

후확산 공정 조건이 p+ 박막의 잔류 응력 분포에 미치는 영향

박태규, 정옥찬, 양상식  
아주대학교 전자공학부

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

T. G. Park\*, O. C. Jeong, and S. S. Yang  
School of Electronics Engineering, Ajou University

**Abstract** - In this paper, the effects of the drive-in process parameters on the residual stress profile of the p+ silicon film has been investigated. All the residual stress profile has been estimated by the second-order polynomial. All the coefficients of the polynomial have been determined from the measurement of the deflections of cantilevers and a rotating beam by using a surface profiler meter and by means of focusing a calibrated microscope. As the drive-in temperature or the drive-in time increases, the boron concentration decreases and the magnitude of the average residual stress decreases. If the boron concentration decreases the tensile residual stress decreases except near the surface where the magnitude of compressive residual stress increases.

1. 서 론

수 마이크로론 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 수 ~ 수십 MPa 크기의 잔류응력이 발생하게 되고, p+ 층을 마이크로 소자에 사용할 경우에는 바람직하지 않은 응답을 갖게 된다.

기존의 연구[1-3]에 의하면 박막의 좌굴 또는 외팔보의 휨 등을 이용하여 평균 응력을 측정 한 후, 그 결과로부터 박막의 두께 방향의 응력분포를 정성적으로 추측하는 방식으로만 연구하였으며, 실험 조건이 연구자마다 달라 서로 다른 결론을 발표하였다. 또, Yang[4-5] 등은 외팔보 구조와 회전빔 구조를 이용하여 실험적인 방법으로 p+ 박막의 잔류응력 분포를 정량적으로 추정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 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 힘들다. 또, 응력 분포 추정에 필요한 각 구조들을 서로 다른 시편에 제작하는 방식으로 공정이 설계되어 잔류응력 추정 에 있어서 다소 오차가 발생할 수 있다. 따라서, 이러한 오차를 줄일 수 있도록 시편 제작 공정을 적절히 설계하여 특정 변수의 영향을 쉽게 알 수 있는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 잔류응력 추정법[4-5]을 이용하여 후확산 공정 조건이 p+ 박막 내부에 존재하는 잔류응력 분포에 미치는 영향을 파악한다. 특히, 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 중립면에서의 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 방향으로로는 균일하다고 가정한다[4].

2. 1. 잔류응력 분포 추정

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[4].

$$\sigma_x = \sum_{k=0}^4 a_k Y^k \tag{1}$$

여기서,  $a_k$ 는 다항식의 계수로서 상수이다.

만일 외팔보의 윗쪽 면을  $2\delta$  만큼 식각하면 중립축은  $\delta$  만큼 이동하고, 외팔보의 수직 변위가 달라진다. 이 동된 중립축, y 에 대한 응력식은 식 (2)와 같다.

$$\sigma_x = \sum_{k=0}^4 a_k (y - \delta)^k \tag{2}$$

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

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

이다. 여기서, E는 탄성계수(Young's modulus)이고, L과 b 그리고 h는 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[4]. 식(1)을 이용하면 다항식 계수,  $a_0$ 와 평균응력과의 관계는 식 (4)와 같이 구해진다.

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

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 식각 공정도를 나타낸다. 점선(- -)은 식각 전의 초기 실리콘의 외형을 나타내고, 실선(—)은 단계별 식각후 실리콘의 외형을 나타낸다. 동일한 시편상에서 패턴 A, B, C, D, E에 대하여 각각의 산화막을 순차적으로 제거하여 식각하면 다양한 박막의 두께를 갖는 구조를 제작할 수 있다. 즉, 패턴 A는 ( $t_A + t_B + t_C + t_D$ ) 시간 동안 앞면(뒷면)의 응력층이 식각되고, 패턴 C는 ( $t_C + t_D$ ) 시간 동안 앞면이 식각된다.

