

붕소가 도핑된 실리콘 박막의 잔류응력으로 인한 변형에 관한 실험적 연구

양 의 혁, 양 상 식, 지 영 훈
아주대학교 제어계측공학과

An Experimental Study on the Deformation of Boron Doped Silicon Diaphragms due to the Residual Stress

E. H. Yang, S. S. Yang and Y. H. Ji
Dept. of Control and Instrumentation Engr. Ajou University

ABSTRACT

In this paper, a novel method to figure out the relative residual stress distribution along the depth of silicon diaphragms is presented. Cantilevers with various thickness are fabricated by the time controlled etching method using EPW as an etchant. The boron concentration along the depth of the cantilevers is obtained by the TSUPREM IV simulation, and the etching time to get the proper thickness is calculated. By measuring deflections of the p+ silicon cantilevers, the stress profile along the depth of diaphragm is calculated. The obtained stress profile is reasonable and useful to expect the deflection of cantilevers and the buckling of diaphragms.

1. 서 론

얇고 균일한 박막의 제작은 마이크로 소자의 공정에 있어 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 박막을 마이크로 전자기계 시스템(Micro Electro Mechanical Systems)에 응용하기 위하여는 그 제작방법도 마이크로 디바이스의 제작을 위한 반도체 공정과 부합되어야 한다. 반도체 공정에 부합되는 전기적, 기계적 특성이 좋은 마이크로 요소의 제작이라는 측면에서 본다면, 주로 실리콘 반도체 계열의 물질을 사용하는 것이 유리하다. 이 중 p+ 박막은 제작이 용이하고 정밀한 두께조절이 가능하다는 장점이 있다. 마이크로 요소의 일부 부분으로 사용할 경우, p+ 박막은 박막 자체의 내부 잔류응력으로 인하여 동작특성이 비선형적이 되고, 요소의 기계적 강도가 약화된다. 최근, 이 문제들을 해결하기 위하여 p+ 박막의 길이에 따른 응력분포의 분석 및 좌굴(buckling)의 발생방지 방법에 관한 연구가 서서히 시작되고 있다.[1~4] F. Masheeh[1] 등은 p+ 박막 자체는 인장응력을 받고 있으나, 산화막 마스크 제작을 위한 열처리 공정시 산화막과 p+ 실리콘의 열적 불일치로 인하여 그 경계면에 소성(plastic)변형을 일으키는 응력층(stressed layer)이 형성되기 때문에 좌굴(buckling) 현상이 발생한다는 연구결과를 발표하였다. X. Ding[2] 등은 좌굴 현상은 산소 분위기에서 열처리된 박막 뿐만 아니라, 질소 분위기에서 열처리된 박막에서도 일어난다는 실험결과를 발표하였다. 이들 연구에 의하면 열처리된 p+ 박막 자체가 압축응력을 받는 것으로 되어 있다. 이는 열처리 공정으로 인한 붕소 원자의 재분포와 오랜 확산으로 형성된 실리콘 원자와 붕소 원자간의 격자의 불일치, 그리고 박막형성을 위하여 뒷면에서부터 식각할 때 박막이 형성되면서 그 모서리(edge) 부분에 발생하는 집중적인 압축응력 때문

이라고 분석하고 있다. W. Chu[3] 등은 열산화 공정이 p+ 실리콘 박막의 두께에 걸친 잔류응력의 분포에 미치는 영향을 조사하였다. 이들은 마스크의 모양을 외팔보 형태로 제작하여 p+ 박막을 형성하고, 식각 후 외팔보의 아래방향 혹은 윗 방향으로의 휨 정도를 현미경의 촛점 조절법으로 측정하여 그 응력분포를 밝혀냈다. 시편을 A, B 그룹으로 나누었는데, A의 시편은 앞면의 산화막을 그대로 두었고 B의 시편은 앞면의 산화막을 제거하여 뒷면이 식각되는 동안 앞면의 p+ 실리콘 부분도 식각액에 노출되도록 하였다. 실험결과 A 그룹의 p+ 외팔보들은 밑으로 휘어져 있고 B 그룹의 외팔보들은 윗쪽으로 휘어졌는데, 이 사실로부터 열산화 공정은 p+ 실리콘과 산화막의 경계층의 응력분포를 변화시키며, 나머지 p+ 실리콘의 응력상태는 계속 인장 응력을 받고 있다는 결론을 내렸다.

