

論文98-35D-2-8

결정립 식각 기술을 이용한 다결정 실리콘 부착 방지 구조

(Polysilicon Anti-sticking Structure by Grain Etching Technique)

李泳柱*, 朴明圭*, 全國鎭*

(Young joo Yee, Myoung kyu Park, and Kuk jin Chun)

요 약

마이크로머시닝 기술로 제작되는 미세 구조물의 부착 현상을 경감하기 위한 다결정 실리콘 표면 변형기술이 개발되었다. 부착 방지를 위해 변형된 다결정 실리콘은 제어할 수 있는 깊이와 거칠기를 갖는 마이크로미터 이하의 초미세 결정립 구멍으로 구성된다. 제안하는 부착 방지용의 결정립 구멍은 추가의 사진 묘화 공정이나 박막 증착 공정 없이 두 단계의 건식 식각으로 간단하게 형성된다. 결정립 구멍이 형성된 다결정 실리콘 기판을 채택함으로써 제작 공정 및 사용 중에 유발되는 부착을 두 배 이상 감소시킬 수 있다. 또한, 본 논문에서는 구조물로 쓰이는 다결정 실리콘의 두께 방향에 분포하는 잔류 응력 기울기로 인해 유발되는 휨 모멘트 효과를 포함하는 외팔보 구조의 부착 모델을 유도하였다. 부착 현상을 줄이기 위해 세척액의 표면 장력과 접촉면의 표면 에너지가 줄어드는 조건에서, 응력 기울기에 의한 효과는 부착 현상을 해석하는 데 중요한 요소가 된다. 회생층 식각 후의 세척 및 건조의 온도가 부착에 미치는 영향을 모델링 하였으며, 이를 실험적으로 검증하였다. 개발된 부착 방지용 다결정 실리콘 구조와 유도된 부착 모델로부터, 세척 및 건조 등을 위한 특별한 장비 없이 습식 회생층 식각 및 탈이온수 세척 공정만으로도 부착 현상을 3.5배 이상 줄일 수 있었다.

Abstract

Polysilicon surface modification technique is developed to reduce the sticking of microstructures fabricated by micromachining. Modified anti-sticking polysilicon consists of submicrometer grain holes with controlled depth and roughness. Proposed anti-sticking grain holes are simply formed by two-step dry etch without additional photolithography nor deposition of thin films. Both process-induced sticking and in-use sticking are successfully reduced more than two times by adopting grain holed polysilicon substrate. A sticking model for cantilever beam is derived. This model includes bending moment stems from stress gradient along the thickness direction of structural polysilicon. Because The surface tension of rinse liquid and the surface energy of the solids to be stuck tend to decrease in recently developed anti-sticking techniques, the effect of stress gradient will play an important role to analyze the sticking phenomena. Effect of the temperature during post-release rinse and dry is modelled and verified experimentally. Based on developed anti-sticking polysilicon structure and the sticking model, sticking of microstructure, fabricated by simple wet process including sacrificial layer etch and rinse with deionized water without special equipment for post-release rinse and dry was alleviated more than 3.5 times.

* 正會員, 서울大學校 電氣工學部 및 半導體 共同研究所

(School of Electrical Engineering and Inter-university

Semiconductor Research Center, Seoul National University)

接受日字:1997年10月2日, 수정완료일:1998年2月2日

I. 서론

미세 구조물의 부착(sticking) 현상은 표면 마이크로머시닝 공정에서 희생층을 선택적으로 습식 식각한 후, 세척 및 건조 과정에서 필연적으로 발생하는 세척액의 표면 장력에 기인하며^[1], 성공적으로 제작된 미세 구조물도 동작 중 습도나 과도한 충격 등의 환경에서 복원되지 않는 부착이 발생하기도 한다^[2]. 최근 표면 마이크로머시닝에 의해 제작되는 MEMS에서 제작 공정 과정이나 사용 중에 발생하는 미세 구조물의 원하지 않는 부착물체를 해결하기 위한 연구가 광범위하게 행해지고 있다^{[3]-[8]}.

본 논문에서는 표면 마이크로머시닝으로 제작되는 미세 구조물의 부착을 줄이기 위하여, 기판 다결정 실리콘의 표면 거칠기를 제어할 수 있는 변형 기술을 소개한다. 이 다결정 실리콘 표면 변형 기술은 실리콘 집적회로 제작 공정의 불순물 확산 및 산화와 건식 식각으로 구성되며, 추가적인 사진 묘화 공정을 필요로 하지 않으며, 부착 방지 용도의 다중체(polymer) 박막의 증착 역시 불필요하다. 부착 방지용 다결정 실리콘의 표면 거칠기를 제어하기 위한 공정을 정리하였으며, 표면 마이크로머시닝으로 제작된 평가용 미세 구조물을 통하여 제한한 표면 가공 기술의 부착 방지 효과를 실험적으로 검증하였다.

희생층 식각 후 행해지는 세척 및 건조의 온도에 따른 부착 특성을 연구하였으며, 구조 층으로 사용되는 다결정 실리콘의 잔류 응력 분포에 의한 두께 방향 응력 기울기(stress gradient)의 영향을 고려한 부착 모델을 제시하였다.

