

# 후확산 공정 조건이 $p^+$ 실리콘 박막의 잔류 응력 분포에 미치는 영향

論 文  
48C-9-11

## The Effects of the Drive-in Process Parameters on the Residual Stress Profile of the $p^+$ Silicon Thin Film

鄭玉贊\* · 朴泰奎\*\* · 梁翔植\*\*\*  
(Ok-Chan Jeong · Tae-Gyu Park · Sang-Sik Yang)

**Abstract** - The paper represents the effects of the drive-in process parameters on the residual stress profile of the  $p^+$  silicon film. Since the residual stress profile is not uniform along the direction normal to the surface, the residual stress is assumed to be a polynomial function of the depth. All the coefficients of the polynomial can be determined by measuring of the thicknesses and the deflections of cantilevers and the deflection of a rotating beam with a surface profiler meter and a microscope. As the drive-in temperature or the drive-in time increases, the boron concentration decreases and the magnitude of the average residual tensile stress decreases. Then, near the surface of the  $p^+$  film the residual tensile stress is transformed into the residual compressive stress and its magnitude increases.

**Key Words** :  $p^+$  silicon film, Residual stress profile, Cantilevers, Rotating beam

### 1. 서 론

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)의 주요 구성 요소인 박막은 전기적 절연체나 배선으로 쓰일 뿐만 아니라 기계적 구조물로서도 유용하다. 일반적으로 MEMS 분야에서 균일한 두께의 박막으로 제작할 수 있는 실리콘계 재료는 폴리 실리콘,  $p^+$  실리콘, 산화 실리콘, 그리고 질화 실리콘 등이다[1]. 이와 같은 박막을 MEMS 소자의 기계적 구조물로 사용하기 위해서는 설계시에 탄성계수, 프와송비, 잔류응력, 항복강도 등과 같은 박막의 기계적 성질에 대한 자료가 필요하다. 기계적 성질은 박막의 제작 공정 조건에 따라 다르다. Lee 등은 LPCVD 폴리 실리콘의 증착 조건과 인 도핑 공정 조건이 탄성 계수 등의 물리적 성질에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다[2].

실리콘계 재료중에서도  $p^+$  실리콘은 전기 전도성이 커서 전극 또는 배선의 역할을 겸할 수 있고 자동 식각 정지법을 이용하여 박막을 원하는 두께로 제작할 수 있으며 그 박막은 투명하고 좌굴(buckling)이 없기 때문에 마이크로 센서와 마이크로 구동기 등의 제작에 널리 쓰인다[3-5].  $p^+$  실리콘 구조물은 고온에서의 부분적인 붕소 확산 공정과 후확산 공정, 습식 식각 공정 등 일련의 공정을 거쳐 제작되는 데, 붕소 입자가 실리콘의 입자보다 작으므로 붕소 확산 공정중에 인장응력이 발생한다[6]. 박막내에 잔류인장응력이 존재하면 정전력과 같은 구동력에 대한 변형이 현격하게 감소하고

구동기의 성능이 저하된다[4].  $p^+$  박막의 잔류응력에 관한 기존의 연구는 박막의 좌굴 또는 외팔보의 휨 등을 이용하여  $p^+$  박막의 평균 압축 응력 또는 평균 응력 구배 등을 측정 한 후, 그 결과로부터  $p^+$  박막의 두께 방향의 응력분포를 정성적으로 추측하는 것에 그쳤고, 실험 조건이 연구자마다 달라 서로 다른 결론을 발표하였다[7-9]. 또, Cabuz 등은 SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy)와 MRS (Microprobe Raman Spectroscopy)를 이용하여 후확산 공정에 따른  $p^+$  층의 농도 변화와 잔류응력에 의한 격자 변형을 측정하였다[10]. 또, 제작된 외팔보 구조의 굽힘 방향과 처짐의 크기로부터  $p^+$  박막내의 잔류응력 상태를 정성적으로 설명하였다. 붕소 농도와  $p^+$  층의 변형을 간의 관계에는 소성 변형으로 인한 히스테리시스가 있으며, 이로 인하여 붕소 농도가 감소하는 영역에서는 압축응력이, 증가하는 영역에서는 인장응력이 발생한다고 결론을 내렸다. 즉,  $p^+$  박막의 잔류응력은 붕소 농도보다는 후확산 공정에 의한 붕소 농도의 변화에 더 큰 영향을 받는다고 보고하였다. 그러나,  $p^+$  박막내의 깊이에 따른 잔류응력 분포를 정량적으로 측정하지 못하였기 때문에 제시한 해석은 완벽하지 않다. Yang 등은 외팔보 구조와 회전빔 구조를 이용하여 실험적인 방법으로  $p^+$  박막의 잔류응력 분포를 정량적으로 측정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다[11]. 또, Yang 등은 공정 조건이 다른 두  $p^+$  박막의 잔류응력 분포를 비교하였다[12]. 그러나, 각 시편의 붕소 확산 공정 및 후확산의 공정 변수인 시간과 온도가 서로 다르기 때문에 측정된 잔류응력 분포로부터 각각의 공정 변수가 잔류응력 분포에 미치는 영향을 파악하기 힘들다. 또, 응력 분포 측정에 필요한 각 구조들이 서로 다른 시편에 제작되도록 공정이 설계되어 잔류응력 측정에 있어서 오차 발생 가능성이 크다. 따라서, 이러한 오차를 줄일 수 있도록 시편 제작 공정을 적절히 설계하여 특정 변수의 영향을 쉽게 알 수 있는 연구가 필요하다.

