

표면 미세 가공된 구조체를 이용한 박막의 응력 측정

Stress Measurement of films using surface micromachined test structures

이창승*, 정회환*, 노광수**, 이종현*, 유형준*

*한국전자통신연구소 반도체연구단, **한국과학기술원 재료공학과

Chang-Seung Lee*, Hoi-Hwan Chung*, Kwangsoo No**, Jong-Hyun Lee*, and Hyung-Joun Yoo*

*Semiconductor division, Electronics and Telecommunications Research Institute

**Dept. of Mater. Sci. and Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology

Abstract

The microfabricated test structures were used in order to evaluate the stress characteristics in films. The test structures were fabricated using surface micromachining technique, including HF vapor phase etching as an effective release method. The fabricated structures were micro strain gauge, cantilever-type vernier gauge and bridge for stress measurement, and cantilever for stress gradient measurement. The strain was measured by observing the deformation of the structures occurred after release etching and the amount of deformation can be detected by micro vernier gauge, which has gauge resolution of 0.2 μ m. The detection principles and the degree of precision for the measured strain were also discussed. The characteristics of residual stress in LPCVD polysilicon films were studied using these test structures. The stress gradient due to the stress variation through the film thickness was calculated by measuring the deflection at the cantilever free end.

Key Words: stress measurement, surface micromachining, test structures, film

1. 서론

표면 마이크로머시닝(surface micromachining) 기술을 이용하여 초소형의 센서나 액추에이터를 제작하는데 있어 제한적인 요소 중의 하나는 박막의 증착 과정에서 발생하는 잔류응력이다. 박막의 잔류응력은 열응력(thermal stress)과 고유응력(intrinsic stress)으로 표현될 수 있다. 열응력은 박막과 하부 기판과의 열팽창 계수의 차이에 의하여 발생된다. 고유응력은 박막의 핵생성과 결정의 성장과정에서 발생되며, 증착방법과 성장온도 등의 공정변수와 관련되어 있다. 피생층을 식각하여 구조체를 기판으로부터 분리하던 잔류응력으로 인하여 구조물은 원하지 않는 변형을 받게된다. 압축응력은 브릿지의 버클링(buckling)을 일으키며, 박막의 두께방향에 대한 응력의 불균일성으로 인해 나타나는 응력구배(stress gradient)는 캔티레버의 휨 변형(bending)을 일으킨다. 또한 잔류응력은 제조된 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 소자의 특성을 변화시킬 수 있으므로 잔류응력을 조절하는 기술에 관한 연구가 선행되어야 한다.

박막의 잔류응력을 측정하는 방법은 비파괴 검사와 파괴 검사로 구분할 수 있다. 비파괴 검사에는 X-ray를 이용하는 방법, wafer의 곡률을 이용하는 방법 등이 있으며, X-ray 방법은 비정질 박막에는 사용될 수 없다는 단점을 가진다. 파괴 측정 방법에는 balloon 법, load-deflection 법과 in-situ로 미소 구조체를 이용하여 측정하는 방법이 있다. 최근들어 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작된 미소 구조체인 bridge[1,2], ring & beam[2-4], vernier gauge[5], micro strain gauge[6], rotating beam pair structure[7] 등이 잔류응력의 측정에 많이 사용되고 있다. 구조물을 기판으로 분리할 때, 잔류응력에 의하여 변형이 일어나며 이를 이용하여 변형량을 측정한다.

폴리실리콘(polycrystalline silicon) 박막은 ULSI의 반도체 공정에서 뿐만 아니라 표면 마이크로머시닝을 근간으로 하는 MEMS 소자의 구조용 박막 재료로서 널리 사용되고 있으며, 불순물 도핑(doping)을 통하여 전기전도도가 향상되며 열처리 후에도 압축응력을 가진다[8-10]. 실리콘 격자내의 치환형 위치를 차지하는 불순물 원자는 격자를 변형시켜 응력을 유발하므로[2], 실리콘에 첨가된 불순물 원자는

박막의 응력구배를 형성시키는 중요한 요인 중의 하나이다.

