

진공 환경내 실시간 입자 모니터링 시스템의 개발 및 성능평가

안강호[†] · 김용민* · 권용택*

[†]한양대학교 기계공학과, *현대교정인증기술원 R&D center

Development and Performance Test of In-situ Particle Monitoring System using Ion-counter in Vacuum Environments

Kang Ho Ahn[†], Yong Min Kim* and Yong Taek Kwon*

[†]Mechanical Engineering of Hanyang University

*Hyundai Calibration & Certification Technologies, R&D Center

ABSTRACT

In this paper, a new method that monitors the quantity of particles using ion-counter in vacuum environment is introduced. In-situ particle monitoring (ISPM) system is composed by Gerdien type ion-counter (house-made), DC power supply and electrometer. The ion-counter applied by positive voltage detects only positive charged particles. Therefore the particles to be detected should be in known charge state for further data analysis. Ion-counter is installed at the exhaust line of process equipment where the pressure loss is structurally low. ISPM system performance has been verified with SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) system. The correlation coefficient is above 0.98 at the particle size range of 20~300 nm in diameter with identified charge distribution under 0.1~10.0 Torr.

Key Words : in-situ particle monitoring, ion-counter, soft x-ray, vacuum system

1. 서 론

반도체 분야에서는 정밀, 집적화로 인하여 작업장 내의 불순물의 유무가 매우 중요한 사항이 되고 있다. 일반적으로 반도체 공정 중 발생하는 입자 및 불순물을 최소화 하기 위하여 진공기술 등을 사용하고 있으며, 보다 효율적인 생산을 위하여 공정내의 입자를 실시간으로 계측할 수 있는 시스템의 필요성이 대두되고 있다. ISPM(In-situ Particle Monitoring)이란 반도체 장비에서 공정 내 발생하는 입자의 양을 측정하기 위하여 입자 모니터링 시스템을 하나의 공정요소로 포함시키는 것을 의미한다. 현재 반도체 공정에서 입자를 계측하기 위해서 '테스트 웨이퍼 모니터링' 방법을 사용하고 있다. 테스트 웨이퍼 모니터링이란 공정 내 테스트 웨이퍼를 통과시킨 후, 테스트 웨이퍼 위에 침착된 입자들을 분석하여 작업장의 오염도를 측정하는 방법

이다. 이 방법은 실질적인 반도체 수율을 나타내 주기 때문에 널리 쓰이고 있으며 표준 측정 방법으로 사용되고 있다. 하지만 실시간으로 입자의 양을 측정할 수 없으며, 비용이 많이 드는 단점이 있다.

Peter and Lawrence(1989)[1]는 실시간 입자 모니터링을 위하여 레이저 산란 특성을 이용한 방법을 사용하였다. 진공 상태에서 레이저 측정 장치의 입자에 대한 측정 감도는 약 20% 수준이었으며, 입자 크기가 작아질수록 측정감도가 감소하여 300 nm 이하의 입자는 측정할 수 없었다. 또한, 테스트 웨이퍼와 레이저 측정 장치와의 상관계수는 0.52 정도로 매우 낮은 정도였다 [2]. Kinney *et al.*(1996)[3]은 공기 역학적 렌즈(aerodynamic lens)를 사용하여 레이저 센서의 측정 감도를 향상시킴으로써 ISPM에 적용 가능성을 제안하였다. 하지만 공기역학적 렌즈의 구조상 큰 압력손실이 발생하며, 레이저 측정 장치의 특성 때문에 300 nm 이하의 입자는 측정 불가능한 단점이 남아있다.