\* 正 會 員 : 亞 洲 大 工 大 制 御 計 測 工 學 科 博 士 課 程

\*\* 準 會 員 : 亞 洲 大 工 大 制 御 計 測 工 學 科 碩 · 博 士 課 程

\*\*\* 正 會 員 : 亞 洲 大 工 大 制 御 計 測 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1999年 1月 28日

最 終 完 了 : 1998年 7月 29日

본 논문에서는 참고문헌 [11]의 잔류응력 분포 측정법을 이용하여 후확산 공정 조건이  $p+$  박막 내부에 존재하는 잔류응력 분포에 미치는 영향을 파악한다. 특히, 같은 시편 내에 두께를 달리하는 응력 측정 구조를 제작하여 잔류응력을 측정함으로써 여러 시편들간의 농도 분포 불균일로 인한 잔류응력 측정 오차 발생 가능성을 제거한다.

### 2. 응력 측정 방법

본 절에서는 표면에 평행인 방향의 잔류응력을 측정하는 Yang 등의 방법을 이용한다[11]. 다만, 그 계산식 중 틀린 부분을 지적하고자 한다. 박막 내의 잔류응력은 표면에 수직인 방향으로는 변화하고 평행인 방향으로는 변화가 없다고 가정한다. Yang 등의 잔류응력 분포 추정 방법은 외팔보 구조물을 이용하여  $p+$  박막의 중립면에서의 잔류응력에 대한 상대적인 잔류응력 분포를 정량적으로 구하는 것과 회전 빔 구조물을 이용하여 평균 잔류응력을 계산하는 것으로 이루어진다. 이 두 계산 결과로부터 잔류응력 분포의 깊이 방향에 따른 분포를 추정한다. 여기서, 잔류응력은 휘어진 외팔보 구조 또는 회전 빔 구조를 본래의 변형이 없는 상태로 되돌려 놓았을 때 존재하는 응력을 의미한다.

그림 1은 잔류응력 분포 측정을 위한 개념도를 나타낸다. 외팔보의 단면에서 보의 중립축으로부터  $Y$  만큼 떨어진 위치에 작용하는 보의 축( $x$  축)방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 를 식 (1)과 같이 다항식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_x(Y) = \sum_{k=0}^n a_k Y^k \quad (1)$$

여기서,  $a_k$ 는 다항식의 계수로서 상수이다. 잔류응력이 있는 외팔보 윗부분의 일부층을 제거하게 되면 그림 1(a)와 같이 외팔보의 수직 변위가 변화하게 되고, 이에 대응하는 외팔보의 응력 상태는 그림 1(b)와 같이 나타낼 수 있다. 만일 그림 1(c)와 같이 외팔보의 윗쪽 면을  $2\delta$  만큼 식각하면 중립축은  $\delta$  만큼 이동하고, 외팔보의 수직 변위가 달라진다. 이동된 중립축,  $y$  에 대한 응력식은 식 (2)와 같다.

$$\sigma_x(y-\delta) = \sum_{k=0}^n a_k (y-\delta)^k \quad (2)$$

윗면이  $2\delta$  만큼 식각되어 외팔보 두께가  $h$ 인 경우의 외팔보 끝 점( $x=L$ )에서의 수직변위,  $v_L$ 은 외팔보의 수직 변위,  $v$ 와 굽힘 모멘트,  $M_b$ 와의 관계로부터 구해진다. 여기서 다항식의 차수를 4 차로 한정하면,

$$\begin{aligned} v_L &= \frac{6L^2}{Ebh^3} M_b \\ &= -\frac{L^2}{E} \left\{ \frac{1}{2} a_1 - \delta a_2 + \left( \frac{3}{2} \delta^2 + \frac{3}{40} h^2 \right) a_3 \right. \\ &\quad \left. - \left( 2\delta^3 + \frac{3}{10} h^2 \delta \right) a_4 \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 여기서,  $E$ 는 탄성계수(Young's modulus)이고,  $L$ 과  $b$ 는 각각 외팔보의 길이와 폭이며, 참고문헌 [11]의 식 (3)을 상기의 식 (3)과 같이 바로 잡는다. 다양한 두께를 갖는 외

팔보에 대한 수직 변위와 식 (3)을 이용하여 다항식 계수  $a_1, a_2, a_3, a_4$ 를 구할 수 있다.

다항식의 계수,  $a_0$ 는 적분 과정에서 소거되어 식 (3)에 나타나지 않으므로 회전 빔 구조를 이용하여 평균 응력,  $\sigma_{avg}$ 를 측정하고, 이로부터  $a_0$ 를 구한다[6]. 식 (1)을 이용하면 다항식 계수,  $a_0$ 와 평균응력과의 관계는 식 (4)와 같이 구해진다.

$$a_0 = \sigma_{avg} - \frac{1}{H} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \sum_{k=1}^n a_k Y^k dY \quad (4)$$

여기서,  $H$ 는 식각 전의 박막의 두께를 나타낸다.

