

논문 99-8-1-08

## 마이크로 공진 구조체 제작을 위한 다층 폴리실리콘의 스트레스 특성 최창익, 이창승, 장원익, 홍윤식, 이종현, 손병기\*

### Stress characteristics of multilayer polysilicon for the fabrication of micro resonators

C. A. Choi, C. S. Lee, W. I. Jang, Y. S. Hong, J. H. Lee, and B. K. Sohn\*

#### 요 약

MEMS(Microelectromechanical System) 기술분야에서 폭넓게 사용하고 있는 폴리실리콘 박막을 이용하여 폴리실리콘 미소 공진 구조체를 제작하였다. 폴리실리콘 증착은 저압기상화학증착 장비를 사용하여 대칭적 두께로 박막을 적층하였고 폴리실리콘의 응력과 응력구배를 최소화시키기 위한 적층, 도핑 방법 및 열처리에 따른 특성을 분석하였다. 이를 위하여 브리지 빔과 캔틸레버 테스트 패턴을 제작하여 기계적 응력 특성을 측정하였으며, 아울러 공정 조건별 개별 시료에 대한 물성을 XRD, SIMS등으로 분석하였다. 공진 구조체는 대칭적 증착 구조를 가지며, 최종적으로 6.5 $\mu\text{m}$ 의 두께로 적층되었다. 제작된 평면형 공진 구조체의 진동특성은 직류 15V, 교류 0.05V의 구동전압, 1000mtorr 압력에서 공진 진폭이 5 $\mu\text{m}$ , Q값이 1270임을 보였으며, 개발된 마이크로 폴리실리콘 공진체는 마이크로 자이로 및 가속도 센서에 응용될 수 있다.

#### Abstract

Micro polysilicon actuators, which are widely used in the field of MEMS (Microelectromechanical System) technology, were fabricated using polysilicon thin layers. Polysilicon deposition were carried out to have symmetrical layer structures with a LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) system, and we have measured physical characteristics by micro test patterns, such as bridges and cantilevers to verify minimal mechanical stress and stress gradient in the polysilicon layers according to the methods of multilayer deposition, doping, and thermal treatment, also, analyzed the properties of each specimen, which have a different process condition, by XRD, and SIMS etc.. Finally, the fabricated planar polysilicon resonator, symmetrically stacked to 6.5 $\mu\text{m}$  thickness, showed Q of 1270 and oscillation amplitude of 5 $\mu\text{m}$  under DC 15V, AC 0.05V, and 1000 mtorr pressure. The developed micro polysilicon resonator can be utilized to micro gyroscope and accelerometer sensor.

#### 1. 서론

반도체 공정기술을 이용한 MEMS (microelectromechanical system) 제작기술은 압력, 가속도센서 등 특히 물리제측 센서의 소형화에 큰 기여를 하고 있다.

일반적으로 멤즈 기술은 기판가공을 위주로 하는 벌크가공 (bulk micromachining)형 멤즈와 기판의 표면 박막 가공을 위주로 하는 표면가공 (surface micromachining)형 멤즈로 개발되고 있다.

\* 한국전자통신연구원 원천기술연구본부  
(Telecommunication basic research lab., ETRI)  
\*\* 경북대학교 전자전기공학부 (School of electronics and Electrical Eng., KNU)

표면가공형의 경우 사용하는 박막의 스트레스, 강도 등의 물리적인 특성에 따라 응용하고자 하는 구조체 제작 특성에 큰 영향을 미친다. 특히 멤즈 기술에서 진

동체를 이용하는 센서 제작일 경우 구조물로서 기계적 특성 및 전기적 응용성이 뛰어난 단결정 또는 다결정의 실리콘 재료가 널리 사용되고 있다. 특히 폴리실리콘 재료는 전기적 특성이 우수하고 증착 및 식각 등의 가공공정이 용이하여 표면가공형 멤즈 분야에서 많이 이용되고 있는 박막재료이다.

정전 구동형 공진체를 이용한 자이로센서 제작과 같이 폴리실리콘의 구동 구조물이 표면에서 떠있는 상태로 제작해야 할 경우, 표면에 지지된 앵커부분을 제외하고는 스프링, 구동전극체 및 질량구조물 등은 희생층(sacrificial layer) 산화막 제거 후 변형이 없이 유지되어야 한다. 또한 구동 구조물은 기판표면과의 정전력 또는 유동 액체의 표면장력에 의한 고착현상을 방지하여야 하는 기술적 어려움이 있다.

이와 같이 표면가공 분야에서 수  $\mu\text{m}$  두께로 증착되어 사용되는 폴리실리콘은 주로 저압기상화학증착(LPCVD; low pressure chemical vapor deposition) 방법에 의하여 기판표면에 증착되어 사용되고 있으나 멤즈 제작 분야에서는 주로 전기적인 재료특성보다 기계적인 재료특성이 매우 중요하다. 특히 기판 표면에서 부유된 상태로 진동하는 미소 구조체를 갖는 자이로센서와 같이 기계적인 진동체 특성을 유지하기 위해서는, 재료의 내부 응력을 감소시켜 최종 구조물의 변형이 없어야 한다.

기상화학증착법으로 증착되는 폴리실리콘의 내부 스트레스의 크기는 폴리실리콘의 그레인 사이즈, 다결정 구조의 결정방향, 불순물 농도 및 열처리 정도에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있어, 표면가공형 멤즈 제작시 사용 용도에 따라 공정조건을 최적화 시켜야 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 전술한 멤즈용 진동구조체 제작에 필요한 저응력 폴리실리콘을 얻기 위하여 LPCVD 공정에 의한 적층방법과 도핑 및 열처리 방법에 따른 폴리실리콘의 스트레스 특성을 분석하여 보고 최종적으로 SOI(silicon on insulator) 구조를 갖는 평면형 공진 구조체를 제작하여 기계적인 공진 특성을 분석하였다.