II. 다결정 실리콘 부착 방지 구조

다결정 실리콘에 마이크로미터 이하의 결정립(grain) 크기를 갖는 구멍을 형성하여 초고집적 기억 소자(ULSI DRAM)에 응용이 가능한 커패시터를 형성하는 기술이 개발되었다^[9]. 이 다결정 실리콘 표면 변형 기술은 마이크로미터 이하의 형상을 다결정 실리콘에 형성할 수 있다. 결정립 구멍이 형성된 다결정 실리콘 층을 미세 구조물 아래의 기판에 적용하면, 미세 구조물과 접촉하게 되는 유효 접촉 면적이 현저히 줄게 되어 기판과 구조물간의 부착을 감소시키는 부착 방지 구조로 응용할 수 있다^[10]. 그림 1에 다결정 실

리콘에 초미세 결정립 구멍을 형성하는 방법을 요약하여 도시하였다. N형 불순물인 인(P)이나 비소(As)로 고농도로 도핑(doping)된 실리콘의 산화율은 농도가 높아질수록 증가하며, 다결정 실리콘에 인이 첨가되면, 다결정 실리콘의 결정립과 결정립계 사이에 인의 분리(segregation)가 진행된다. 이 분리 현상에 의해 다결정 실리콘의 결정립계 부근의 인의 농도가 결정립에 비해 높아지며, 국부적인 농도 차가 있는 다결정 실리콘을 산화하게 되면, 결정립과 결정립계에 성장하는 산화막의 두께 차가 발생한다^[11]. 즉, 결정립계 부근에 보다 두꺼운 산화막이 성장하게 된다. 주상 구조(columnar structure)의 다결정 실리콘을 증착하고 확산이나 이온 주입법에 의해 인을 10^{20}cm^{-3} 이상으로 도핑한 후(그림 1 (a)), 다결정 실리콘을 산화하게 되면 결정립과 결정립계에서의 산화막 두께가 달라지며(그림 1 (b)), 이 산화막을 결정립 부분의 실리콘이 부분적으로 드러나도록 건식 식각하고(그림 1 (c)) 산화막에 대해 높은 선택도와 높은 이방성(anisotropy)을 갖는 반응기(chemistry)로, 드러난 결정립 부분의 실리콘을 반응성 이온 식각(RIE)하면 초미세 결정립 구멍을 갖는 다결정 실리콘 구조물이 완성된다(그림 1 (d)). 즉, 도핑과 열 산화 및 반응성 이온 식각이라는 기존의 실리콘 집적회로 제조 공정으로 재현성 있게 다결정 실리콘에 결정립 구멍을 형성할 수 있다.

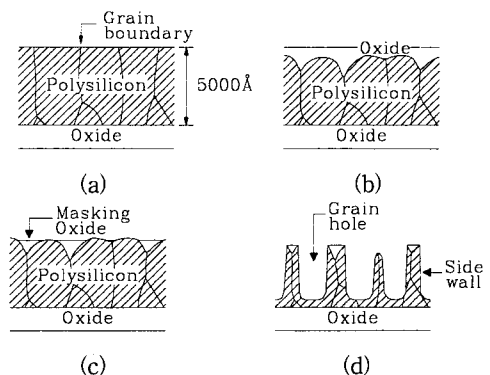


그림 1. 부착 방지용 다결정 실리콘 결정립 구멍 형성을 위한 핵심 공정. (a) 기판 다결정 실리콘 증착. (b) 인 도핑 및 산화. (c) 산화막 등방성 식각. (d) 다결정 실리콘 이방성 반응성 이온 식각
 Fig. 1. Key process for the formation of anti-sticking grain holes at polysilicon. (a) Deposition of substrate polysilicon. (b) Phosphorus doping and oxidation. (c) etch-back of oxide. (d) anisotropic etch of polysilicon by RIE.

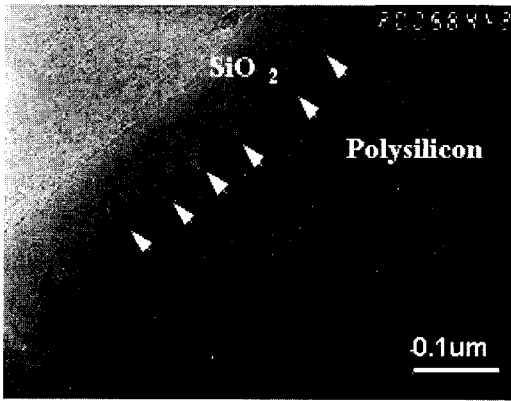


그림 2. 인으로 도핑되어 산화된 기판 다결정 실리콘의 단면 투과 전자 현미경 사진. 화살표는 결정립계 부근에서 인의 분리 현상에 의한 산화 촉진을 가리킨다.

Fig. 2. Cross sectional TEM image of substrate polysilicon oxidized during doping with phosphorus. Arrow heads indicate enhanced oxidation in the vicinity of grain boundaries due to phosphorus segregation.

그림 2는 다결정 실리콘을 기화된 $POCl_3$ 로 확산 및 산화 한 후에 단면을 투과 전자 현미경(TEM)으로 관찰한 사진이며 이 그림에서 그림 1의 (b)에서 묘사된 산화막 두께 차이를 볼 수 있다. $POCl_3$ 도핑 후 그림 1에 도시한 두 단계의 전식 식각 후에 형성된 결정립 구멍 구조의 표면 형상을 주사 전자 현미경(SEM) 및 AFM(atomic force microscope)으로 관찰한 결과가 발표되었다^[6]. 다결정 실리콘을 N형의 불순물로 도핑하지 않은 경우에는 산화 및 두 단계 식각을 동일하게 행하여도 결정립 구멍이 형성되지 않고, 식각 전의 표면 형상이 남게 됨을 확인하였으며^[11], 이로부터 고농도의 N형 불순물의 분리 현상이 결정립 형성에 주요 원인임을 알 수 있다.

초미세 결정립 구멍을 갖는 다결정 실리콘 표면의 거칠기는 결정립 구멍의 깊이를 변화시키거나 결정립의 크기를 변화시킴으로써 조절이 가능하며, 본 연구에서는 다결정 실리콘의 결정립 크기는 일정하게 유지하며 결정립 구멍의 깊이를 조절함으로써 표면 거칠기를 조절하였다. 구멍의 깊이는 결정립 부분 실리콘을 반응성 이온 식각하는 정도에 따라 조절할 수 있다. 그림 3은 결정립 형성을 위한 전식 식각의 두 번째 단계인 Cl_2 플라즈마를 이용한 반응성 이온 식각 시간에 따른 결정립 구멍 깊이의 선형적인 변화를 보여 준

다. 결정립 구멍의 깊이는 각 시편의 단면 형상을 주사 전자 현미경으로 관찰하여 각 시편의 개별 결정립 구멍의 깊이를 측정한 후 이 값들을 평균하여 결정하였다.