2. 실험방법

2-1. 제작공정

박막의 잔류응력을 측정하기 위한 구조체를 제조하기 위하여 표면 마이크로머시닝 기술을 이용하였다. p형 Si(100) 웨이퍼위에, 열산화막과 질화막을 증착한 다음, 폴리실리콘층을 증착한다. 희생층으로서 2 μ m 두께의 TEOS (Tetra Ethyl Ortho Silicate) 산화막을 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 법으로 증착한다. 다음에는 구조체로 사용될 폴리실리콘층을 LPCVD로 2 μ m 두께로 증착하고, POCl₃로 도핑(doping)한 후 열처리(annealing)를 수행한다. 폴리실리콘의 건식식각을 위한 마스크 재료로서 TEOS 산화막을 마스크로 사용하여 폴리실리콘층을 반응성 이온 식각(Reactive Ion Etching)한다. HF 기상 식각 (Vapor Phase Etching) 공정을 이용하여 희생층을 제거하여 구조체를 제조하였다. 2 μ m 두께의 TEOS 산화막에 대한 측면 식각율은 14.5 μ m/hr 이었다.

2-2. 측정원리

가. Cantilever-type vernier gauge

캔티레버 2개를 사용한 변형량 미소 측정기는 vernier가 제조된 빔, scale이 제조된 빔과 micro vernier gauge 부분으로 구성되며, Fig. 1(a)와 같이 micro vernier gauge는 0.2 μ m 까지 측정이 가능하다. 이러한 구조체를 이용하여 측정되는 변위 y는 다음과 같다[5].

$$y = (1+\varepsilon)L_1 + (1+\varepsilon)L_2 + (1+\varepsilon)L_g - (L_1 + L_2 + L_g) \quad (1)$$

$$= \varepsilon(L_1 + L_2 + L_g)$$

$$= \varepsilon L_e$$

여기에서 L₁ 및 L₂는 캔티레버의 길이, L_g는 vernier gauge 부분의 길이, ε 는 변형률이다. 캔티레버 빔의 길이는 1000 μ m 이며, 측정 가능한 변형률은 1 $\times 10^{-4}$ ~ 2 $\times 10^{-3}$ 사이의 값이다.

측정 오류의 원인은 vernier gauge의 변형과 캔티레버의 변형을 들 수 있다. 이상적으로 버니어 자체는 설계된 크기로부터 변형되지 않아야 된다. 그러나 기관으로 부터 분리될 때 잔류응력에 의한 변형이 버니어에도 발생하게 되지만, 박막의 변형량은 10⁻³ 이하이면 버니어의 변형에 의한 오류는 무시될 수 있을 만큼 작다. 그리고 박막내에 응력구배가 존

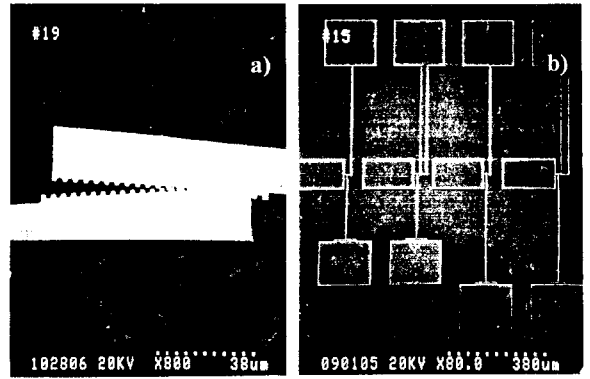


Fig. 1. A SEM of the surface micromachined cantilever-type vernier gauge (a) and micro strain gauge (b).

재할 경우, 캔티레버는 기관의 수직방향에 대하여 변형을 일으키며, 측정의 정확성에 영향을 미친다. 캔티레버의 끝에서 투사된 측면 변형량 Δ 는 다음과 같다.

$$\Delta = L - (\rho - h) \tan(L/\rho) \quad (2)$$

여기에서 L은 캔티레버의 길이, h는 변형된 빔의 끝에서의 수직 변위, ρ 는 곡률 반경이다. 박막의 실제 변형량은 상하 변형을 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Actual displacement} = \text{Gauge reading} - 2\Delta \quad (3)$$

