

정전형 평판 공진자의 동특성

The Dynamic Characteristics of an Electrostatic Plate Resonator

정 옥 찬 (아주대 대학원), 양 상 식 (아주대 공대)

Ok-Chan Jeong(Ajou Graduate School, Ajou Univ.), Sang-Sik Yang(Ajou Univ.)

ABSTRACT

In this paper, an electrostatic plate resonator with four corrugated bridges and another with four flat ones have been fabricated and tested by the electrostatic actuation. The resonators consist of one rigid plate and four bridges. Boron diffusion process and anisotropic etch process with EPW are mainly used to fabricate the resonators. The dynamic characteristics of the fabricated resonators are obtained by measuring the velocity of the center of the rigid plate using a laser vibrometer. The results show that the deflection of the resonator with the corrugated bridges is larger than the resonator with the flat ones. It has been confirmed that the corrugated structure releases the residual tensile stress in the bridges resulted from the diffusion process.

1. 서 론

최근 집적회로 제조기술의 발달로 센서와 기계장치의 극소형화가 가능해짐에 따라 이들 요소들의 개발에 관한 연구가 많이 진행됨과 더불어 이들의 응용에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 여러 응용 분야 중의 하나인 가속도 센서에 대한 연구가 활발히 연구되고 있다^(1,2,3). 일반적으로, 가속도계는 질량이 가속도를 받을 때 생기는 하중이 브리지에 전달되어 브리지에 변형이 발생하게 되는데, 이러한 변형의 변화에 의한 저항 변화를 측정하여 가속도를 검출하게 된다. 즉, 가속도계의 동작 특성은 브리지의 재질과 그에 따른 물성치에 따라 달라지며, 균일한 두께의 브리지 제작이 중요하다. p+ 실리콘은 균일한 두께의 박막 제작을 위하여 식각 정지층으로 많이 쓰인다⁽⁴⁾. 마이크로 소자의 제작에 있어서 p+ 실리콘의 응용 범위는 마이크로 밸브⁽⁵⁾, 마이크로 구동기⁽⁶⁾ 등과 같이 다양하다. 그러나, 고온에서의 확산 공정으로 인하여 p+ 실리콘 구조를 제작하였을 때, 박막의 잔류응력으로 인하여 동특성에 영향을 미친다⁽⁷⁾. 이러한 응력 문제를 해결하기 위하여 구동기의 박막의 형태를 주름진 형태로 제작하는 연구가 수행되었다^(8,9). 특히, Yang⁽⁹⁾ 등은 p+ 박막을 갖는 구동기의 동특성 시험을 통하여 주름진 박막은

잔류응력에 무관한 동특성을 갖는다는 시뮬레이션 결과를 얻었다. 그러나, 주름진 박막은 구조적인 문제로 인하여 정전력에 대한 해석이 힘들고, 박막의 진동시에는 휘어진 전극에 대한 등가 간극에 대한 고려가 필요하며, 이에 대한 변위-힘 관계식의 오차 등으로 정확한 해석이 불가능하다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 변형이 없는 편평한 전극판과 변형 해석이 쉬운 브리지를 갖는 공진자 구조를 제작하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 미소 브리지와 평판 등으로 구성되는 공진자를 설계하고 제작한다. 그림 1은 정전형 평판 공진자의 개략도를 나타낸다. 공진자는 평판과 4개의 브리지로 구성된다. 평판은 정전력에 의한 변형이 없으며, 미소 질량을 갖도록 설계하고, 브리지는 주름진 형태와 편평한 형태로 제작한다. 제작된 공진자의 정적 및 동적 특성 시험을 수행하여, 주름진 브리지의 잔류 인장응력의 완화효과를 시험한다. 즉, 공진자의 제작 공정으로 인하여 발생하는 잔류 응력이 공진자의 동작 특성에 미치는 영향을 고찰한다. 또, 공진 간극에 따른 감쇠율을 측정하고자 한다.