본 연구에서는 ion-counter를 이용하여 진공 중 입자

[†]E-mail : khahn@hanyang.ac.kr

의 농도 변화를 실시간으로 측정 할 수 있는 입자 모니터링 시스템을 구축하였다. 본 연구에서 사용한 ion-counter를 이용한 방법은 반도체 공정과 같이 일정한 크기 분포와 일정한 하전 분포를 지닌 입자를 높은 상관도로 측정 할 수 있다. 하지만 자연적으로 생성되는 입자의 하전 정도는 매우 낮은 수준이기 때문에 특정 농도 이상의 입자가 존재할 경우에만 측정이 가능한 단점이 있다.

본 연구에서는 개발한 ISPM system과 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer) system의 결과를 비교함으로써 개발된 ISPM system의 타당성을 검증하였다. 또한, 반응노를 사용함으로써 실제 반도체 공정과 비슷한 환경에서 ISPM system의 성능을 평가하였으며, 동시에 soft x-ray등을 활용하여 ISPM system 성능의 향상을 시도하였다.

2. 본 론

2.1. Ion-counter

전하를 띤 입자를 측정하는 방법에는 입자가 가지고 있는 전자나 이온에 의한 전류를 측정하는 방법과 전하를 띤 입자의 전기장 내의 거동으로 입자를 측정하는 방법 등이 있다. 전자는 구조 및 조작이 간단한 장점이 있지만, 일정 농도 이상의 입자만 측정 가능하다. 후자의 방법은 입자의 거동을 살피기 위한 광학장치들로 인해 구조와 조작이 불편한 단점이 있지만, 낮은 농도의 입자를 측정할 수 있는 특성을 갖고 있다.

Ion-counter는 입자의 전기적 성질을 이용하여 입자의 경로를 바꾸고, Faraday cup과 같이 입자가 갖고 있는 정전기적 특성을 이용하여 입자의 개수를 측정하는 장치이다. 그러나, ion-counter는 Faraday-cup과는 달리 전하를 갖고 있는 입자 중 한 극성의 입자만 측정하는 특징이 있다. 본 실험에서는 Fig. 1과 같이 Gerdien 형태의 ion-counter를 사용하였다. 두 개의 원형 관과 한 개의 원형 봉으로 구성되어 있으며, 원형 봉과 내부원

통 사이로 에어로졸이 흐르게 되고, 여기에 전기장을 걸어줌으로써 전하를 띤 입자를 포집 하게 된다. 외부 원통과 내부 원통은 Teflon으로 절연되어 있으며, BNC로 연결되어 전류계에서 전류를 측정하게 된다. 전류계는 Keithly사의 6517A(측정 범위는 3 fA~20 mA)와 pre-Amp가 연결되어 외부 노이즈를 제거해줄 수 있는 인터랩사의 전류계(측정 범위는 1 fA~140 fA)를 사용하였다. Faraday cup과 같이 전체 유로가 방해 받지 않고, 내부의 원형 봉에 의한 유로의 변경만 있기 때문에 압력 손실이 적으며 진공에서 사용이 가능할 것으로 판단할 수 있다.

Ion-counter는 Fig. 1과 같이 전압을 인가하여 입자를 검출하는 위치에 따라서 in-type, out-type 두 가지 타입으로 구분할 수 있다. Out-type은 전극봉에 전압을 인가시킴으로써, 전극봉에 인가된 극성과 다른 극성을 가진 입자들은 전극봉으로 향하고 같은 극성을 가진 입자들은 내부원통에서 미세전류계를 통하여 검출되는 방식이다. 이때 전원공급장치와 미세전류계의 접지를 외부원통으로 일치시킴으로써 외부노이즈를 최소화 하였다. In-type은 전극봉이 아닌 내부원통에 전압을 인가하여 전극봉으로 입자를 검출하는 방식이다.