나. Micro strain gauge

박막의 변형량을 lever mechanism 으로 확대하여 측정하는 방법으로, beam I의 끝부분에 제조된 micro vernier gauge를 이용하여 변형량을 검출한다[6]. Fig. 1(b)에서와 같이 strain gauge는 3개의 빔과 vernier gauge로 구성되며, beam T의 변형은 beam S의 bending을 일으키며 이로 인하여 indicator beam(I)은 증폭된 변위만큼 움직인다. micro strain gauge에 의한 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{y}{L_1 L_t} \frac{2EI_s}{(L_s/2)^2} \left(\frac{L_t}{Eb_t} + \frac{L_s^3}{12EI_s} \right) \frac{1}{C_f} \quad (4)$$

여기에서 y는 beam I의 변위, t는 박막의 두께, L₁, L_t,

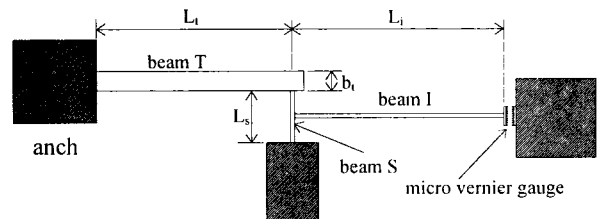


Fig. 2. The schematics of the micro strain gauge.

L_s 는 각 빔의 길이, b_t 는 beam T의 너비, I_s 는 beam S의 관성모멘트이고, C_f 는 보정값이며, Fig. 2에 micro strain gauge를 나타내었다. Beam T의 폭이 $5\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 이고 beam I의 길이가 $300\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$ 인 구조체가 설계되었으며, 측정 가능한 변형률은 $1 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-3}$ 사이의 값이다.

나. Rotating beam pair structure

잔류 응력에 의한 박막의 변형 빔의 회전으로 전환되며, 이렇게 증폭된 변위는 빔의 끝부분에 설치된 vernier gauge를 이용하여 검출한다. Fig. 3에서와 같이 구조체는 3개의 빔으로 구성되어 있으며, beam A와 beam B의 변형은 indicator beam(C)의 회전을 일으키며, indicator beam은 증폭된 변위만큼 움직인다. rotating beam pair structure에 의한 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\varepsilon = \frac{Oy}{(L_A + L_B + W)(L_C + 0.5O)} \frac{1}{C_f} \quad (5)$$

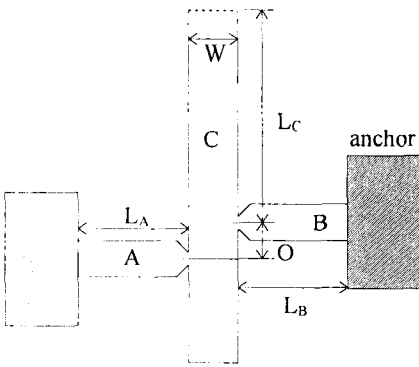


Fig. 3. The schematics of the rotating beam pair structure for stress measurement.

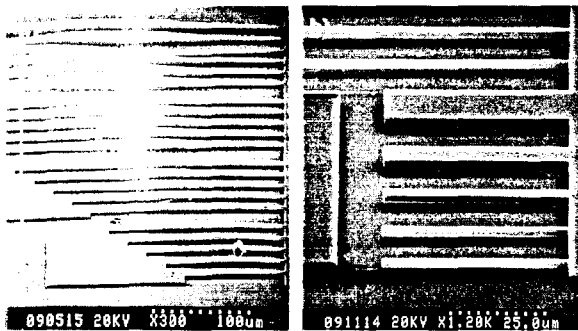


Fig. 4. A SEM of the microfabricated bridge beams (a) and cantilever beams (b).

여기에서 y 는 indicator beam pair의 변위로 micro vernier gauge로부터 읽히는 값이며, L_A , L_B , L_C 는 각 빔의 길이이며, O 와 W 는 구조체의 크기를 나타내는 상수로 Fig. 3에 도시하였다. Beam C의 길이가 $200\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$ 인 구조체가 설계되었으며, 10^{-5} 이상의 변형률 측정할 수 있다.