기존의 연구결과들을 보면, 같은 p+ 박막의 응력분포에 대하여 서로 다른 결론들이 도출되고 있는데, 여기서 크게 두 가지 문제점을 찾아볼 수 있다. 첫째는 실험방법상의 차이로 인한 오류이다. X. Ding 등은 4시간 이상의 긴 열처리 공정을 행한 반면 W. Chu 등은 50분 정도의 비교적 짧은 시간 동안 열처리를 행한 후 식각공정을 행하였기 때문에 이들의 연구 결과의 차이를 그대로 비교하는 것은 무리이다. 또, 식각시간과 그 방법도 모두 다르다. p+ 박막은 앞, 뒷면의 식각 방법에 따라 식각되는 깊이가 다르기 되므로, 붕소의 도핑 농도 분포를 정확히 예측한 후 식각하여야 하나, 이들의 연구에서는, 단순히 p+ 박막이 식각되어 그 두께가 변하면서 외팔보의 변위가 달라진다는 것 이외에는 언급하지 않았다. 둘째는 붕소 확산원의 종류와 식각액의 조성비 등 실험 조건의 차이로 인한 오류이다. 붕소 확산원의 종류에 따라 확산도(diffusivity) 및 p+ 박막에 대한 식각률이 차이를 보이게 되므로, 각 연구자 고유의 실험 조건을 명백히 제시한 후 실험결과에 대한 결론을 얻어야 한다. 이러한 점을 감안할 때, p+ 박막의 응력분포에 대한 해석은 박막에 작용하는 평균 응력에 대한 정성적 분석만으로는 부족하며 박막의 두께별로 퍼져 있는 응력의 분포를 해석적으로 예측할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 p+ 박막의 두께에 대한 응력의 분포를 분석하는 새로운 방법을 제시하고, 그에 대한 실험을 수행한다.

2. 잔류응력분포 해석

본 논문에서는 붕소확산공정과 열산화공정, 식각공정 등을 거쳐 제작되는 p+ 박막의 잔류응력 분포를 해석하기 위하여 p+ 외팔보를 제작하고, 그 변형을 측정하여 응력 분포를 계산한다. 여기서, 잔류응력이

라 함은 박막 또는 외팔보의 변형이 없는 상태에서 그 내부에 존재하는 응력을 의미한다. 따라서, 잔류응력은 휘어진 외팔보를 본래의 상태로 되돌려 놓기 위하여 가해주는 응력과 같다. 박막 내의 잔류응력은 표면에 수직인 방향으로만 변화가 있고 수평 방향으로는 균일하다고 가정한다. 또 식각공정은 응력분포에 영향을 주지 않는다고 가정한다.

그림 1은 내부 잔류응력으로 인하여 휘어진 $p+$ 실리콘 외팔보를 나타낸다. h 는 외팔보의 두께, b 는 외팔보의 폭이다. 외팔보 내의 x 축 방향 잔류응력을 σ_x 라 하고, 이를 식 (1)과 같이 y 에 대한 다항식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_x = \sum_{i=0}^n a_i y^i \quad (1)$$

여기서, a_i 는 다항식의 계수로서 상수이다. 외팔보에 작용하는 굽힘 모멘트, M_b 와 잔류응력과의 관계는

$$\begin{aligned} M_b &= - \int_A \sigma_x y dA \\ &= - \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x b y dy \end{aligned} \quad (2)$$

이고, 외팔보의 y 축 방향의 변위 v 와 M_b 와의 관계는

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M_b}{EI_{yy}} \quad (3)$$

이다. 여기서 E 는 탄성계수이고, I_{yy} 는 중립축에 대한 단면의 관성모멘트로서

$$I_{yy} = \frac{1}{12} b h^3 \quad (4)$$

이다. 외팔보의 윗쪽 면을 $2\delta_m$ 만큼 식각하면 그 단면과 중립축의 이동은 그림 2와 같고 윗쪽의 $2\delta_m$ 만큼의 잔류응력층이 없어지게 되므로, 외팔보의 수직변위가 변화하게 된다. 이 때의 외팔보의 두께와 중립축을 각각 h_m , y_m 이라 하면

