# p+ 실리콘의 강성계수 및 잔류응력 측정

김 상 철*, 정 옥 찬, 양 상 식
아주대학교 전자공학부

# A Measurement of the Residual Stress and Young's Modulus of p+ Silicon

Sang Cheol Kim*, Ok Chan Jeong, Sang Sik Yang
Division of Electronics Engineering, Ajou University

**Abstract** - In this paper, the residual stress and young's modulus of the p+ thin film have been estimated by using the electrostatic resonators. The electrostatic plate resonator with four corrugated bridges and another with four flat ones have been fabricated. The deflection of the plate has been calculated under the induced tension and the residual stress and compared with the dynamic test results. When the young's modulus of the p+ silicon is 125 GPa, The estimated residual stresses of the flat and the corrugated bridges are about 15 MPa and less than 5 MPa, respectively.

It has been confirmed that the corrugated structure releases the residual tensile stress resulted from the heavy boron diffusion process.

## 1. 서 론

집적회로 제조기술의 발달로 센서와 기계장치의 극소형화가 가능해짐에 따라 이들의 개발에 관한 연구가 많이 진행되고, 응용에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 여러 응용 가능한 분야로는 압력센서, 가속도계, 마이크로 펌프 등 의공학 분야와 생물 및 유전공학 분야로의 가능성이 있다. 이 중 가속도 센서에 대한 연구가 활발히 연구되고 있다.

일반적으로, 가속도계는 브리지에 전달된 하중이 브리지의 변형을 일으키고 변형 변화에 의한 저항 변화를 측정하여 가속도를 검출하게 된다. 즉, 가속도계의 동작특성은 브리지의 재질과 그에 따른 물성치에 따라 달라진다. 균일한 두께의 박막 제작을 위하여 식각 정지층으로 많이 쓰이는 p+ 실리콘은 마이크로 밸브, 마이크로 구동기 등과 같이 다양한 응용 범위가 있다. 그러나, 고온에서의 확산 공정으로 인하여 p+ 실리콘 구조를 제작하였을 때, 박막의 잔류응력으로 인하여 동특성에 영향을 미친다. 이러한 응력 문제를 해결하기 위한 연구가 수행되어 왔으며, Yang[1] 등은 p+ 박막을 갖는 구동기의 동특성 시험을 통하여 주름진 박막이 잔류응력에 무관한 동특성을 갖는다는 시뮬레이션 결과를 얻었다. 또, 정전력을 이용한 가속도계의 감쇠비 제어에 관한 연구가 수행되었다[2]. 그러나, 공진자의 브리지를 이루고 있는 재질에 대한 기계적 특성 연구가 부족하다.

본 연구에서는 편평한 브리지와 주름진 브리지를 갖는 정전형 공진자를 제작하고, 제작된 정전형 공진자의 동적 특성 시험을 수행한다. 또, 초기 인장력과 공진자의 수직 변위에 의하여 발생하는 인장력을 고려하여 빔의 정적 변위를 계산하는 Choi[3] 등의 미소 빔 변위 추정 방법을 이용하여 실험 결과에서 얻는 정적 변위 결과로부터 p+ 실리콘 박막에 내재되어 있는 잔류응력의 크기를 추정한다.

## 2. 공진자 정적 변위 해석

본 논문에서는 그림 1과 같이 변형이 없는 것으로 가정할 수 있는 평판 진동추와 평판 진동추의 네 모서리를 지지하는 브리지로 이루어진 공진자를 이용하여 변위 해석과 실험을 수행한다. 공진자 윗면에 전극이 증착된 유리판을 접합하여 진동추와 유리판 사이에 적절한 간극을 갖도록 한 대면 전극에 전압을 인가하여 정전력에 의해 평판 진동추의 수직변위가 발생하도록 한다. 평판 진동추는 변형이 없으므로 그림 2와 같이 양 끝단이 고정된 빔의 중앙에 정전력에 해당하는 집중하중, $F$가 작용하는 것으로 단순화하여 변형을 해석할 수 있다.

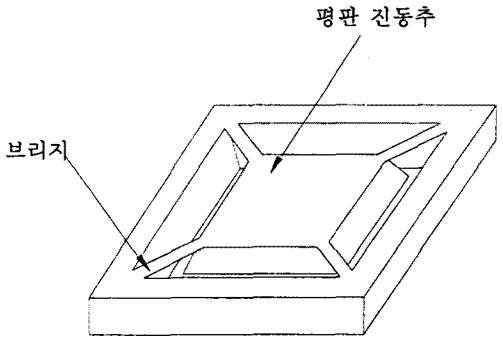


그림 1. 정전형 공진자의 개략도.

