

반도체 제조공정 중 발생하는 오염입자 측정에 관한 연구

나정길, 김태성

성균관대학교 기계공학부

초록

As the minimum feature size decreases, it is more difficult to control critical contaminant particles. For 16GB flash memory introduced by Samsung a few months ago, 50nm process was used and in this case, contaminant particles as small as 25nm should be controlled. The particle beam mass spectrometer (PBMS) was developed to directly sample particles at pressures down to 100 mtorr. This instrument is sensitive to small particles (>5nm) produced in low concentrations (>20cm⁻³). The PBMS has proved to be effective in measuring particles generated during semi-conductor fabrication processes, such as low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD) of thin films. The operating principle of the PBMS and some measurement results are reviewed in this paper.

1. 서론

서브마이크론 크기(0.1 μ m)의 미세오염입자는 반도체가 고집적화 됨에 따라 수율, 디바이스 성능 및 신뢰성에 치명적인 영향을 끼친다. 2003 년도에 발표된 International Technology Roadmap for Semiconductor(ITRS)에 따르면[1], 2009년에는 임계입자크기가 25nm에 이를 것으로 전망되고 있다. 따라서 반도체업계를 중심으로 기관 위의 오염입자의 제거와 감지기술에 중점을 두고 활발히 연구가 진행하고 있으나, 50nm 이하의 입자들은 보편적으로 사용되는 표면 스케너에 의해 감지되기 어렵고, 일반적인 클리닝 기술로는 제거효율이 낮은 실정이다.

McMurry 그룹은 반도체 제조공정 중 저압의 가스(>100mtorr)내에 부유하는 입자의 농도(>20cm⁻³)와 크기분포(5~500nm)를 측정하기 위해 Particle Beam Mass Spectrometer(PBMS)를 개발하였고, thermal[3-5] 및 plasma enhanced[6] chemical vapor deposition(CVD)과 같은 반도체 제조공정 중 발생하는 입자들을 측정하는데 효율성을 입증하였다. Ziemann 등[4]은 poly-Si 박막의 LPCVD 공정 중 발생입자를 PBMS 로 측정하여 가스의 체류시간(residence time)과 온도의 함수로서 균질 핵성장에 대한 임계압력을 제시하였다. McMurry 등[5]은 SiO₂ 박막의 LPCVD 공정 동안 발생하는 입자에 대해 연구를 수행하였고, 입자의 형성은 압력에 매우 민감하다는 사실과 PBMS 로 측정된 입자들과 기관표면 위의 미립자 오염의 상관관계를 유도하였다. Nijhawan[3]은 poly-Si 의 LPCVD

공정 중 입자의 형성과 수송에 대해 포괄적인 연구를 수행하였다. 그는 입자 핵생성과 성장, 수송에 대해 수치적인 해석기법을 개발하였고, PBMS 측정을 통해 모델링 결과를 수정하였다. Rao 등[6]은 Lam Research Corporation DSMTM 9800 LPCVD 반응기 내의 borophosphosilicate glass(BPSG)의 증착과정 중 입자의 발생을 모니터링 하였다. 그들은 정상가동조건(압력: 1~3 torr, 온도: 775~825℃)에서 높은 농도의 입자($\sim 10^{-5} \text{cm}^{-3}$)를 측정하였고, 문턱압력과 가스 유동률을 제시하였다. 본 논문에서는 PBMS의 작동원리에 대해 기술하고 poly-Si 과 SiO₂ 박막의 LPCVD 공정 중 입자측정에 관하여 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

poly-Si 박막[7]과 SiO₂ 박막[8]의 LPCVD 공정은 GEC reference cell 에서 수행하였다. 입자들은 배기라인(exhaust line)과 반응기(reactor) 내에서 수집하였다. Figure 1 은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 가스유동이 공정챔버의 배기라인으로부터 두 개의 펌프가 설치된 PBMS 에 유입된다. 가스유동 내의 입자들은 공기역학렌즈를 이용하여 입자빔(particle beam)의 형태로 관의 중심부로 모아지며 노즐팽창에 의해 가속되고, 대부분의 가스는 첫 번째 챔버에서 제거된다. 충분한 관성을 가진 입자들은 2mm 의 스키머(skimmer)를 통하여 고진공($<10^{-5}$ torr)상태의 챔버로 이동하게 된다. 이 때, 입자들은 전자총들에 의해 포화상태로 하전되고 90° 정전기적전향장치 (electrostatic deflector)에 어떤 임계값 아래의 입자의 운동에너지와 하전량의 비에 따라 분류가 된다. 입자빔의 전류량은 Faraday 검지기와 전류계에 의해 측정된다.