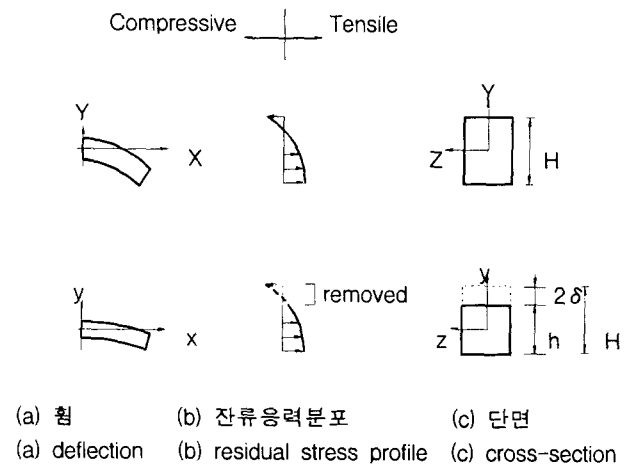


그림 1 식각 전(그림 상)·후(그림 하)의 보의 휨 변화.  
 Fig. 1 The beam deflection variation by the before(the upper figures) and after(the lower figures) etch.

### 3. 개선된 외팔보 제작 방법

그림 2는 다양한 두께를 갖는 외팔보의 제작을 위한 식

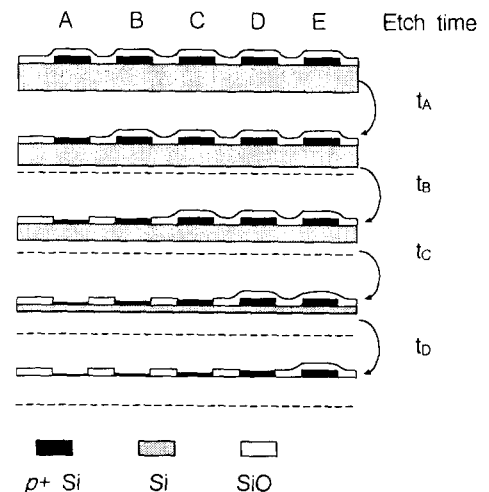


그림 2 다양한 두께를 갖는 외팔보의 식각 공정도.  
 Fig. 2 The etch process of the cantilevers with various thicknesses.

각 공정도를 나타내는 것으로서 외팔보 길이 방향에 수직인 단면을 보여준다. 점선은 식각 전의 초기 실리콘의 외형을 나타내고, 실선은 단계별 식각후 실리콘의 외형을 나타낸다. 동일한 시편상에서 외팔보 A, B, C, D, E 에 대하여 각각의 산화막을 순차적으로 제거하여 식각하면 다양한 박막의 두께를 갖는 구조를 제작할 수 있다. 즉, 외팔보 A는 ( $t_A + t_B + t_C + t_D$ ) 시간 동안 앞면 (윗면)의 용액층이 식각되고, 외팔보 C는 ( $t_C + t_D$ ) 시간 동안 앞면이 식각된다.

4. 제작 공정

본 논문에서는 비저항이 10 ~ 20  $\Omega\text{cm}$ 이고 두께가  $330 \pm 10 \mu\text{m}$ 인 4 inch, n형, (100) 실리콘 웨이퍼를 사용한다. 먼저, 0.5  $\mu\text{m}$ 의 열산화막을 성장시킨 후 양면 정렬 구멍을 식각한다. 식각액은 EPW (Ethylendiamine : Pyrocatechol : DI Water = 250 ml : 40 g : 80 ml) 용액을 사용하고 식각은  $115 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 수행한다. 그림 3은 정렬 구멍 식각 후의 제작 공정도를 나타낸다. 열산화막을 성장시킨 후, 그림 3(a)와 같이 앞면의 산화막을 제거하고, 고체 확산원 BNI100을 이용하여  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 600 분 동안 선확산하여 웨이퍼 앞면을 붕소로 도핑한다. 선확산 후 실리콘 표면에 생성되는 유리질 등의 물질을 제거하기 위하여 HF 수용액 (D. I. water : HF = 10 : 1)으로 실리콘 웨이퍼의 표면을 2 분간 식각한다. 이 식각 후  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 60 분 동안의 습식산화 공정(Low Temperature Oxidation)으로 실리콘 웨이퍼 표면에 BSG(Boro-Silicate-Glass)층이 생성된다. 이 BSG가 완전히 제거(sheet off)될 때까지 HF 수용액으로 식각한다. 이와 같은 식각, 산화, 식각 공정(HF-LTO-HF 공정)은 열산화막을 얻기 위한 후확산 공정의 전처리 공정으로서 붕소 선확산 공정에서 생성된 BSG를 완전히 제거하기 위한 공정이다.