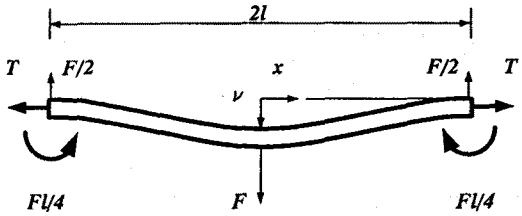


그림 2. 인장력 및 수직 하중에 의한 빔의 변형.

양단 고정보의 중앙에 집중하중, $F$가 작용하고 양단에 인장력이 $T$일 때, 수직 변위, $v$는

$$v(x) = \frac{F\alpha}{2}\left(\sinh\beta x - (1+\cosh\beta x)\tanh\frac{\beta l}{2}\right) + \frac{F(l-x)}{T} \quad (1)$$

이고, 여기서 $\alpha$와 $\beta$는 각각

$$\alpha = \frac{F}{2}\sqrt{\frac{Ewh^3}{3T^3}} \tag{2}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{T}{EI}} \tag{3}$$

이다[3]. 여기서, $E$는 영률이고, 빔의 폭은 $w$, 두께는 $h$, 관성모멘트 $I$는 $wh^3/12$ 이다. 식 (1)-(3)의 $T$는 하중에 의하여 발생하는 인장력, $T_i$와 초기 인장력, $T_b$의 합이다. 즉,

$$T = T_i + T_b \tag{4}$$

이다. 초기 인장력, $T_b$는 빔의 길이 변화와는 무관하며, 외력에 의하여 발생하는 인장력, $T_i$와 빔의 길이의 변화, $(L-l)$와의 관계는

$$\begin{aligned} T_i &= Ewh(L-l)/l \\ &= (Ewh/2l)\int_0^l (dv/dx)^2 dx \end{aligned} \tag{5}$$

와 같다. 식 (5)에 식(1)의 수직변위를 대입하여 $T_i$와 $T$의 관계식을 얻으면,

$$T_i = \frac{F^2 Ewh}{4T^2}\left[3 - \frac{3\tanh u}{u} - \tanh^2 u\right] \tag{6}$$

와 같다. 여기서, $u$는

$$u = \sqrt{\frac{T}{EI}\frac{l}{2}} \tag{7}$$

이다. 임의의 초기장력, $T_b$에 대하여 외력, $F$로 인하여 빔에 발생하는 인장력, $T_i$는 식 (6)의 비선형 방정식의 해를 구하여 얻고, 이 때 얻어진 인장력, $T$를 식 (1)에 대입하면 수직 변위를 구할 수 있다.

인가 전압의 변화에 대하여 예상되는 정적 변위를 초기응력의 변화에 대하여 간극이 5 ㎛인 정전형 공진자의 인가 전압에 따른 수직 변위를 계산하면 그림 3과 같다. 계산에 사용된 공진자의 브리지는 길이, 폭, 두께가 각각 700 ㎛, 140 ㎛, 2 ㎛이고, 평판 진동추의 크기와 두께는 각각 2 ㎜×2 ㎜이고, 70 ㎛이다. 그림에서 초기응력의 크기가 증가함에 따라 공진자의 수직 변위가 점차적으로 감소함을 알 수 있다.

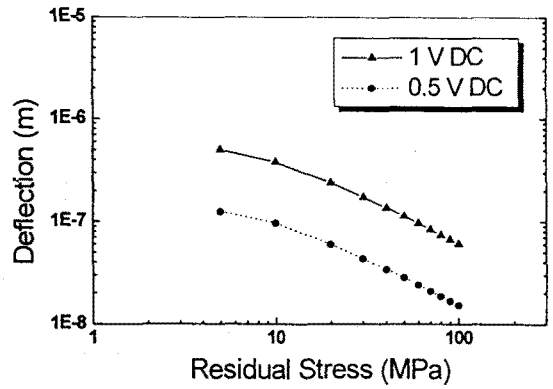


그림 3. 초기응력 크기에 따른 수직 변위 계산 결과.