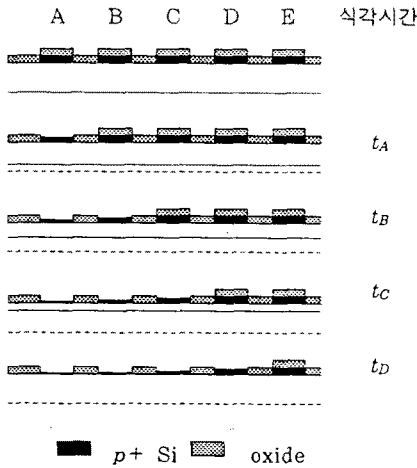


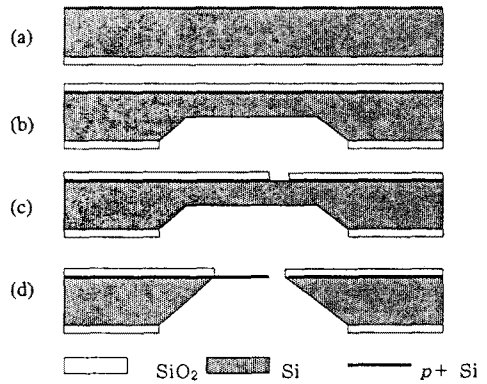
그림 1. 다양한 식각 깊이를 갖는 응력 측정 구조 식각 공정도.

## 3. 응력 측정 구조의 제작 공정

본 실험에서는 비저항이  $10 \sim 20 \Omega\text{cm}$ 이고 두께가  $330 \pm 10 \mu\text{m}$ 인 4 inch,  $n$ 형, (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 2는 정렬 구멍 식각 후의 제작 공정도를 나타낸다. 열산화막을 성장시킨 후, 앞면의 산화막을 제거하고, 그림 2(a)와 같이 웨이퍼 앞면을 붕소로 도핑한다. 붕소의 도핑은 고체 확산원 BN1100을 이용하여  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 60분 동안 선풍산을 수행하고, HF-LTO-HF 공정으로 BSG를 제거한다. 후확산 공정 온도는  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  혹은  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고 후확산 시간은 60 혹은 90 분으로 하여 습

식산화로 후확산 공정을 수행한다. 각 시편의 공정 조건은 표 1과 같다. 그림 3은 각 시편의 붕소도핑 분포를 T-SUPREM 시뮬레이션으로 구한 결과이다. 후확산 온도나 후확산 시간이 증가할수록 시편 표면의 도핑 농도는 낮아지고, 전체적으로 농도 구배가 작아진다.

그림 2(b)와 같이 웨이퍼 뒷면에 식각창을 형성한 후, 웨이퍼 전체의 식각에 소요되는 시간에서 앞면의  $p+$  층 표면을 원하는 만큼 식각하는데 필요한 시간을 뺀 만큼의 시간 동안 식각한다. 그림 2(c)와 같이 웨이퍼의 앞면에 응력측정용  $p+$  구조물을 형성하기 위하여 사진식각공정을 행한 후, 등방성 식각액을 이용하여 선택적으로  $p+$  층을 제거한다. 이 때, 한 시편에 6 개의 패턴의 외팔보 구조와 회전 빔 구조의 패턴이 완성된다. 이후에 그림 1과 같은 식각 방식으로 다양한 두께의 외팔보 구조 제작을 수행한다. 여기서, 외팔보 구조인 경우에는 붕소가 도핑된 실리콘 앞면의 산화막을 선택적으로 제거하고, 뒷면의 실리콘과 함께 앞면의  $p+$  박막을 식각한다. 회전 빔 구조는 그림 1의 패턴 E와 같이  $p+$  식각정지가 일어날 때까지 뒷면을 완전히 식각한다. 식각 완료 후 BOE 용액에 처리하여 앞면에 남아 있는 산화막을 제거하여 그림 2(d)와 같이 응력 측정 구조를 완성한다. 그림 4는 제작된 외팔보 구조와 회전 빔 구조의 사진들이다.



(a) oxidation and predeposition (b) drive-in and backside etch (c) oxide-patterning and  $p+$  layer removal (d)  $p+$  layer and backside silicon etch

그림 2. 잔류응력 측정 구조의 공정도.