$$y_m = y + \delta_m \quad (5)$$

이고, 식 (5)를 이용하여 식 (1)을 y_m 과 δ_m 으로 표현하면

$$\sigma_x(y_m) = \sum_{i=0}^n a_i (y_m - \delta_m)^i \quad (6)$$

이며, 식 (2)와 식 (4)의 h 와 y 는 단순히 h_m 과 y_m 으로 각각 대체하여

$$M_b = - \int_{-h_m/2}^{h_m/2} \sigma_x b y_m dy_m \quad (7)$$

$$I_{yy} = \frac{1}{12} b h_m^3 \quad (8)$$

의 관계식을 얻는다. $x=0$ 에서 외팔보의 수직변위와 그 기울기는 모두 0으로 하여 식 (3)을 적분하면, 윗면이 $2\delta_m$ 만큼 식각되어 외팔보 두께가 h_m 인 경우의 외팔보 끝점($x=L$)에서의 수직변위, v_L 이 구해진다. 여기서 다항식의 차수를 5 차 까지로 제한하면,

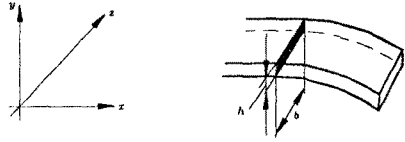


그림 1. 내부 잔류응력에 의하여 휘어진 $p+$ 외팔보

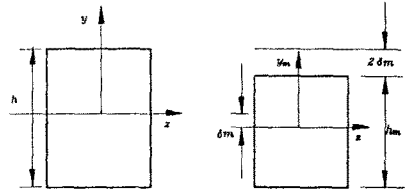


그림 2. 두께가 다른 $p+$ 외팔보의 단면도

$$\begin{aligned} v_{|x=L} &= - \frac{12L^2}{E} \left[\frac{h_m^6}{24} a_1 - \frac{h_m^8}{12} \delta_m a_2 \right. \\ &\quad + \left(\frac{h_m^6}{8} \delta_m^2 + \frac{h_m^8}{160} \right) a_3 \\ &\quad - \left(\frac{h_m^6}{6} \delta_m^3 + \frac{h_m^8}{40} \delta_m \right) a_4 \\ &\quad + \left(\frac{5}{24} h_m^6 \delta_m^4 + \frac{h_m^8}{16} \delta_m^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{h_m^{10}}{896} \right) a_5 \left. \right] \end{aligned} \quad (9)$$

이다. $p+$ 실리콘 외팔보의 윗면을 비등방성 식각액을 이용하여 시간조절법으로 식각하여, 외팔보의 두께를 바꾸어 주면서 그 때의 외팔보 끝점의 수직변위를 측정하고, 식 (9)로부터 응력분포를 나타내는 다항식의 계수 $a_1 \sim a_5$ 를 계산함으로써 잔류응력의 분포를 구한다. 그러나, 여기서 a_0 는 구할 수가 없기 때문에 깊이에 따른 응력 분포의 절대적인 크기는 알 수 없고, 상대적인 응력분포의 형태만을 알 수 있다.

3. 박막제작

본 실험에서는 비저항이 1~10.0cm인 4 inch, n 형 (100) 실리콘 웨이퍼를 사용한다. 식각액은 Ethylenediamine, Pyrocatechol, DI Water 를 250ml : 40g : 80ml 로 혼합한 EPW 용액을 사용하고 식각은 $115 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 수행한다. EPW 식각액의 실리콘 식각률은 실리콘에 주입된 붕소원자의 농도에 따라 변한다. H. Seidel[5]은 실험 자료를 토대로 다음의 관계를 얻었다.

$$R = \frac{R_i}{\left[1 + \left(\frac{C_B}{C_0} \right)^4 \right]} \quad (10)$$

여기서, R_i 는 도핑되지 않은 실리콘의 식각률이고, R 은 붕소 도핑농도 C_B 에서의 식각률이다. C_0 는 도핑농도에 따른 식각률 곡선에서 식각률이 급격히 낮아지기 시작하는 점 ($R=R_i/2$ 인 점)의 붕소 도핑농도를 나타낸다. 붕소 도핑농도 C_B 에서의 $p+$ 박막의 식각깊이를 d , 식각시간을 t 라 하면, 식 (10)으로부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$t = \frac{d}{R_i} \left[1 + \left(\frac{C_B}{C_0} \right)^4 \right] \quad (11)$$