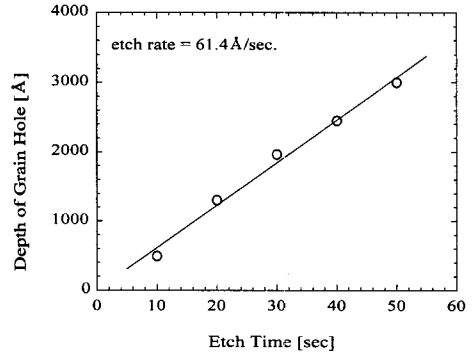


그림 3. 결정립 식각 두 번째 단계인 Cl_2 식각 시간에 따른 다결정 실리콘 결정립 구멍의 깊이 조절

Fig. 3. Control of average depth of polysilicon grain holes with respect to the second step dry etch with Cl_2 .

III. 시험용 미세 구조물의 제작

미세 구조물의 부착 현상을 분석하고, 결정립 구멍을 갖는 기판용 다결정 실리콘 부착 방지 구조의 성능을 평가하기 위하여 다양한 치수의 다결정 실리콘 외팔보 구조물을 표면 마이크로머시닝으로 제작하였다. 제작된 다결정 실리콘 외팔보의 두께는 $2 \mu m$ 로 고정하였으며, 외팔보의 폭은 각각 5, 10, 20, 40 μm 로 세분하고, 길이는 각 폭에 대하여 20 μm 에서 1 mm까지 10 μm 씩 증가하도록 설계하였다. 부착 방지 구조의 효과를 비교하기 위하여 설계된 다양한 치수의 다결정 실리콘 외팔보를 단결정 실리콘 기판, 표면 변형을 하지 않은 통상적인 다결정 실리콘 기판 및 결정립 구멍이 형성된 다결정 실리콘 기판 상에 각각 제작하였다. 부착 방지를 위한 결정립 구멍은 결정립 식각 두 번째 단계의 식각 시간을 변화시켜 다섯 종류의 깊이를 갖도록 세분하였다. 희생층으로는 화학 기상 증착법(CVD)에 의해 형성되는 $2 \mu m$ 두께의 산화막을 사용하였고, 이 산화막에 구조물 고정부(anchor)를 사진 묘화 및 전식 식각으로 형성하였다. 고정부가 형성된 희생층 산화막 위에 $2 \mu m$ 두께의 외팔보를 형성

할 구조물용 다결정 실리콘을 저압 화학 기상 증착법(LPCVD)으로 625°C에서 증착하고, 응력 조절을 위한 도핑 및 어닐링(annealing)을 거쳐 사진 묘화 및 전식 식각으로 구조물 형상을 정의하였으며, 49% 농도의 불산 용액에서 희생층을 식각하여 시험 미세 구조물을 완성하였다. 결정립 식각으로 부착 방지 초미세 구조를 형성한 다결정 실리콘 기판 위에, 앞서 기술한 공정 단계를 거쳐 제작된 다결정 실리콘 외팔보의 고정되지 않은 한 쪽 끝 부분이 그림 4에 나타나 있다.

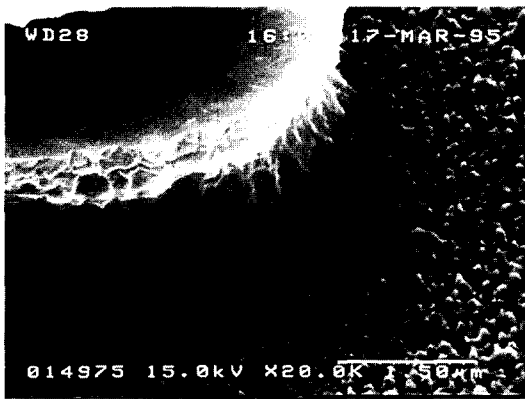


그림 4. 결정립 구멍 부착 방지 구조의 다결정 실리콘 기판 상에 떠있는 다결정 실리콘 외팔보의 고정되지 않은 끝 부분 전자 현미경 사진

Fig. 4. SEM image of the free end of polysilicon cantilever beam released over anti-sticking grain-holed polysilicon substrate.

구조물용 다결정 실리콘의 두께 방향 잔류 응력 기울기를 변화시키기 위하여 희생층 산화막을 두 가지로 구분하였으며, 다결정 실리콘 증착 후에 행해지는 POCl₃를 이용한 확산 및 어닐링의 열처리 조건을 변화시켰다. 희생층은 액체 TEOS(tetraethyl orthosilicate)로 플라즈마 화학 기상 증착(PECVD) 되는 산화막과 상압 화학 기상 증착(APCVD)된 PSG(phosphosilicate glass)로 따로 형성하였다. 각기 다른 희생층 상에 증착된 다결정 실리콘은 850, 900, 950, 1000°C 등의 온도에서 열처리되었다. 외팔보 빔의 두께 방향에 분포하는 응력 기울기는 빔의 변형에 의해 생기는 고정되지 않은 끝의 수직 변위를 측정하여 계산할 수 있으며^[12], 빔 끝의 변위는 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였다. 각 공정 조건에 따른 응력 기울기의 측정 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1. 희생층 및 열처리 조건에 따른 구조물 다결정 실리콘의 응력 기울기

Table 1. Stress gradient in structural polysilicon with respect to the kind of sacrificial oxide and the conditions of thermal annealing.

희생층	POCl ₃ doping	Annealing in N ₂	응력 기울기 [MPa/μm]
TEOS oxide	as deposited at 625°C		42.8
	850°C,30min	850°C,60min	8.24
	900°C,30min	900°C,60min	-22.2
	950°C,15min	1000°C,60min	-16.3
10% PSG	850°C,30min	850°C,60min	1.11

또한, 희생층 식각 후에 행해지는 세척 및 건조의 온도를 달리하여 미세 구조물 부착에 미치는 온도 효과 관찰하였다.

