

후 확산 공정 온도가 p+ 박막의 잔류 응력 분포에 미치는 영향

정옥찬, 박태규, 양상식  
이주대학교 전자공학부

The Effect of Drive-in Process Temperature on the Residual Stress Profile of the p+ Thin Film

O. C. Jeong\*, T. G. Park, and S. S. Yang  
Division of Electronics Eng., Aju University

**Abstract** - In this paper, an effect of drive-in process temperature on the residual stress profile of the p+ silicon film has been investigated. The residual stress profile has been calculated as the fourth-order polynomials. All coefficients of the polynomials have been determined from the measurement of the vertical deflections of the p+ silicon cantilevers with various thickness and the tip displacement of the p+ silicon rotating beam. From the determination results of the residual stress profile, the average stress of the film thermally oxidized at 1000 °C is 15 MPa and that of the film oxidized at 1100 °C is 25 MPa. The profile of the residual stress through the high temperature drive-in process has a steeper gradient than the other case.

1. 서 론

얇고 균일한 박막의 제작은 마이크로 소자의 제작에 있어 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 수 마이크로 두께의 박막들은 제작시 열처리 과정을 거치게 되며, 이 때 서로 다른 물질간의 열 팽창계수 등 박막 자체 특성의 차이로 인하여 박막 내부에 응력이 잔류하게 된다. 특히 붕소 확산에 의해 제작된 p+ 층의 경우 붕소와 실리콘의 입자 크기의 차이로 인하여 수십 MPa 크기의 잔류응력이 발생하게 되고, p+ 층을 마이크로 소자에 사용할 경우에는 바람직하지 않는 응답을 갖게 된다.

기존의 연구로써, F. Masheeh[1] 등은 열산화 공정시 Si/SiO<sub>2</sub> 경계면에 소성변형을 일으키는 응력층이 형성되기 때문에 좌굴 현상이 발생한다는 연구결과를 발표하였다. X. Ding[2] 등은 질소 분위기에서 열처리된 박막에서도 좌굴 현상이 일어남을 보임으로써, 좌굴 현상이 단순히 Si/SiO<sub>2</sub> 경계면의 응력층 때문만은 아님을 밝혔다. 또, W. Chu[3] 등은 좀 더 체계적인 실험을 통하여, 열산화 공정은 Si/SiO<sub>2</sub> 경계면의 응력분포만을 크게 변화시킨다는 결론을 내렸다. 이러한 기존의 연구들은 박막의 좌굴 또는 외팔보의 휨 등을 이용하여 평균 응력을 측정 한 후, 그 결과로부터 박막의 두께 방향의 응력분포를 정성적으로 추측하는 방식으로만 수행되어 왔고, 그 실험 조건이 연구자마다 달라 서로 다른 결론이 도출되고 있다. 최근 Yang[4] 등은 외팔보 구조와 회전빔 구조를 이용하여 실험적인 방법으로 p+ 박막의 잔류응력 분포를 정량적으로 추정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 또, 선 확산 및 후 확산 공정 조건이 서로 다른 두 p+ 박막에 대하여 잔류응력 분포를 추정하고 이를 비교하는 연구를 수행하였다[5]. 그러나, 붕소 확산 공정 및 후 확산의 공정 변수인 시간과 온도가 서로 다르기 때문에 박막 내의 잔류응력 분포를 비교하더라도 각각의 공정 변수가 잔류응력 구배에 미치는 영향을 파악하기 어렵다. 또,

응력 분포 추정에 필요한 각 구조들을 서로 다른 시편에 제작하는 방식으로 공정이 설계되어 잔류응력 추정에 있어서 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 선·후 확산 공정 변수 중 온도 및 시간에 대한 체계적인 실험이 필요하다. 특히, 후 확산 공정 조건이 박막 내의 잔류응력 분포에 미치는 영향에 관한 실험은 전무한 상태이다.

본 연구에서는 Yang[4-5] 등의 잔류응력 추정법을 이용하여 후 확산 공정 온도가 p+ 박막 내부에 존재하는 잔류응력 분포에 미치는 영향을 확인하고, 붕소 도핑 농도의 분포와 잔류응력 분포를 상관관계를 파악한다. 또, 같은 시편 내에 두께를 달리하는 응력 측정 구조를 제작함으로써 여러 시편의 불균일로 인한 잔류응력 추정 오차를 줄인다.

