

# 저압공정 중 발생하는 나노입자 실시간 측정장비에 관한 연구

나정길<sup>1</sup> · 조대근<sup>2</sup> · 최재봉<sup>1</sup> · 김영진<sup>1,2</sup> · 김태성<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 기계공학부, 수원 440-746

<sup>2</sup>성균관대학교 나노과학기술원, 수원 440-746

(2007년 10월 1일 받음)

본 논문에서는 저압환경에서 실시간으로 나노입자를 측정할 수 있는 PBMS(Particle Beam Mass Spectrometer)의 개발에 대해 서술하였다. 개발된 PBMS의 교정을 위해 NaCl입자를 사용하였다. DMA(Differential Mobility Analyzer)를 통해 +1가로 하전된 입자를 1 lpm 발생시켜 그 중 0.086 lpm을 PBMS 입구의 오리피스를 통해 분기하여 유입시켰다. DMA와 PBMS의 전류값을 비교하여 전송효율을 측정된 결과 입자의 크기에 따라 약 50~60%를 나타내었다. 또한 DMA에서 특정한 크기의 입자를 발생시켜 PBMS로 측정하였으며 그 결과는 입자크기별 농도분포와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

주제어 : 저압공정, 나노입자, 실시간, 측정장비, PBMS

## I. 서 론

공정 중 발생하는 입자는 반도체 생산 수율에 가장 큰 영향을 끼치는 원인으로 파악되고 있으며, 생산 수율을 저하시키는 원인 중 70% 가량이 이와 관련된 것으로 알려져 있다[1]. 현재 클린룸 기술의 발달로 외부환경에서 유입되거나 인체에서 발생하는 입자는 제어가 되고 있지만, 반도체 공정 중이나 반도체 공정 장비에서 발생하게 되는 입자는 제어가 되고 있지 않은 실정이다. 대부분의 반도체 공정은 저압환경에서 이루어지며, 이 때 발생하는 입자를 제어하기 위해서는 저압환경에서 측정할 수 있는 측정시스템이 필요하다. 최근 국내에서는 화학기상증착(Cheical Vapor Deposition, CVD) 시스템 내 파이프내벽에서의 오염입자 침착은 심각한 문제점으로 인식되고 있으며 이를 초음파 및 진동진단법을 통해 모니터링 하는 기술이 개발된 바 있다.[2] 또한, 오염입자의 발생을 막기 위해 전구체의 안정된 공급을 위한 실시간 초음파진단기술을 개발한 바 있다.[3] 표 1은 2005년도 International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)를 통해 보고된 연도별 최소 DRAM half pitch와 그에 따른 killer 입자의 크기를 보여준다[4]. 2009년에 50nm 기술이 사용되면 제어해야 될 입자의 크기는 25 nm가 되지만, 이런 크기의 입자를 실시간으로 측정할 수 있는 장비는 현재 개발된 사례가 없다. 현재 반도체 공정에서 입자를 계측하고 있는 PWP(Particles per Wafer Pass)방법은 공정 내 테스트 웨

이퍼를 통과시킨 후, 테스트 웨이퍼 위에 침착된 입자들을 분석하여 오염도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 실질적인 반도체 수율을 나타내기 때문에 널리 쓰이고 있으며, 표준 측정방법으로 사용되고 있다. 하지만 실시간으로 입자의 양을 측정할 수 없으며, 비용이 많이 든다는 단점이 있고 더욱이 측정주기를 짧게하면 대량의 웨이퍼 사용으로 인해 비용이 증가하게 된다는 어려움을 가지고 있어 공정 중에 입자를 측정할 수 있는 대안기술 필요한 실정이다. PWP 방법과 달리 본 연구를 통해 개발된 PBMS는 오염원 발생에 대한 즉각적인 대처와 조치가 가능하며, 부가적인 추가 비용이 발생하지 않기 때문에 실시간 모니터링 장비가 없는 현재의 반도체 공정에 충분히 적용될 가능성이 있다. 특히 CVD 공정은 반도체 공정의 약 30%를 차지할 만큼 중요한 단계이며 생성되는 오염입자 모니터링을 통해 공정 불량 유무를 판단 할 수 있는 공정이기 때문에 이에 적합한 측정장치가 필요한 실정이다.

표 1. DRAM half pitch and killer particle size

	2005	2006	2007	2008	2009	...	2020
DRAM 1/2 pitch (nm)	80	70	65	57	50	....	14
Critical particle size (nm)	40	35	32.5	28.5	25	....	25

본 연구에서는 저압환경에서 실시간으로 나노입자를 측정할 수 있는 PBMS의 개발과 이에 대한 calibration 과정에 대해 서술하였다.