## 2. 폴리실리콘 시료 제작

본 실험은 우선 다층으로 적층된 폴리실리콘에 대한 잔류응력의 변화 특성을 관찰하기 위하여 시료제작을 대칭적 두께로 적층을 할 경우와, 비대칭적 두께로 적

층 하는 방법으로 구분하고, 이를 다시 도핑과 열처리를 하는 과정으로 세분하여 각각의 시료 기판 박막의 잔류응력을 측정하고자 한다. 측정방법은 리소그래피 공정과 희생층 식각공정을 행한 후, rotating beam pair, cantilever beam 등의 테스트 패턴을 제작하여 응력을 측정하였으며 시료제작 흐름도는 그림 1에 나타내었다.

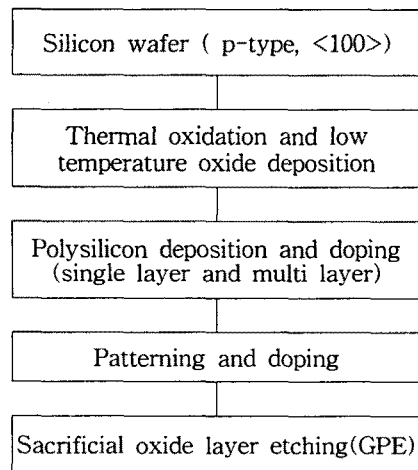


그림 1. 폴리실리콘 시료 제작 흐름도.

Fig. 1. Flow chart of polysilicon specimen fabrication.

시료는 결정면이(100), 비저항이  $6-8\Omega \cdot \text{cm}$ 인 붕소가 도핑된 P형 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하였고 희생층 박막으로는 먼저 기판을  $950^\circ\text{C}$ ,  $\text{H}_2/\text{O}_2$  분위기에서 산화막 두께를  $3000\text{\AA}$  정도로 성장시킨 후, LPCVD 공정으로 LTO (low temperature oxide) 박막을  $1.5\mu\text{m}$  두께로 증착 하였다. 폴리실리콘 증착은 LPCVD 방법으로  $\text{SiH}_4$ 를 사용하여  $625^\circ\text{C}$ 에서 수행 하였으며, 단층 및 다층으로 쌓은  $2\mu\text{m}$  두께의 폴리실리콘 증착과 불순물 도핑은 구조적으로 대칭 또는 비대칭적인 구조가 되게 하였고, 도핑은  $\text{POCl}_3$ 로써 온도  $900^\circ\text{C}$ 에서 수행하였다. 폴리실리콘 박막 증착이 완료된 시료는 rotating beam pair, cantilever beam 등의 잔류 응력 측정용 패턴을 포토리소그래피 공정으로 구현한 다음 전식각으로 폴리실리콘을 식각하고, 최종 질소 분위기에서 설정된 온도에 따라 시료별로 열처리 공정을 수행하였다.

폴리실리콘 아래층의 희생층 산화막은 메탄올( $\text{CH}_3\text{OH}$ )과 불화수소(HF)의 기화 증기를 이용한 GPE(gas phase etching)방법으로 희생층 산화막을 식

각하여 측정하고자 하는 패턴을 기판으로 부터 플로팅 (floating) 되게 하였다.

### 3. 응력 측정 원리 및 방법

박막의 잔류응력을 측정하는 방법은 비파괴 검사와 파괴 검사로 구분할 수 있다. 비파괴 검사에는 X-ray 와 Raman spectroscopy를 이용하는 격자변형 측정법, 레이저를 이용하여 웨이퍼의 곡률을 측정하는 wafer bowing 방법 등이 있다. 파괴 검사에는 balloon법, load-deflection법과 기판에서 분리된 미세 구조체 (released microstructure)를 이용하는 측정법이 있다. 최근들어 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작된 미소 구조체인 bridge<sup>[1]</sup>, ring and beam<sup>[2]</sup>, micro strain gauge<sup>[3]</sup>, rotating beam pair structure<sup>[4]</sup> 등이 잔류 응력의 측정에 많이 사용되고 있다. 구조물을 기판으로 분리할 때, 잔류응력에 의하여 구조물에 변형이 일어나는 원리를 이용하여 박막의 응력을 측정한다. 본 논문에서는 미소 구조체인 bridge와 rotating beam pair 구조체를 이용하여 박막의 응력을 측정하였으며, 캔틸레버를 이용하여 박막의 응력 구배를 측정하였다. 이러한 측정용 미세 구조물을 그림 2에 나타내었다. rotating beam pair 구조체는 버니어 게이지(vernier gauge)를 이용하여 박막의 변형을 측정하며 분해능은 0.2 $\mu\text{m}$  이며, 그림 2(b)에 나타내었다. 박막의 잔류 응력은 미소 구조체를 이용하여 구한 박막의 변형률(strain)과 박막의 물질 상수인 탄성률(Young's modulus)을 이용하여 계산될 수 있으며, 구조체에 따른 박막의 변형률을 측정하는 방법을 아래에 설명하였다. 브릿지는 박막의 성질과 상관없이 브릿지 빔의 기하학적인 크기만으로 변형률을 측정할 수 있으나, 압축 변형률의 측정만이 가능하고, 그림 2(c)와 같이 종횡비(aspect ratio)가 다른 빔의 배열이 필요하다. 브릿지에 대한 buckling criteria 는 아래와 같다<sup>[1]</sup>.

$$\epsilon = \frac{\pi^2 h^2}{3 L_c^2} \quad (1)$$

여기에서  $\epsilon$  는 박막의 변형률,  $h$ 는 박막의 두께,  $L_c$ 은 버클링(buckling)이 일어나지 않은 가장 긴 빔의 길이이다. 빔의 길이는 50 $\mu\text{m}$ ~1500 $\mu\text{m}$  이며, 측정 가능한 변형률은 5.8 $\times 10^{-6}$ ~5.2 $\times 10^{-3}$  사이의 값이다.