EPW 용액을 이용한 여러 차례에 걸친 식각실험으로부터, $C_0 = 2.9 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 이고 $R_i = 1 \mu\text{m}/\text{min}$ 임을 얻는다. 식 (11)과 시뮬레이션으로 얻는 붕소의 농도분포의 프로파일을 이용하여 p^+ 박막을 원하는 깊이로 식각하는데 필요한 식각시간을 계산할 수 있다. n 형 실리콘 웨이퍼를 1100°C 에서 420분 동안 붕소를 선풍산(predeposition)한 후, 900°C 에서 20분간 LTO 공정을 행하여 HF 용액으로 BSG를 제거하고 1100°C 에서 16분 동안 습식산화로 후확산(drive-in)한 경우에 박막의 깊이 방향으로의 붕소의 농도분포를 TSUPREM IV 시뮬레이션으로 얻는다. 그림 3은 시뮬레이션을 통하여 얻어진 붕소의 농도분포를 나타낸다. 표 1은 상기의 공정 후, p^+ 박막의 뒷면을 식각할 때 식 (11)로 계산된 식각두께에 따른 시간을 나타낸다.

표 1. p^+ 박막의 식각두께와 식각시간

group	d (μm)	t (min)
1	0.0	0.0
2	0.12	10
3	0.4	40
4	0.46	50
5	1.6	280

p^+ 박막의 선택적 식각 및 붕소 도핑을 위한 1장의 마스크와 웨이퍼의 양면 정렬(double-side alignment)을 위한 1장의 마스크, 그리고 뒷면의 식각창을 위한 1장의 마스크를 사용한다. 박막과 외팔보 이외에도 H. Guckel 등[6]과 M. Mehregany 등[7]이 고안한 응력분석 구조를 마스크에 포함시킨다. 식(9)에서 $a_1 \sim a_5$ 를 구하기 위하여, 동일하게 처리된 시편에 대하여 표 1과 같이 p^+ 박막의 식각시간을 각각 다르게 하며 5 그룹의 시편을 제작한다. p^+ 박막의 뒷면으로부터의 식각을 통한 두께의 조절실험은 실리콘 웨이퍼 자체의 두께 오차 및 10시간에 가까운 긴 식각에 따른 식각률의 오차 때문에, 계산된 수치와 같이 정확히 수행하기가 어려우므로 박막 뒷면에서의 식각정도가 가능한 일정한 깊이에서 일어나도록 해 주면서 p^+ 박막 앞면을 서로 다른 시간으로 식각하여 두께를 조절하여야 한다. 앞면에 선택적으로 붕소가 도핑된 후 그 위에 산화막이 덮여 있는 상태에서, 각 공정의 조건이 달라지게 된다.

그림 4는 실험 공정도를 나타낸다. 여기서, w 는 실리콘 웨이퍼의 두께이고 x 는 뒷면의 식각 깊이를 나타낸다. $0.5 \mu\text{m}$ 의 열산화막을 성장시킨 후 양면 정렬 구멍 형성을 위한 사진식각공정을 행한다. 30분 동안의 식각을 통하여 정렬구멍을 형성한다. 열산화막을 모두 제거한 다음 $2 \mu\text{m}$ 의 열산화막을 성장시킨다. 웨이퍼의 앞면에 여러가지 구조의 응력분석용 p^+ 구조물을 형성하기 위하여 사진식각공정을 행한다. 이때, 웨이퍼의 뒷면으로의 붕소 확산을 막기 위하여 뒷면의 산화막은 PR로 보호한다. 고체 붕소확산원 BN1100를 사용하여 1100°C 에서 7시간 선풍산한 다음 900°C 에서 20분간의 LTO공정 후 HF용액에 처리하여 BSG를 제거하고 1100°C 에서 16분 동안 습식산화하여 박막을 위한 p^+ 층을 형성함과 동시에 다음 공정의 비등방성 식각시 식각 마스크로 작용할 $0.3 \mu\text{m}$ 의 산화막을 성장시킨다. 앞면의 산화막을 모두 그대로 두고 뒷면에 식각창을 형성한 후, 웨이퍼 전체의 식각에 소요되는 시간에서 앞면의 p^+ 박막을 원하는 만큼 식각