라. Bridge beams

박막의 성질과 상관없이 브릿지의 기하학적인 크기만으로 변형률을 측정할 수 있으나, 압축 변형률의 측정만이 가능하고 Fig. 4(b)에서와 같이 중횡비가 다른 빔의 배열이 필요하다는 단점이 있다. 브릿지 빔에 대한 buckling criteria는 아래와 같다[1,2].

$$\varepsilon = \frac{\pi^2 h^2}{3L_c^2} \quad (6)$$

여기에서 ε 는 박막의 변형률(strain), h 는 브릿지 빔의 두께, L_c 는 버클링이 일어나지 않은 가장 긴 빔의 길이이다. 빔의 중횡비(aspect ratio)를 조절하여 원하는 해상도와 측정 범위를 조절할 수 있다. 폭이 $10\mu\text{m}$ 이고 길이는 $20\mu\text{m}$ 간격으로 $100 \sim 500\mu\text{m}$ 범위의 빔이 설계되었으며, 측정 가능한 변형률은 $5.2 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ 사이의 값이다.

3. 결과 및 고찰

박막내의 두께방향에 대한 응력분포(stress profile)는 평균응력과 응력의 불균일한 분포로 인하여 발생하는 응력구배로 표현될 수 있으며, Fig. 5에 도시하였다. 지금까지의 응력에 대한 연구는 대부분이 잔류응력이라고 불리우는 평균응력에 집중되어져 있으며, MEMS 분야에서 응력에 의한 미소 구조체의 변형이 심각한 문제로 대두되면서 응력구배에 대한 관심이 증가하고 있는 실정이다. 그러므로 박막내의 응력 특성을 면밀하게 고찰하기 위해서는 평균응력과 응력구배에 대한 연구가 동시에 수행되어야 한다.

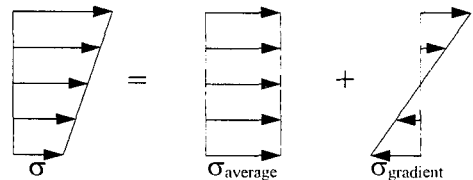


Fig. 5. The schematic representation of the stress profile.

3-1. 잔류응력 특성

박막의 잔류 응력은 미소 구조체를 이용하여 측정된 변형률(strain)과 박막의 물질 상수인 Young's modulus E 와 Poisson's ratio ν 를 이용하여 계산될 수 있다. LPCVD법으로 증착된 폴리실리콘 박막은 증착 후 300MPa ($\epsilon=2 \times 10^{-3}$) 이상의 압축응력을 보이며, 어닐링을 통하여 75MPa 정도로 응력이 완화되었다. Fig. 6 에서는 브릿지를 이용하여 측정된 폴리실리콘 박막의 변형률을 도시하였다. 어닐링 온도가 증가함에 따라 실리콘 박막의 응력이 감소하는 경향을 보이며, 인을 첨가한 실리콘 박막은 첨가하지 않은 시료에 비하여 어닐링으로 인한 응력완화가 증대되었다. 일반적으로 응력 완화는 어닐링을 수행하는 동안 결정성장 및 결정 결함의 확산 등을 통하여 일어난다. 인이 첨가된 실리콘 박막에서 인 원자가 실리콘 결정성장을 촉진하여 어닐링에 의한 응력 완화효과가 증대되었음을 의미한다. 인이 2단계로 첨가된 박막의 응력은 실시된 열처리 구간에서 일정한 응력을 가진다. 반면 도핑된 원자는 실리콘 격자의 치환형 위치를 차지하여 격자를 변형시키고 그 주위에 응력을 유발시키므로, 인의 도핑 시간이 증가함에 따라 폴리실리콘 박막의 응력이 증가한다.

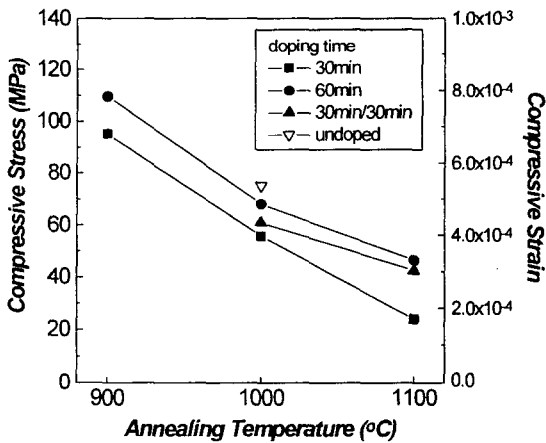


Fig. 6. Stress in the doped polysilicon films with annealing temperature, measured using bridge structure.