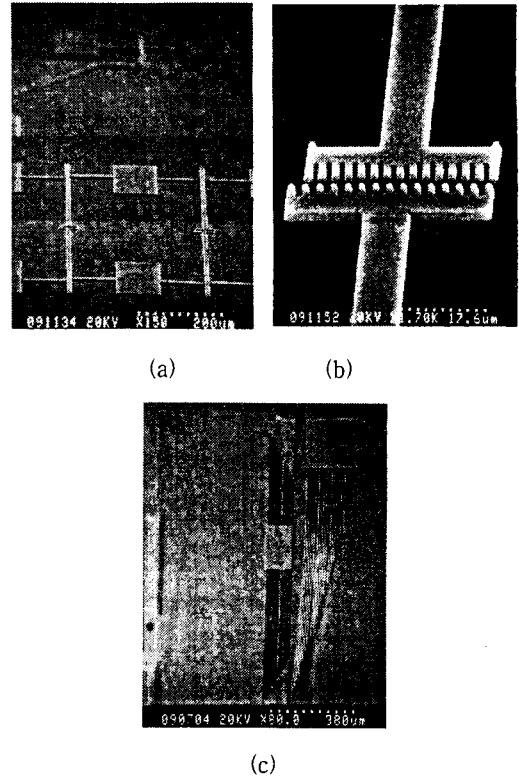


그림 2. 응력과 응력구배를 측정하기 위한 미세 구조물의 SEM 사진. (a) 회전빔 구조체, (b) 버니어 게이지, (c) 브릿지와 캔틸레버.

Fig. 2. SEM photographs of released microstructures for stress and stress gradient measurement. (a) rotating beam pair structure, (b) vernier gauge, (c) bridge and cantilever.

Rotating beam pair 구조체에서는 잔류 응력에 의한 박막의 변형량이 빔의 회전으로 전환되며, 이렇게 증폭된 변위는 빔의 끝부분에 설치된 버니어 게이지를 이용하여 검출한다. 브릿지와는 달리 인장 응력 및 압축 응력의 측정이 가능하고 그림 2(a)와 같이 3개의 빔으로 구성되며, rotating beam pair 구조체의 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$\epsilon = \frac{yO}{(L_A + L_B + W)(L_C + 0.5O)} \quad (2)$$

여기에서  $y$ 는 변위로 버니어 게이지를 통해 읽히는 값이며,  $L$ 은 각 빔의 길이이며,  $O$ 와  $W$ 는 구조체의 크기를 나타내는 상수이다. 측정 가능한 변형률은 9.8 $\times 10^{-6}$ ~1.5 $\times 10^{-3}$  이다.

박막의 두께 방향으로 응력의 불균일로 인하여 발생되는 응력구배는 휨 모멘트(bending moment)를 발생시키며, 캔티레버에서 상하로 변형(deflection)을 일으킨다. 응력구배는 캔티레버 빔의 끝에서 변형량(d)을 측정함으로써 계산되며, 응력구배( $\sigma_g$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_g = \frac{Ed}{L^2} \quad (3)$$

여기에서 d는 캔티레버 빔 끝에서의 변위, L은 캔티레버빔의 길이, E는 탄성율이다. 그림 2(c)에서는 너비 1-20 $\mu\text{m}$ , 길이 50-1500 $\mu\text{m}$ 의 캔티레버 빔을 나타내었다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4-1. 다층 폴리실리콘의 특성

저압화학기상증착법으로 625 $^{\circ}\text{C}$ 에서 증착하고 인을 도핑한 후 질소 분위기하에서 어닐링된 폴리실리콘 박막의 XRD 패턴을 그림 3에 나타내었다. 2 $\mu\text{m}$  두께의 단층(single layer) 시료 (d)는 (220) 방위로 우선 배향되어 있으며, 0.5 $\mu\text{m}$  박막을 4번 적층한 다층(multi layer) 시료 (a,b,c)는 (111), (220), (311) 방위의 결정이 혼재된 다결정의 형태를 가진다. 다층 시료는 그림 4과 같이 어닐링 온도에 따라 우선 배향성이 변화되는 것을 관찰하였다. 어닐링 온도가 증가함에 따라 (220) 배향성은 감소하지만 (111) 배향성은 증가하는 경향을 보인다. 도핑된 불순물 인은 폴리실리콘에서 실리콘 원자의 이동성을 증가시켜, 폴리실리콘의 결정성장을 촉진시키는 것으로 알려져 있으며, 어닐링에 의한 배향성 변화에 직접적인 영향을 미친 것으로 사료된다<sup>[5]</sup>. 폴리실리콘 박막의 잔류 응력은 어닐링 온도에 따라 감소한다는 결과로 미루어 볼 때, 박막의 우선 배향성과 잔류 응력은 밀접한 관계가 있을 것으로 추정되며<sup>[6]</sup> 이 분야에 대한 깊이있는 연구가 필요하다고 생각된다.

다층 폴리실리콘 적층방법은 두꺼운 박막을 형성시킬 수 있다는 장점이 있는 반면에 폴리실리콘/폴리실리콘 계면이 발생된다는 단점이 있다. 폴리실리콘/폴리실리콘 계면에 도핑된 불순물이나 산소가 쌓이게 되어 폴리실리콘의 전기적, 기계적 성질에 영향을 미치게 된다. 또한 여러층으로 구성된 다층 폴리실리콘을 이용하여 맵스 구조물을 제조하는데 있어서 한 층으로된 박막에 비하여 잔류 응력의 제어가 어렵다는 단점이 있다.