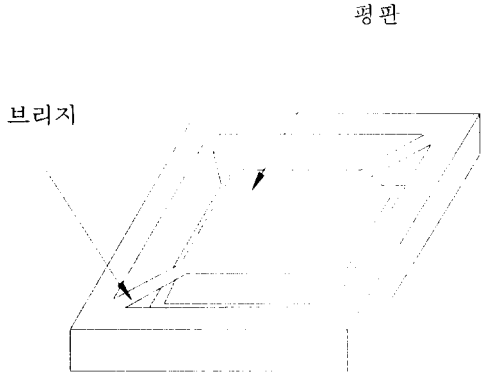


그림 1. 미소 평판 공진자의 구조.

2. 미소 공진자의 변형 및 정적 변위 해석

그림 2는 정전형 평판 공진자와 대면전극으로 이루어진 구조의 단면도를 나타낸다. 파이렉스 유리에 증착된 Cr-Au층을 고정 전극으로 하고, p+ 실리콘을 진동추 상부에 형성하여 가동 전극으로 한다. 두 전극 사이에 전압을 인가하면 정전력에 의하여 브리지가 변형을 일으키며, 평판이 위로 움직이게 된다. 또, 두 전극 사이에 교류 정현파 전압을 인가하면 평판 공진자가 진동하게 된다. 평판 공진자는 브리지 재료의 기계적 물성치에 따라서 변위가 달라진다.

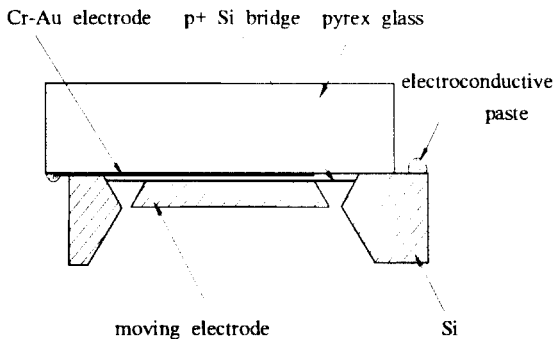


그림 2. 정전형 공진자의 단면도.

만약, 공진자의 평판 전극과 고정 전극 사이에 정전력을 인가하였을 때, 평판 공진자의 변위가 y 라고 하면, 두 평판 사이의 전위차, V 와 초기 간극, d_0 에 따른 정전력, F_e 는

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{(d_0 - y)^2} \quad (1)$$

이다. 여기서, ϵ 와 A 는 각각 공기의 유전율과 평판 전극의 면적이다⁽¹⁰⁾.

정전력에 의한 네 개의 편평한 브리지와 한 개의 평판을 갖는 공진자의 힘과 정적 변위의 관계는

$$F_d = K_y x \quad (2)$$

와 같다. 여기서, K_y 는 등가 스프링 상수이고, 브리지의 길이, 폭, 두께가 각각 l , b , h 라면

$$K_y = 4 \frac{E b h^3}{l^3} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다⁽³⁾. 여기서, E 는 p+ 실리콘의 영률이다. 브리지에 잔류응력이 있을 경우에도, 주름진 브리지와 같이 그 구조가 잔류응력을 완화시킬 수 있어서 잔류응력의 영향이 스프링 상수에 영향을 주지 않는다고 가정한다면 주름진 브리지를 갖는 공진자의 예상 변위는 영률에만 의존한다고 볼 수 있다.