2. 응력추정 방법

본 논문에서는 외팔보 구조를 이용하여 p+ 박막의 증립면에서의 잔류응력에 대한 상대적인 잔류응력 분포를 정량적으로 구하고, 회전 빔 구조를 이용하여 평균 잔류응력을 계산한다[4-5]. 또, 두 구조의 계산 결과로부터 p+ 박막의 깊이 방향으로의 절대적인 잔류응력 분포를 추정한다. 여기서, 잔류응력은 휘어진 외팔보 구조 또는 회전 빔 구조를 본래의 변형이 없는 상태로 되돌려 놓았을 때 존재하는 응력을 의미한다. 또, 박막 내의 잔류응력은 표면에 수직인 방향으로 크기의 변화가 있고 수평 방향으로 균일하다고 가정한다[4].

2. 1. 상대적 잔류응력 분포 추정

외팔보의 단면에서 보의 증립축으로부터 Y 만큼 떨어진 위치에 작용하는 보의 축(x 축)방향 잔류응력,  $\sigma_x$ 를 식 (1)과 같이 다항식으로 표현할 수 있다[4].

$$\sigma_x = \sum_{k=0}^n a_k Y^k \tag{1}$$

여기서,  $a_k$ 는 다항식의 계수로서 상수이다. 만일 외팔보의 윗쪽 면을  $2\delta$  만큼 식각하면 증립축은  $\delta$  만큼 이동하고, 외팔보의 수직 변위가 달라진다. 이동된 증립축, y 에 대한 응력식은 식 (2)와 같다.

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

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

### 3. 응력 측정 구조의 제작 공정

$$v_L = \frac{6L^2}{Ebh^3} M_b$$

$$= -\frac{L^2}{E} \left\{ \frac{1}{2} a_1 - h^2 \delta a_2 + \left( \frac{3}{2} \delta^2 + \frac{3}{40} h^2 \right) a_3 - \left( 2\delta^3 + \frac{3}{10} h^2 \delta \right) a_4 \right\} \quad (3)$$

이다. 여기서,  $E$ 는 탄성계수(Young's modulus)이고,  $L$ 과  $b$  그리고  $h$ 는 각각 외팔보의 길이와 폭과 그리고 두께이다. 다양한 두께를 갖는 외팔보에 대한 수직 변위와 식 (3)을 이용하여 다항식 계수  $a_1 \sim a_4$ 를 구할 수 있다.

#### 2. 2. 평균 응력 추정

박막의 수평방향으로 작용하는 평균응력에 의해 회전 변형이 생기는 회전 빔 구조를 이용하여  $p+$  실리콘 박막에 존재하는 평균 응력,  $\sigma_{avg}$ 를 추정할 수 있다[6]. 식(1)을 이용하면 다항식 계수,  $a_0$ 와 평균응력과의 관계는 식 (4)와 같이 구해진다.

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

여기서,  $H$ 는 식각 전의 박막의 전체 두께를 나타낸다.

#### 2. 3. 시편의 제작 방법

그림 1은 다양한 식각 깊이를 갖는 응력 측정 구조 제작을 위한 공정 개념도를 나타낸다. 점선(-)은 식각 전의 초기 실리콘의 외형을 나타내고, 굵은 선(—)은 단계별 식각후 실리콘의 외형을 나타낸다. 동일한 시편상에서 A, B, C, D 패턴에 대하여 각각의 산화막을 순차적으로 제거하여 식각하면 다양한 박막의 두께를 갖는 구조를 제작할 수 있다. 즉, 패턴 A는 ( $t_A + t_B + t_C$ ) 시간 동안 앞면(뒷면)의 응력층이 식각되고, 패턴 C는  $t_C$  시간 동안 앞면이 식각된다.

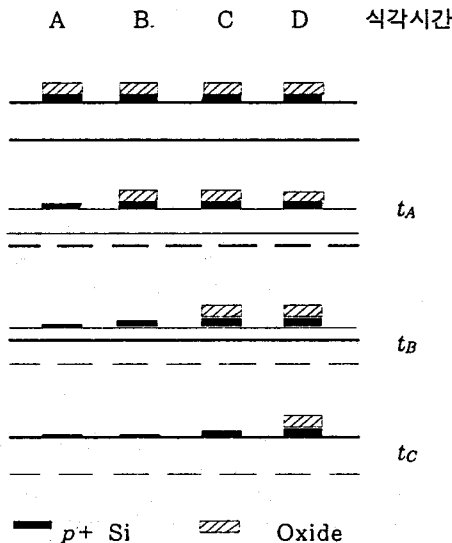
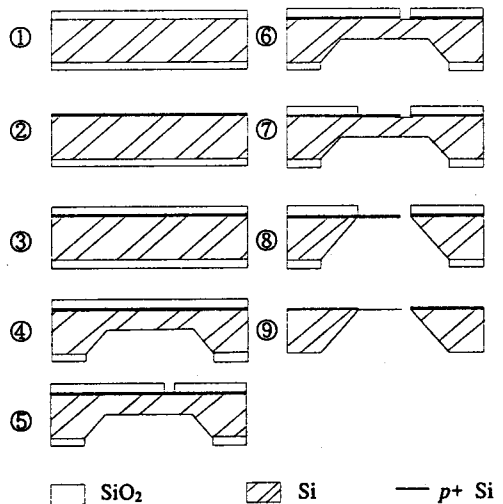