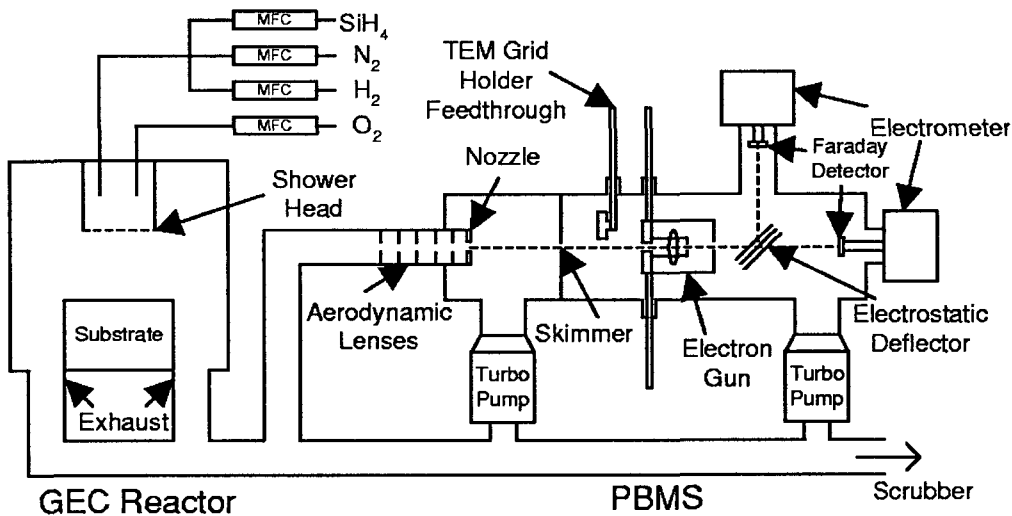


Figure 1. Schematic of PBMS and CVD reactor for SiO₂ deposition.

PBMS 데이터의 변환은 다음과 같이 유도할 수 있다. 정전기장에서 유입되는 입자를 꺾이게 하기 위해 충분한 전장강도를 얻기 위한 전압은 입자의 운동에너지와 하전량의 비에 비례한다.

$$V = m_p u_p^2 / 2 A z_p e \quad (1)$$

여기서 m_p , u_p , z_p 는 각각 입자 질량, 속도, 하전량을 나타낸다. A 는 전향각에 의존하는 상수이고 e 는 단위 전자량을 나타낸다. 입자의 질량, 속도, 하전량은 입자크기에 대한 주요 함수이기 때문에 굴절된 전압에 따라 임계입자크기, $D_p(V)$ 가 결정된다. Faraday 검지기에서 측정된 굴절된 입자빔의 전류량 식으로부터 다음과 같은 입자크기분포함수를 구할 수 있다.

$$\frac{dn_p}{d \log(D_p)} = \frac{dI}{dV} \frac{dV}{d \log(D_p)} \frac{1}{z_p(D_p)\eta(D_p)\dot{Q}e} \quad (2)$$

입자크기 분포를 구하기 위해 I(V)와 V(D_p)의 값을 구하여야 하는데 I(V)는 굴절전압이 변하는 동안 입자빔의 전류량을 측정함으로써 구할 수 있고, V(D_p)는 입자 크기, 질량, 속도, 하전량 사이의 관계식을 이용하여 식(1)로부터 구할 수 있다. 다음 식은 이론적, 실험식 연구[2,10]에 의해 제시된 식이다.

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p K_g (K_m D_p)^3 \quad (3)$$