\* [전자우편] tkim@skku.edu

## II. PBMS 작동원리 및 이론

그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 가스유동이 저압챔버로부터 PBMS로 유입이 된다. 가스유동 내의 입자들은 공기역학렌즈(aerodynamic lenses)[5, 6]를 통하여 입자빔(particle beam)의 형태로 관의 중심부로 모아지며 노즐(nozzle)팽창에 의해 가속된다. 충분한 관성을 가진 입자들은 anode와 cathode, filament로 구성된 electron gun을 통해 포화상태로 하전된다. 3개의 니켈 메쉬(mesh)로 구성된 electrostatic deflector에서 가운데 메쉬에 전압을 인가하여 스캔하면, 어떤 임계값 아래의 입자가 운동 에너지와 하전량의 비에 따라 분류가 된다. 분류된 입자의 전류량은 Faraday detector와 electrometer에 의해 측정된다.

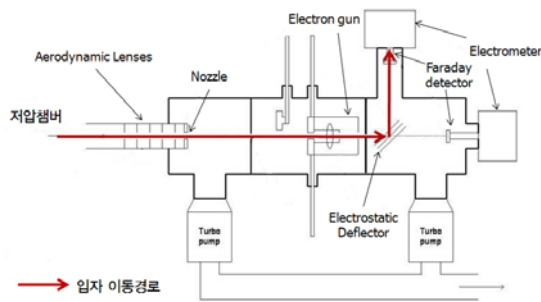


그림 1. schematic of PBMS

deflector 내 유입되는 입자를 꺾이게 하기 위해 충분한 전기적 강도를 얻기 위한 전압은 식(1)과 같이 입자의 운동 에너지와 하전량의 비에 비례한다.

$$V = m_p u_p / 2AZ_p e \quad (1)$$

여기서,  $m_p$ ,  $u_p$ ,  $Z_p$ 는 각각 입자의 질량, 속도, 하전량을 나타낸다.  $A$ 는 전향각에 의존하는 상수(45°일 경우  $A=2$ ),  $e$ 는 단위 전자량을 나타낸다. Faraday detector에서 측정된 입자의 전류량은 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 양변을 미분하면 식(3)과 같이 입자크기분포함수를 구할 수 있다.

$$I(V) = \sum_0^{D_p(V)} \frac{dn_p}{d \log(D_p)} Z_p(D_p) \eta(D_p) \dot{Q}_e d \log(D_p) \quad (2)$$

$$\frac{dn}{d \log(D_p)} = \frac{dI}{dV} \frac{dV}{d \log(D_p)} \frac{1}{Z_p(D_p) \eta(D_p) \dot{Q}_e} \quad (3)$$

입자크기분포를 구하기 위해  $I(V)$ 와  $V(D_p)$ 의 값을 구하여야 하는데,  $I(V)$ 는 전압이 변하는 동안 입자의 전류량을 측정하여 구할 수 있고,  $V(D_p)$ 는 입자크기, 질량, 속도, 하전량 사이의 관계식을 이용하여 식(1)로부터 구할 수 있다[7, 8].

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p K_g (K_m D_p)^3 \quad (4)$$

$$\frac{u_p}{c} = 0.64 St^{-0.33} \quad (5)$$

$$St = \frac{\rho_p K_m D_p}{2(1 + \pi \alpha_a / 8) \rho_g d_n} \quad (6)$$

$$Z_p = 1 + \frac{s D_p^2}{\Delta + D_p} \quad (7)$$

여기서,  $\rho_p$ 는 입자밀도,  $K_g$ 는 이동도형상계수,  $c$ 는 가스 평균열속도,  $St$ 는 입자의 Stroke 수,  $\rho_g$ 는 가스밀도,  $\alpha_a$ 는 가스의 조정계수(대부분 가스는  $\sim 0.9$ )[9],  $s$ 와  $\Delta$ 는 재료 의존상수이며 각각  $2800 \mu\text{m}^{-1}$ ,  $0.05 \mu\text{m}$ 이다. 이러한 관계식은 Ziemann 등[7], Nijhawan[10]의 논문에 자세히 기술되어 있다.

## III. PBMS Calibration

그림 2는 PBMS calibration을 위한 실험장치의 실제 구성도이다. (1)~(7)은 각각 DMA(HCT SMPS system), Faraday cup(HCT제작), rotary pump (Alcatel Pascal series), turbo pump(Leybold TURBOVAC 361), PBMS, electrometer(Keithley 6517A), power supply(Xantrex XDL/XPD series)를 나타낸다. DMA(1)를 통하여 특정크기의 입자를 발생시켜 유량의 일부를 PBMS(5)로 분기하였다. 각각의 전류량을 측정하여 전송효율을 계산하였고, 입자 deflection 후 PBMS의 입자크기분포와 비교하였다.