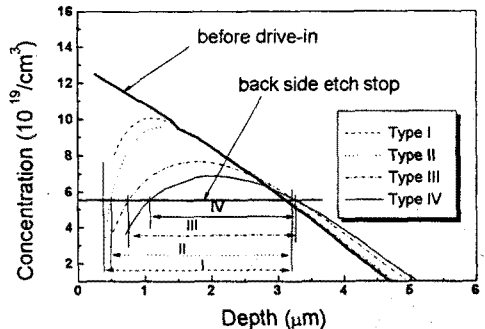
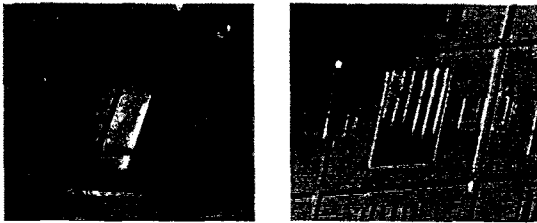


그림 3. 붕소 도핑 농도에 대한 T-SUPREM 시뮬레이션 결과.

표 1. 각 시편의 공정 조건

		drive-in temperature(°C)	
		1000	1100
drive-in time(min)	60	Type I	Type III
	90	Type II	Type IV



(a) 회전 필름 구조 (b) 외팔보 구조

그림 4. 제작된 응력 측정 구조의 사진.

#### 4. 측정 및 결과

제작된 두 구조의 변위와 두께는  $\alpha$ -step과 광학 현미경의 초점 조절법을 이용하여 측정한다. 표 2는 각 외팔보의 처짐과 두께 및 회전 필름 구조의 변위와 FEM 시뮬레이션 결과[4]를 비교하여 얻은  $p+$  박막의 평균잔류응력을 나타낸다. 여기서, 외팔보의 처짐과 두께의 단위는  $\mu\text{m}$ 이다. 표 2의 측정치를 이용하여 식 (1)의 다항식의 차수를 1차에서 4차까지 변화시키면서 계수를 구하고, 다시 이 계수를 이용하여 식 (3)의  $v_L$ 을 계산하였다. 계산된 외팔보 끝단의 수직 변위를 표 2의 실험 결과와 비교할 때, 다항식의 차수가 2 차 이상인 경우에는 수  $\mu\text{m}$  정도의 오차를, 1 차 다항식인 경우에는 수십  $\mu\text{m}$ 의 오차를 보인다. 또, 그림 3의 봉소 도핑 농도를 고려할 때, 2차 다항식으로 응력 상태를 표현하는 것이 적절하다.

표 3은 식 (1)에서 응력의 단위는 MPa로, 길이 단위는  $\mu\text{m}$ 로 한 경우 각 계수를 구한 결과이다. 이러한 결과로부터 추정된  $p+$  층의 깊이에 따른 응력분포 곡선은 그림 5와 같다. 후확산 공정의 온도 혹은 시간이 증가할수록 봉소 농도가 낮아지며 박막의 두께는 감소하게 되고, 평균 잔류응력이 작아진다. 또,  $p+$  층에서 후확산 공정으로 인하여 봉소 도핑 농도가 낮아질수록 인장 응력의 크기가 작아지고 특히  $p+$  층의 표면부근에서는 압축응력으로 전환되어 그 크기가 증가한다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 회전 필름 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 시험하였다.

본 논문의 결과는  $p+$  식각 정지막을 이용한 박막 제조시 중요한 설계 요건인 박막의 두께 및 응력 분포 예측 등에 필요한 자료이다. 특히, 공진자의 브리지와 마이크로 펌프의 구동기용  $p+$  박막 설계 및 공정설계에 중요한 자료로 쓰일 수 있다.

표 2. 후확산 공정 조건에 따른 외팔보의 처짐과 두께 및 회전 필름 구조로부터 얻은 평균 잔류 응력.

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	

표 3. 잔류응력 다항식 계수.

	$a_0$	$a_1$	$a_2$
Type I	57.2	-15.2	-8.8
Type II	36.4	-14.5	-7.1
Type III	25.5	-14.1	-9.5
Type IV	18.2	-12.9	-7.2

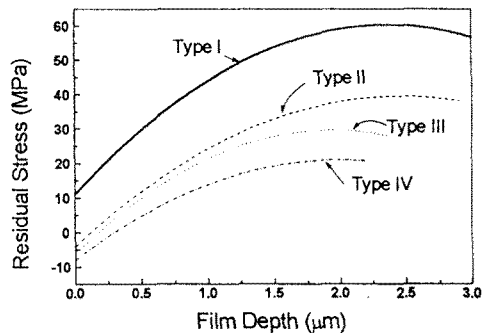


그림 5. 후확산 공정 조건에 따른  $p+$  박막의 잔류응력 분포도.

#### 6. 참고문헌

- [1] F. Masech 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.