

논문 99-8-3-09

MEMS 공정을 위한 여러 종류의 산화막의 잔류응력 제거 공정

이상우, 김성운, 이상우, 김종팔, 박상준, 이상철, 조동일Reduction of the residual stress of various oxide films for MEMS
structure fabricationSangwoo Yi, Sungun Kim, Sangwoo Lee, Jongpal Kim, Sangjun Park,
Sangchul Lee, and Dong-il Cho

요 약

본 논문에서는 MEMS 공정에 많이 사용되는 tetraethoxysilane (TEOS) 산화막, low temperature oxide (LTO), 7 wt%, 10 wt% phosphosilicate glass (PSG)의 잔류응력을 Euler beam과 bent-beam strain sensor를 제작하여 측정하였다. 이러한 산화막 잔류응력 측정 구조물을 만들기 위해 다결정실리콘을 희생층으로 사용하였으며 XeF₂를 이용하여 희생층 식각을 하였다. 먼저 각 산화막의 증착 당시 잔류응력을 측정한 후 500 °C에서 800 °C까지 질소분위기에서 1 시간 동안 열처리하였다. 또 표면미세가공에서 가장 많이 사용되는 585 °C, 625 °C 다결정실리콘 증착 조건에서 열처리하여 산화막의 잔류응력 변화를 측정하였다. 측정 결과 TEOS와 LTO, 7 wt% PSG는 600 °C 이하에서 압축잔류응력이 줄어들다가 그 이상에서 다시 커지는 반면에 phosphorus 농도가 높은 10 wt% PSG의 경우는 500 °C 이상에서 압축잔류응력이 증가하는 것을 확인하였다. 또 7 wt% PSG가 585 °C 다결정실리콘 증착 시 가장 작은 잔류응력을 나타내었다.

Abstract

Various oxide films are commonly used as a sacrificial layer or etch mask in the fabrication of microelectromechanical systems (MEMS). Large residual strain of these oxide films causes the wafer to bow, which can have detrimental effects on photolithography and other ensuing processes. This paper investigates the residual strain of tetraethoxysilane (TEOS), low temperature oxide (LTO), 7 wt% and 10 wt% phosphosilicate glass (PSG). Euler beams and a bent-beam strain sensor are used to measure the residual strain. A polysilicon layer is used as the sacrificial layer, which is selectively etched away by XeF₂. First, the residual strain of as-deposited films is measured, which is quite large. The residual strain of the films is also measured after annealing them not only at 500 °C, 600 °C, 700 °C and 800 °C in N₂ environment for 1 hour but also at the conditions for depositing a 2 μm thick polysilicon at 585 °C and 625 °C. Our results show that the 7 wt% PSG is best suited as the sacrificial layer for 2 μm thick polysilicon processes.

1. 서 론

* 서울대학교 전기공학부(School of Electrical Eng.,
Seoul National University)
<접수일자 : 1998년 12월 11일>

다결정실리콘을 구조층으로 이용하는 표면미세가공
기술은 1980년 초반부터 개발되어 왔으며 현재 MEMS
제작에 가장 많이 쓰이고 있다. 표면미세가공 기술은
복잡한 2 차원 형상을 만드는데 적합하며 CMOS

(complementary metal oxide semiconductor) 공정과 호환성이 있기 때문에 마이크로모터, 액츄에이터, 고속도 센서와 자이로스코프의 진동 빔 (beam) 등을 제작하는데 많이 사용된다.

표면미세가공에 사용되는 박막의 두께는 2~10 μm 로 CMOS 공정에서 일반적으로 사용되는 막의 두께인 1 μm 미만에 비해서 두껍기 때문에 기계적인 특성이 매우 중요하다. 이러한 이유 때문에 다결정실리콘 막의 잔류응력에 대한 연구들이 많이 수행되었다. 하지만 표면미세가공에서 희생층이나 식각 마스크로 사용되는 산화막의 잔류응력 및 열처리에 따른 잔류응력의 변화에 대한 체계적인 연구는 수행되지 못하고 있는 실정이다.

산화막의 잔류응력이 문제가 되는 이유는 이것이 기판의 기계적인 변형을 일으켜 기판을 휘게 하여 사진공정이나 chemical mechanical polishing (CMP) 등의 후속공정에 영향을 미치고 과도한 잔류응력으로 인해 식각 마스크나 도핑 마스크로 사용되는 박막에 crack이 생겨 원하지 않는 부분이 식각되거나 도핑이 되기 때문이다. 특히 표면미세가공에서 희생층으로 사용되는 산화막은 공정 초기에 증착된 후 여러 공정을 거쳐 최종 공정 단계에서 제거되기 때문에 산화막의 잔류응력은 모든 공정에 영향을 미친다.

본 논문에서는 산화막의 잔류응력과 열처리에 따른 그 변화를 측정하여 MEMS 구조물 공정 최적화를 위한 산화막의 잔류응력 제거 공정을 개발하였다. 인장잔류응력은 bent-beam strain sensor를, 압축잔류응력은 Euler beam을 이용하여 잔류변형율을 측정하였다. 희생층으로는 다결정실리콘을 이용하였으며, 희생층 제거는 기상 XeF_2 식각 장비를 이용하여 수행하였다.