IV. 응력 기울기 및 온도 효과를 고려한 부착 모델

구조물 다결정 실리콘의 두께 방향으로 잔류 응력이 불균일하게 분포하게 되면, 응력 기울기에 따라 다결정 실리콘 외팔보가 위 또는 아래로 휘게 된다. 그림 5에 양(+)의 응력 기울기에 의해 위로 휨 외팔보가 세척 및 건조 과정에서 기판에 부착되는 과정을 두 단계로 나누어 도시하였다. 이 그림의 (a)는 응력 기울기로 변형된 빔이 세척액의 표면 장력에 의해 변형이 없는 곧은 형상으로 복원되는 과정이며, (b)는 복원된 빔이 기판에 부착된 형상을 묘사하고 있다.

두께 방향의 응력 기울기가 없는 외팔보의 부착 길이(detachment length, x_d)의 유도 과정^[10]과 유사하게 응력 기울기의 영향을 고려한 외팔보의 부착 길이 역시 에너지 평형을 이용하여 구할 수 있다. 양의 응력 기울기로 인해 위로 휨 외팔보의 부착 길이는 응력 기울기가 없는 빔의 부착 길이에 비해 증가하며, 증분을 Δx_d 라 하면, x_d 의 증가로 인해 발생하는 그림 5 (b)와 같은 계의 에너지 변화(ΔU_T)는 다음 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta U_T &= \Delta U_E + \Delta U_{LS} + \Delta U_{SS} \\ &= \frac{32EIh^2}{5} \left[\frac{1}{x_d^3} - \frac{1}{(x_d + \Delta x_d)^3} \right] \\ &\quad - 2\gamma_L w \cos \theta_c (\Delta x_d - \Delta x_1) + \gamma_{SV} \Delta x_d \end{aligned} \tag{1}$$

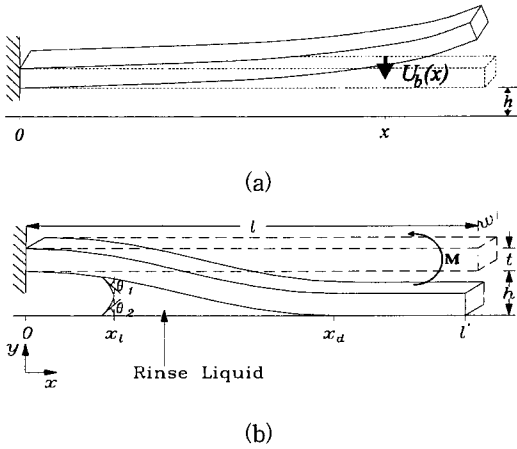


그림 5. 두께 방향의 양의 응력 기울기로 인해 위로 휨 외팔보가 세척 및 건조 과정에서 기판에 부착되는 가상적 과정 (a) 휨 외팔보가 세척액의 표면 장력으로 끈게 찢어지는 단계 (b) 끈은 외팔보가 건조 과정의 진행에 따라 기판에 부착되는 단계

Fig. 5. Sticking of cantilever beam bent upward by positive stress gradient along thickness direction. At first step, bent cantilever is straightened by the capillary force of rinse liquid as in (a) and straightened cantilever is stuck to substrate as rinse liquid dried off (b).

이 식에서 ΔU_E 는 끈은 외팔보가 기판에 부착됨으로써 생기는 변형으로 외팔보에 저장된 탄성 에너지의 변화이며, ΔU_{LS} 및 ΔU_{SS} 는 외팔보와 기판사이의 세척액에 의한 표면 장력과 부착된 기판과 외팔보 일부의 표면 에너지에 의해 축적된 에너지의 변화를 각각 나타낸다. E 는 다결정 실리콘의 탄성 계수(Young's modulus)이고 I 는 관성 모멘트, w 및 t 는 외팔보의 폭과 두께이며, γ_L 및 γ_S 는 각각 세척액의 표면 장력과 접촉되는 다결정 실리콘의 표면 에너지이다. 또한, θ_c 는 세척액과 구조물(θ_1), 세척액과 기판(θ_2)의 접촉 각이다. 직사각형의 단면을 갖는 빔의 관성 모멘트는 $wt^3/12$ 으로 주어진다. 그림 5 (a)의 과정에서 응력 기울기로 휨 빔을 끈게 찢는데 요구되는 에너지는 식 (2)로 표현할 수 있다^[12].

$$\Delta U_b = \frac{\beta M^2}{EI} (x_d + \Delta x_d) \quad (2)$$

이 식에서 M 은 빔 내부의 응력 기울기에 의한 휨 모멘트(bending moment)이고, β 는 경계 조건과 빔

을 찢는데 요구되는 힘의 분포에 의해 결정되는 상수이다. 균일한 휨 모멘트로 휨 외팔보의 두께 방향 응력(σ) 분포는 변형이 없는 위치(c)에 대하여 식 (3)과 같이 주어지며, 휨 모멘트와 응력 기울기의 관계는 식 (4)와 같다^[12].

$$\sigma(y) = \frac{M(y-c)}{I} \quad (3)$$

$$\Gamma \equiv \frac{\partial \sigma}{\partial y} \quad (4)$$

ΔU_T 와 ΔU_b 가 같아지는 조건에서 평형 상태에 도달하며, 이 값을 Δx_d 에 대해 미분해도 같아지게 된다. 식 (1)과 (2)로부터 다음 등식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\beta \Gamma^2 I}{E} = -\frac{96 E h^2}{5(x_d + \Delta x_d)^4} + 2\gamma_L w \cos \theta_c \left(\frac{dx_l}{dx_d} - 1 \right) + \gamma_S w \quad (5)$$