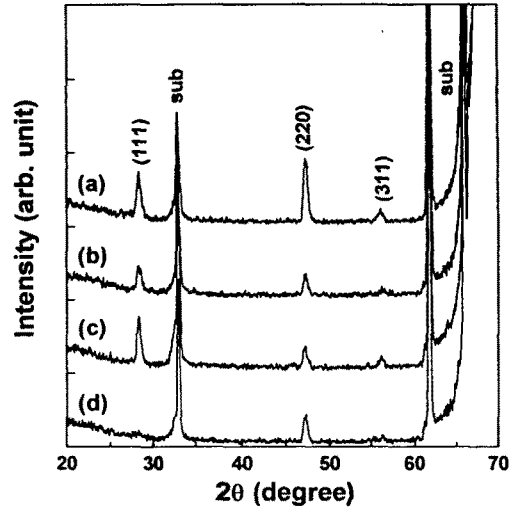


그림 3. 어닐링 온도에 따른 다층(a-c) 및 단층(d) 폴리실리콘 박막의 XRD 패턴.

(a) 900 $^{\circ}\text{C}$  (b) 1000 $^{\circ}\text{C}$  (c) 1100 $^{\circ}\text{C}$  (d) 1000 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. XRD patterns of multilayer(a-c) and single layer(d) polysilicon films with various annealing temperature.

(a) 900 $^{\circ}\text{C}$  (b) 1000 $^{\circ}\text{C}$  (c) 1100 $^{\circ}\text{C}$  (d) 1000 $^{\circ}\text{C}$

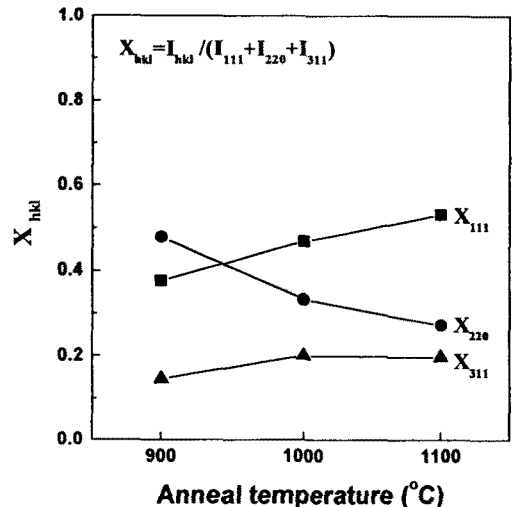
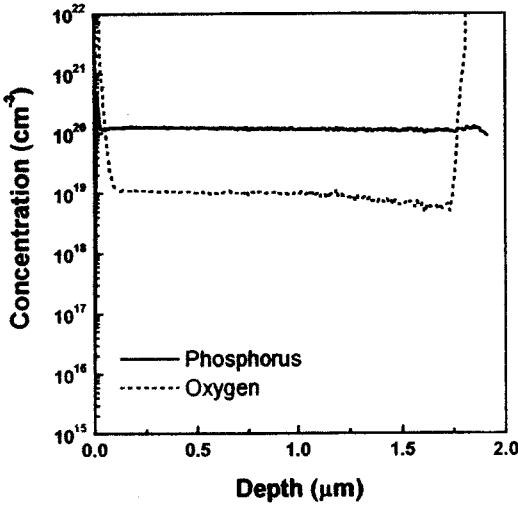
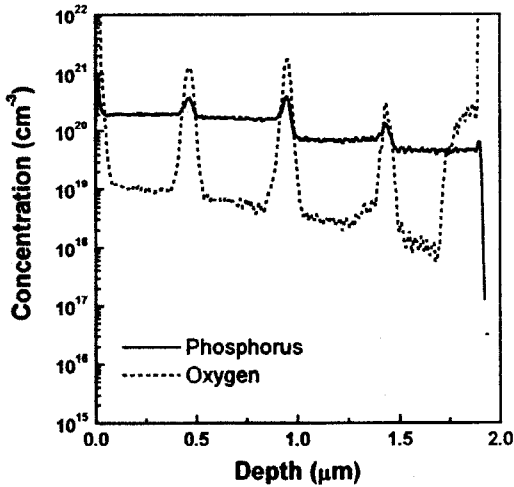


그림 4. 어닐링 온도에 따른 다층 폴리실리콘 박막의 우선 배향성 변화.

Fig. 4. Preferred orientation of multilayer polysilicon films with annealing temperature.



(a)



(b)

그림 5. 도핑과 어닐링을 수행한 폴리실리콘 박막의 SIMS 농도 분포도.

(a) 단층 박막, (b) 다층 박막

Fig. 5. SIMS depth profiles of polysilicon films after doping and annealing.

(a) single layer film, (b) multilayer film

그림 5는 인 도핑후 1000°C에서 1시간 동안 어닐링된 폴리실리콘 박막의 두께에 따른 SIMS 농도 분포도이며, (a)는 단층으로 (b)는 4층으로 이루어진 2μm 두께의 폴리실리콘 박막이다. 단층으로 이뤄진 박막에서는 도

핑된 인의 농도가 균일하게 분포되어 있으며 산소도 같은 경향을 보인다. 반면 다층 폴리실리콘에서는 상대적으로 많은 양의 인과 산소가 폴리실리콘/폴리실리콘 계면에 쌓여 있으며 두께 방향으로 불균일한 농도 분포를 나타낸다. 계면의 산소는 계면에 얇은 산화층이 존재한다는 것을 의미하며, 폴리실리콘의 산화는 압축 응력을 발생시키므로 이러한 계면 산화층은 응력에 큰 영향을 미칠 것이다. 또한 인의 불균일한 농도 분포는 박막의 응력 분포에 직접적인 영향을 미친다. 표 1에는 두가지 시료에 대한 불순물의 평균 농도를 SIMS 자료를 이용하여 정리하였다. 다층 박막은 계면의 영향으로 단층 박막에 비해 산소와 인의 평균 농도가 높은 것으로 조사되었으며, 폴리실리콘 박막은  $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$  정도의 고농도로 도핑되어 있다.