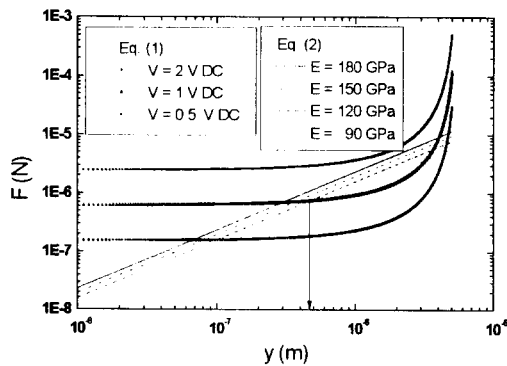
그림 3은 대면 전극의 간극이 각각 $5 \mu\text{m}$ 와 $10 \mu\text{m}$ 인 편평한 브리지를 갖는 공진자에 작용하는 힘과 변위 곡선을 나타낸다. 대면전극의 넓이는 4 mm^2 이고, 브리지의 길이, 폭, 두께는 각각 $700 \mu\text{m}$, $140 \mu\text{m}$, $2 \mu\text{m}$ 이다. 그림에는 다양한 인가 전압에 따른 식 (1)의 정전력 곡선과 다양한 영률값에 대한 식 (2)의 공진자 힘-변위 관계를 나타내는 곡선이 있다. 두 곡선이 만나는 점은 공진자의 정적 변위의 평형점을 나타내며, 두 개의 교점에서 평형을 이룬다. 그러나, 변위가 큰 평형점은 외란에 의해 공진자의 평판이 고정 전극에 붙게 되는 불안정한 점이고, 전압을 걸어 안정하게 평형을 이루는 점은 변위가 작은 교점이다. 인가 전압이 클수록 변위가 커지며, 영률의 크기가 클수록 변위는 작아진다.

3. 공진자의 제작 공정

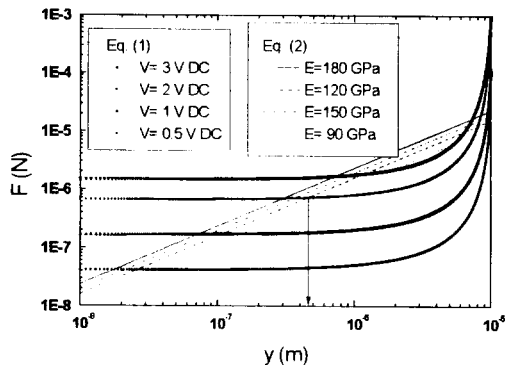
본 연구에서 공진자 제작에 사용되는 웨이퍼는 n형 (100) 웨이퍼로 두께가 $525 \pm 10 \mu\text{m}$ 이고, 정전 구동을 위한 대면 전극은 두께가 $540 \mu\text{m}$ 인 파이렉스 유리 (Corning #7740)를 기판으로하여 제작한다. 변형을 일으키는 브리지는 균일한 두께의 박막을 제작하는 데 용이한 p+ 실리콘으로 제작한다. 그림 4는 공진자의 제작 공정 순서를 나타낸다. 우선, 공진자

의 진동 공간 형성을 위하여 얇은 식각을 수행하여 5 μm 깊이의 진동 공간을 형성한다. 특히, 주름진 브리지를 갖는 공진자인 경우에는 진동 공간의 형성 후, 주름 형성을 위한 식각을 수행한다. 양면 정렬을 위한 정렬홈 식각 후, 시편의 뒷면을 EPW (Ethylendiamine : Pyrocatechol : DI Water = 250 ml : 40 g : 80 ml) 수용액을 이용하여 115 $^{\circ}\text{C}$ 에서 450 분간 약 450 μm 을 식각한다. 평판 공진자의 브리지와 평판 전극 형성을 위하여 붕소 확산 공정을 수행한다. 먼저, 고체 확산원 BN1100을 사용하여 1100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 600 분간 산화 공정을 수행하고, 연속하여 HF-LTO-HF 공정으로 BSG를 제거한 후, 후확산 공정으로 1100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 90 분간 습식 산화 공정을