식 (8)에서 위로 휨 외팔보 빔의 부착 길이(X_{du})를 구하면 다음 식과 같다.

$$X_{du} = x_d + \Delta x_d = \left[\frac{8 E h^2 t^3}{5 \left(2\gamma_L \cos \theta_c \left(\frac{dx_l}{dX_{du}} - 1 \right) + \gamma_S - \frac{2 \Gamma^2 I^3}{5 E} \right)} \right]^{1/4} \quad (6)$$

음(-)의 응력 기울기에 의해 아래로 휨 다결정 실리콘 외팔보의 부착 길이 역시 유사하게 유도되며 식 (7)과 같다.

$$X_{dd} = x_d - \Delta x_d = \left[\frac{8 E h^2 t^3}{5 \left(2\gamma_L \cos \theta_c \left(\frac{dx_l}{dX_{du}} - 1 \right) + \gamma_S + \frac{2 \Gamma^2 I^3}{5 E} \right)} \right]^{1/4} \quad (7)$$

식 (5)의 상수 β 의 값은 세척액의 표면 장력 및 접촉되는 다결정 실리콘의 표면 에너지가 영인 가상적인 경계 조건으로부터 휨 모멘트에 의해 유발되는 변위와의 관계식으로부터 구할 수 있다. 그림 6에는 응력 기울기와 부착 길이와의 관계를 도사하였다. 이 그림은 $2 \mu\text{m}$ 두께의 희생층 위에 형성된 $2 \mu\text{m}$ 두께의 다결정 실리콘 외팔보에 대한 계산 결과이며, 계산에 사용된 다결정 실리콘 탄성 계수는 빗살(comb) 모양의 다결정 실리콘 공진 구조물의 공진 주파수를 측정하여 결정하였으며^[13], 값은 155 GPa이다^[14]. 그림에서 개별 곡선의 파라미터로 사용된 W_T 는 세척액의 표면 장력과 고체의 표면 에너지에 의해 부착을 유발하는 단위 면적 당의 에너지이며 다음 식과 같이 주어진다.

$$W_T = 2\gamma_L \cos \theta_c \left(\frac{dx_L}{dx_d} - 1 \right) + \gamma_s \quad (8)$$

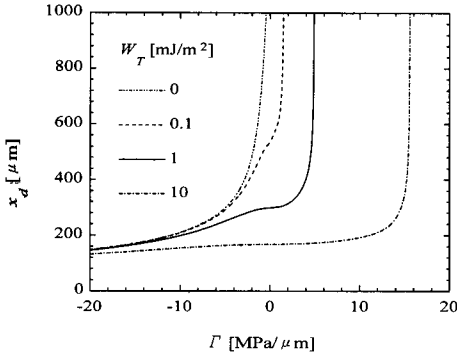


그림 6. 응력 기울기에 따른 다결정 실리콘 외팔보의 부착 길이. 계산에서 사용한 외팔보 및 희생층의 두께는 각각 2 μm이다.

Fig. 6. Detachment length of polysilicon cantilever beam with respect to the stress gradient. The thickness of beam and sacrificial oxide were 2 μm respectively.

부착 방식을 위한 현재의 기술은 W_T 를 줄이는 방향으로 발전하고 있으며, 그림 6에서 볼 수 있듯이 두께 방향의 응력 기울기가 부착 길이를 결정하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다.

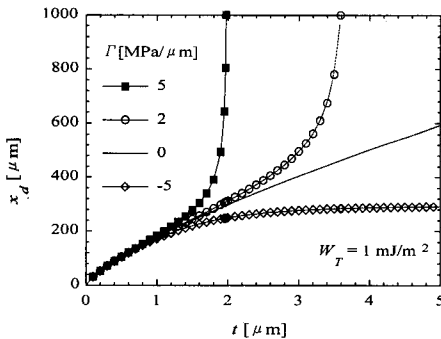


그림 7. 다결정 실리콘 외팔보 두께에 따른 부착 길이의 변화. 계산에서 희생층의 두께는 2 μm로 고정하였다.

Fig. 7. Variation of the detachment length with respect to the thickness of polysilicon cantilever. Thickness of sacrificial layer was fixed at 2 μm in this calculation.

또한, 그림 7에는 다결정 실리콘 외팔보의 두께에 따른 부착 길이를 유도된 모델로부터 계산한 결과이며, 계산에서 사용한 h 값은 2 μm로 고정하였고, W_T 는

1 mJ/m²을 사용하였다. 계산 결과로부터 양의 응력 기울기가 있는 다결정 실리콘 외팔보는 두께의 적은 변화에도 부착 길이가 급격히 변함을 알 수 있다. 그림 8은 표면 마이크로머시닝으로 제작된 다결정 실리콘 외팔보 시험 구조물이 과도한 양(+)의 응력 기울기로 인하여 흰 채로 릴리즈 된 모습을 보여 준다. 이 다결정 실리콘 외팔보의 응력 기울기는 42.8 MP/μm이다.

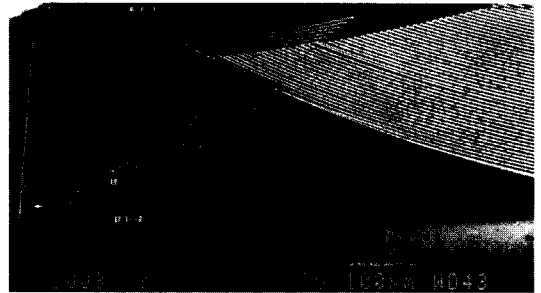


그림 8. 42.8 MPa/μm의 응력 기울기를 갖는 도핑되지 않은 다결정 실리콘 외팔보의 전자 현미경 사진

Fig. 8. SEM image of undoped polysilicon cantilever beams having stress gradient of 42.8 MPa/μm.