하는데 필요한 시간을 뺀 만큼의 시간을 식각한다. 식각 완료 후 앞면의 붕소가 도핑된 실리콘 위의 산화막을 선택적으로 제거하고 p^+ 박막을 식각하기 위한 식각을 행한다. 이 때 뒷면의 식각과 함께 앞면의 p^+ 박막도 원하는 만큼 제거된다. 식각 완료 후 시편을 DI water에 세척한 후 BOE용액에 처리하여 남은 산화막을 제거한다. 다시 시편을 DI water에 세척하고 메탄올에 5분 동안 처리한 후 상온에서 말린다. 공정이 완료된 시편은 외팔보 등의 구조물의 변위 측정을 위한 장치에 고정한다. 시편의 뒷면 식각창 주위에는 식각 깊이를 측정할 수 있는 테스트 패턴들이 형성되어 있기 때문에 시간조절에 의한 뒷면의 식각도 비교적 정확하게 할 수 있다. 이러한 방법은 식각률의 오차 뿐만 아니라 붕소 도핑농도의 추정오차와 식각시간 계산상의 오차 등으로 인하여 완전히 정확할 수는 없으나, 박막이 형성될 때 박막으로 빛이 통과하는 정도를 관찰하여 그 두께를 어느 정도 예측할 수 있기 때문에 여러 번에 걸친 반복실험에 의하여 정확도를 높일 수 있다.