Table 1. Compressive strain of the films measured using the different test structures.

structures	bridge	micro strain gauge	cantilever-type vernier gauge
as-deposited	2.1×10^{-3}	1.6×10^{-3}	8.3×10^{-4}
annealed	2.3×10^{-4}	1.9×10^{-4}	-

사용된 구조체의 종류에 따라 측정된 변형량은 Table 1과 같이 다르게 측정된다. 폴리실리콘 박막은 증착후 변형을 나타내며, 브릿지로 부터 2.1×10^{-3} 의 압축 변형률을 측정하였다. Micro strain gauge를 이용하여 측정된 변형량은 브릿지로 부터 측정된 값에 대하여 20% 이내의 오차를 가진다. Fig. 2의 beam 1의 길이가 500 μ m인 구조체는 길이가 300 μ m인 구조체에 비하여 측정값의 정확성이 크게 떨어졌으며, 빔 자체의 변형이 관찰되었다. 길이가 90 μ m인 vernier gauge 부분의 크기를 작게 설계하는 것도 측정의 정확성을 향상시키는 방법이다. 캔티레버형 gauge의 경우, 3×10^{-4} 이하의 변형량에 대해서는 측정이 불가능하였으며 측정값이 다른 구조체에 비하여 작게 관찰되었다. 특히 Fig. 1(a)에서와 같이 박막의 응력구배가 클 경우에는 측정값에 대한 보정이 필요하다. Fig. 1(a)에서 vernier gauge는 5.8 μ m로 관찰되었으며, 이는 변형량이 3×10^{-3} 으로 계산된다. Fig. 6의 응력구배값과 Eq. (2)과 Eq. (3)을 이용하여 보정하면 변형량은 5×10^{-5} 이며, 브릿지로부터 측정된 9×10^{-4} 와는 큰 오차를 보인다. 측정 범위를 증가시키기 위해서는 캔티레버의 길이를 1000 μ m 이상으로 제조해야 하며, 응력구배의 의한 영향은 더욱 증가한다.

3-2. 응력구배 특성

박막내의 잔류응력은 두께 의존성이 있으며, 박막의 두께방향으로 존재하는 응력구배(stress gradient)는 휨 모멘트(bending moment)를 발생시키며[11], 캔티레버에서 상하로 변형(deflection)을 일으킨다. 응력구배는 캔티레버 빔의 끝에서 휘어진 변형량(d)을 측정함으로써 계산되며, 응력구배(σ/t)는 아래와 같이 표현된다[5].

$$\frac{\sigma}{t} = \frac{E}{2\rho} \cong \frac{Ed}{L^2} \quad (7)$$

여기에서 d는 캔티레버 빔의 휘어진 변위, L은 캔티레버 빔의 길이, E는 탄성율이다. Fig. 4에서는 너비 1-20 μ m, 길이 50-1500 μ m의 캔티레버 빔을 보여주고 있다.

박막내의 응력분포는 평균응력인 잔류응력과 응력의 불균일한 분포로 인하여 발생하는 응력구배로 분리될 수 있다. 길이가 긴 캔티레버 등을 이용한 고감도의 센서를 제작하는데 있어 불균일한 응력분포는 장애 요소가 되고있다. 본 논문에서는 고농도의 인이 첨가된 폴리실리콘 박막의 응력구배 특성을 조사하였다. 증착된 폴리실리콘 박막은 증착후에

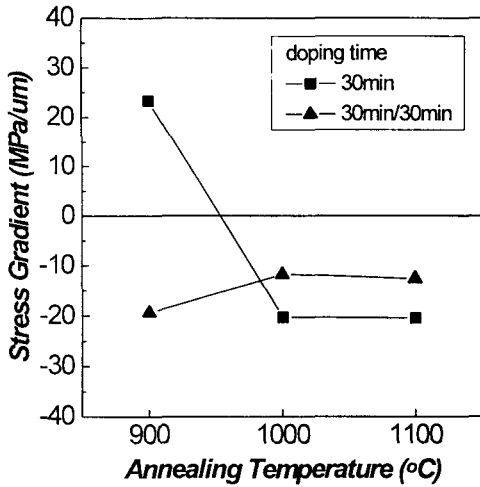


Fig. 7. Stress gradient in the doped polysilicon films with annealing temperature, measured using cantilever.