세척액의 표면 장력은 임계 온도(critical temperature, T_c) 부근까지 온도에 선형적으로 비례하여 작아지며, 다음의 식과 같이 주어진다^{[15], [16]}.

$$\gamma_L(T) = E_s \left(1 - \frac{T}{T_c} \right) \quad (9)$$

이 식에서 E_s 는 용액에 따른 특성 상수이다. 부착의 일(work of adhesion, W_s)은 떠있는 빔을 기판에 부착시키는데 작용하는 유인의 총량이며, 식 (6) 및 (7)의 네제곱근 안의 중괄호 속의 값이다. 식 (6), (7), (9)를 결합하면 부착의 일은 온도에 선형적으로 비례하는 다음 식과 같이 간략화 할 수 있다.

$$W_s(T) = A - BT \quad (10)$$

이 식에서 A 와 B 는 상수이다. 부착의 일은 외팔보의 부착 길이로부터 측정할 수 있으며 관계식은 다음과 같다^[1].

$$W_s = \frac{8Eh^2t^3}{5x_d^4} \quad (11)$$

본 절에서 기술한 바와 같이 습식의 릴리즈 및 세

척 공정으로 제작되는 미세 구조물의 부착은 세척 및 건조를 세척액의 끓는 온도 부근에서 수행함으로써 결정립 구멍 부착 방지 구조와 결합하여 더욱 감소시킬 수 있게된다.

V. 측정 결과 및 고찰

통상적인 다결정 실리콘 기판과 결정립 구멍이 형성된 부착 방지용 다결정 실리콘 기판 상에 제작된 다결정 실리콘 외팔보를 전자 현미경으로 관찰하였다^[6]. 외팔보의 부착 길이는 부착이 발생한 빔 직전의 길이로 결정되었다. 결정립 구멍을 갖는 다결정 실리콘 기판의 부착 방지 성능은 결정립 구멍의 깊이에 의존하며, 결정립 구멍의 깊이가 2000Å 이하에서는 부착 방지 효과가 거의 없었다. 그러나, 결정립 구멍이 2000Å 이상 깊어지면 릴리즈된 외팔보의 부착 길이가 급격히 증가하여 포화된다.

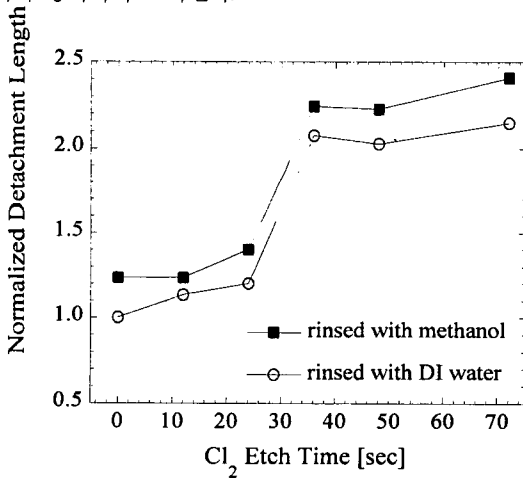


그림 9. 결정립 구멍 깊이에 따른 다결정 실리콘 외팔보의 부착 길이 변화. 그래프에서 부착 방지 가공을 하지 않은 다결정 실리콘 기판 상에 릴리즈된 후 탈이온수로 세척한 다결정 실리콘 외팔보의 부착 길이를 기준치로 환산하였다.

Fig. 9. Detachment length of polysilicon cantilever with respect to the average depth of anti-sticking polysilicon grain holes. In this graph, the detachment length was normalized with respect to that of polysilicon cantilever released over ordinary substrate polysilicon without anti-sticking modification followed by rinse with de-ionized water.

다양한 깊이의 결정립 구멍을 갖는 다결정 실리콘

기판 상에 릴리즈된 다결정 실리콘 외팔보의 부착 길이의 측정 결과를 그림 9에 정리하였다. 측정 결과로부터 결정립 식각 기술을 이용한 다결정 실리콘 부착 방지 구조는 미세 구조물의 부착 길이를 2배 이상 증가시킴을 확인하였다. 그림에서 최종 세척을 메탄올로 수행한 경우가 탈이온수로 세척한 경우보다 부착이 감소하며, 이는 메탄올의 표면 장력이 물보다 작기 때문으로 생각된다. 측정된 외팔보들은 희생층 식각 후 상온에서 세척하였으며, 메탄올로 세척한 시편은 100℃, 물로 세척한 시편은 200℃ 온도의 대류식 오븐에서 건조하였다.

다결정 실리콘 외팔보의 폭은 부착 현상에 별다른 영향을 주지 않았다. 그림 10은 서로 다른 두께 방향 응력 기울기를 갖는 다결정 실리콘 외팔보의 폭에 따른 부착 길이를 측정할 결과이다. 구조물의 폭은 부착 현상에 큰 영향을 미치지 않으나, 구조물 내에 존재하는 두께 방향의 응력 기울기는 영향을 미침을 확인할 수 있다. 이 시편들은 희생층 식각 후 상온의 탈이온수에서 세척되었고, 100℃의 대류식 오븐에서 건조되었다.

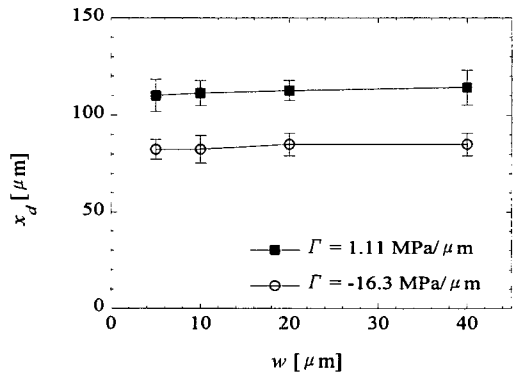


그림 10. 제작된 시험 구조물 다결정 실리콘 외팔보의 폭 변화에 따른 부착 길이의 변화. 측정된 외팔보 구조는 단결정 실리콘 기판 상에 형성되었다.