## 3. 공진자의 제작공정

그림 4는 공진자의 제작 공정도이다. 공진자 제작에 사용되는 웨이퍼는 n형 (100) 웨이퍼로 두께가 525 ± 10 ㎛이고, 변형을 일으키는 브리지는 균일한 두께의 박막을 제작하는 데 용이한 $p+$ 실리콘으로 제작한다. 우선, 공진자의 진동 공간 형성을 위하여 얕은 식각을 수행하여 5 ㎛ 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 (Ethylendiamin -e : Pyrocathecol : DI Water = 250 ㎖ : 40 g : 80 ㎖) 수용액을 이용하여 115 ℃에서 450 분간 약 450 ㎛을 식각한다. 평판 공진자의 브리지와 평판 전극 형성을 위하여 붕소 확산 공정을 수행한다. 먼저, 고체 확산원 BN1100을 사용하여 1100 ℃에서 600 분간 선확산 공정을 수행하고, 연속하여 HF-LTO-HF 공정으로 BSG를 제거한 후, 후확산 공정으로 1100 ℃에서 90 분간 습식 산화 공정을 수행한다. 만약, <110> 방향과 45° 를 이루는 형태로 식각 보호막을 정렬하면 식각 깊이와 하부 식각의 깊이가 같게 된다. 뒷면을 열산화막으로 보호한 상태로 등방성 식각으로 앞면의 $p+$ 실리콘을 선택적으로 제거한 후, EPW 식각액으로 70 분간 식각하여 두께가 2 ㎛인 브리지와 두께가 70 ㎛인 평판 진동추를 완성한다. 브리지는 두 가지 형태로 갖도록 일괄 공정으로 제작하였다. 따라서 주름진 브리지와 편평한 브리지는 주름 형성을 위한 식각 공정을 제외하고는 같은 공정 조건을 거치게 된다. 주름진 브리지의 주름의 주기와 깊이는 각각 140 ㎛과 14 ㎛이다. 공진자의 제작이 완료되면 파이렉스 유리에 Cr-Au를 증착한 후, 전극을 형성한다. 정전형 평판 공진자의 제작은 평판 공진자가 형성된 실리콘 웨이퍼와 파이렉스 유리를 음성 감광제를 이용하여 접합함으로써 완료한다.

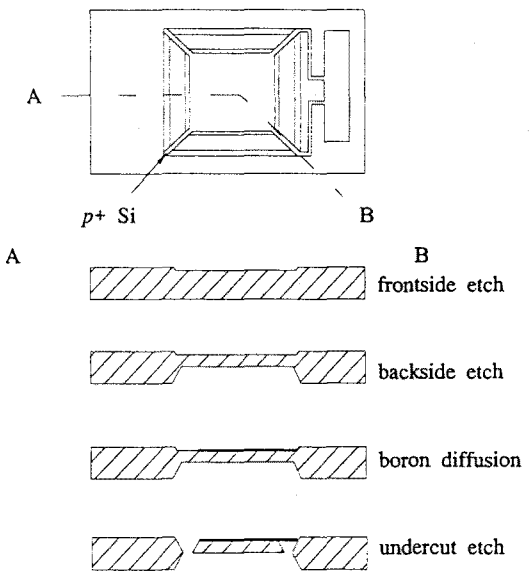


그림 4. 공진자의 제작 공정도.

## 4. 동특성 시험

그림 5는 정전형 미소 평판 공진자의 진동 변위 진폭을 측정하기 위한 측정 시스템의 개략도이다. 두 전극에 교류 정현파 전압을 인가해 주고, 주파수를 변화시키면서 레이져 진동계 (Polytec OFV352 sensor head with

OFV2600 controller)를 이용하여 공진자 평판 중심 속도를 측정한다. 레이져 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, $Y_o$를 식 (4)로부터 계산할 수 있다.

$$Y_o = k\frac{2V_o}{4\pi f} \qquad (6)$$

여기서, $V_o$와 $k$는 각각 레이져 진동계의 출력 전압과 변환 상수이고, f는 인가 전원의 주파수이다. 그리고, 변환 상수, $k$는 5 mm/s/V이다.

그림 6은 간극이 5 ㎛인 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위 주파수 응답을 나타낸다. 공진자에 전압 진폭을 0.5 V AC와 1 V AC로 인가하여 시험한다. 그림의 점선은 감쇠비 추정을 위하여 MatLab을 이용한 측정된 자료의 커브 피팅한 결과이다. 10 Hz에서의 공진자의 변위는 각각 0.076 ㎛와 0.286 ㎛이고, 각각의 감쇠비는 0.20과 0.25이다. 또, 공진 주파수는 인가 전압이 1 V AC인 경우가 74 Hz이고, 0.5 V AC일 때에는 82 Hz이다.