수행한다. 뒷면을 열산화막으로 보호한 상태로 등방성 식각으로 앞면의 p+ 실리콘을 선택적으로 제거한 후, EPW 식각액으로 70 분간식각하여 두께가 2 μm 인 브리지와 두께가 70 μm 인 평판 진동추를 완성한다. 두 가지 형태의 브리지를 갖는 공진자를 일괄 공정으로 제작하였다. 따라서 주름진 브리지와 평평한 브리지는 주름 형성을 위한 식각 공정을 제외하고는 같은 공정 조건을 거치게 된다. 주름진 브리지의 주름의 주기와 깊이는 각각 140 μm 과 14 μm 이다. 공진자의 제작이 완료되면 파이렉스 유리에 Cr-Au를 증착한 후, 전극을 형성한다. 정진형 평판 공진자의 제작은 평판 공진자가 형성된 실리콘 웨이퍼와 파이렉스 유리를 음성 감광제를 이용하여 접합함으로써 완료한다. 그림 5와 6은 각각 제작된 주름진 브리지를 갖는 공진자와 평평한 브리지를 갖는 평판 공진자의 사진이다.



(a) 간극이 5 μm 인 경우.



(b) 간극이 10 μm 인 경우.

그림 3. 미소 공진자의 정적 변위 해석 결과.

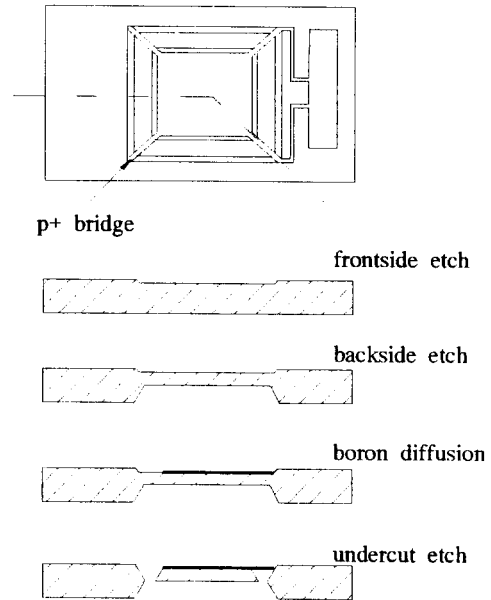


그림 4. 미소 평판 공진자의 제작 공정.

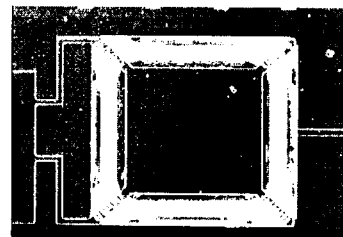


그림 5. 주름진 브리지를 갖는 공진자의 사진.

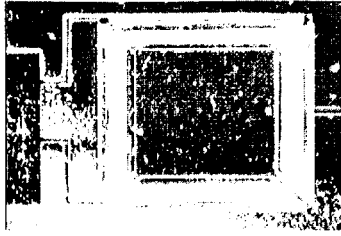


그림 6. 편평한 브리지를 갖는 공진자의 사진.

4. 미소 변위 측정 시험

정전형 미소 평판 공진자의 특성 시험은 평판의 정적 변위를 측정하는 정특성 시험과 평판의 진폭 변위를 측정하는 동특성 시험으로 이루어진다.

그림 7은 정전형 미소 평판 공진자의 진동 변위 진폭을 측정하기 위한 측정 시스템의 개략도이다. 두 전극에 교류 정현파 전압을 두 전극에 인가해 주고, 주파수를 변화시키면서 레이저 진동계 (Polytec OFV352 sensor head with OFV2600 controller)를 이용하여 공진자 평판 중심 속도를 측정한다. 레이저 진동계의 출력 전압 신호는 평판의 속도에 비례한다. FFT Analyzer (Lecroy 9310 Dual Oscilloscope)를 이용하여 인가전압 주파수의 두 배인 주파수에서 출력 전압의 진폭을 얻는다. 공진자의 진동이 정현파 진동이라고 가정하면 공진자의 변위 진폭, Y_0 를 식 (4)로부터 계산할 수 있다.

$$Y_0 = C \frac{V_0}{4\pi f} \quad (4)$$

여기서, V_0 와 C 는 각각 레이저 진동계의 출력 전압과 변환 상수이고, f 는 인가 전원의 주파수이다. 그리고, 변환 상수, C 는 5 mm/s/V 이다.