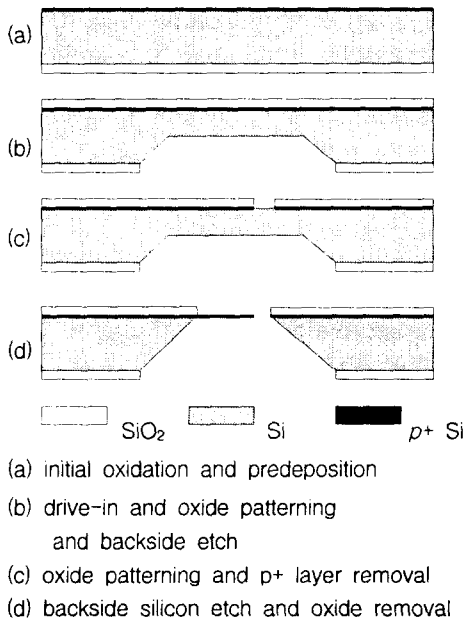


그림 3 잔류응력 측정 구조의 공정도.  
 Fig. 3 The fabrication process of the structures for the residual stress measurement.

후확산 공정 온도는  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  혹은  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고 후확산 시간은 60 혹은 90 분으로 하여 습식산화로 후확산 공정을 수행한다. 각 시편의 공정 조건은 표 1과 같다. 후확산 후 그림 3(b)와 같이 웨이퍼 뒷면에 식각창을 형성한 후, 웨이퍼 전체의 식각에 소요되는 시간, 330 분에서 외팔보 A의 앞면의 p+ 층 식각 시간 ( $t_A + t_B + t_C + t_D$ )을 뺀 만큼의 시간인 230 분 동안 EPW 용액으로 식각한다. 여기서,  $t_A, t_B, t_C, t_D$ 는 각각 10, 20, 30, 40 분이다. 그림 3(c)와 같이 웨이퍼의 앞면에 용력 측정용 p+ 구조물을 형성하기 위하여 사진식각공정을 행한 후, 등방성 식각액을 이용하여 선택적으로 p+ 층을 제거한다. 이 때, 한 시편에 외팔보 A, B, C, D와 회전 빔 구조의 패턴이 완성된다. 이후에 그림 2와 같이 p+ 층 위의 산화막을 순차적으로 제거하면서 식각하여 다양한 두께의 외팔보 구조 제작을 수행한다. 회전 빔과 외팔보 E는 앞면이 보호된 상태로 뒷면의 실리콘을 p+ 식각정지가 일어날 때까지 식각한다. 식각 완료 후 BOE 용액에 처리하여 앞면에 남아 있는 산화막을 제거하여 그림 3(d)와 같이 용력 측정 구조를 완성한다. 외팔보의 길이와 폭은 각각 1500  $\mu\text{m}$ 이고 50  $\mu\text{m}$ 이고 회전빔의 주요 치수는 참고문헌 [12]와 같다. 그림 4는 제작된 회전 빔과 외팔보의 사진들이다.

그림 5는 각 시편의 붕소농도 분포를 T-SUPREM IV (Ver. 6.2.2, System S (Sun : Solaris), Copyright (C) 1988 - 1995, Technology Modeling Associates, Inc.) 시뮬레이션으로 구한 결과이다. 후확산 온도나 후확산 시간이 증가할

표 1 시편의 후확산 공정 조건.

Table 1 The drive-in process conditions of the samples.

시간 (min)	온도( $^\circ\text{C}$ )	
	1000	1100
60	Type I	Type III
90	Type II	Type IV



(a) 회전 빔 구조. (b) 외팔보 구조.  
 (a) the rotating beam. (b) the cantilevers.

그림 4 제작된 응력 측정 구조 사진.  
 Fig. 4 The photograph of the fabricated stress measurement structures.

표 2 외팔보의 처짐과 두께 및 회전 빔 구조로부터 얻은 평균 잔류 인장 응력. (두께 (h)와 처짐 ( $v_L$ )의 단위는  $\mu\text{m}$ 임.)

Table 2 The vertical deflections and the thicknesses of the cantilevers and the average residual stresses obtained from the rotating beams.

Sample	Type I		Type II		Type III		Type IV	
	h	$v_L$	h	$v_L$	h	$v_L$	h	$v_L$
A	2.3	150	2.1	150	1.7	118	1.4	118
B	2.5	186	2.3	166	1.8	142	1.6	148
C	2.7	202	2.4	184	2.0	178	1.9	162
D	2.8	224	2.6	204	2.2	205	2.0	189
E	3.0	256	2.8	244	2.4	230	2.2	216
$\sigma_{avg}$	45 MPa		25 MPa		15 MPa		8 MPa	

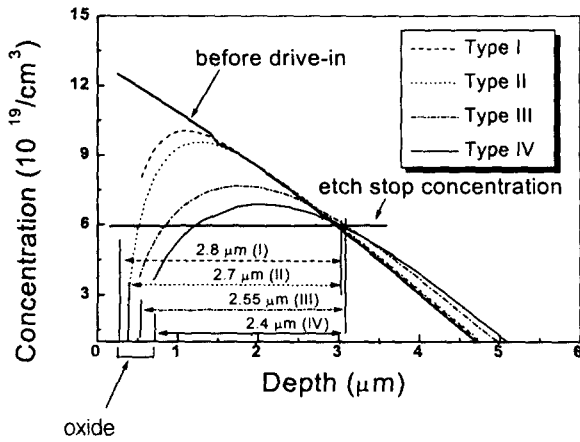


그림 5 T-SUPREM 시뮬레이션으로 구한 붕소 농도 분포.