2. 잔류응력의 영향 및 측정 방법

2.1 잔류응력이 사진공정에 미치는 영향

잔류응력으로 인해 기판이 휘게 되면 사진공정에 심각한 영향을 준다. 잔류응력 σ_f 는 기판을 휘게하여 가장자리와 중앙과의 높이차 δ 를 야기시킨다. 그림 1에서 처럼 반지름이 r 인 평평한 실리콘 기판위에 박막을 올릴 때 생기는 radius of curvature를 R 이라고 하면 R 과 δ 사이에는 식 (1)과 같은 관계가 성립한다. 식 (1)을 식 (2)의 Stoney 식^[1]에 대입하면 식 (3)과 같이 σ_f 와 δ 의 관계가 나온다. E_s 와 ν_s 는 각각 실리콘 기판

의 Young's modulus와 Poisson's ratio이고, t_f 는 증착된 산화막의 두께, E_f 와 ν_f 는 각각 산화막의 Young's modulus와 Poisson's ratio이고 ϵ_f 는 산화막의 잔류변형률이다. $\frac{E_f}{(1-\nu_f)}$ 가 98 GPa^[2]인 CVD PSG 박막을 $\frac{E_s}{(1-\nu_s)}$ 가 180.5 GPa^[2]이고 두께가 525 μm 인 (100) 4 인치 실리콘 웨이퍼 위에 2 μm 두께로 증착했을 때 δ 는 표 1과 같이 구할 수 있다.

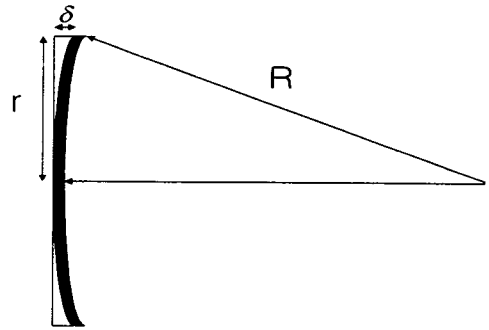


그림 1. 증착된 박막에 의해 휨 웨이퍼

Fig. 1. Deformation of silicon wafer by the residual stress of deposited film

$$R = \frac{r^2}{\delta} \quad (R \gg \delta) \quad (1)$$

$$\sigma_f = \frac{E_s}{6(1-\nu_s)} \frac{t_s^2}{R t_f} = \frac{E_f}{(1-\nu_f)} \epsilon_f \quad (2)$$

$$\delta = \frac{6(1-\nu_s) t_s^2}{E_s t_s^2} \sigma_f \quad (3)$$

표 1. 잔류응력, 잔류변형율에 따른 δ 의 변화

Table 1. The dependence of height δ from center to edge of the deformed wafer on residual stress

Residual strain (ϵ_f)	Residual stress (σ_f)	δ
1 %	980 MPa	56.9 μm
0.5 %	490 MPa	28.4 μm
0.2 %	196 MPa	11.38 μm
0.1 %	98 MPa	5.69 μm
0.05 %	49 MPa	2.845 μm
0.02 %	19.6 MPa	1.138 μm
0.01 %	9.8 MPa	0.569 μm

웨이퍼 상의 단차 δ 가 크면 사진공정에 큰 영향을 미친다. 웨이퍼 상의 단차 δ 에 따라 구현할 수 있는 최소패턴의 크기를 390 - 405 nm의 파장을 가지는 stepper를 이용하여 실험하였다. 이 경우 δ 는 노광할 부분이 초점에서 벗어난 정도를 나타내고, 양의 값은 초점보다 멀 경우이고, 음의 값은 가까운 경우이다. 그림 2는 실험 결과를 정리한 것이고 그림 3은 단차 δ 에 따라 구현된 trench와 fence의 SEM 사진이다. Trench의 경우 웨이퍼의 단차 δ 가 $5 \mu\text{m}$ 이상일 경우 $1.5 \mu\text{m}$ 선폭을 구현할 수 없다. 그리고 fence의 경우는 그보다 더 작은 $3 \mu\text{m}$ 의 단차에도 $1.5 \mu\text{m}$ 의 선폭을 구현할 수 없다. 그러므로 $1.5 \mu\text{m}$ 의 line과 space를 구현하기 위해서는 단차 δ 가 최소한 $3 \mu\text{m}$ 미만, 즉, 산화막의 잔류응력을 50 MPa 이내로 줄이는 공정 개발은 필수적이다.