그림 8은 진동 공간이 $5 \mu\text{m}$ 와 $10 \mu\text{m}$ 인 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위 진폭을 나타낸다. 두 공진자에 인가하는 정전력과 변위 진폭의 크기를 비슷하게 하기 위하여, 각각의 공진자에 전압 진폭을 1 V AC 와 2 V AC 로 인가하여 시험한다. 간극이 $5 \mu\text{m}$ 와 $10 \mu\text{m}$ 인 두 공진자의 10 Hz 에서의 변위 진폭은 각각 $0.148 \mu\text{m}$ 와 $0.167 \mu\text{m}$ 이고, 각각의 감쇠비는 0.35 와 0.25 이다. 두 경우 모두 공진 주파수는 35 Hz 이고 간극 내의 공기 점성 마찰로 간극이 작은 경우의 감쇠비가 큼을 알 수 있다.

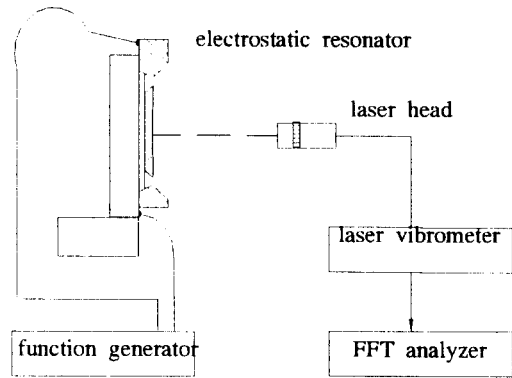


그림 7. 진동 변위 진폭 측정 시스템의 개략도.

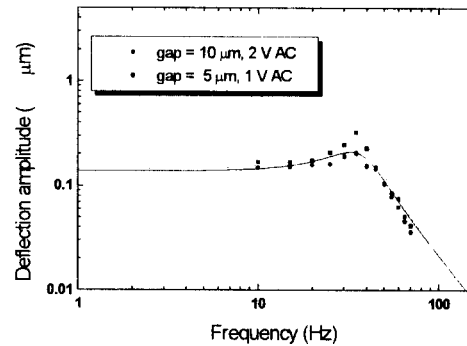


그림 8. 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위 진폭 주파수 응답 곡선.

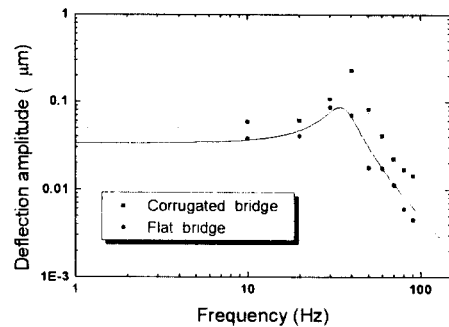


그림 9. 인가 전압이 0.5 V 일 때 간극이 $5 \mu\text{m}$ 인 두 공진자의 변위 진폭 주파수 응답 곡선.

그림 9는 두 전극 사이에 인가한 정현파 전압 진폭이 0.5 V AC일 때 간극이 5 μm 이고 각각 편평한 브리지와 주름진 브리지를 갖는 두 미소 공진자의 변위 주파수 응답을 나타낸다. 그림의 곡선은 측정된 자료를 커브 피팅한 결과이다. 주름진 브리지를 갖는 공진자와 편평한 브리지를 갖는 공진자의 첫 번째 공진 주파수는 각각 39 Hz와 35 Hz이고 감쇠비는 각각 0.12와 0.20이며, 10 Hz에서의 변위 진폭은 각각 0.053 μm 이고, 0.038 μm 이다.