Fig. 5 The boron concentration profile obtained by T-SUPREM simulation.

수록 시편 표면의 도핑 농도는 낮아지고, 전체적으로 농도 구배가 작아진다. p+ 실리콘의 붕소의 농도가  $6 \times 10^{19}/\text{cm}^3$  이상에서 식각률이 현저하게 줄어들게 되므로 이 농도에 해당되는 점이 뒷면 식각정지점이다. 또, 앞면의 p+ 층 일부는 후확산 공정시 산화되어 최종적으로 산화막을 식각할 때 제거된다. 후확산에 의해 식각정지점이 깊어지나, 앞면 산화막 층이 더 두꺼워지므로 그림 5에 표시된 바와같이 p+ 실리콘 박막의 두께는 후확산 시간과 온도가 증가할수록 박막의 두께가 감소하게 된다. 여기서, p+ 층으로 파고 들어간 산화막 층의 깊이는 일반적으로 알려진 산화막 성장 속도를 이용하여 계산하였다. T-SUPREM을 이용한 고농도의 붕소 확산 농도 분포 시뮬레이션에서는 일반적으로 알려진 실험식을 사용하므로 그림 5에서 예상되는 박막 두께와 실제 박막 사이에 오차가 있을 수 있다.

### 5. 측정 및 결과

제작된 외팔보들의 변위는 광학 현미경의 초점 조절법을

이용하여 측정하고, 두께는  $\alpha$ -step으로 측정한다. 회전 빔 구조의 측정된 변위와 참고문헌 [12]의 FEM 시뮬레이션 결과를 비교하여 p+ 박막의 평균 잔류 응력을 얻는다. 계산에 사용된 p+ 박막의 탄성계수는 125 GPa이고, 이 값은 Ding 등이 실험으로 얻은 값이다[13]. 표 2의 Type I의 경우에 대하여 5 개의 Sample의 수직 변위를 이용하여 1, 2, 3, 4 차의 다항식으로 구해진 잔류응력 분포를 부록 A에 수록하였다. 또, 그 다항식의 적절성을 확인하기 위하여 실험치에 대한 계산치의 오차를 비교하였다. 부록 A의 오차 분석 결과를 고려하고, 다양한 차수의 경우에 대한 잔류응력 분포와 그림 5의 붕소 도핑 농도 분포를 비교하여 잔류응력 분포를 2 차 다항식으로 나타내는 것이 타당함을 알 수 있다. 또, 부록 B에 의하면 Type I의 경우 최대 잔류응력 값에 대한 최대 오차율은 약 3%이다.

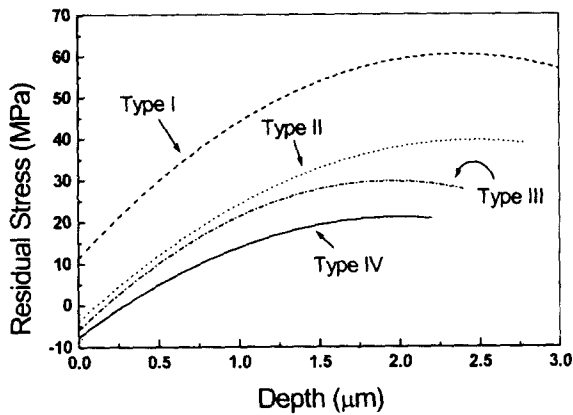
표 2는 외팔보의 두께에 따른 처짐과 각 Type의 평균 잔류 응력을 나타낸다. 후확산 온도가 1000 °C 일 때 후확산 시간이 60 분과 90 분이면 평균 잔류 인장응력이 각각 45 MPa과 25 MPa이고, 후확산 온도가 1100 °C 일 때 후확산 시간이 60 분과 90 분이면 평균 잔류 인장응력이 각각 15 MPa과 8 MPa이다. 여기서, 후확산 시간을 60 분에서 90 분으로 길게 하면 평균 잔류 인장 응력이 약 1/2로 감소하고, 후확산 공정온도를 1000 °C에서 1100 °C로 높이면 평균 잔류 인장 응력이 약 1/3로 감소하는 것을 알 수 있다.

표 3 추정된 잔류응력 분포의 다항식 계수.

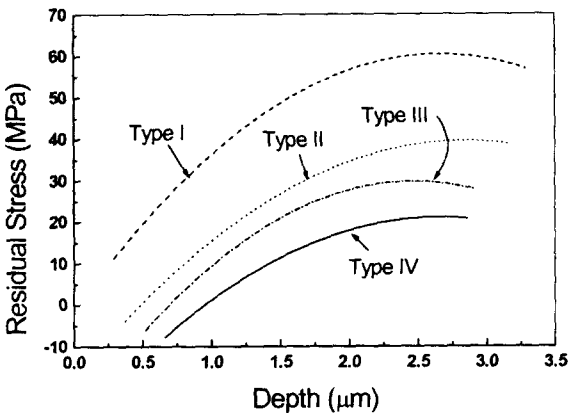
Table 3 The determined coefficients of the residual stress profile polynomial.