-2.8MPa/um 정도의 낮은 응력구배를 보이나, 불순물이 첨가된 실리콘 박막의 응력구배 특성은 열처리 온도와 첨가된 불순물의 농도 분포에 따라서 크게 달라진다. Fig. 7 에서와 같이 30분 동안 도핑된 박막에서 900°C에서 어닐링을 실시하면 빔은 위로 휘어지며 양의 응력구배를 나타낸다. 어닐링 온도가 1000°C 이상으로 증가하면 빔의 휘는 방향이 바뀌어 음의 응력구배를 가진다. 2단계 도핑된 박막에서는 어닐링 온도가 증가함에 따라 응력구배가 감소하는 경향을 보인다. 열처리하는 박막내의 불순물 분포를 변화시키고, 응력을 완화시키는 2가지 작용을 동시에 일으킨다. 또한 Fig. 6 에서 조사된 바와 같이 불순물의 농도에 따라 응력이 완화되는 정도가 달라진다. 양의 응력구배는 박막의 상부보다 하부의 압축응력이 크다는 것을 의미하며, 어닐링 온도가 900°C로 비교적 낮은 경우 양의 응력구배를 보이는 것은 불순물 농도가 높은 박막 상부에서 상대적으로 응력 완화가 크게 일어나 상부의 압축응력이 작게 나타나기 때문이다.

4. 결론

박막의 응력을 측정하기 위하여 파괴 검사법 중의 하나인 표면 마이크로머시닝 기술로 제조된 미세 구조체를 이용하였다. 응력 측정을 위한 micro strain gauge, cantilever-type vernier gauge, bridge와 응력구배 측정을 위한 캔틸레버가 제작되었으며, 변형량의 검출에는 division이 21이고, 해상도가 0.2um 인

micro vernier gauge가 사용되었다. 그리고 각각의 측정 구조체에 대한 동작원리와 측정 특성을 비교분석하였고 측정의 정확도를 향상시키기 위한 방법이 제시되었다. 미세 가공된 구조체를 이용하여 10⁻⁴ 이하의 작은 변형률을 측정할 수 있었으며, micro vernier gauge의 해상도를 증가시켜 측정범위를 조절할 수 있다. 캔틸레버형 게이지보다는 변형량을 확대시켜 검출하는 micro strain gauge 에서 보다 정밀한 변형률응 측정하였다. 응력의 측정은 LPCVD 폴리실리콘 박막에 대하여 실시되었으며, 잔류응력 및 응력 구배 특성이 조사되었다.

5. 참고문헌

- [1] H. Guckel, T. Randazzo and D. W. Burns, J. Appl. Phys. **57**, 1617 (1985)
- [2] M. Orpana and A. O. Korhonen, The Inter. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91), 957 (1991)
- [3] H. Guckel, D. W. Burns, C. C. G. Visser, H. A. C. Tilmans, and D. Deroo, IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 35 (1988) pp.800-801
- [4] A. O. Korhonen, Thesis, Faculty of Electrical Eng., Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, Feb 1991
- [5] C.-J. Kim, R. S. Muller and A. P. Pisano, Sensors and Materials **4**, 291 (1993)
- [6] L. Lin, R. T. Howe and A. P. Pisano, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems, Fort Lauderdale, FL, U.S.A. (1993) pp.201-206
- [7] J. F. L. Goosen, B. P. van Drieënhuizen, P. J. French and R. F. Wolffenbittel, The 7th Inter. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Yokohama, Japan (1993) pp.783-786
- [8] S. P. Murarka and T. F. Retajczyk, Jr., J. Appl. Phys. **54**, 2069 (1983)
- [9] M. S. Choi and E. W. Hearn, J. Electrochem. Soc. **131**, 2443 (1984)
- [10] T. I. Kamins, Sensors and Actuators **A21-A23**, 817 (1990)