

ISPM 및 PBMS를 이용한 BPSG 및 PSG CVD 공정 중 발생하는 오염입자의 실시간 측정

나정길¹⁾ · 최재봉¹⁾ · 문지훈²⁾ · 임성규³⁾ · 박상현³⁾ · 이현정⁴⁾ · 채승기⁴⁾
윤주영⁵⁾ · 강상우⁵⁾ · 김태성^{1,2)*}

¹⁾성균관대학교 기계공학부, ²⁾성균관대학교 성균나노과학기술원, ³⁾나노융합센터 확산박막팀
⁴⁾삼성전자 생산기술팀, ⁵⁾한국표준과학연구원 진공센터

(2010년 8월 26일 투고; 2010년 9월 24일 수정; 2010년 9월 26일 게재확정)

Real-time Contaminant Particle Monitoring for Chemical Vapor Deposition of Borophosphosilicate and Phosphosilicate Glass Film by using In-situ Particle Monitor and Particle Beam Mass Spectrometer

Jeong Gil Na¹⁾ · Jae Boong Choi¹⁾ · Ji Hoon Moon²⁾ · Sung Kyu Lim³⁾ · Sang Hyun Park³⁾
Hun Jung Yi⁴⁾ · Seung Ki Chae⁴⁾ · Ju Young Yun⁵⁾ · Sang Woo Kang⁵⁾ · Tae Sung Kim^{1,2)*}

¹⁾*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University*

²⁾*Sungkyunkwan Advanced Institute of Nano Technology, Sungkyunkwan University*

³⁾*National Nanofab Center*

⁴⁾*Manufacturing Technology Team, Semiconductor Business, Samsung Electronics*

⁵⁾*Vacuum Center, Korea Research Institute of Standards and Science*

(Received 26 August 2010; received in revised form 24 September 2010; accepted 26 September 2010)

Abstract

In this study, we investigated the particle formation during the deposition of borophosphosilicate glass (BPSG) and phosphosilicate glass (PSG) films in thermal chemical vapor deposition reactor using in-situ particle monitor (ISPM) and particle beam mass spectrometer (PBMS) which installed in the reactor exhaust line. The particle current and number count are monitored at set-up, stabilize, deposition, purge and pumping process step in real-time. The particle number distribution at stabilize step was measured using PBMS and compared with SEM image data. The PBMS and SEM analysis data shows the 110 nm and 80 nm of mode diameter for BPSG and PSG process, respectively.

Keywords : PBMS (particle beam mass spectrometer), ISPM (in-situ particle monitor), BPSG (borophosphosilicate glass), PSG (phosphosilicate glass)

* Corresponding author.

Tel : +82-31-290-7466, Email : tkim@skku.edu

1. 서 론

현재 반도체 공정에서 입자를 계측하고 있는 particles per wafer pass(PWP) 방법은 공정 내 테스트 웨이퍼를 통과시킨 후, 테스트 웨이퍼 위에 침착된 입자들을 표면 스캐너(surface scanner)를 통해 분석하여 오염도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 실질적인 반도체 수율을 결정하기 때문에 널리 쓰이고 있으며, 표준 측정방법으로 사용되고 있다. 그러나 실시간으로 입자의 양을 측정할 수 없기 때문에 오염원 발생에 대한 즉각적인 대처와 조치가 불가능하다는 치명적인 문제가 있다. 또한, 고가의 장비 가격 및 대량의 웨이퍼 사용으로 인해 비용이 증가하게 된다는 어려움을 가지고 있다(Takahashi and Daugherty, 1996). 이러한 단점을 극복하기 위해 그동안 실시간으로 입자를 측정할 수 있는 장비에 대한 활발한 연구가 진행되었는데 대표적인 장비로 *In-situ* particle monitor(ISPM)과 particle beam mass spectrometer(PBMS)를 들 수 있다.

ISPM은 입자의 산란 및 흡수를 이용한 광학 입자 센서로서 실시간 측정이 가능하고 장비크기가 작고 가격이 비교적 저렴하며, 총 소요비용을 상당히 줄일 수 있다는 장점이 있어서 PWP 방식과 연계하여 활발한 연구가 진행된 바 있다(Bowling *et al.*, 1989; Dance *et al.*, 1992; Peters *et al.*, 1992).

1990년대 초반 미국 미네소타대학교의 McMurry 그룹에 의해 개발된 PBMS는 약 100 mTorr 저압환경에서 5~500 nm의 입자크기를 약 30~60 초의 빠른 시간으로 측정할 수 있다(Ziemann *et al.*, 1995). PBMS는 그 동안 thermal(McMurry *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2002, Nijhawan *et al.*, 2003) 및 plasma enhanced (Rao *et al.*, 1998; Shen *et al.*, 2003) chemical vapor deposition(CVD) 공정 중 발생하는 SiO₂ 및 polysilicon 입자에 대한 실험적·수치 해석적 연구를 통해 그 효율성을 입증한 바 있다. 따라서 ISPM 및 PBMS는 오염입자 발생에 대한 즉각적인 대처와 조치가 가능하며, 측정 효율이 높으며 부가적인 추가 비용이 발생하지 않기 때문에 실시간 모니터링 장비에 관한 적절한 대안이 없는 현재의 반도체 공정에 충분히 적용될 가능성이 있다.