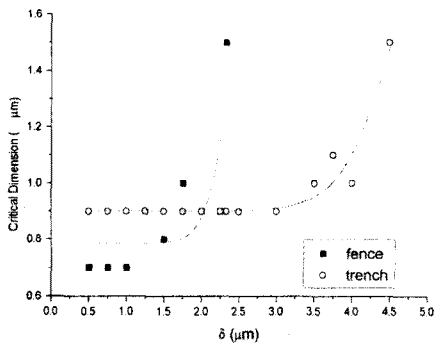
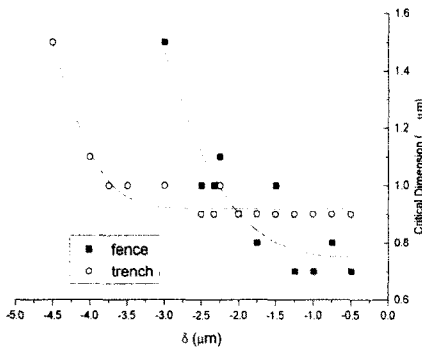
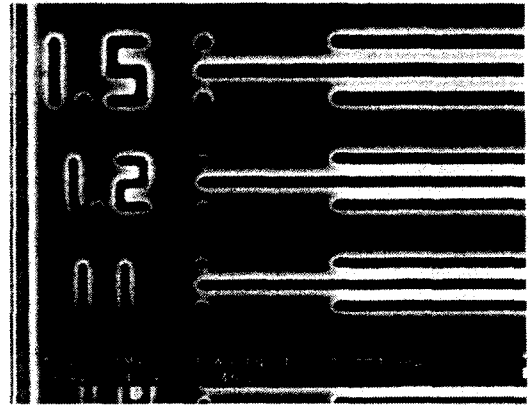


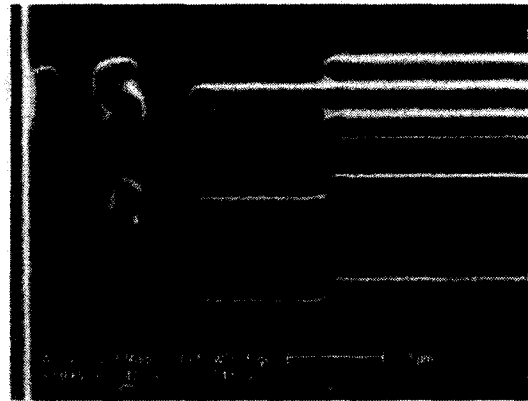
그림 2. 웨이퍼상의 단차 δ 와 사진공정에서 구현할 수 있는 최소패턴의 크기

Fig. 2. Dependence of critical dimension developed by photolithography on the height δ from center to edge of the deformed wafer



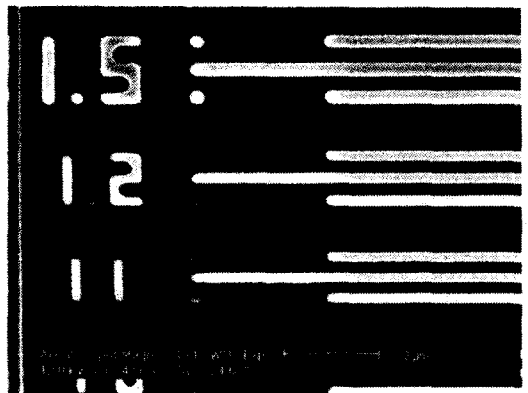
(a) $\delta = 0$ 일 때 trench 사진공정 결과

(a) trench : $\delta = 0$



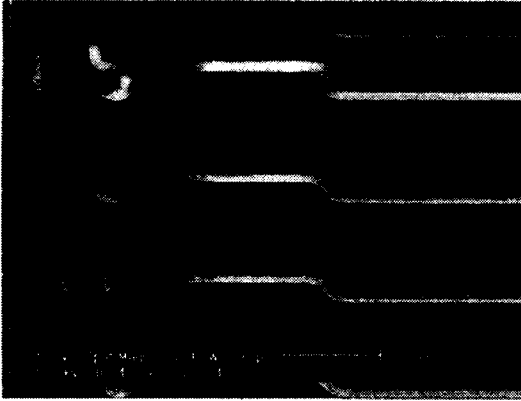
(b) $\delta = 5 \mu\text{m}$ 일 때 trench 사진공정 결과

(b) trench : $\delta = 5 \mu\text{m}$



(c) $\delta = 0$ 일 때 fence 사진공정 결과

(c) fence : $\delta = 0$



(d) $\delta = 3 \mu\text{m}$ 일 때 fence 사진공정 결과
 (d) fence : $\delta = 3 \mu\text{m}$

그림 3. 웨이퍼상의 단차 δ 에 따른 trench와 fence의 사진공정 결과

Fig. 3. The SEM photographs of trenches and fences developed by photolithography with different δ

2.2 잔류응력 측정 방법

박막의 잔류응력을 측정하는 방법은 X 선이나 레이저를 이용하여 박막이 증착된 웨이퍼의 curvature를 측정하는 방법과 load-deflection을 이용한 방법, 그리고 bridge나 ring과 같은 구조물을 만들어서 측정하는 방법 등이 있다.