$$\frac{u_p}{\bar{c}} = 0.64 St^{-0.33} \quad (4)$$

$$St = \frac{\rho_p K_m D_p}{2(1 + \pi \alpha_a / 8) \rho_g d_n} \quad (5)$$

$$z_p = 1 + \frac{s D_p^2}{\Delta + D_p} \quad (6)$$

여기서, ρ_p는 입자밀도, K_g는 기하형상계수, k_m은 이동도형상계수, \bar{c} 는 운반가스의 평균열속도, s_t는 운반가스의 평균열속도에 대한 입자 Stokes 계수이고, ρ_g는 운반가스의 밀도, α_a는 운반가스의 조정계수(대부분의 가스는 0.9이하), 그리고 s = 2800 μm⁻¹, Δ = 0.05 μm는 재료의존상수이다. 이러한 관계는 Ziemann 등[2], Nijhwan[3]의 논문에 자세히 기술되어 있다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 2는 poly-Si 박막(압력: 2torr, 온도: 750°C, SiH₄(100%)유량: 200SCCM)의 LPCVD 공정 중 배기라인과 반응기 내에서 수집된 입자들의 PBMS 측정을 통한 입자크기분포 결과를 나타낸다. 반응기 내에서 측정된 입자의 지름은 40~50nm 인 반면에 배기라인에서는 10~15nm 로 작게 측정되었다. 이러한 입자크기의 차이는 배기라인 측정에서 입자의 수송손실 때문일 것으로 판단된다. 배기라인에서의 입자농도 역시 같은 이유로 반응기 내에서보다 훨씬 낮게 측정되었다.

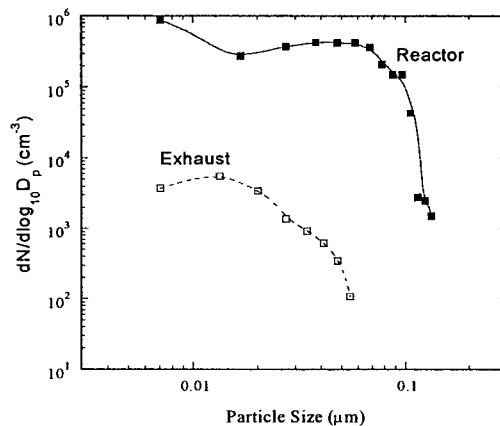


Figure 2. PBMS size distributions measured in the process exhaust and reactor at the base case conditions.

Figure 3은 배기공정에서 입자 형성이 시작되는 임계 온도와 압력을 PBMS를 사용하여 측정 한 결과이다. (a)에서 보는 바와 같이 750°C의 증착온도에서 압력이 1.5torr이상으로 증가함에 따라 입자가 형성됨을 알 수 있고, (b)를 통해 약 715°C의 임계 압력 이상에서 입자가 형성됨을 알 수 있다.

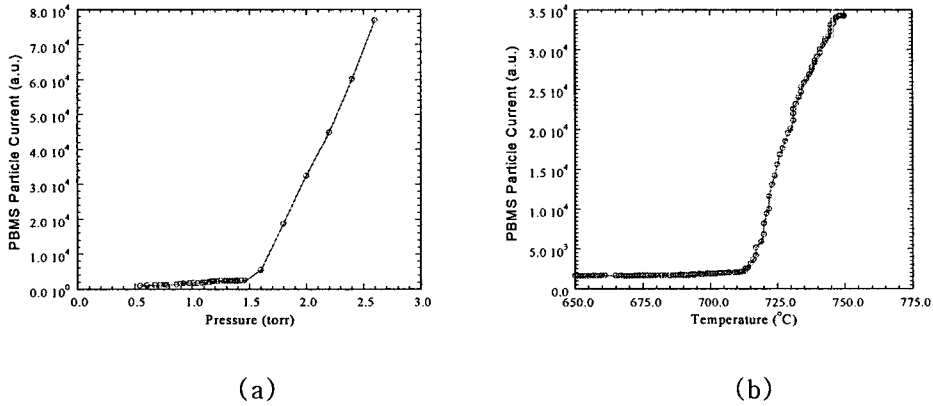


Figure 3. Critical pressure (a) and temperature (b) of particle formation.

Figure 4는 SiO₂의 LPCVD 공정 중 관찰된 입자 발생의 다른 영역들을 온도와 압력의 함수로 나타내었다. (A)는 explosion, 화학발광, 극소수의 입자발생 영역, (B)불안정 입자 발생영역, (C) 안정한 입자 발생 영역, (D) 입자 발생하지 않는 영역을 나타낸다.

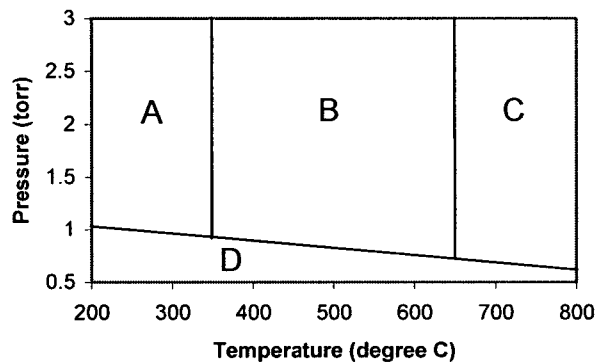


Figure 4. Pressure-temperature reaction diagram of the LPCVD of SiO₂ from SiH₄ and O₂.