그림 7은 간극이 5 ㎛이고 인가 전압의 진폭이 0.5 V AC와 1 V AC 일 때, 주름진 브리지를 갖는 미소 공진자의 변위 주파수 응답을 나타낸다. 측정된 주름진 브리지를 갖는 공진자의 첫 번째 공진 주파수는 80 Hz이고 감쇠비는 0.12이고, 10 Hz에서의 변위는 각각 0.106 ㎛이고 0.514 ㎛이다.

주름진 브리지를 갖는 공진자의 변위가 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위보다 큰 것은 두 브리지를 이루고 있는 재질인 $p+$ 실리콘에 잔류하는 인장응력때문이다. 즉, 편평한 브리지를 갖는 경우에는 브리지에 내재되어 있는 인장응력에 의하여 공진자의 변위가 응력이 없을 때에 비하여 작다. 그러나, 주름진 브리지인 경우에는 잔류응력이 완화되므로 같은 인장응력하에서 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위보다 크게 된다.

또, 제 2절의 정적 변위 결과와 제 4절의 실험 결과를 비교하면 편평한 브리지의 평균 잔류응력의 상태는 인장응력이고, 크기는 15 MPa이고, 주름진 경우에는 5 MPa 이하의 인장응력을 갖는다.

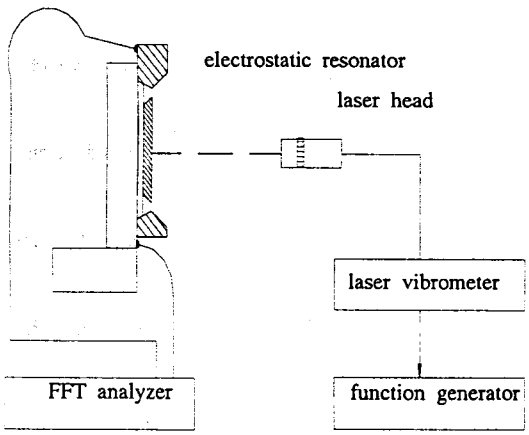


그림 5. 측정 시스템의 개략도.

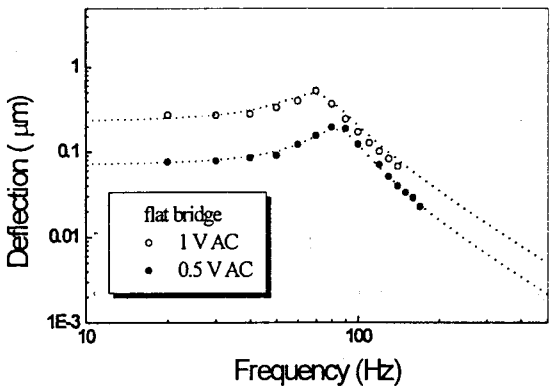


그림 6. 편평한 브리지를 갖는 공진자의 주파수 특성.

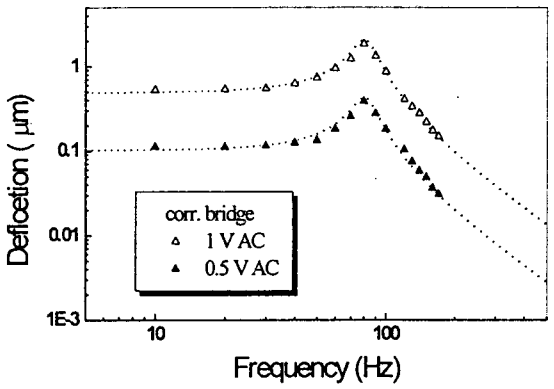


그림 7. 주름진 브리지를 갖는 공진자의 주파수 특성.

## 5. 결 론

본 연구에서는 $p+$ 실리콘을 이용하여 편평한 브리지와 주름진 브리지를 가지는 정전형 공진자를 제작하였으며, 동특성 실험을 수행하였다. 그리고, 인가 전압의 크기에 따른 브리지내의 잔류응력과 정전력에 의하여 발생하는 브리지의 인장력의 변화에 따른 공진자의 변위를 계산하였다. 계산 결과와 실험 결과로부터, $p+$ 실리콘으로 제작된 두 브리지의 잔류응력의 크기를 추정하였다.

향후, 공진자의 정적 변위의 측정 시험을 수행하여 공진자의 감쇠비 측정 실험을 수행할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

[1] 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," *ASME Winter Meeting*, DSC-Vol. 59, Atlanta, U. S. A., pp. 441-445, Nov. 1996.

[2] 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, pp. 100-106, 1994..

[3] B. K. Choi, and E. G. Lovell, "Improved analysis of microbeams under mechanical and electrostatic loads," *J. Micromech. Microeng*, 7, pp. 24-29, 1997.