Fig. 10. Variation of the detachment length of fabricated polysilicon cantilever beam. Measured cantilever beams were released over bare silicon substrate.

희생층 식각 후의 세척 및 건조 공정의 온도에 의한 부착 길이의 변화를 측정하였다. 측정된 다결정 실리콘 외팔보는 단결정 실리콘 기판 상에 형성되었으며, 8.24 MPa/μm의 응력 기울기를 나타내었다. 이 시편

들은 각기 다른 온도의 탈이온수로 세척하였고, 세척 시의 탈이온수 온도와 동일한 온도에서 건조하였다. 측정 결과 부착의 일(W_s)은 그림 11과 같이 온도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였으며, 부착 길이는 물이 끓는 온도 부근에서 급격히 증가하는 경향을 보였다 (그림 12). 결정립 식각으로 형성된 부착 방지용 다결정 실리콘 기판 위에 릴리즈 되는 다결정 실리콘 외팔보를 희생층 식각 후의 세척 및 건조를 100°C에서 수행하여 부착 길이를 3.5배 증가시킬 수 있었다. 3.5배의 부착 길이 증가는 부착의 일이 150배 이상 감소함을 의미한다.

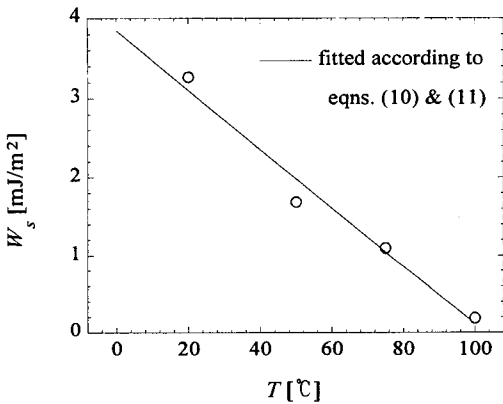


그림 11. 희생층 식각 후의 탈이온수 세척 및 건조 온도에 따른 다결정 실리콘 외팔보의 부착의 일의 변화

Fig. 11. Change of the work of adhesion of polysilicon cantilever due to the temperature of DI water rinse and dry after release etch.

미세 구조물의 성공적인 릴리즈 후에도 탄성체인 다결정 실리콘 구조물은 소자의 동작 중에 기판에 부착될 수 있다. 결정립 구멍을 갖는 다결정 실리콘 구조가 동작 중 부착을 방지하는 성능을 측정하였다. 이를 위하여, 제작된 다결정 실리콘 외팔보 시험 구조물을 표면 형상 측정기인 Tencor사의 alpha step의 탐침(stylus)으로 기판에 강제적으로 부착되도록 하였다. 탐침은 5 mg의 일정한 힘으로 떠있는 외팔보를 기판으로 부착시키면서 50 $\mu\text{m/s}$ 의 일정한 속도로 외팔보의 폭 방향을 가로지르도록 하였다. 이와 같은 인위적 부착을 반복한 후, 외팔보의 부착 길이를 측정하였다. 이 실험을 통하여 미세 구조물의 동작 중 부착을 모사하였으며, 인위적 부착 후의 다결정 실리콘 외팔보의 부착 길이는 그림 13과 같다. 결정립 식각 기술로 표

면이 변형된 부착 방지용 다결정 실리콘 기판이 표면 마이크로머시닝 공정 후의 사용 중 부착 현상 역시 2배 이상 감소시킨다는 것을 알 수 있다.

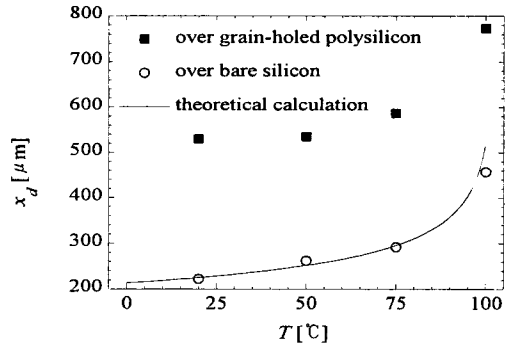


그림 12. 희생층 식각 후의 탈이온수 세척 및 건조 온도에 따른 다결정 실리콘 외팔보의 부착 길이의 변화

Fig. 12. The detachment length of polysilicon cantilever with respect to the temperature of DI water rinse and dry after release etch.

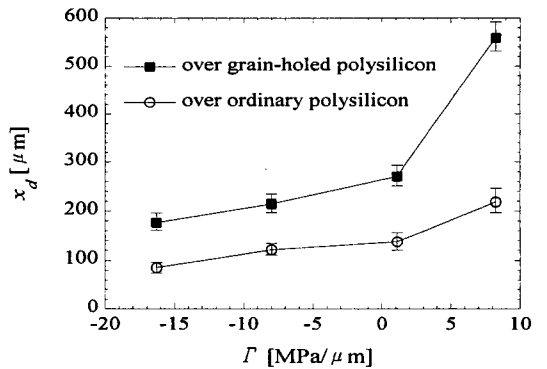


그림 13. 인위적인 부착 후에 측정된 다결정 실리콘의 부착 길이. 측정 결과로부터 결정립 구멍을 갖는 다결정 실리콘 부착 방지 구조가 사용 중 부착 현상 역시 2배 이상 감소 시킴을 유추할 수 있다.

Fig. 13. The detachment length of polysilicon cantilever beams after intentional sticking. From this measurement, it is known that the grain holed polysilicon substrate also reduces the in-use sticking more than two times.

VI. 결론

결정립 식각을 통한 다결정 실리콘 부착 방지 구조

는 릴리즈 공정 시의 세척 및 건조를 위한 특별한 장비 없이, 간단한 습식 공정만으로도 미세 구조물의 부착 현상을 경감시킬 수 있다.