이 중에서 curvature를 측정하여 잔류응력을 계산하는 방법은 측정이 편리하다는 장점으로 인해 많이 사용되고 있으나 웨이퍼 전체의 평균 응력만을 측정할 수 있다는 단점이 있다. 그리고 복합층의 경우 여러막 전체의 평균값 측정만이 가능하다. 또한 박막의 두께에 따른 응력의 불균일성은 측정할 수 없다.

본 연구에서는 Euler beam^[3]과 bent-beam strain sensor^[4]를 이용하여 TEOS(tetraethoxysilane)와 LTO (low temperature oxide)와 PSG(phosphosilicate glass)의 잔류변형율을 측정하였다. PSG는 phosphorus의 농도가 7 wt%와 10 wt%인 것을 실험하였다.

Euler beam의 경우 여러 길이의 bridge형 beam을 array로 만들어서 그 중에 잔류응력에 의해 buckling이 일어나는 가장 짧은 빔을 관측하여 식 (4)로 잔류변형율을 계산할 수 있다. L은 buckling이 일어난 가장 짧

은 빔의 길이이고, h는 빔의 두께이다.

$$\epsilon_f = \frac{\pi^2 h^2}{12L^2} \tag{4}$$

하지만, 이 방법으론 인장잔류응력을 측정할 수 없다. 그래서 인장 잔류변형율을 측정하기 위해 그림 4의 bent-beam strain sensor를 사용하였다. 인장잔류응력은 Guckel ring^[5]으로도 측정할 수 있지만, 이 경우 응력구배에 의해 구조물이 아래로 휘거나 위로 휘어, 측정값이 정확하지 못하다. Bent-beam strain sensor는 박막의 잔류응력에 의해 변형된 가운데 부분의 vernier gauge의 눈금을 읽어서 그 변형된 양 Δy 를 구한 후 식 (5)를 이용하여 구한 k를 식 (6)에 대입하여 잔류변형율을 측정할 수 있다.^[4]

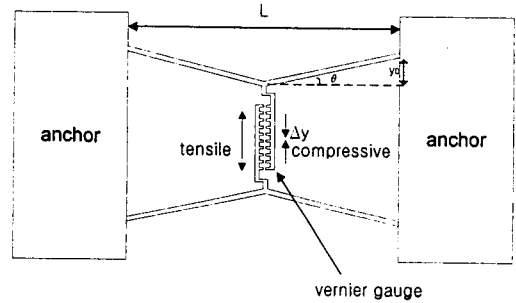


그림 4. Bent-beam strain sensor의 개념도
 Fig. 4. The schematic diagram of bent-beam strain sensor

$$y_0 + \Delta y = 2 \frac{\tan \theta}{k} \tanh \frac{kL}{4} \tag{5}$$

$$\epsilon_f = \frac{\Delta L'}{L} + \frac{k^2 w^2}{12h} \tag{6}$$

여 기 서

$$\Delta L' = \frac{(\tan \theta)^2}{4k} [2H + kL - kLH^2 + \sinh kL - 2H \cosh kL + H^2 \cosh kL] - L \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)$$

w는 beam의 너비, $\tan \theta = \frac{y_0}{(L/2)}$, $H = \tanh \left(\frac{kL}{4} \right)$

이다. 이 경우는 압축잔류변형율과 인장잔류변형율을 모두 측정할 수 있지만 압축잔류응력이 어느 정도 이상이면 buckling이 일어나기 때문에 측정 오차가 커지게 되므로 인장잔류변형율을 측정하는데 사용하였다. 그림 5는 제작된 구조물의 SEM 사진이고 그림 6은 이러한 구조물의 제작 공정을 나타낸 것이다.

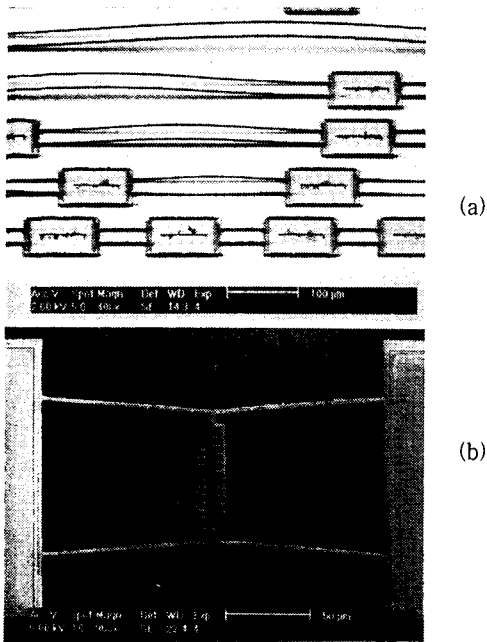


그림 5. (a) Euler beam : 압축잔류응력을 가지는 증착 당시의 7 wt% PSG (b) Bent-beam strain sensor : 인장잔류응력을 가지는 증착 당시의 10 wt% PSG

Fig. 5 (a) Euler beam : as-deposited 7 wt% PSG in compressive stress (b) Bent-beam strain sensor : as-deposited 10 wt% PSG in tensile stress