	$a_0$	$a_1$	$a_2$
Type I	54.1	-15.8	-9.1
Type II	32.4	-15.1	-7.4
Type III	24.9	-14.7	-9.9
Type IV	15.5	-13.5	-7.5

표 3은 식 (1)에서 응력의 단위는 MPa로, 길이 단위는  $\mu\text{m}$ 로 한 경우에 2 차 다항식의 계수를 구한 결과이다. 2 차 다항식으로 추정된  $p^+$  실리콘의 깊이에 따른 잔류응력분포는 그림 6(a)와 같다. 그림 6(a)는 네 가지 시편의 각각의 깊이에 따른 응력 분포를 나타내는 것으로서 식각으로 제거되는 앞면 산화막은 고려하지 않은 것이다. 그림 6(b)는 서로 다른 후확산 공정에 의해 생성되고 식각공정으로 제거되는 앞면의 산화막 두께를 고려하여 그림 5와 같이 후확산 공정전의  $p^+$  층의 깊이 (절대위치)에 따른 잔류응력 분포를 나타낸 것이고, 이로부터 각 깊이에서의 후확산 공정에 의한 잔류응력 변화를 쉽게 알 수 있다. 후확산 공정의 온도 혹은 시간이 증가할수록 모든 깊이에서 잔류응력이 낮아지나,  $p^+$  층의 표면 부근에서는 압축 응력으로 전환되어 그 크기가 증가한다. 그림 5와 그림 6을 비교하면, 붕소 도핑 농도 분포와 잔류 응력 분포의 변화하는 경향이 비슷함을 알 수 있다. 즉, 붕소 도핑 농도가 낮아질수록 인장 응력의 크기가 작아진다.



(a) 후확산 공정 후의  $p^+$  층의 깊이를 횡축으로 한 경우.  
(a) vs. the  $p^+$  layer depth after the drive-in.



(b) 후확산 공정 전의  $p^+$  층의 깊이를 횡축으로 한 경우.  
(b) vs. the  $p^+$  layer depth before the drive-in.

그림 6 후확산 공정 후의 잔류응력 분포.  
Fig. 6 The residual stress profile after the drive-in process.

## 6. 토 의

Maseeh와 Senturia는 선확산시 생성되는 BSG를 식각 보호막으로 사용한 경우의  $p^+$  박막은 30 MPa의 평균 잔류 응력을 보이고, CVD 질화막을 이용한 경우에도  $p^+$  박막은 인장응력임을 실험적으로 얻었으나, 열산화막을 식각 보호막을 사용한 경우에는  $p^+$  박막의 평균 잔류 응력 이 압축응력임을 발표하였다[7]. 또, Ding과 Ko는 습식 산화 공정을 이용한 후확산 공정을 수행하게 되면 최대 붕소 도핑 농도 감소로 인하여  $p^+$  박막내의 인장응력이 크게 감소하게 되고, 뒷면을 식각하여 제작한 박막은 압축응력 상태를 보인다고 하였다[8]. 그리고, Cabuz 등은  $p^+$  층 앞면의 일부를 제거 할 경우 외팔보의 변위가 크게 감소한다는 실험적 자료를 제시하였다[10]. 기존의 연구 결과를 종합하면, 후확산 공정에 의해 붕소 농도가 낮아지면 인장응력이 작아지고, 산화막이 생성되는 경우 압축응력으로 전환되며  $p^+$  막의 표면 쪽의 응력구배가 큰 것을 알 수 있다.

상기의 연구 결과들은 정성적인 자료에 근거한 결론으로서 평균응력과 응력구배등을 부분적으로만 알 수 있음에 반하여 본 논문의 5절에서 정량적으로 구한 잔류응력 분포에서 후확산 공정의 영향을 명확히 볼 수 있다. 후확산 공정으로 붕소 도핑 농도가 낮아짐에 따라  $p^+$  막의 평균 잔류 응력이 낮아지는 것을 알 수 있고,  $p^+$  층 표면은 산화막의 압축응력의 영향을 받아서 산화막의 두께가 커짐에 따라 인장응력이 점점 작아지고 산화막의 두께가 더 두꺼워지면 압축응력으로 전환되고 그 크기도 점점 커지는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 Type I인 경우에만 시편의 표면에서 인장 응력인 상태를 보이는데, 이는 그림 5에서 보듯이 열산화막의 두께가 다른 시편에 비하여 얇기 때문이다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 회전 빔 구조와 다양한 두께를 갖는 외팔보를 개선된 방법으로 제작하였고, 이 구조물들의 변위로부터  $p^+$  박막의 잔류 응력 분포를 2 차 다항식으로 구하였다. 후확산 공정의 온도 혹은 시간이 증가할수록 붕소 농도가 낮아지며 박막의 두께는 감소하게 되고, 평균 잔류인장 응력이 작아진다. 또,  $p^+$  층의 표면 부근에서는 압축응력으로 전환되어 그 크기가 증가한다.

본 논문의 결과는  $p^+$  식각 정지막을 이용한 박막 제조 시 중요한 설계 요건인 박막의 두께 및 응력 분포 예측 등에 필요한 자료이다. 특히, 공진자의 브리지와 마이크로 펌프의 구동기용  $p^+$  박막 구조 설계 및 공정 설계에 중요한 자료로 쓰일 수 있다. 추후에 붕소 도핑 농도와 잔류 응력과의 관계를 정립하는 연구가 진행될 예정이다.