이러한 장비들을 활용하여 실제 반도체 제조공정에서의 활용가능성에 대한 일부 연구가 진행되었는

데 대표적으로 Rao *et al.*,(1998)은 반응기의 배기라인에 연결된 PBMS를 이용하여 Lam Research 사의 low pressure CVD(model: DSM™ 9800) 장비에 대하여 borophosphosilicate glass(BPSG) 박막 증착공정 동안 발생하는 오염입자에 관한 모니터링을 수행한 바 있다. 특히, 공정압력 및 전구체로 쓰인 Tetraethoxysilane(TEOS)의 유량에 따른 입자발생 특성에 대해 규명하였다.

한편, BPSG 박막은 그 동안 층간 절연막 재료로 널리 사용된 PSG의 고온공정에 따른 결정학적 결함 및 오염물질 확산 등의 문제(Armstrong and Tolliver, 1974; Hara and Suzuki, 1984)를 해결하기 위해 실리콘 카에 B와 P를 함께 넣어준 것으로 PSG 보다 더 낮은 온도에서 공정이 가능하다는 장점이 있는 것으로 알려져 있다(Bowling and Larrabee, 1985). 이러한 절연체 박막은 기본적으로 수 십 nm 이하의 두께와 고순도, 고품질을 요구하기 때문에 박막증착 공정에 있어서 오염입자 측정 및 분석은 매우 중요하다 할 수 있다. 본 연구에서는 BPSG 및 PSG 박막 증착을 위해 실제 양산라인에서 활용되고 있는 CVD 장비에 대하여 ISPM 및 PBMS를 동시에 설치하여 발생 입자를 모니터링하고 그 결과를 비교·평가 하였다.

2. 실험방법

본 실험에서는 BPSG 및 PSG CVD 공정 중 발생하는 입자를 측정하기 위해 ISPM과 PBMS를 Figure 1과 같이 설치하였다. CVD 장비는 나노중합펌센터에서 실제 양산장비로 활용되고 있는 APPLIED MATERIALS 사의 Precision 5000 모델을 활용하였다. ISPM은 광 소멸 방식의 INFICON사의 9020 모델을 사용하였으며 약 260 nm 이상의 입자를 측정할 수 있다. PBMS에서는 공기역학렌즈를 통해 입자를 중심축으로 포커싱 하고(Liu *et al.*, 1995), 전자총을 통해 포화상태로 하전 시키고(Ziemann *et al.*, 1995), 편향판을 통해 입자를 90° 굴절시켜 패러데이 컵에서 입자전류를 측정한다. 본 실험에서는 편향판에 1000 V를 가전하여 패러데이 컵의 전류 변화량을 측정하는 모니터링 방식(mode)을 사용하여 500 nm 이하의 입자의 크기를 측정하였고, 그 이상의 크기는 고려하지 않았다. 한편, 입자가 안정적

Table. 1 Process steps of BPSG CVD.

| step number | 1. set-up | 2. stabilize | 3. deposition | 4. purge | 5. pumping |
|-------------|---------------------|---|---|---------------------|---------------------------------|
| P(Torr) | 0.01 | 200 | 200 | 200 | 0.01 |
| T(°C) | 442 | 444 | 440 | 440 | 430 |
| Gas name | O ₂ , He | O ₂ , O ₃ , He, TEOS, TEPO, TEB | O ₂ , O ₃ , He, TEOS, TEPO, TEB | O ₃ , He | O ₂ , O ₃ |

으로 발생하는 증착 단계에서는 시간에 따라 편향 전압을 변화시키는 스캐닝 방식(scanning mode)를 사용하여 입자 크기 분포를 측정하였다.

PBMS와 ISPM을 배기구의 배기라인에 순서대로 설치하고 발생입자를 동시에 모니터링 하였다. 소스는 TEB(Triethylborate), TEPO(Triethylphosphate) 및 TEOS(Tetraethoxysilane)를 사용하였고, 운반가스는 He, 반응가스로 O₂ 및 O₃를 사용하였다. 증착온도와 압력은 양산을 위해 쓰이는 전형적인 조건으로 각각 440°C, 200 Torr 로 설정하였다. 공정순서는 조건 확보(set-up), 안정화(stabilize), 증착(deposition), 배기(purge) 및 펌핑(pumping) 순으로 크게 5단계로 나눌 수 있으며, Table 1에 정리하였다. 한편, PSG 공정은 TEB 소스만 배제되었고 그 외 공정조건 및 순서는 동일하다.