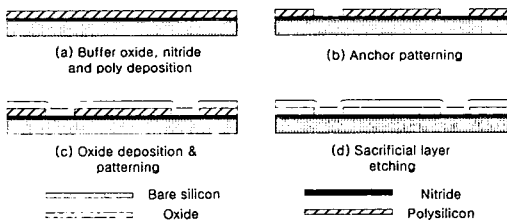


그림 6. 산화막의 잔류변형을 측정 구조물 제작공정도
Fig. 6. Process flow for the fabrication of residual stress measurement structures

산화막으로 이러한 구조물을 만들기 위해서 다결정 실리콘을 희생층으로 사용하였다. 실리콘 희생층을 식각하는 방법은 KOH나 EDP, TMAH등을 사용한 습식 식각이 많이 사용된다. KOH나 TMAH는 실리콘과 산화막의 식각 선택비가 비교적 좋으나 산화막을 구조물로 하여 정확한 잔류응력을 측정하기 위해서는 보다 좋은 식각 선택비가 요구된다. 뿐만 아니라, 이러한 습

식 식각 방법은 식각 후, 건조시키는 과정에서 구조물이 기판에 붙는 stiction이 생기기 때문에 stiction을 없애기 위한 추가 공정이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 다결정실리콘과 산화막의 식각 선택비가 우수하고 건식 식각으로 stiction이 생기지 않는 기상 XeF₂를 이용하여 희생층으로 사용된 다결정실리콘을 식각하였다.

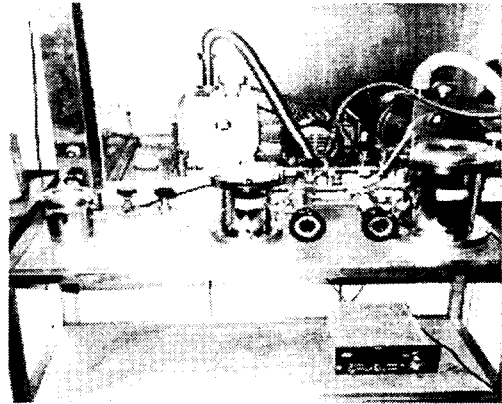


그림 7. XeF₂를 이용한 다결정실리콘 희생층 건식 식각 장비

Fig. 7. Gas-phase silicon etcher using XeF₂

그림 7은 자체 개발된 XeF₂ 건식 식각 장비이고, 그림 8과 그림 9는 각각 다결정실리콘의 식각율과 TEOS 산화막의 식각율을 나타낸 것이다. 다결정실리콘의 식각율은 10.8 μm/min이고 TEOS 산화막은 47.14 Å/min으로, 식각 선택비는 2000 : 1 이상이다. 다결정실리콘 2 μm를 식각하기 위해 20 초 동안 식각을 할 경우 식각되는 산화막은 18 Å 미만이다.

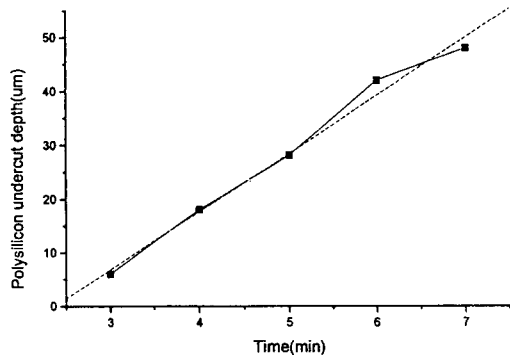


그림 8. XeF₂에 대한 다결정실리콘의 식각율: 10.8 μm/min
Fig. 8. Etch rate of polysilicon by XeF₂: 10.8 μm/min

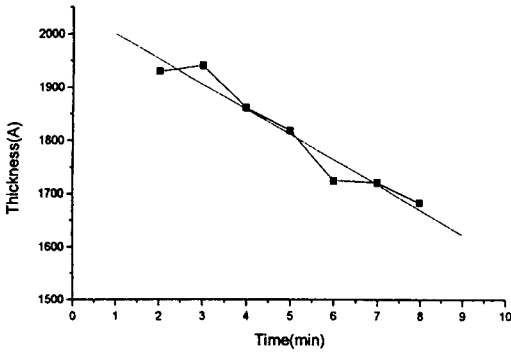


그림 9. XeF₂에 대한 TEOS 산화막의 식각율:47.14Å/min
Fig. 9. Etch rate of TEOS oxide by XeF₂:47.14Å/min

3. 실험 결과

본 연구는 표 2와 같이 여러 종류의 산화막을 증착하여, 각각의 산화막을 열처리하여 잔류용력 제거 조건을 구하였다. 실험된 막의 종류는 2 μm TEOS, 1 μm LTO, 2 μm 7 wt% PSG와 10 wt% PSG이다.