## 참 고 문 헌

[1] E. Obermeier, "Material Property Data - A Key Issue for the Design of Microsystems," *Proc. International Symposium on MIMR*, Sendai, Japan,

pp. 110-113, September 1995.

[2] S. W. Lee, C. H. Cho, J. P. Kim, S. J. Park, S. W. Yi, J. J. Kim, and D. I. Cho, "The Effects of Post-Deposition Processes on Polysilicon Young's Modulus," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 8, pp. 330-337, 1998.

[3] E. H. Yang, S. S. Yang, O. C. Jeong, "Fabrication and Electrostatic Actuation of Thin Diaphragms," *KSMIE International Journal*, Vol. 12, No. 2, pp. 161-169, 1998.

[4] 정옥찬, 김상철, 양상식, "정전형 평판 공진자의 동특성," 한국 정밀공학회 추계학술대회 논문집, Vol. 2, pp. 1084-1088, 1997. 11.

[5] O. C. Jeong, and S. S. Yang, "Fabrication and Drive Test of a Thermopneumatic Micropump with the corrugated Diaphragm," *International Conference Electrical Engineering 98*, Kyungju, Korea, Vol. 1, pp. 902-905, July 24 - 29, 1998.

[6] K. E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material," *Proc. IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-70, pp. 420-457, May 1982.

[7] F. Maseeh and S. D. Senturia, "Plastic Deformation of Highly Doped Silicon," *Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators*, Vol. 2, Montreux, Switzerland, pp. 861-865, June 1989.

[8] X. Ding and W. H. Ko, "Buckling Behavior of Boron Doped  $p^+$  Silicon Diaphragms," *Tech. Digest, IEEE Int. Conf. on Solid State Sensors and Actuators*, Montreux, Switzerland, pp. 201-204, June 1991.

[9] W. H. Chu and M. Mehregany, "A Study of Residual Stress Distribution through the Thickness of  $p^+$  Silicon Films," *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-40, pp. 1245-1250, 1993.

[10] C. Cabuz, K. Fukatsu, T. Kurabayshi, K. Minami, and M. Esashi, "Microphysical Investigations on Mechanical Structures Realized in  $p^+$  Silicon," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 109-117, September 1995.

[11] E. H. Yang, S. S. Yang, S. H. Yoo, "A Technique for Quantitative Determination of the Profile of the Residual Stress along the Depth of  $p^+$  Silicon Films," *Applied Physics Letters*, Vol. 67, No. 7, pp. 912-914, 1995.

[12] E. H. Yang, S. S. Yang, "The Quantitative Determination of the Residual Stress Profile in Oxidized  $p^+$  Silicon Films," *Sensors and Actuators A*, Vol. 54, pp. 684-689, December 1996.

[13] X. Ding, W. H. Ko, and J. M. Mansour, "Residual Stress and Mechanical Properties of Boron doped  $p^+$  Silicon Films," *Proc., IEEE Transducers '89*, Vol. 2, pp. 866-871, 1989.

부 록 A

표 2의 Type I의 측정치를 이용하여 식 (1)의 다항식의 차수를 1 차에서 4 차까지 변화시키면서 곡선 적합 방법으로 계수를 구하여 얻은 잔류응력의 분포는 그림 A.1과 같다. 각 다항식의 경우에 대하여 얻어진 계수로부터 식 (3)의  $v_L$ 을 계산하고, 표 2의 실험치에 대한 계산치의 오차는 그림 A.2와 같다. 다항식의 차수가 1인 경우에는  $\pm 53 \mu\text{m}$ 의 오차를, 2 차와 3 차인 경우에는 각각 최대  $7 \mu\text{m}$ 와  $5 \mu\text{m}$ 의 오차를 갖는다. 4 차인 경우에는 실험치와 같으므로 오차가 없다.

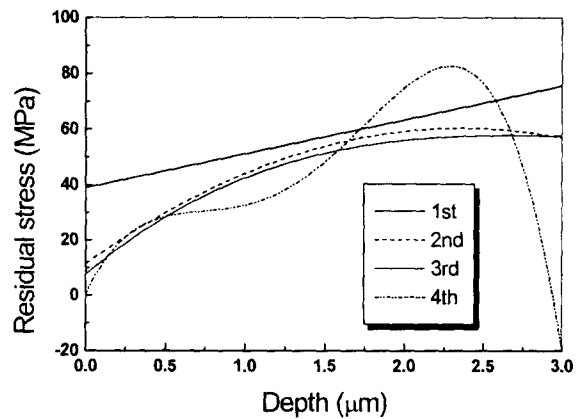


그림 A.1 다항식의 차수에 따른 추정 잔류응력 분포.  
Fig. A.1 The residual stress profile estimated for various polynomial orders.