Fig. 2는 이온카운터에 인가되는 전압과 입자의 극성에 따른 In-type과 out-type의 특성을 테스트한 결과이다. In-type, out-type ion-counter에 -40 V, +40 V의 전압을 인가하였고, DMA(Differential Mobility Analyzer) [4]에서 발생시킨 60 nm 크기의 (+)극성과 (-)극성을 갖는 입자를 사용하여 실험을 수행하였다. 동시에 soft x-ray를 on/off 함으로써 이온에 대한 ISPM system의 영향을 관찰하였으며, ISPM system의 압력은 8 Torr로 유지되었다. Ion-counter에 인가된 전압과 같은 극성의 입자는 측정할 수 있었지만 그 이외의 경우에는 입자를 측정할 수 없었다. 또한 ion-counter에 전압이 인가되지 않았을 경우에는 어떠한 입자도 검출할 수 없었다.

Soft x-ray에 의하여 발생된 이온의 영향은 in-type과 out-type에서 서로 다른 경향성을 보였다. In-type의 경우에는 soft x-ray on/off시 급격한 신호의 증감이 있었지만 바로 원래의 신호로 되돌아 왔다. 하지만 out-type의 경우 전극봉에 (-)전압을 가했을 경우에는 soft x-ray 작동에 의해 신호가 (-)방향으로 내려가서 안정화 되었고, 전극봉에 (+)전압을 인가하였을 경우에는 신호가 (+)방향으로 이동하여 안정화 되었다. 즉, out-type의 경우에는 이온을 검출할 수 있지만 in-type의 경우에는 이온을 검출할 수 없음을 알 수 있다. 이는 in-type과 out-type에서 포집되는 이온의 극성이 다르기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다.

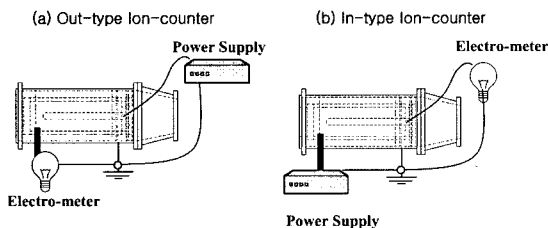


Fig. 1. Schematic diagram of (a) Out-type Ion-counter and (b) In-type Ion-counter.

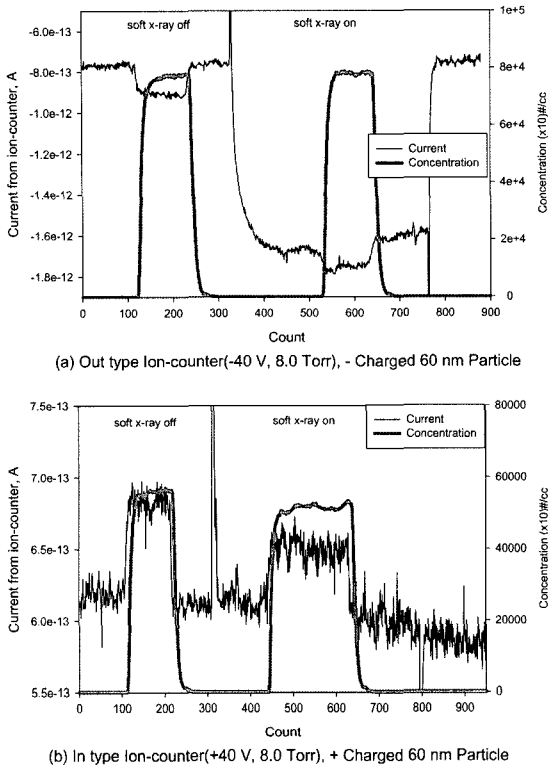


Fig. 2. Response of (a) Out-type Ion-counter and (b) In-type Ion-counter.