표 2. 산화막 증착 조건 및 증착 두께

Table 2. Conditions of depositing various oxides and their thickness

	Equipment Model	Target Thickness	Deposited Thickness	Temp.	Pres.	Gas		
						SiH ₄	O ₂	PH ₃
LTO	PYROX Model 216 (APCVD)	1.00 μm	1.017 μm	350 °C	1 atm	81.6 sccm	1.8 SLPM	0 sccm
7wt% PSG		2.00 μm	1.974 μm	350 °C	1 atm	81.6 sccm	1.8 SLPM	5.30 sccm
10wt% PSG		2.00 μm	2.117 μm	350 °C	1 atm	81.6 sccm	2.4 SLPM	7.58 sccm
TEOS	Precision 5000 (PECVD)	2.00 μm	1.995 μm	350 °C	9 Torr	TEOS		O ₂
						220 sccm	220 sccm	

각 산화막의 열처리 온도에 따른 잔류변형율의 변화를 측정하기 위하여 500 °C에서부터 800 °C까지 100 °C씩 증가시키면서 1 시간 동안 질소 분위기에서 열처리를 수행하였다. 또한 다결정실리콘의 희생층으로 사용될 산화막의 잔류용력 변화를 측정하기 위해서 585

°C와 625 °C에서 2 μm 다결정실리콘을 증착할 때 걸리는 시간 동안 열처리를 수행하였다. 이 경우 585 °C에서는 330 분, 625 °C에서는 150 분이다.

3.1 온도별 열처리 결과

그림 10은 각 산화막을 500 °C에서 800 °C까지 1 시간 동안 질소분위기에서 열처리한 후 각 산화막의 잔류변형율을 정리한 것이다. 증착 당시 잔류용력은 TEOS와 LTO, 7 wt% PSG는 압축잔류용력을 가지고 10 wt% PSG는 인장잔류용력을 가진다.

TEOS는 증착 당시 매우 큰 잔류용력을 가진다. 열처리함으로써 증착 당시에 비해 작은 압축잔류용력을 가지지만, 값이 비교적 크고 모든 열처리 공정 조건에서 비슷한 값을 가진다. 1 μm 두께의 LTO의 경우 증착 당시는 압축잔류용력을 가지나 저온(500 °C, 600 °C) 열처리 공정에 의해 인장잔류용력을 갖게 되며, 그 이상 온도의 열처리에서는 다시 압축잔류용력을 나타낸다. 하지만 모든 조건에서 0.1 % 미만의 작은 값을 보인다. 7 wt% PSG도 증착당시 큰 압축잔류용력을 가지며 열처리에 따라 잔류용력 크기가 줄어든다. 그러나 600 °C 이상에서 고온 열처리 공정에서는 다시 그 크기가 증가한다.

TEOS, LTO 및 7 wt% PSG는 600 °C 이하에서 열처리 할 경우 산화막의 압축잔류용력이 줄어드는데, 이는 박막 내에 있는 silanol(SiOH) 때문이다. SiOH는 산화막의 Si-O 결합에 수소가 첨가되어 생기는 것으로 분자의 크기를 팽창시키기 때문에 압축잔류용력을 발생시킨다.^[6,8] 600 °C까지 온도를 증가할수록 압축잔류용력이 낮아지는 이유는 박막 증착 도중에 TEOS나 silane의 수소 혹은 증착 후 대기 중의 수분에 의해 생긴 SiOH 결합이 열처리에 의해 깨져 OH가 분리되기 때문이다. 그리고 박막 내의 void가 열에너지에 의한 원자의 이동으로 함몰되어 박막이 수축되어 박막의 밀도가 증가하고^[6,7] 밀도가 증가할수록 Si-O-Si의 bonding tensile strain이 커지는 것^[8]도 압축잔류용력이 낮아지는 이유이다. 600 °C 이상의 열처리에서는 그 전까지 줄어들던 압축잔류용력이 다시 커지는데 이는 고온에서 SiO₂ 결합내의 실리콘과 산소 원자들이 활발히 움직여 원자들의 재배치가 일어나고 박막내의 인장 잔류용력은 점점 작아지기 때문이다^[8]. 그렇기 때문에 600 °C 이상에서는 주로 열팽창계수의 차이에 의한 thermal stress가 지배적이다. 그러나 TEOS 산화막의

경우 압축잔류응력이 증가하는 정도가 다른 산화막과 비교했을 때 그다지 크지 않은 이유는 TEOS 산화막이 PECVD를 이용하여 증착되기 때문에 APCVD를 이용하여 증착한 산화막들보다 박막이 치밀하며 따라서 열처리에 따른 밀도 변화나 공기 중에 습기에 그다지 민감하지 않기 때문이다.