그림 1. 다양한 식각 깊이를 갖는 박막 제작 공정도.

본 실험에서는 비저항이  $10 \sim 20 \Omega\text{cm}$ 이고 두께가  $525 \pm 10 \mu\text{m}$ 인 4 inch,  $n$ 형, (100) 실리콘 웨이퍼를 사용한다. 그림 2는 제작 공정도를 나타낸다. 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. 웨이퍼 앞면의 붕소 확산을 위하여 열산화막을 성장시킨 후, 앞면의 산화막을 제거한다. 붕소의 도핑은 고체 확산원 BN1100을 이용하여  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 600 분 동안 선확산을 수행하고, HF-LTO-HF 공정으로 BSG를 제거한다. 두 시편을 각각  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 와  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 90 분 동안 습식산화로 후확산 공정을 수행한다. 그리고, 뒷면 식각장을 형성한 후, 웨이퍼 전체의 식각에 소요되는 시간에서 앞면의  $p+$  박막을 원하는 만큼 식각하는데 필요한 시간 동안 맨 만큼의 시간을 식각한다. 그리고, 웨이퍼의 앞면에 응력측정용  $p+$  구조물을 형성하기 위하여 사진식각공정을 행한 후, 등방성식각액을 이용하여 선택적으로  $p+$  막을 제거한다. 이 때, 식 (3)의  $a_1 \sim a_4$ 와  $a_0$ 를 구하기 위하여, 같은 시편에 외팔보 구조와 회전 빔 구조를 제작한다. 즉, 그림 1과 같은 식각 방식으로 다양한 두께의 외팔보 구조 제작을 수행한다. 여기서, 외팔보 구조인 경우에는 앞면의 붕소가 도핑된 실리콘 위의 산화막을 선택적으로 제거하고, 뒷면의 식각과 함께 앞면의  $p+$  박막을 식각하고, 회전 빔 구조는 식각정지가 일어날 때까지 뒷면을 완전히 식각한다. 식각 완료 후 BOE 용액에 처리하여 앞면에 남아 있는 산화막을 제거한다. 그리고, 메탄올 처리를 하여 대기중에서 말린다. 그림 3과 4는 각각 제작된 외팔보 구조와 회전 빔 구조의 사진들이다.



① oxidation, ② prepel., ③ drive-in, ④ backside etch, ⑤ oxide-patterning, ⑥  $p+$  layer removal, ⑦ oxide patterning, ⑧  $p+$  layer & backside silicon etch, ⑨ oxide removal

그림 2. 잔류응력 측정 구조의 공정도.

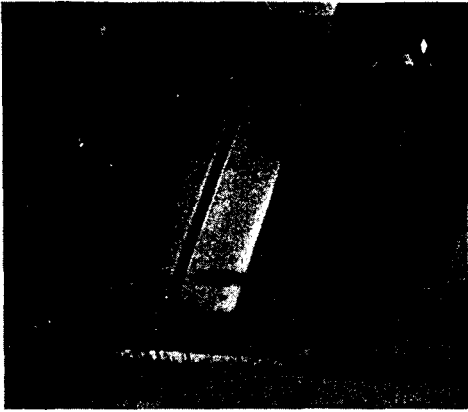


그림 3. 제작된 회전 빔 구조의 사진.

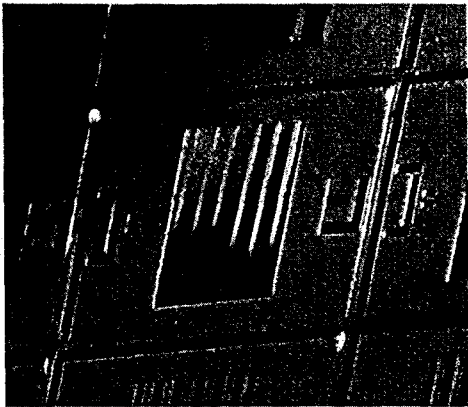


그림 4. 제작된 외팔보 구조의 사진.