그림 2. experimental set-up for PBMS calibration

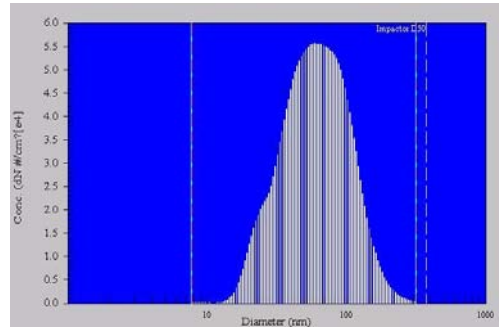
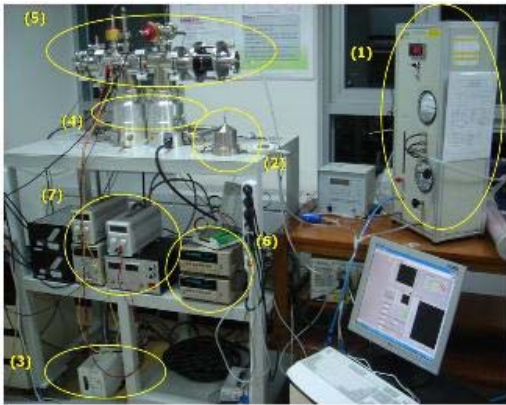


그림 3. size distribution for NaCl particle with DMA

i) 진공도(Vacuum) 측정

PBMS(5) 최적의 작동압력은 입자가 유입되는 첫 번째 챔버에서  $10^{-3}$  torr, 입자가 하전되고 측정되는 두 번째 챔버에서  $10^{-5}$  torr이다. 입구에 장착된 오리피스 직경을 바꿔가며 진공게이지를 통하여 각 챔버 별 진공도를 측정하였고 그 결과는 표 2와 같다.

표 2. results of vacuum degree

오리피스 직경(mm)	0.1	0.08
유량(lpm)	0.086	0.044
첫 번째 챔버(torr)	$2 \times 10^{-3}$	$9.8 \times 10^{-4}$
두 번째 챔버(torr)	$5.5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$

이를 이론값과 비교하기 위해 컨덕턴스(conductance)를 계산하여 비교하였다.

$$C_p = 182(D^4/L) \times \bar{p} \quad (8)$$

여기서  $D$ 는 파이프의 직경,  $L$ 은 파이프의 길이,  $\bar{p}$ 는 평균압력을 나타낸다. 시스템 사양을 통해 계산한 두 번째 챔버의 이론적 압력은 약  $2.9 \times 10^{-6}$  torr이며, 실제 측정값과 오차가 나는 이유는 outgassing, leak 등에 의한 것으로 판단된다.

ii) 전송효율(transport efficiency) 측정

NaCl 입자를 크기별로 발생시킬 수 있는 DMA를 이용하여 그림 3과 같이 50~100 nm 범위의 입자를 발생시켜 DMA와 PBMS에 각각 0.916, 0.086 lpm의 유량으로 분기하여 입자의 전류량을 측정하였다.

NaCl 입자분포 중 50~80 nm에 대해 각각의 유량으로 환산하여 DMA 대비 PBMS의 효율을 측정한 결과 그림 4~7과 같이 50~60%임이 확인되었다. 입자의 크기가 증가할수록 효율이 감소하는 이유는 PBMS 유입 시 입자빔 크기의 퍼짐(divergence)이 커지고, 분기관 내 관성에 의한 충돌, 중력에 의한 침전과 같은 수송손실 등에 의한 것으로 판단된다.

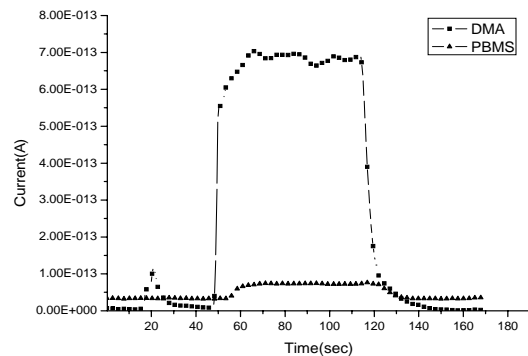


그림 4. transport efficiency for NaCl 50 nm (66%)