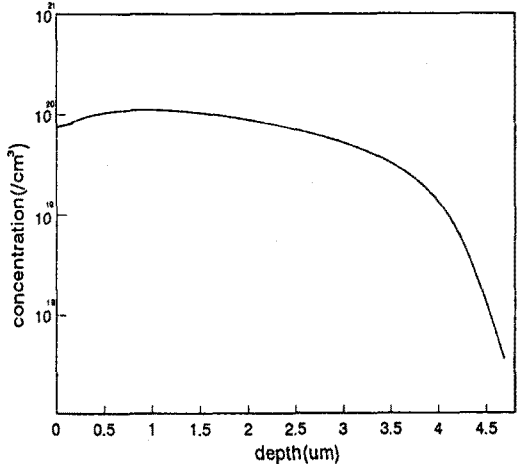


그림 3. 붕소의 농도분포

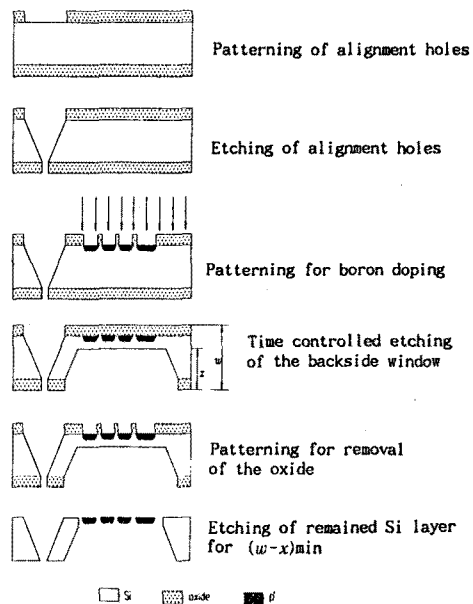


그림 4. 식각 실험 공정도

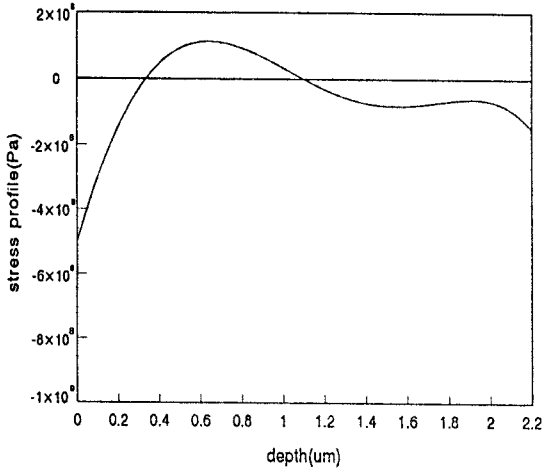


그림 5. p^+ 박막의 두께에 따른 응력 분포도

4. 측정 및 결과

응력분포에 따른 외팔보의 수직변위는 W. Chu 등이 이용한 광학 현미경의 초점 조절법을 이용하여 측정할 수 있다. 외팔보의 두께는 광학 현미경으로 단면을 관찰함으로써 알 수 있다. 각 시편에 대한 측정결과는 표 2와 같다. 표 2의 측정치를 이용하여 2절의 잔류응력 다항식의 각 계수를 구한 결과가 표 3과 같다. 이러한 결과들로부터 추정된 p^+ 박막의 두께에 따른 응력분포도는 그림 5와 같다. 2절에서 언급한 바와 같이 α_0 를 알 수 없기 때문에, 어느 범위가 인장 또는 압축 응력 하에 있는지는 파악할 수 없으나, 응력 분포곡선으로부터의 산화막이 있던 면의 경계층은 압축응력을 받고 있을 가능성이 큰 것은 알 수 있다.

표 2. 측정결과

시 편	$h_m(\mu m)$	$v_L(\mu m)$
1	2.2	189
2	2.08	16
3	1.8	-144
4	1.74	-46
5	0.5	-50

표 3. 잔류응력 다항식 계수
(단위:MPa)

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
325	149	-568	-346	139

5. 결론

본 연구에서는 p^+ 박막의 두께에 대한 응력분포의 프로파일을 알아내기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여, 외팔보의 두께에 걸친 잔류응력의 상대적 분포를 정량적으로 예측할 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 잔류응력 분포를 다항식으로 가정하였으나, 그 외의 적절한 함수를 사용하여 추후, p^+ 박막의 잔류응력 분포를 계산할 수 있을 것이라 생각된다. 또, 잔류응력의 절대적인 분포를 알기 위하여 적절한

구조를 고안하여 실험하는 연구가 필요하다.

본 실험에서는 1100°C에서의 특정한 한 가지 조건에서 처리된 시편에 한해서만 실험을 하였으나, 계속되는 실험을 통하여 여러가지 공정변수에 대한 p^+ 박막의 내부 응력분포에 대한 분석을 수행할 것이다. p^+ 박막의 응력분포에 대한 해석이 완료되면, 박막의 두께와 마스크용 산화막의 두께 등을 고려하여 공정을 진행함으로써 잔류응력을 완화시켜 박막이 변형을 일으키지 않는 조건을 형성할 수 있게 되기 때문에, 이 박막을 이용한 센서나 구동기로의 응용이 쉬워진다. 또, p^+ 박막의 응력분포 해석은 폴리실리콘이나 기타 절연막들의 응력분석에도 응용될 수 있으므로 박막을 이용한 마이크로 요소제작의 기반기술을 확립하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

6. 인용 문헌

1. F. Maseeh and S. D. Senturia, "Plastic Deformation of Highly Doped Silicon," *Transducers '89 Digest*, pp.861-865, Montreux, Switzerland, June 1989.
2. X. Ding, W. H. Ko and J. M. Mansour, "Residual Stress and Mechanical Properties of Boron-doped p^+ -Silicon Films," *Transducers '89 Digest* pp.866-871, Montreux, Switzerland, June 1989.
3. X. Ding and W. H. Ko, "Buckling Behavior of Boron - doped p^+ Silicon Diaphragms," *Transducers '91 Digest*, pp.93-96, Montreux, Switzerland, June 1991.
4. W. H. Chu and M. Mehregany "A Study of Residual Stress Distribution Through the Thickness of p^+ Silicon Films," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-40, pp.1245-1250, July 1993.
5. H. Seidel, "The Mechanism of Anisotropic Silicon Etching and its Relevance for Micromachining," *Transducers '87 Digest*, pp.120-125, Tokyo, Japan, June 1987.
6. H. Guckel, D. W. Burns, C. C. G. Visser, H. A. C. Tilmans and D. Deroo, "Fine - Grained Polysilicon Films with Built - In Tensile Strain," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-35, pp.800-801, June 1988.
7. M. Mehregany, R. T. Howe, and S. D. Senturia, "Novel Microstructure for the in situ Measurement of Mechanical Properties of Thin Films," *J. Appl. Phys.* 62(9), pp.3579-3584, Nov. 1987.