구조물의 공진 주파수와 파손 강도(buckling load) 등의 기계적 특성을 계산하였다. 그림 5에는 기계적 특성을 시뮬레이션하기 위하여 FEM(B)로 생성한 ABAQUS 입력 격자(mesh) 구조이다.

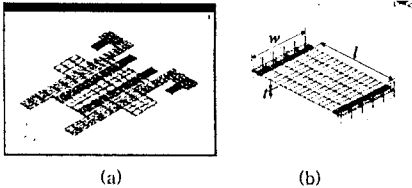


그림 5. 유한 요소법 해석을 위한 실리콘 펜듈럼 구조의 입력 격자(a) 및 탄성 스프링(flexure) 부분의 확대 부분(b)

탄성 스프링(flexure)의 기계적 강도가 제작된 펜듈럼의 파손 강도를 결정짓게 된다. 본 논문에서 제안하는 공정으로 스프링을 제작하게 되면, 식각시 드러나게 되는 실리콘의 (100) 결정면과 (111) 결정면이 이루는 모서리(convex corner)에서 (331) 방향으로 식각이 진행되어<sup>18)</sup> 설계된 마스크상의 치수와 차이를 보이게 된다. 그러나, 스프링의 두께를 조절하면, 설계한 치수의 펜듈럼에서 요구되는 동일한 기계적 성능을 얻을 수 있게 된다. 다음의 그림 6에는 개발된 공정에 의해 제작된 실리콘 펜듈럼 구조물에 대한 ABAQUS 해석 결과인 공진 모드를 보여 주며, 표 2에는 동일한 포토 마스크로 기존의 공정에서 제작된 펜듈럼과 새로 개발된 공정으로 제작된 펜듈럼의 기계적 해석의 결과를 정리하였다. 해석 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 새로운 실리콘 다단차 미세 구조물 형성 기술로 제작된 실리콘 펜듈럼은 실리콘 이방성 식각과 식각 방지막 패터닝을 번갈아 하는 기존의 공정으로 제작된 펜듈럼과 기계적으로 동일한 특성을 갖는다. 즉, 본 논문에서 제안하는 다단차 구조물 제작 기술의 유용성을 검증할 수 있었다.

그러나, 본 논문에서 제안하는 공정은, 앞서도 언급한 바와 같이 식각 과정에서 모서리가 드러날 경우 (331)

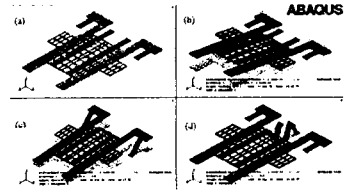


그림 6. 제작된 실리콘 펜듈럼 구조물의 유한 요소법 해석 결과. 입력 격자(a) 및 제 1(a), 제 2(c), 제 3(d) 공진 모드

결정 방향의 식각 진행 면이 생성되어 야기되는 마스크 패턴과 구조물의 수평 방향의 치수 차이를 마스크 설계 단계에서 보정해 주어야 하는 문제점을 내포하고 있다.

표 2. 실리콘 펜듈럼의 기계적 특성 해석 결과 비교

펜듈럼 제작방식	탄성 스프링(flexure) 치수		공진 주파수[Hz]	파손 강도[mN]
	길이(l)	폭(w)		
개발된 방식	2.2mm	1.0mm	17.14	1.883
		16.16 $\mu\text{m}$	19.12	1.652
기존방식	2.0mm	1.2mm	15.77	1.752

#### V. 결론

본 논문에서는 수십 마이크로미터 이상의 여러 개의 깊은 단차를 요구하는 복잡한 실리콘 미세 구조물을 제작하는 새로운 기술을 제안하였으며, 이 기술을 적용하여 관성 항법 장치급 실리콘 가속도계에 사용되는 실리콘 펜듈럼 구조물을 제작한 결과를 보여 주고 있다. 개발된 공정으로 하나의 실리콘 펜듈럼 구조물 내에  $390\mu\text{m}$ ,  $300\mu\text{m}$ ,  $290\mu\text{m}$ ,  $40\mu\text{m}$ ,  $16\mu\text{m}$ 의 다섯 가지 두께의 다단차 구조를 구현하였으며, 이 공정은 선 식각 방지막 패터닝, 후 실리콘 이방성 식각으로 특징 지워질 수 있다. 새로운 단차 형성 기술은 기존의 펜듈럼 제작 공정에서 사진 묘화시 발생하는 문제를 극복할 수 있는 반면, 단계적 식각에서 파생되는 모서리 과도 식각으로, 설계된 마스크와 식각된 구조물의 수평 방향 치수가 차이가 나는 문제를 관찰할 수 있었다. 그러나, 이 차이는 예측할 수 있으며, 마스크 설계시 보정으로 극복할 수 있다. 또한, 새로 개발된 공정으로 제작된 실리콘 펜듈럼을 유한 요소법으로 해석한 결과, 기존의 공정으로 제작한 구조물과 기계적 특성이 동일함을 검증할 수 있었으며, 따라서, 제안하는 다단차 3차원 실리콘 미세 구조물 제작 기술의 적합성을 확인할 수 있었다.

\* 본 연구는 국방과학연구소의 지원(자동제어 특화연구센터 42과제)으로 수행되었으며, 연구에 많은 도움을 주신 서 계범 연구원, 문 홍기 연구원, 헌진 정원의 김 종욱 과장님께 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] 이영주, 전국진, 부종욱, 김성태, "유속 감지를 위한 실리콘 유량센서의 설계 및 제작," 전자공학회논문지, 제 31권, A편 제 5호, pp. 571-578, 1994. 5.
- [2] 전국진, 이영주 외, "유도무기 관성항법장치용 실리콘 가속도계," 정밀유도제어 기술 심포지엄, 진부령, 1995. 8.
- [3] H. Seidel *et al.*, "Anisotropic Etching of Crystalline silicon in Alkaline Solutions," J. Electrochem. Soc., vol. 137, no. 11, pp. 3612-3625, Nov. 1990.