#### 4. 측정 및 결과

후확산 공정에 따라 제작된 두 시편의 변위는 광학 현미경의 촛점 조절법을 이용하여 측정한다. 그 측정 결과는 표 1과 같다. 표 1의 측정치를 이용하여 식 (6)의 잔류응력 다항식의 계수,  $a_1 \sim a_4$ 를 구한다. 회전 빔 구조의 측정은 광학 현미경에서 촬영된 사진을 이용하는데, 측정된  $p+$  박막의 두께에 평균응력은 그림 3의 결과와 비교하였을 때, 1000 °C 일 때가 15 MPa이고, 1100 °C에서는 25 MPa로 두 경우 모두 인장응력 상태를 갖는다. 회전 빔 구조를 이용하여 측정된 평균응력과 외팔보 구조로 부터 얻어진 다항식 계수  $a_1 \sim a_4$ 를 이용하여, 박막의 증착층에서의 응력,  $\alpha_0$ 를 구한다. 표 2는 잔류응력 다항식의 각 계수를 구한 결과이다. 이러한 결과로부터 추정된  $p+$  박막의 깊이에 따른 응력분포 곡선은 그림 5와 같다. 후확산 공정의 온도가 높아질수록 박막의 두께가 증가하였으며, 박막 표면에서의 압축응력의 크기가 온도가 낮은 경우보다 크다. 또, 후확산 공정시 성장되는 열산화막의 두께가 증가할수록 잔류응력의 구배가 더 심하게 된다는 실험적 결과를 얻었다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 회전 빔 구조와 다양한 응력층을 갖는 외팔보 구조를 이용하여  $p+$  박막의 깊이 방향에 따른 잔류 응력 분포를 추정하였다. 후확산 공정시 생성되는 열산화막 두께에 따른 잔류 응력 분포의 추이를 시험하기 위하여 1000 °C와 1100 °C에서 90 분 동안 후확산 공정을 수행하였다. 후확산 공정의 온도가 높아질수록 표면에서의 압축응력의 크기가 증가하였다. 또, 고온에

서의 후확산 공정으로 인하여 잔류응력의 구배가 더 심하게 된다는 실험적 결과를 얻었다.

표 1. 후확산 공정 조건에 따른 외팔보의 처짐과 두께.

No.	Drive-in Condition			
	G_I(1000 °C, 90 min)		G_II(1100 °C, 90 min)	
	$h(\mu\text{m})$	$v_L(\mu\text{m})$	$h(\mu\text{m})$	$v_L(\mu\text{m})$
1	1.8	220	2.2	286
2	1.6	195	2.1	244
3	1.4	168	1.7	192
4	1.2	152	1.4	164
5	0.9	118	1.2	130

표 2. 잔류응력 다항식 계수 (단위 : MPa)

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
G_I	17.5	-45.5	-18.2	43.4	21.9
G_II	28.3	-38.9	-5.45	10.9	-6.08

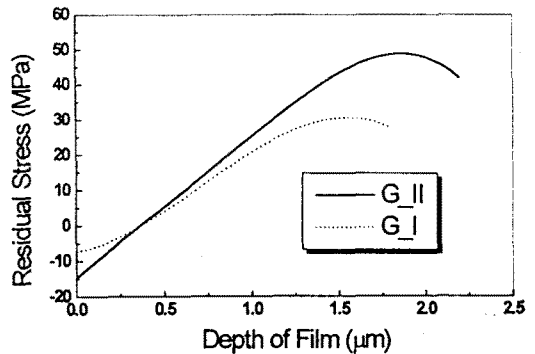


그림 5. 후확산 공정 조건에 따른  $p+$  박막의 깊이 방향에 따른 잔류응력 분포도.

#### 6. 참고문헌

- [1] F. Maseeh et al., *Transducers '89 Digest*, pp. 861-865, June 1989.
- [2] X. Ding et al., *Transducers '91 Digest*, pp. 93-96, June 1991.
- [3] W. H. Chu et al., *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-40, pp.1245-1250, July 1993.
- [4] E. H. Yang, et al., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 67(7), 14, pp. 912-914, August 1995.
- [5] E. H. Yang et al., *Sensors and Actuators A*, Vol. 54, pp. 684-689, 1996.
- [6] J. F. L. Goosen et al., *Transducers '93*, pp. 783-786, June 1993.