표 1. 폴리실리콘 박막의 불순물 원자의 평균농도.

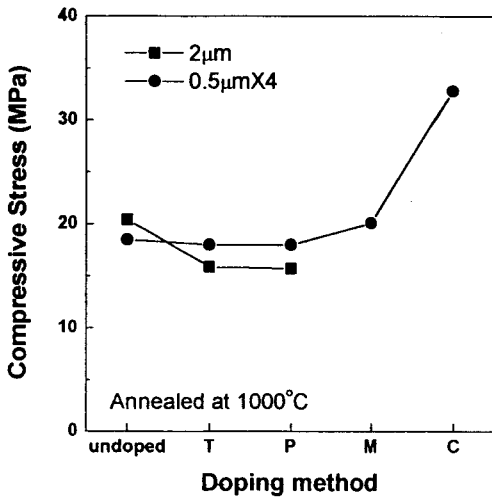
Table 1. The average concentration of impurity atoms in polysilicon films.

Elements	Atomic concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	
	single layer	multi layer
Oxygen	$1.94 \times 10^{19}$	$9.79 \times 10^{19}$
Phosphorus	$1.18 \times 10^{20}$	$1.35 \times 10^{20}$

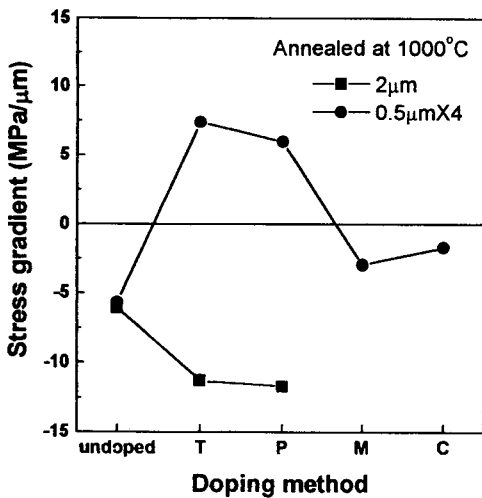
4-2. 잔류응력과 응력구배

마이크로머시닝 기술을 이용한 미세 구조물의 제작에 있어서 박막의 잔류응력의 제어 기술은 필수적이며, 이는 미소 구조물 구현시 과도한 잔류 응력은 구조체를 변형 혹은 파괴시키기 때문이다. 폴리실리콘 박막에서 도핑된 불순물의 농도 분포가 응력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 여러 가지 도핑 방법이 시도되었다. 통상적인 방법으로 박막을 형성한 다음에 박막의 전면에 도핑을 하는 방법(T 도핑), 박막을 식각하여 선평 10μm 이하의 미세 구조물을 형성한 다음 도핑을 하는 방법(P 도핑), 4층으로 이루어진 박막에서 첫번째 층과 세번째 층에 도핑을 하는 방법(M 도핑), 그리고 M 도핑과 P 도핑을 함께 사용하는 복합적인 방법으로 첫번째 층과 세 번째 층에 도핑을 한 다음 박막을 패터닝하여 구조물을 형성한 다음 다시 도핑을 하는 방법(C 도핑)으로 시료를 분류하여 수행하였다. 이중 C 도

핑 방법은 도핑된 불순물의 농도가 가장 큰 방법이다. 도핑은 포클 액체 소스를 이용하여 인(P)을 도핑하였으며 도핑 시간(30분)과 도핑 온도(900°C)는 각각의 경우에 대하여 동일하게 유지하였으므로, 도핑된 불순물의 농도는 도핑 횟수에 비례한다. SIMS 분석 결과로부터 1회 도핑시 인의 농도는  $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$  정도이다.



(a)



(b)

그림 6. 도핑 방법에 따른 폴리실리콘 박막의 응력(a)과 응력구배(b).

Fig. 6. Stress(a) and stress gradient(b) of polysilicon film with doping method.

그림 6에는 위에서 설명한 도핑 방법에 따른 폴리실리콘 박막의 응력과 응력구배를 나타내었다.

도핑되지 않은 박막에서는 단층 시편의 응력이 높으나 T 도핑과 P 도핑에서는 단층 시편의 응력이 다층 시편보다 낮게 조사되었으며, 이는 다층 시편에서 폴리실리콘 박막 적층시, 박막 계면의 산화층 형성 영향으로 높은 응력을 보이는 것으로 사료된다.

다층 시편에서 불순물의 농도가 높은 M 도핑과 C 도핑에서 응력이 증가하는 경향을 보이는데, 이는 폴리실리콘 박막에서 인 원자가 압축응력을 발생시킨다는 연구와 일치한다<sup>[5]</sup>.

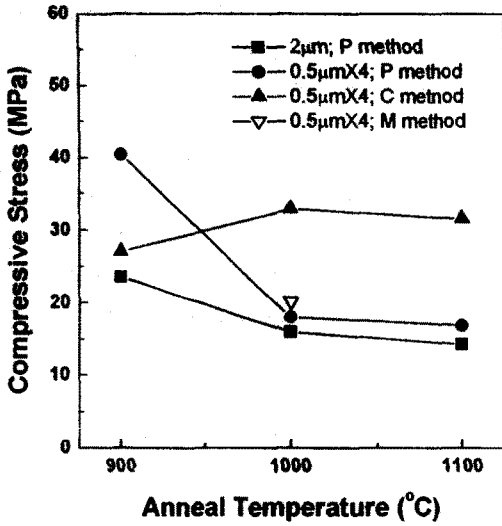
응력구배는 캔티레버를 이용하여 측정하였으며 양의 값은 캔티레버가 상 방향으로 휘어지는 것을 의미한다. 응력구배는 불순물의 농도 분포에 직접적인 영향을 받으며, 그림 6(b)와 같이 도핑 방법에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다. 도핑되지 않은 시편의 응력구배는 비슷한 정도의 음의 값을 가지지만, T 도핑과 P 도핑을 실시한 시편에서는 단층 시편과 다층 시편은 반대의 값을 가진다.