간극이 5 μm 이고 0.5 V AC를 인가하였을 때, 주름진 브리지를 갖는 공진자의 10 Hz에서 얻은 변위 진폭을 두 배한 결과는 정특성 해석 결과와 비슷하나, 편평한 브리지인 경우에는 해석 결과와 큰 차이가 있다. 1100 °C에서 10시간 동안의 붕소 도핑공정과 drive-in 공정으로 형성된 p+ 실리콘에 내재되어 있는 잔류 인장응력으로 인하여 브리지의 변형에 영향을 미쳐 변위가 작아진 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 p+ 식각 정지법을 이용하여 두 가지 형태의 브리지를 갖는 평판 공진자를 각각 제작하였다. 평판 공진자는 주로 붕소 확산과 비등방성 식각 공정 등으로 제작하였다. 제작된 정전형 공진자와 Cr-Au 전극 사이에 교류 정현파 전압을 인가하여 평판의 변위 진폭을 측정하는 동적 특성 시험을 수행하였다. 측정은 레이저 진동계를 이용하여 다양한 주파수에 따른 평판 공진자의 속도 진폭을 얻은 후, 평판의 중심 변위 진폭을 계산하였다. 주름진 브리지를 갖는 공진자의 변위가 편평한 브리지의 경우보다 크다는 실험 결과를 얻었다. 또한, 정전력에 의한 공진자의 정적변위를 계산하였고, 해석과 시험 결과의 비교로부터 주름진 구조가 잔류응력을 완화시킴을 확인하였다.

참고문헌

1. N. Yazdi and K. Najafi, "An All-Silicon Single-Wafer Fabrication Technology for Precision Microaccelerometer," *Tech. Digest, 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '97)*, Chicago, USA, June 16-19, 1997, pp. 1181-1184.
2. J. T. Suminto, "A Simple, high Performance Piezoresistive Accelerometer," *Tech. Digest, 6th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91)*, San Francisco, CA, USA, June, 1991, pp. 104-107.

3. R. P. van Kampen, M. J. Vellekoop, P. M. Sarro, and R. F. Wolffenbuttel, "Application of Electrostatic Feedback to Critical Damping of an Integrated Silicon Capacitive Accelerometer," *Sensors and Actuators A*, Vol. 43, 1994, pp. 100-106.
4. E. H. Yang and O. C. Jeong and S. S. Yang, "Fabrication and Testing of a Polysilicon Piezoresistive Accelerometer using the p+ Silicon Diaphragm," *KIEE 96 Annual Summer Conf. Yong-Pyong, Korea, July, 1996*, pp. 1994-1996.
5. S. S. Yang, E. H. Yang, S. Y. Kim, S. Y. Kim and J. D. Seo, "Fabrication of Electrostatic Actuators and Passive Valves with p+ Diaphragms for Micropumps," *ASME Winter Meeting, DSC-Vol. 55-2*, Chicago, U. S. A., Nov. 1994, pp. 733-740.
6. E. H. Yang, S. S. Yang, S. W. Han and S. Y. Kim, "Fabrication and Dynamic Testing of Electrostatic Microactuators with p+ Diaphragms," *Sensors and Actuators A*, Vol. SNA 050/1-2, pp. 151-156, 1995.
7. E. H. Yang, S. S. Yang and S. H. Yoo, "A Technique for Quantitative Determination of the Profile of the Residual Stress along the Depth of p+ Silicon Films," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67 (7), 14, pp. 921-914, August 1995.
8. P. R. Scheeper, W. Olthuis, and P. Bergveld, "The Design, Fabrication, and Testing of Corrugated Silicon Nitride Diaphragms," *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 3, 1994, pp. 36-42.
9. E. H. Yang, S. S. Yang, E. J. Park, and S. H. Yoo, "Dynamic Characteristic of Corrugated and Flat p+ Diaphragms Actuated Electrostatically under Residual Stress," *DSC-Vol. 59, Microelectromechanical Systems (MEMS) ASME 1996*, Atlanta, U. S. A., Nov. 1996, pp. 441-445.
10. H. V. Allen, S. C. Terry, and D. W. DE Bruin, "Accelerometer Systems with Self-testable Features," *Sensors and Actuators*, Vol. 20, 1989, pp. 153-161.