부착 방지 구조의 결정립 구멍은 확산, 산화, 진식 식각 등의 CMOS 집적회로 제조 공정을 이용하여 재현성 있게 형성할 수 있다. 더욱이, 결정립 구멍을 형성하기 위한 추가적인 사진 묘화 공정이 필요 없으며, 물리적으로 형성된 결정립 구멍은 부착 방지를 위해 증착되는 탄화 불소계(fluorocarbon)의 다중층 박막이나 SAM(self assembled monolayer)에서 문제가 되는 부착 방지 성능의 열화(degradation)를 겪지 않는다.

본 논문에서는 응력 기울기를 고려한 미세 구조물의 부착 모델을 제시하였으며, 점차 세척 공정 시의 표면 장력 및 접촉면의 표면 에너지가 줄어드는 현재의 기술 추세에서는 응력 기울기에 의한 효과가 부착 현상을 이해하는데 중요한 요소임을 보였다. 미세 구조물의 부착의 일을 희생층 식각 후에 행해지는 최종적인 세척과 건조 공정의 온도에 선형적인 함수로 표현하였으며, 이를 실험 결과와 비교하였다. 다결정 실리콘 외 팔보의 부착 길이는 최종 세척액의 끓는 온도 부근에서 세척 및 건조하였을 때 급격히 증가함을 알 수 있었다.

본 논문에서 기술한 다결정 실리콘 부착 방지 구조는 미세 구조물 제작 공정에서 유발되는 부착을 2배 이상 줄일 뿐만 아니라, 제작된 후 사용 중에 발생할 수 있는 부착 현상 역시 2배 이상 줄일 수 있었다. 다결정 실리콘 미세 구조물의 부착은 결정립 식각 기술로 형성되는 부착 방지용 다결정 실리콘 기판을 사용하고, 최종 세척 및 건조 공정을 세척액의 끓는 온도 근처에서 수행함으로써 3.5배 줄일 수 있다. 즉, 간단한 습식 릴리즈 공정으로도 부착 현상을 개선할 수 있으며, 이러한 개선 효과는 150배 정도의 부착의 일의 감소를 뜻한다.

감사의 글

※ 본 연구는 자동 제어 특화 연구 센터(ACRC)의 지원(AC-042) 및 통상 산업부 G7 과제인 표면 미세가공 기반기술개발 과제의 지원으로 수행되었으며, 교육부 반도체분야 연구과제(ISRC 96-E-4101)의 일부로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] C. H. Mastrangelo and C. H. Hsu, "Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces-part I: basic theory," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 33-43, Mar. 1993.
- [2] M. R. Houston, R. Maboudian, and R. T. Howe, "Ammonium fluoride anti-stiction treatments for polysilicon microstructures," *Transducers'95*, 1995, vol. 1, pp. 210-213.
- [3] G. T. Mulhern, D. S. Soane, and R. T. Howe, "Supercritical carbon dioxide drying of microstructures," *Transducers '93*, 1993, pp. 198-201.
- [4] R. L. Alley, P. Mai, K. Komvopoulos, and R. T. Howe, "Surface roughness modification of interfacial contacts in polysilicon microstructures," *Transducers '93*, 1993, pp. 288-291.
- [5] J. H. Lee, Y. I. Lee, W. I. Jang, C. S. Lee, and H. J. Yoo, "Gas-phase etching of sacrificial oxides using anhydrous HF and CH₃OH," *MEMS 97*, 1997, pp. 48-53.
- [6] Y. Yee, K. Chun, J. D. Lee, and C. -J. Kim, "Polysilicon surface-modification technique to reduce sticking of microstructures," *Sensors and Actuators*, vol. A-52, pp. 145-150, 1996.
- [7] P. F. Man, B. P. Gogoi, and C. H. Mastrangelo, "Elimination of post-release adhesion in microstructures using thin conformal fluorocarbon films," *MEMS 96*, 1996, pp. 55-60.
- [8] Y. Matsumoto, K. Yoshida, and M. Ishida, "Fluorocarbon film for protection from alkaline etchants and elimination of in-use stiction," *Trnasducers'97*, 1997, pp. 695-698.
- [9] Y. Yee, S. Yu, K. Chun, and J. D. Lee, "The novel capacitor structure with polysilicon grain hole for advanced dynamic random access memory," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 33, Part 1, no. 1B, pp.

- 578-580, 1994.
- [10] T. Kamins, *Polycrystalline silicon for integrated circuit applications*, Kluwer Academic Publishers, 1987.
 - [11] Y. Yee, K. Chun, and J. D. Lee, "Polysilicon surface modification technique to reduce sticking of microstructures," *Transducers'95*, 1995, vol. 1, pp. 206-209.
 - [12] W. D. Pilkey, *Formulas for stress, strain, and structural matrices*, John Wiley & Sons, 1994.
 - [13] M. Biebl, G. Brandl, and R. T. Howe, "Young's modulus of *in situ* phosphorus doped polysilicon," *Transducers'95*, 1995, vol. 2, pp. 80-83.
 - [14] 이상우, 이영주, 조동일, 전국진, ISRC MEMS MPC 내부 보고서, 1997. 6.
 - [15] A. W. Adamson, *Physical chemistry of surfaces*, 4th edition, John Wiley & Sons, 1982.
 - [16] T. Abe, W. C. Messner, and M. L. Reed, "Effects of elevated temperature treatments in microstructure release procedures," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 66-75, 1995.

저 자 소 개

李 泳 柱(正會員) 第 31卷 A編 第 5號 參照
 현재 서울대학교 전기공학부 박사과
 정

全 國 鎮(正會員) 第 34卷 D編 第 8號 參照
 현재 서울대학교 전기공학부 부교수



朴 明 圭(正會員)
 1973년 12월 19일생. 1996년 2월 서
 울대학교 전기공학부 졸업(학사).
 1996년 3월 ~ 현재 서울대학교 전
 기공학부 대학원(석사과정) 재학중.
 주관심 분야는 실리콘 표면 마이크로
 머시닝 및 집적화 공정 개발 등임