C 도핑법이 가장 균일한 농도 분포를 가질 것으로 예상되며, 다층 시편에서 이 방법으로 도핑한 시료의 응력구배가 가장 작은 것으로 나타났다.

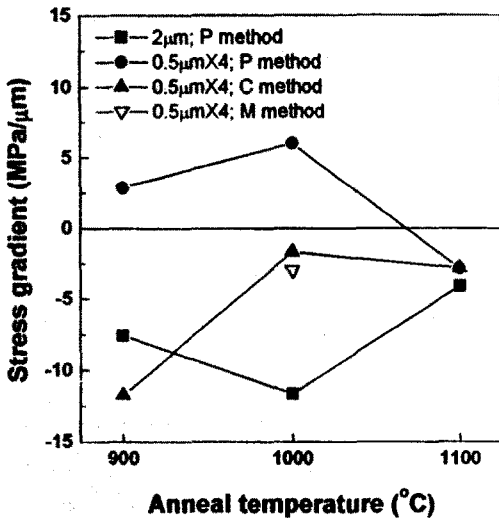
그림 7은 어닐링 온도에 따른 폴리실리콘 박막의 응력과 응력구배를 나타내었다. P 도핑된 단층 시편과 다층 시편에서 어닐링 온도가 증가함에 따라 응력이 감소하는 경향을 보이며, 단층 시편이 보다 낮은 응력을 나타낸다. 도핑되지 않은 증착 후의 다층 폴리실리콘은 300MPa 정도의 압축응력을 가지며, 고온 열처리를 통하여 압축응력이 감소한다.

일반적으로 응력 완화는 전위 이동, 결정결함 확산, 결정 성장과 같은 변화를 수반한다. 인은 폴리실리콘의 결정성장을 촉진한다고 알려져 있으며, 도핑된 인은 먼저 폴리실리콘 계면을 따라 빠르게 확산된 다음 결정결함을 발생시키며 결정 내부로 확산된다. 도핑 농도가 큰 C 도핑의 경우 어닐링 온도에 관계없이 다른 도핑 방법에 비해 큰 응력을 나타내며, 인은 폴리실리콘에서 압축응력을 발생시키기 때문에 인의 농도가 클수록 압축응력은 높게 나타난다. 어닐링 온도에 따른 폴리실리콘 박막의 응력구배는 더욱 복잡한 형태로 나타난다.

다층 시편에서 P 도핑과 C 도핑된 박막은 1000°C 이하에서 열처리된 시편은 반대부호의 응력구배를 가지지만, 1100°C에서는 계면 산화의 영향으로 비슷한 정도의 응력구배를 보인다.



(a)



(b)

그림 7. 어닐링 온도에 따른 폴리실리콘 박막의 응력

Fig. 7. Stress(a) and stress gradient(b) of polysilicon film with annealing temperature.

다층으로 적층된 시료의 응력구배 특성을 그림 8과 같이 다층 박막의 응력은 폴리실리콘의 응력과 계면 산화층의 응력으로 구성된다고 가정하면, 응력구배는 계면간 거리의 함수로 표현할 수 있다.

$$\sigma_g = \frac{6}{h^3} t_{ox} (\sigma_{ox} - \sigma_{poly}) \sum_i l_i \quad (4)$$

여기에서  $\sigma_{ox}$  는 산화층의 응력,  $\sigma_{poly}$  는 폴리실리콘의 응력,  $t_{ox}$  는 산화층의 두께, 그리고  $l_i$  는 계면의 상대적인 위치이다. 위 식에서  $(\sigma_{ox} - \sigma_{poly})$  는 상수이며, 대칭적인 적층을 이용하면  $\sum l_i$  항이 최소화되어 계면 산화층 및 불순물 편석의 영향이 거의 없는 낮은 응력구배를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서 이러한 예상을 바탕으로 적층되는 박막의 두께를 변화시켜 값의 변화에 따른 박막의 응력과 응력구배를 조사하여 그림 9에 나타내었다.  $\sum l_i$  은 -0.4에서 +0.4까지 변화시켰으며,  $\sum l_i = 0$  인 박막은 5000Å 두께의 박막을 4회 적층하였고, 그 외의 다른 값을 가지는 박막은 4000Å과 6000Å 두께의 박막으로 적층 순서를 조합하여 다층 박막 시편을 제조하였다. 다층 박막의 응력은  $\sum l_i$  값에 관계없이 일정한 값을 유지하였다.  $\sum l_i$  값이  $\pm 0.2, \pm 0.4$  인 박막(비대칭 적층)에서는  $\sum l_i$  에 따라 응력구배가 증가하는 경향을 보이지만,  $\sum l_i$  이 0인 박막(대칭적 적층)은 양의 응력구배를 가지며 비대칭 박막에 비하여 반 정도의 응력구배를 가진다.

이러한 결과는 다층 박막에서 적층되는 박막의 두께를 변화시켜 응력구배를 제어할 수 있는 가능성을 제시하였으며, 다층 폴리실리콘의 응력 구배를 결정하는 주요한 인자는 계면에 형성되는 산화층과 불순물의 편석으로 판단된다.