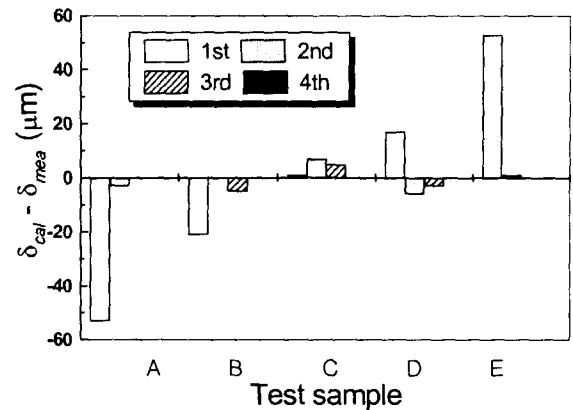
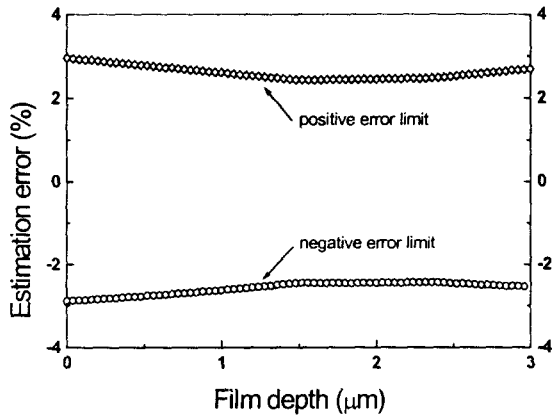


그림 A.2 다항식의 차수에 따른 수직 변위 오차.  
Fig. A.2 The vertical deflection calculation errors for various polynomial orders.

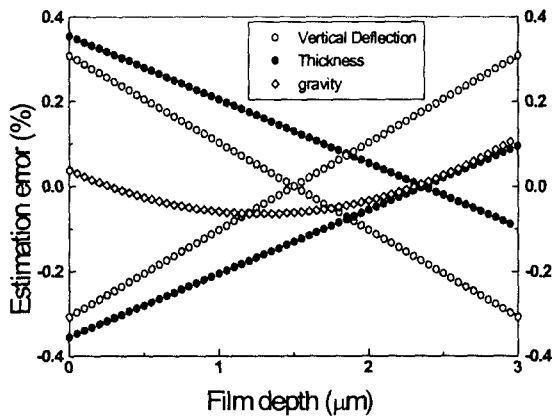
부 록 B

5 절에서 구한 잔류응력 분포의 오차는 광학 현미경의 초점 조절법에 의한 외팔보의 수직 변위 측정 오차 ( $\pm 2 \mu\text{m}$ )와 외팔보 두께 측정 오차 ( $\pm 0.01 \mu\text{m}$ ), 회전 빔의 회전 변위 측정 오차 ( $\pm 0.05 \mu\text{m}$ ), 중력에 의한 외팔보 빔의 처짐(최대  $+ 0.7 \mu\text{m}$ ) 등에 기인한다. 그림 B.1(a)는 Type I의

경우에 수직 변위 측정 오차, 두께 측정 오차, 중력에 의한 처짐 등 각각의 오차가 잔류응력 측정에 전파된 오차를 최대 잔류응력 값에 대한 오차율로 나타낸 것이다. 오차율은  $p^+$  박막의 깊이에 따라 다르고 박막의 양쪽 표면으로 갈수록 커진다. 또, 회전빔의 회전 변위 측정 오차에 의한 응력 측정 오차율은 약  $\pm 2\%$ 이고, 박막 깊이에 관계없이 동일하다. Type I인 경우에 상기의 네 가지 오차가 중첩되면 그림 B.1(b)과 같이 박막 앞쪽 표면에서 약  $\pm 3\%$ 의 최대 잔류응력 오차를 보인다.



(a) The estimation error due to the vertical deflection error, thickness error, and the gravity each.  
(a) 수직 변위 오차, 두께 오차, 중력에 기인한 오차.



(b) 회전 변위 오차를 포함한 경우 중첩된 오차.  
(b) The estimation error due to all including the rotation measurement error.

그림 B.1 최대 잔류응력 값에 대한 오차율.  
Fig. B.1 The percentage error with respect to the maximum residual stress.

## 저 자 소 개



정 옥 찬 (鄭玉贊)

1972년 6월 28일 생. 1997년 아주대학교 일반대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정. 주관심분야 : 박막의 잔류응력 해석 및 측정과 마이크로 펌프용 구동기의 설계, 제작 및 측정.

Tel : (0331) 219-2488, Fax : (0331) 212-9531

E-mail : memsoku@mems.ajou.ac.kr



박 태 규 (朴泰奎)

1975년 6월 5일 생. 1998년 아주대학교 제어계측공학과 졸업(학사). 현재 동 대학원 석·박사 통합과정. 주관심 분야 : 초점 미세 조절용 마이크로구동기의 설계 및 제작.

Tel : (0331) 219-2488, Fax : (0331) 212-9531

E-mail : jackptg@madang.ajou.ac.kr



양 상 식 (梁翔植)

1958년 1월 16일생. 1980년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1983년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1988년 U. C. Berkeley 졸업(공학). New Jersey Institute of Technology 연구 조교수. 현재 아주대 공대 전자공학부 교수. 주관심분야 : 마이크로 소자의 Mechanism

과 Actuation, Motion Control과 Nonlinear Control

Tel : 0331-219-2481, Fax : 0331-212-9531

E-mail : ssyang@madang.ajou.ac.kr