안정한 입자발생영역의 경우에 한하여 PBMS를 통해 입자 크기 분포를 측정할 수 있다. 800°C, 1.5torr 하에서 생성된 입자들의 크기 분포를 Figure 5의 (a)에 나타나 있다. 그 결과를 증명하기 위하여 TEM(transmission electron microscopy)장비를 사용하였다. (b)는 800°C, 1.5torr에서 생성된 SiO₂ 입자를 TEM으로 측정한 사진이다. 측정값과 사진을 통해 대부분 입자들의 크기는 약 10nm 이고 약간 큰 입자의 경우 약 20에서 25 nm임을 알 수 있다.

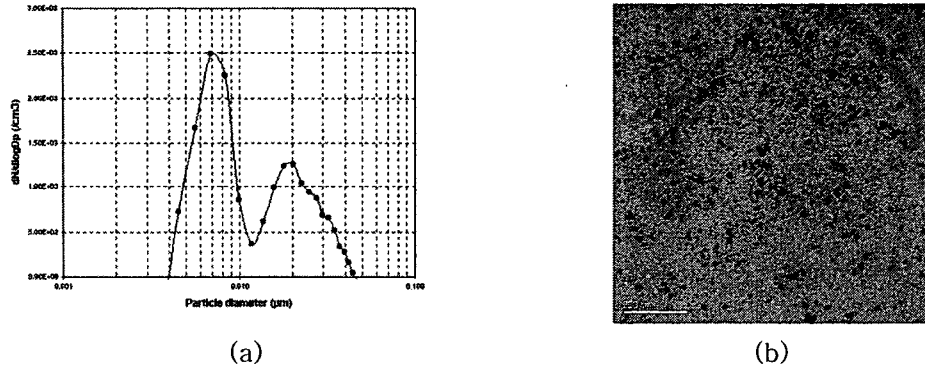


Figure 5. (a) Particle size distribution during CVD of SiO₂ from SiH₄ and O₂ at 1.5torr and a substrate temperature of 800°C. (b) TEM micrograph of SiO₂ particles generated at 800 ° C, 1.5torr. (Scale bar: 50 nm)

4. 결론

PBMS 는 저압(>100mtorr)에서 입자의 크기(>5nm)와 농도(>20cm⁻³)를 측정하는데 매우 효과적인 장비임이 입증되었다. 이러한 기술을 통하여 입자들은 저압환경에서 바로 수집될 수 있고 공기역학렌즈를 통해 모아지며, 포화상태로 하전되고 정전기적 전향장치를 이용하여 분류될 수 있다. 본 논문에서는 PBMS 를 통해 poly-Si, SiO₂ 박막의 LPCVD 공정 중 발생하는 입자의 실시간 측정을 실시하였으며, 그 결과는 이러한 과정 동안 입자조성을 이해하는데 유용한 정보를 제공하였다.

후기

본 논문은 Peter H. McMurry 교수의 지도하에 미국의 미네소타 대학교에서 수행했던 연구를 기초로 하였다.

참고문헌

- [1] SIA, 2003 International Technology Roadmap for Semiconductors, 2003.
- [2] Ziemann, P.J., et al., J. Aerosol. Sci., 26(5), pp. 745-756, 1995.
- [3] Nijhawan, S., "Experimental and computational study of particle nucleation, growth, and transport during low-pressure thermal decomposition of silane", Mechanical Engineering in University of Minnesota, 1999.
- [4] Ziemann, P.J., et al., "Particle beam mass spectrometry of submicron particles formed during LPCVD of polysilicon films.", On-Line Monitoring Institute of Environmental Sciences - Proceedings Annual Technical Meeting, 1995.
- [5] McMurry, P.H., et al., J. Vac. Sci. Technol. A, 14(2), pp. 582-587, 1996.
- [6] Rao, N.P., et al., Journal of the Electrochemical Society, 145(6), pp. 2051-2057, 1998.
- [7] Nijhawan, S., et al. "Particle measurements and transport in silane LPCVD", Contamination Control Institute of Environmental Sciences - Proceedings Annual Technical Meeting, 1998.
- [8] Kim, T., et al., J. Vac. Sci. Technol. A, 20(2), pp. 413-423, 2002.