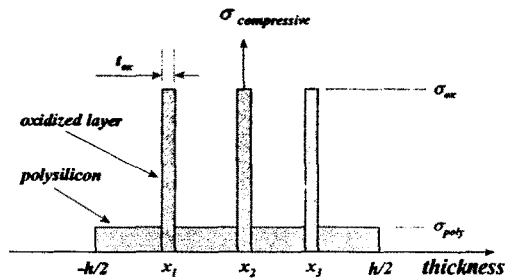
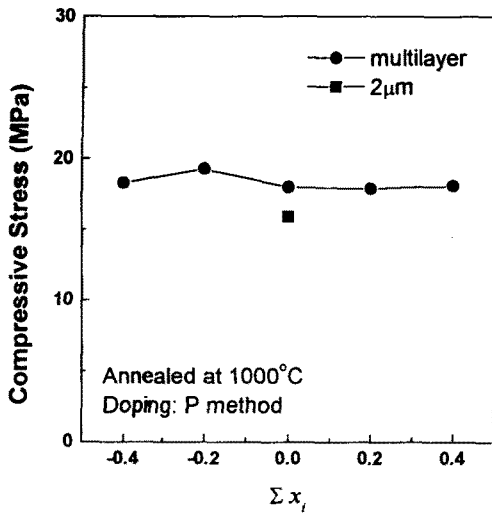
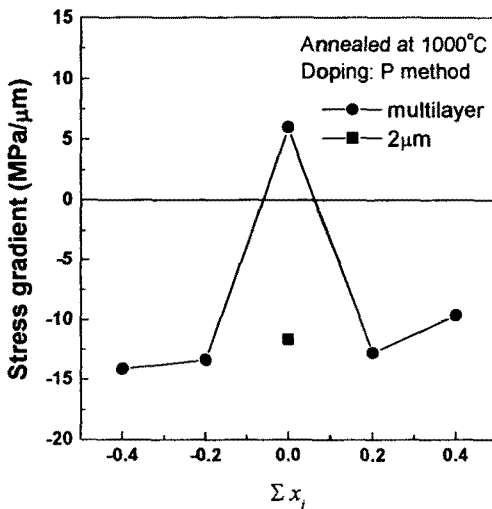


그림 8. 다층 실리콘 박막에서 응력 분포를 나타내는 모식도.

Fig. 8. The schematic configuration of the stress distribution in multi-layered polysilicon.



(a)



(b)

그림 9. 상대적인 계면 위치에 따른 폴리실리콘 박막의 응력(a)과 응력구배(b).

Fig. 9. Stress(a) and stress gradient(b) of polysilicon film with relative interface location.

이상의 결과를 정리해 보면 응력구배는 C 도핑후 1000°C에서 열처리한 시편이 가장 낮으며, 이는 두께방향으로 균일한 불순물 농도를 유지하기 때문이다. 응력은 P 도핑 또는 M 도핑후 1100°C에서 열처리한 시편이 가장 낮다. C 도핑은 불순물을 가장 균일하게 유지시킬수 있으나 불순물 농도가 높아서 높은 응력을 보

인다. 따라서, 미세 구조물 제작을 위한 폴리실리콘 다층박막은 첨가되는 불순물의 농도를 적게하고 C 도핑을 사용하는 것이 유리하며, 어닐링 온도는 1000°C가 가장 적합하다고 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 6.5 $\mu$ m 두께의 폴리실리콘 구조체를 제작하였다. 0.8 $\mu$ m 두께의 폴리실리콘 박막을 대칭적으로 적층하고 도핑횟수를 줄이므로서 불순물의 첨가량을 적게한 C 도핑법을 사용하여 1000°C에서 어닐링을 수행하였다. 이러한 방법으로 제조된 6.5 $\mu$ m 두께의 폴리실리콘 시편은 -0.15 MPa/ $\mu$ m의 낮은 응력구배와 -7.6MPa의 낮은 응력을 나타내었으며, 1000 $\mu$ m $\times$ 1000 $\mu$ m 크기의 미세 공진 구조물을 성공적으로 제조할 수 있었다.

#### 4-3. 폴리실리콘 구조체의 구동 특성

그림 10의 사진은 평면형 진동 자이로의 구동 특성을 조사하기 위해 제작된 두께 6.5 $\mu$ m의 폴리실리콘 시험 진동 구조체이다. 시험 공진기의 양측에는 빗살 전극이 구비되어 있고 진동하는 구조체는 앵커로부터 이중 평행보로 지지되어 있다. 구동 실험시 진동 구조체에는 직류 전압이 인가되고 양측의 빗살 전극중 한쪽에는 교류 전압이 인가되어 구조체를 진동시킨다. 진동 중 다른 한측의 빗살 전극에서는 진동 구조체의 진동 변위에 비례하는 신호를 얻는다.

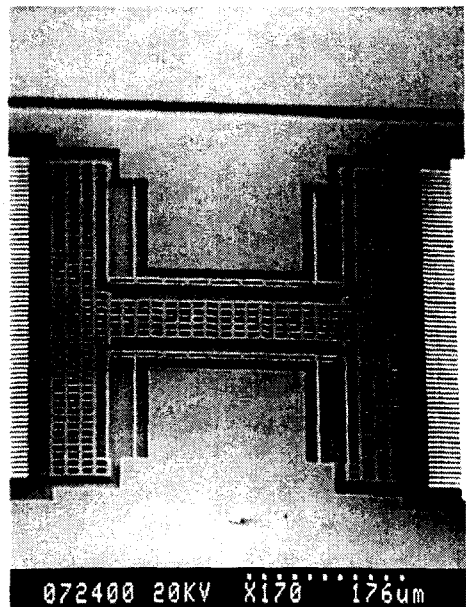


그림 10. 수평 진동 시험 구조체.

Fig. 10. Horizontally vibrating test structure.