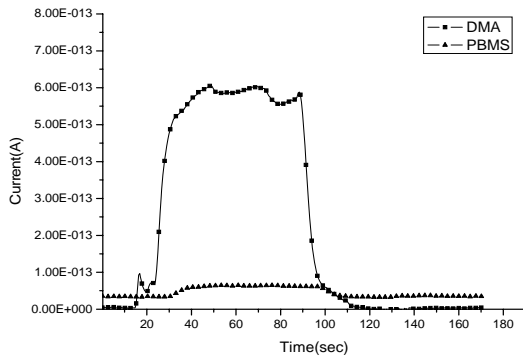


그림 5. transport efficiency for NaCl 60 nm (57%)

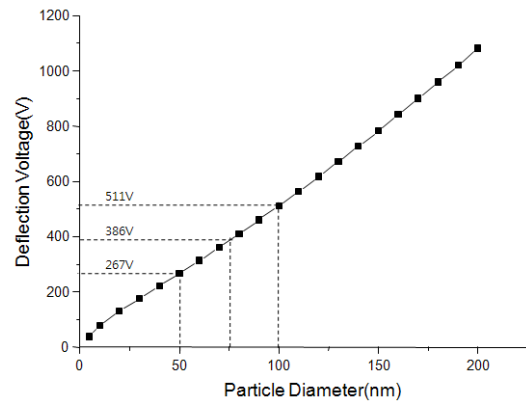


그림 8. theoretical deflection curve

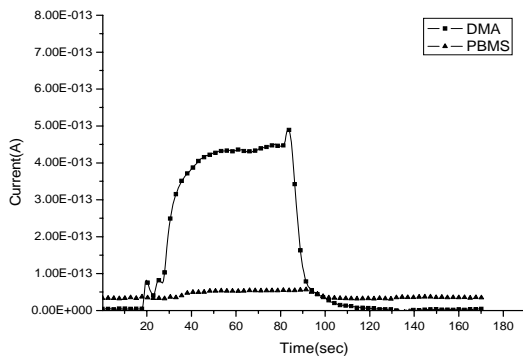


그림 6. transport efficiency for NaCl 70 nm (55%)

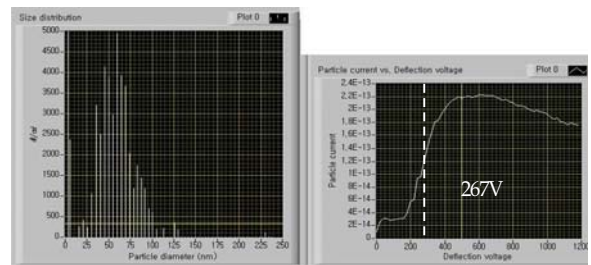


그림 9. measurement results for NaCl 50 nm

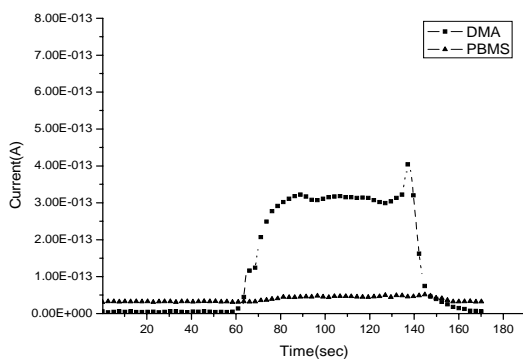


그림 7. transport efficiency for NaCl 80 nm (52%)

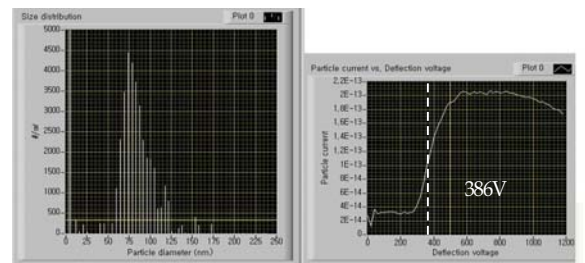


그림 10. measurement results for NaCl 75 nm

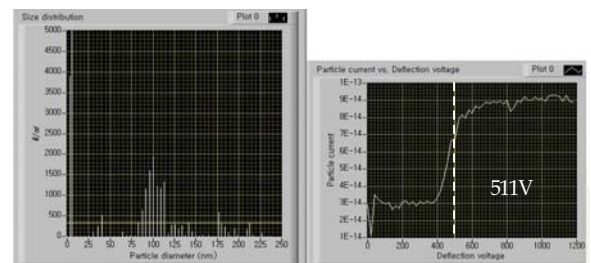


그림 11. measurement results for NaCl 100 nm

### iii) 입자분포측정결과

식(1), (4)~(7)에 나타난 바와 같이 입자를 deflection 시키는 최대전압은 입자크기에 관한 함수이다. 따라서 NaCl 입자크기에 따른 이론적인 deflection 전압은 그림 8과 같다.