2.2. 실험적 평가

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 ion-counter와 DC전원 공급기 그리고 미세전류측정기를 결합한 ISPM system을 구축하였다. ion-counter는 ion등의 영향을 제거하기 위하여 In-type ion-counter를 사용하였다. 반응노를 사용하여 반도체에 주로 사용되는 SiO₂입자를 생성하였다. 50°C로 유지되고 있는 기화기를 사용하여 TEOS (Tetraethyl-Orthosilicate) 증기를 발생시켜 반응노(800 °C)에 주입하였다. 이때 운반가스로는 질소가스를 사용

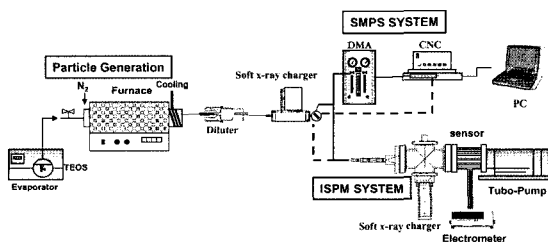


Fig. 3. Experimental setup of schematic diagram.

하였다. 이때 생성된 입자의 농도를 조절하기 위하여 희석장치를 사용하였으며, 볼츠만평형하전분포를 형성하기 위하여 soft x-ray charger를 사용하였다[5]. 대기압 상태에서 SMPS system으로 측정하였으며 동시에 진공상태에서 ISPM system으로 측정하여 이를 비교하였다.

2.2.1. ISPM System의 실험 결과

대기압 상태의 입자를 진공 상태인 ISPM System으로 유입하기 위하여 다단 오리피스 형태의 pressure reducer(감압기)를 사용하였다. 감압기에서는 압력 차에 따른 급격한 팽창 때문에 입자의 손실이 발생하게 된다. 이 입자의 손실은 ISPM system의 성능을 평가하는데 영향을 미치기 때문에 감압기에서의 transmission efficiency(전달효율)를 실험으로 구하였다. 특정 전압을 인가한 DMA에서 나온 1가의 하전을 지닌 입자를 대기압 상태에서는 CNC(Condensation Nuclei Counter; TSI-3022)로, 진공에서는 ion-counter에서 측정함으로써 입자의 크기와 압력에 따른 전달효율을 구하였다. Fig. 4는 1.6 torr에서 입자 크기에 대한 전달효율을 보여주고 있다. 크기가 큰 입자가 작은 입자보다 감압기에 의한 손실이 많음을 확인할 수 있다.

SMPS는 입자의 분포를 빠르게 측정하는 시스템으로 DMA와 CNC로 구성되어 있다. 반응노에서 생성된 입자를 soft x-ray charger를 통과시켜 Boltzmann 평형 전하 분포를 형성하게 하였다. 우선 SMPS system으로 입자의 분포를 구하였으며, CNC와 ISPM system에서 동시에 입자를 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 5와 같다. CNC에서 측정된 농도는 점으로 표시하였으며, ISPM system에서 측정된 미세 전류 변화는 실선으로 표시하였다. 입자의 농도가 변함에 따라 ISPM system의 전류

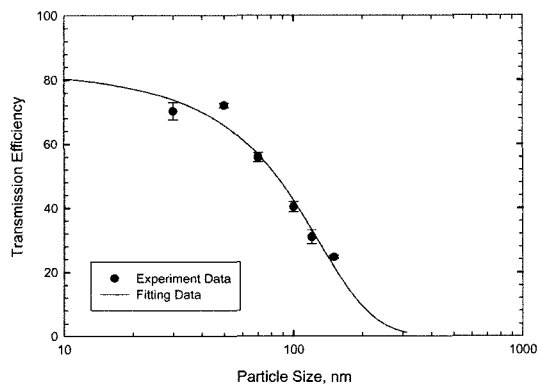


Fig. 4. Transmission efficiency of pressure reducer under 1.6 torr.

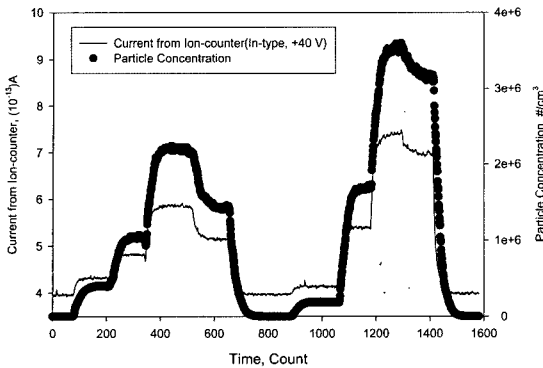


Fig. 5. The comparison between result of ISPM system under 1.6 Torr and counts of CPC3022 under 760 Torr.