빛살 전극과 이중 평행보를 이용한 수평 진동 구조체는 선형적이고 큰 변위를 낼 수 있는 장점이 있다. 구동 실험은 1000 mtorr의 압력을 갖는 챔버내에서 직류 15V, 교류 0.05V의 전압을 가하고 구동 주파수를 변화해가며 출력 전압을 측정하였다. 그림 11는 실험을 통한 주파수 응답 곡선을 보이고 있다. 실험 결과 제조된 진동 구조체의 공진 주파수는 7629.5Hz 이고 Q값은 1270 이었다. 이때의 최대 진동 진폭은 5 $\mu$ m 였다.

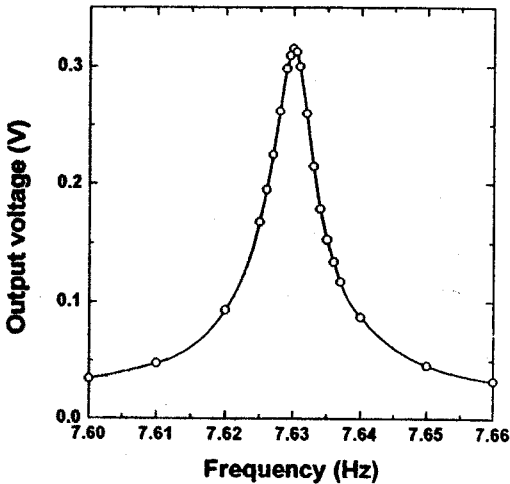


그림 11. 시험 구조체의 주파수 응답 특성.

Fig. 11. Frequency response characteristics of the test structure.

### 5. 결론

본 연구에서는 두꺼운 폴리실리콘박막을 진동체로 응용하는 표면 가공형 멤즈 기술분야에서 구조물의 왜곡을 일으키는 폴리실리콘의 내부응력과 응력구배를 최소화 하기 위하여 폴리실리콘 박막을 대칭적 두께로서 다층으로 적층하는 방법을 제안하였고, 인 도핑과 열처리방법에 따른 물리적 응력 특성을 조사하였다. 대칭적 두께와 비대칭적 두께로 4회 적층한 두께 2 $\mu$ m의 폴리실리콘 시료분석을 통하여 인의 불순물이 높게 도핑 될 수록 응력이 커짐을 알 수 있었으며 응력구배를 감소시키는 방법로서는 박막의 증착 두께와 도핑 단계를 대칭적인 적층 구조로 수행하고, 열처리 온도를 1000 $^{\circ}$ C에서 수행하는 것이 가장 적합한 것으로 사료된다. 전술한 방법의 다층으로 적층한 6.5 $\mu$ m 두께의 도핑된 폴리실리콘 박막을 사용하여 플로팅된 구조물을 제

제한 결과, -0.15 MPa/ $\mu$ m의 낮은 응력구배와 -7.6MPa의 내부응력을 얻을 수 있었으며, 제작된 테스트 공진체는 직류15V, 교류 0.05V의 전압인가와 1000mtorr의 압력하에서 Q값이 1270으로 공진됨을 보였으며, 최대 진동 진폭은 5 $\mu$ m였다.

이상 제안된 폴리실리콘 박막 적층방법은 일반적인 반도체 IC 공정의 폴리실리콘 증착공정을 이용하여 응력 및 응력구배가 적은 수 $\mu$ m 두께의 폴리실리콘 박막 구현이 가능하므로 표면 가공형 멤즈 제작 응용분야에 유용 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 정보통신부의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 실험에 많은 도움을 주신 ETRI 회로소자연구소 종합실험실운영팀원께 감사 드립니다.

### 참고 문헌

- [1] M. Orpana and A. O. Korhonen, "Control of residual stress of polysilicon thin films by heavy doping in surface micromachining", *Transducers '91*, pp.957-960, 1991.
- [2] H. Guckel, D. W. Burns, C. C. G. Visser, H. A. C. Tilmans, and D. Deroo, "Fine-Grained Polysilicon Films with Built-In Tensile Strain", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 35, pp.800-801, 1988.
- [3] L. Lin, R. T. Howe and A. P. Pisano, "A Passive, *In Situ* Micro Strain Gauge", *Proc. of IEEE workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp.201-206, 1993.
- [4] J. F. L. Goosen, B. P. van Drieënhuizen, P. J. French and R. F. Wolffenbuttel, "Stress Measurement Structures for Micromachined Sensors", *Transducers '93*, pp.783-786, 1993.
- [5] T. I. Kamins "Design properties of polycrystalline silicon", *Sensors and Actuators Vol. A21-A23*, pp.817-824, 1990.
- [6] P. J. French, B. P. van Drieënhuizen, D. Poenar, J. F. L. Goosen, Rolf Mällée, P. M. Sarro and R.

F. Wolffenbittel, "The developement of a low-stress polysilicon process compatible with standard device processing", J. MEMS Vol.5, No.3, pp.187-196, 1996.

---

著 者 紹 介

---

최 창 익(崔 昌 億)

『센서학회지 제7권 제1호』 논문 98-7-1-11 p.82참조.

홍 윤 식(洪 允 植)

『센서학회지 제7권 제1호』 논문 98-7-1-11 p.82참조.

이 창 승(李 昌 承)

『센서학회지 제7권 제1호』 논문 98-7-1-11 p.82참조.

이 종 현(李 鐘 洙)

『센서학회지 제7권 제1호』 논문 98-7-1-11 p.82참조.

장 원 익(張 元 翼)

『센서학회지 제7권 제1호』 논문 98-7-1-11 p.82참조.

손 병 기(孫 炳 基)

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-08 p.101참조.

현재 경북대학교 전자전기공학부 교수, 센서기술연구소장.