본 연구에서는 입자분포를 측정하기 위해 상용프로그램인 Labview를 이용하여 입자크기분포 프로그램을 개발하였다. 그림 9~11는 DMA를 통해 NaCl 50, 75, 100 nm를 발생시키고 이를 PBMS에서 측정한 결과를 나타낸다(좌 : 입자크기 별 농도분포, 우 : 입자전류 별 deflection 전압). 우 그래프에서 기울기가 최대가 되는 지점이 deflection 전압이며, 이는 그림 8의 이론적인 값과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 저압에서 발생하는 입자의 분포를 실시간으로 측정할 수 있는 PBMS의 개발과 이에 대한 calibration 과정에 대해 논하였다. 먼저, PBMS의 작동원리와 데이터 변환을 통한 입자크기분포에 관한 이론적인 식에 대해 기술하였고, calibration을 위해 DMA에서 NaCl 입자를 크기별로 발생시켜 PBMS에서의 측정결과와 비교하였다. 효율 측정 결과 약 50~60%였으며, 50~100 nm 범위에 대해 크기분포를 잘 측정함을 확인 하였다. 향후 효율을 향상시키기 위해 deflector에 설치된 니켈메쉬에 대한 정밀한 설치와 PBMS 내 Faraday detector의 민감도를 향상시키기 위한 설계변경이 필요하다. 또한  $\mu\text{m}$  단위의 큰 입자측정을 위해서는 수천 볼트 이상의 높은 Deflection 전압이 요구되기 때문에 이에 따른 전기적 안전성에 대한 보완연구가 필요하고 ISPM(In-Situ Particle Monitor)과 연계하여 적용될 수 있다. 본 논문을 통해 개발된 PBMS는 반도체 공정과 같은 저압환경에서 발생하는 오염입자에 대한 실시간 측정을 가능하므로 공정모니터링 장비로 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 삼성전자 산학협동연구과제에 의해 수행되었음. 위탁기관으로서 장비제작에 도움을 준 (주) 에이치시티에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] John F. O'Hanlon, J. Vac. Sci. Technol. A, **7**(3), 2500~2503 (1989).
- [2] 윤주영, 성대진, 신용현, 이지훈, 문두경, 강상우, 한국진공학회지, **15**(4), 421-426 (2006).
- [3] 윤주영, 신용현, 정광화, 한국진공학회지, **14**(3), 110-114 (2005).
- [4] International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), (2005).
- [5] Liu, P., et al., J. Aerosol. Sci. Technol., **22**(3), 293-313, (1995)
- [6] Liu, P., et al., J. Aerosol. Sci. Technol., **22**(3), 314-324, (1995)
- [7] Ziemann, P. J., et al., J. Aerosol. Sci., **26**(5), 745-756, (1995)
- [8] Nijhawan, S., P. H. McMurry, S. A. Cambell, J. Vac. Sci. Technol. A, **18**(5), 2198-2206, (2000)
- [9] Friedlander, S. K., *Smoke, dust, and haze : Fundamentals of aerosol behavior, 2nd ed.* ( Wiley Press, New York, 2000), xvii. 317.
- [10] Nijhawan, S., Mechanical Engineering in University of Minnesota, (1999)

## Study on the real-time measurement equipment for nanoparticle in low-pressure processes

Jeonggil Na<sup>1</sup>, Daegeun Cho<sup>1,2</sup>, Jaeboong Choi<sup>1</sup>, Youngjin Kim<sup>1,2</sup>, Taesung Kim<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746*

<sup>2</sup>*Advanced Institute Nanotechnology, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746*

(Received October 1 2007)

In this paper, we discussed about the development of the PBMS(Particle Beam Mass Spectrometer) that can measure the nanoparticles on real-time in low-pressure processes. To calibrate this equipment, a DMA(Differential Mobility Analyzer) was used to generate NaCl particles which are charged to +1. Total aerosols flow rate was 1 lpm and 0.086 lpm of that was introduced into the PBMS through the pressure-reducing critical orifice. Transport efficiency through PBMS was 50~60 % compared to particle current for DMA and PBMS according to the particle size. Results of measurements are in good agreement with size distributions obtained by DMA.

Keywords : low-pressure process, nanoparticle, real-time, measurement equipment, Particle Beam Mass Spectrometer

\*[E-mail] tkim@skku.edu