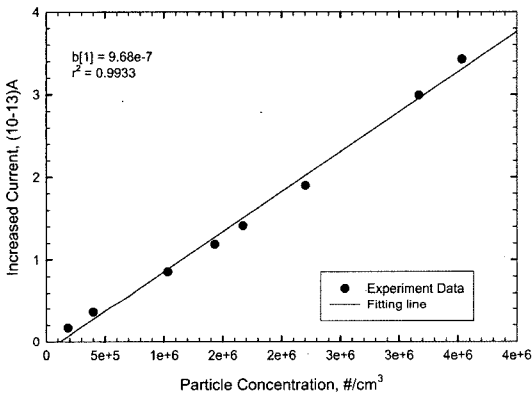


Fig. 6. The linearity between ISPM and CPC3022.

량도 같은 트렌드를 가지면서 변하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 입자의 농도 변화에 따른 ISPM system에서의 전류의 변화에 관한 상관 그래프이다. 상관계수는 0.98 이상으로 매우 좋은 상관성을 보여 주고 있다. 이 그래프에서 기울기는 ISPM에서 측정되는 입자의 단위 농도가 갖고 있는 전하량이다.

SMPS에서는 입자의 전체 농도에 대한, 해당하는 입자 크기에 따른 농도의 비율에 대한 데이터(Percent Concentration)가 산출된다. 따라서 각각의 입자의 크기에 따른 실제 ISPM에서 측정 될 수 있는 하전 비율을 다음과 같이 계산할 수 있다.

Total Charge Ratio from SMPS system (%)

$$= \sum_{D_p} \left(\begin{matrix} \text{Percent Concentration} \times \text{charge ratio} \\ \times \text{transmission efficiency} \end{matrix} \right)$$

여기서 측정 된 입자는 soft x-ray charger에 의하여

Table 1. Evaluation of charge ratio from SMPS and ISPM

Pressure (Torr)	D _{g,mean} (σ _g) (nm)	Evaluation of charge ratio	
		SMPS	ISPM
0.1	51.32(1.49)	4.46	4.48
	30.19(1.35)	3.8	3.66
1.6	38.89(1.43)	10.59	10.68
	46.31(1.49)	11.54	11.34

볼츠만 평형 전하 분포를 형성하기 때문에, 입자 크기에 따른 전하비(charge ratio)를 계산할 수 있다.

또한, 다음과 같은 계산으로 ISPM에서 측정된 평균 하전 비율을 구할 수 있다.

Total charge Ratio from Ion-Counter (%)

$$= \frac{\text{Increased SLOPE}[Agcc\#]}{\text{Flow rate}[cc/s] \times 1.6E-19[C]} \times 100$$

Table 1에서 0.1 Torr와 1.6 Torr에서 SMPS system과 ISPM system에서 산출된 평균하전비율을 비교하였다. 감압기에서의 압력 차이에 따른 입자의 손실이 커지기 때문에 0.1 Torr 에서의 평균하전비율이 1.6 Torr의 경우보다 작은 것을 확인할 수 있다. 또한, 입자의 크기와 분포에 상관 없이 두 결과가 5% 범위 이내에서 일치함을 확인하였다.