TEOS와 LTO, 7 wt% PSG가 증착 당시 압축잔류응력을 갖다가 열처리 온도가 증가할수록 압축잔류응력이 감소하다가 600 °C 이상에서 압축잔류응력이 다시 증가하는 것에 반해, 10 wt% PSG의 경우 증착 당시 인장잔류변형율을 갖다가 500 °C 이상에서 압축잔류응력이 증가한다. 그 이유는 고온에서 viscous flow 특성이 강하게 나타나는 PSG의 경우, 박막 내의 phosphorus 농도가 높을수록 박막의 viscosity가 낮아지며 따라서 phosphorus 농도가 낮은 박막에 비해 인장잔류응력성분을 해소시키는 온도, 즉 glass annealing point가 낮아지기 때문이다^[9]. 위의 결과에서 LTO와 7 wt% PSG의 잔류응력이 최소가 되는 열처리 온도인 glass annealing point는 600 °C 이상이고, 10 wt% PSG의 경우 500 °C 부근이라는 것을 알 수 있다.

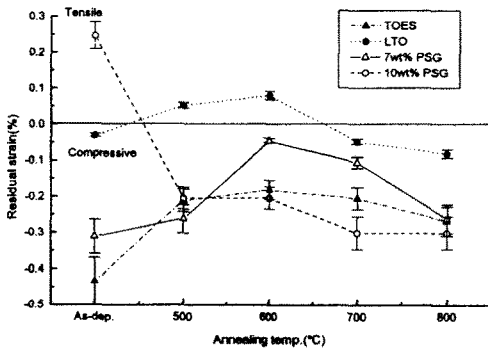


그림 10. 500 °C-800 °C, 1시간 동안 질소 분위기에서 열처리한 산화막의 잔류변형을 변화

Fig. 10. Change of residual strain of various oxides after heat treatments (500 °C - 800 °C) in N₂ environment for 1 hour

3.2 다결정실리콘 증착 조건에서의 열처리 결과

그림 11는 2 μm 다결정실리콘 증착조건인 585 °C /330 분과 625 °C/150 분에서 열처리한 산화막의 잔류 변형율을 정리한 것이다. LTO의 경우 위의 조건에서 열처리한 후의 잔류변형율은 600 °C, 1 시간동안 열처리한 결과와 다르게 압축잔류변형율을 나타낸다. 그

이유는 비록 열처리 온도가 비슷하더라도 열처리 시간이 길어질수록 LTO 박막에 보다 많은 열에너지가 가해져 박막 내에 인장잔류응력이 낮아지고 동시에 압축 잔류응력이 증가하기 때문이다. 이처럼 열처리 시간이 길어질수록 압축잔류응력이 커지는 현상은 585 °C/330 분 열처리한 산화막 중에서 10 wt% PSG를 제외한 나머지 산화막에 동일하게 나타난다. 585 °C/330 분 열처리한 10 wt% PSG의 잔류변형율은 600 °C, 1 시간 열처리한 결과와 비교했을 때, 약간 낮은 압축잔류변형율을 보이지만, 그 차이는 측정오차 한도 내에 있다. 또 10 wt% PSG가 증착 당시 인장잔류응력을 가지다가 585 °C에서 압축잔류응력을 가지는 결과는 앞의 결과와 일치한다.

625 °C/150 분 열처리한 결과, 7 wt% PSG는 +0.00715 %의 인장잔류변형율을 가진다. 이러한 결과는 7 wt% PSG를 600 °C/1 시간 열처리했을 때 박막이 압축잔류응력을 나타내는 결과와 다르다. 그 이유는 다음과 같이 생각할 수 있다. PSG의 경우 일반적으로 glass annealing point 이하의 열처리에서는 인장잔류응력이 증가하고 그 이상의 열처리에서 인장잔류응력이 줄고 압축잔류응력이 증가하는데^[6], 7 wt% PSG의 잔류응력이 인장잔류응력이 되었다는 것은 7 wt% PSG의 glass annealing point가 625 °C와 700 °C 사이에 있다는 것을 의미한다.

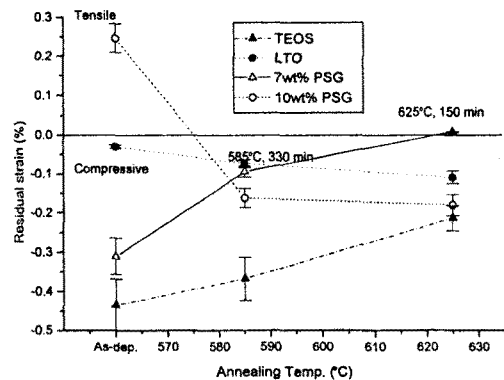


그림 11. 2 μm 다결정실리콘 증착 조건과 동일한 온도와 시간으로(585 °C, 330 분과 625 °C 150 분) 열처리한 산화막의 잔류변형을 변화

Fig. 11. Change of the residual strain after annealing at the conditions for depositing a 2 μm thick polysilicon at 585 °C/330 min and 625 °C/150 min

4. 결 론

참 고 문 헌

위의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) TEOS와 LTO, 7 wt% PSG의 경우 600 °C까지의 열처리 온도에선 압축잔류변형율이 작아지거나 인장잔류변형율을 갖지만 600 °C-800 °C에서는 다시 압축잔류변형율이 커진다.

(2) 10 wt% PSG의 경우 증착 당시 인장잔류변형율을 갖다가 500 °C 이상의 열처리 온도에서 압축잔류변형율로 바뀐다.

(3) 위에서 실험한 모든 산화막은 일정 온도 이상에선 열처리 온도가 높아질수록 압축잔류변형율이 커진다. PSG의 경우는 phosphorus의 농도가 높을수록 압축잔류변형율이 크고 온도증가에 따른 압축잔류변형율의 증가율은 작아진다.

(4) 7 wt% PSG의 경우, 625 °C/150 분 열처리하였을 때 매우 작은 인장잔류변형율을 갖는다. 585 °C 다결정실리콘 증착 조건에서는 LTO 산화막과 7 wt% PSG가 작은 잔류응력을 갖는다. 따라서 585 °C나 625 °C 다결정실리콘을 증착 후 사진공정을 수행할 경우 7 wt% PSG 산화막을 희생층으로 사용하는 것이 유리하다.

감사의 글

본 논문은 교육부 연구비 지원 (과제번호 ISRC 97-E-4205)에 의해 이루어졌습니다.

- [1] G. G. Stoney, Proc. R. Soc. London Ser. A82, 172, 1909.
- [2] Hideo Sunami, et al, "Stress and Thermal-Expansion Coefficient of Chemical-Vapor-Deposited Glass Films", *J. Appl. Phys.* Vol. 41(13), pp. 5115-5117, Dec. 1970.
- [3] H. Guckel, T. Randazzo and D. W. Burns, "A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with applications to polysilicon", pp. 1671-1675, *J. Appl. Phys.* 57(5), 1985
- [4] Yogesh B. Gianchandani, "Bent-Beam Strain Sensors", *J. of Microelectromechanical Systems*, VOL. 5, NO. 1, pp. 52-58, March 1996.
- [5] H. Guckel, D. Burns, C. Rutigliano, E. Lovell and B. Choi, "Diagnostic microstructures for the measurement of intrinsic strain in thin films", pp. 86-95, *J. Micromech. Microeng.* 2, 1992
- [6] M. S. Haque, H. A. Naseem and W. D. Brown, "Residual stress behavior of thin plasma-enhanced chemical vapor deposited silicon dioxide films as a function of storage time", *J. Appl. Phys.* 81 (7), 1 April 1997.
- [7] Akira Shintani, Shojiro Sugaki, and Hisao Nakashima, "Temperature dependence of stresses in chemical vapor deposited vitreous films", *J. Appl. Phys.* 51(8), Aug. 1980.
- [8] K. Ramkumar and A. N. Saxena, "Stress in SiO₂ films deposited by plasma and ozone tetraethylor thosilicate chemical vapor deposition processes", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 139, No 5, May 1992.
- [9] A. K. Shinha, H. J. Levinstein, and T. E. Smith, "Thermal stresses and cracking resistance of dielectric films(SiN, Si₃N₄, and SiO₂) on Si substrates", *J. Appl. Phys.* 49(4), pp. 2423-2426, April 1978,

 著 者 紹 介

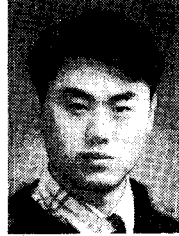


이 상 우(李相佑)

1973년 3월 2일 생.

1997년 2월 서울대학교 전기공학부 졸업(공학사), 1999년 2월 서울대학교 전기공학부 대학원 졸업(공학석사), 현재 서울대학교 전기

공학부 대학원 박사과정 재학중



김 종 팔(金鍾汎)

1972년 9월 2일 생.

1995년 2월 중앙대학교 기계설계학과 졸업(공학사), 1995년 2월 KAIST 기계공학과 대학원 졸업(공학석사), 1999년 서울대학교 전

기공학부 대학원 박사과정 수료



김 성 운(金聖雲)

1975년 10월 30일 생.

1988년 2월 아주대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 1998~현재 서울대학교 전기공학부 대학원 석사과정 재학중



박 상 준(朴相俊)

1974년 1월 10일 생.

1997년 2월 서울대학교 전기공학부 졸업(공학사), 1999년 2월 서울대학교 전기공학부 대학원 졸업(공학석사), 현재 서울대학교 전기

공학부 대학원 박사과정 재학중.

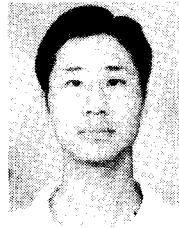


이 상 우(李尙禹)

1969년 4월 20일 생.

1993년 2월 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 1995년 2월 서울대학교 전기공학부 대학원 졸업(공학석사), 1997년 서울대학교

전기공학과 대학원 박사과정 수료



이 상 철(李相鐵)

1969년 8월 12일 생.

1997년 2월 광운대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 1998~현재 서울대학교 전기공학부 대학원 석사과정 재학중.

조 동 일(趙東日)

『센서학회지 제6권 제1호』 논문 97-6-1-10 p.80 참조
현재 서울대학교 전기공학부 부교수