2.2.2. ISPM system의 적용

대기압에서 증화기에 의해 강제로 하전을 띤 입자가 아닌, 생성된 다분산입자를 어떠한 하전기도 거치지 않고 바로 ISPM system으로 측정하였다. 입자 생성조건을 고정시킨 상태에서 일정한 크기와 일정한 분포를 가진 다분산 입자의 농도를 변화시켜 가며 ISPM system과 CNC에서 동시에 입자를 측정하였다. 본 시스템에서 생성된 입자의 평균하전비율은 0.5~2.0 %로 매우 낮은 수준이었다. 따라서 입자의 개수가 충분히 많아야 ISPM system을 바로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

압력과 입자 생성조건이 다른 경우에 입자농도에 대한 이온측정 반응도도 직선적으로 나올 것이다. 이를 증명하기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다.

Fig. 7은 진공 중 ion-counter 전단에서 soft x-ray를 on/off 하였을 경우, 압력과 입자 분포에 따른 ISPM system에서 측정된 기울기이다. Soft x-ray는 1 nm 정도의 파장대이며, 이는 주위의 기체나 물체를 이온화 시켜 많은 양의 이온 영역을 만들 수 있다. 0.1 torr의 경우에는 soft x-ray의 영향이 거의 없었으나, 8.0 torr의

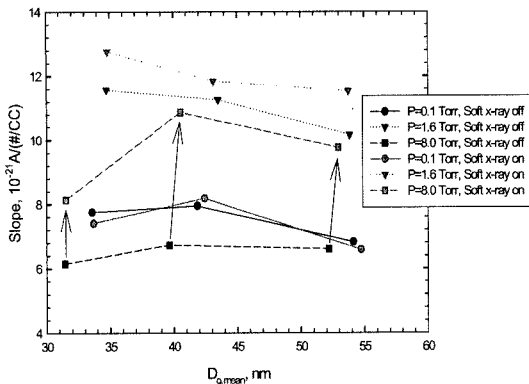


Fig. 7. Effect of ISPM system by soft x-ray.

경우에는 soft x-ray에 의해 하전된 입자의 영향으로 인해 반응이 높게 검출되는 것을 확인할 수 있었다. ISPM 시스템이 8.0 torr 이상인 조건에서는 soft x-ray와 같이 사용한다면, 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 진공 중 ion-counter를 사용하여 입자의 양을 계측하는 새로운 입자 모니터링 시스템을 구축하였다. SMPS system과 본 연구에서 개발한 ISPM system을 비교함으로써 타당성을 검증하였으며, 20~300 nm의 입자를 0.1~8 torr의 조건에서 실험한 결과 일정한 하전분포를 지닌 입자의 경우, 상관도가 0.98 이상으로 좋은 결과를 보였다. 본 연구에서 개발한 실

시간 입자 모니터링 시스템은 보다 좋은 반도체 생산 환경을 제공할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 공통핵심개발사업의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Peter G. Borden *et al.*, "Benefits of real-time, in-situ particle monitoring production medium current implantation," IEEE Transactions on semiconductor manufacturing. Vol. 2, No.4, 1989.
2. Paul J. Ziemann, Peng Liu, Nagaraja P. Rao, David B. Kittelson and Peter H. McMurry., "Particle beam mass spectrometry of submicron particles charged to saturation in an electron beam," J. Aerosol Sci., Vol. 26, No. 5, pp. 745-756, 1995.
3. Kinney, P.D., Bae, G.N., Pui, D.Y.H., & Liu, B.Y.H., "Particle behavior in vacuum systems: Implications for in-situ particle monitoring in semiconductor processing equipment," Journal of the Institute of Environmental Sciences, 40-45, 1996.
4. 안강호, 김남호, 이종호, 배귀남, "Differential Mobility Analyzer(DMA)내의 입자운동 및 특성 분석," 대한기계학회논문집(B) 제 20권 6호, 2005~2013, 1996.
5. Manabu Shimada, Bangwoon Han, Kikuo Okuyama and Yoshio Otani., "Bipolar Charging of Aerosol Nanoparticles by a soft X-ray Photoionizer," Journal of Chemical Engineering of Japan. Vol. 35, 2002.