3. 결과 및 고찰

Figure 2는 BPSG 공정 중 Table 1의 공정순서 1-5 단계 중 (a) ISPM과 (b) PBMS 모니터링 방식을 이용하여 발생되는 입자를 측정한 결과이다. 공정은 2 회를 수행하였으며, 약 180 초 까지는 1-2단계, 약 380 초까지는 3단계 그리고 약 500 초까지는 4-5 단계를 나타낸다. 측정결과 ISPM과 PBMS에서 1-5 단계에 따라 유사한 패턴의 입자발생을 보였다. 그러나 1-2단계와 4-5단계의 100-170 초, 490 초 구간에서는 PBMS의 측정결과에서 나타나지 않는 입자가 ISPM에서 일정한 패턴을 보이며 측정되었으며, 3단계의 전 구간에서는 PBMS가 기준 전류 수치(noise level)인 1.0×10^{-14} A 보다 높은 1.1×10^{-11} A 수준의 균일한 전류를 나타내며 ISPM보다 안정적으로 측정되었다. 이는 ISPM과 PBMS의 측정범위를 벗어나는

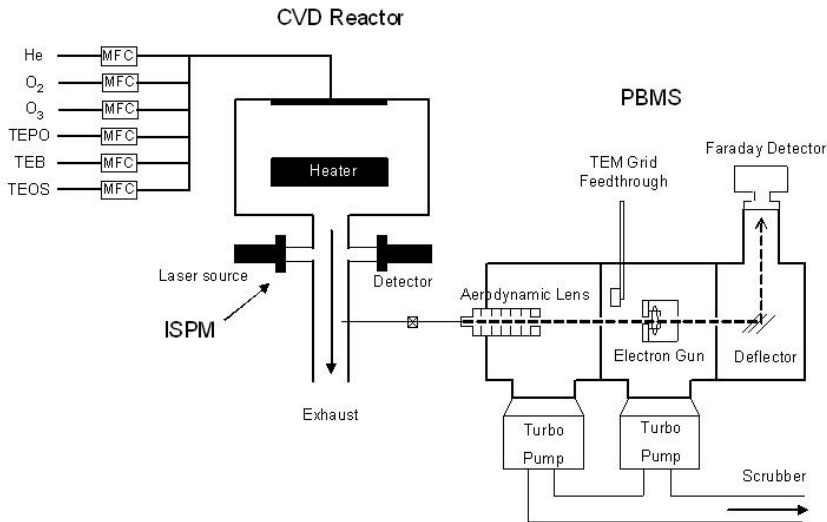


Figure 1. Schematic diagram of the experimental set-up for measuring BPSG and PSG particles with the PBMS and ISPM.

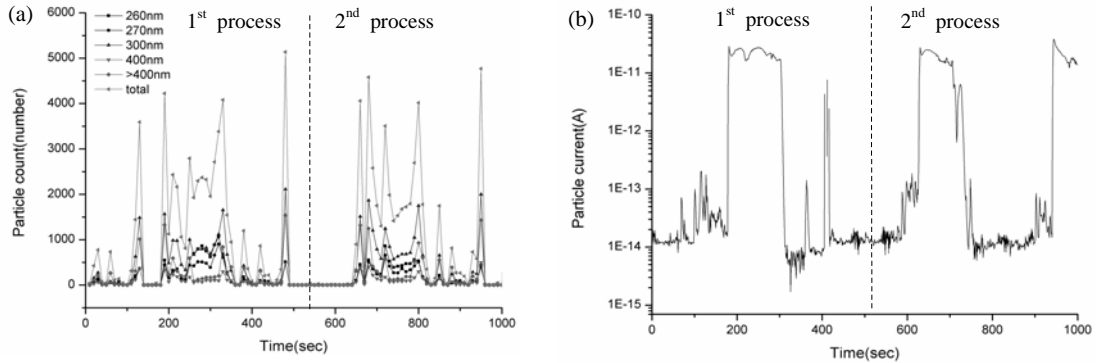


Figure 2. ISPM (a) and PBMS (b) monitoring for measuring BPSG particles.

260 nm 이하, 500 nm 이상의 입자를 각각의 장비에서 측정되었기 때문에 사료된다.

Figure 3은 증착공정 (3단계)에서의 PBMS 스캐닝 방식을 이용해 입자분포를 측정된 결과이다. (a)는 편향 전압에 따른 입자 전류의 측정 결과이며, 이를 입자 크기 분포로 환산한(Ziemann et al., 1995) 결과를 (b)에 나타내었다. 측정결과 최대입자크기 및 농도가 약 110 nm, $1.2 \times 10^4 \text{ #/cm}^3$ 로 측정되었다. 측정 신뢰성을 검증하기 위해 증착공정 중 PBMS 내 장착된 TEM grid를 이용하여 입자를 포집하였다. 이를 TEM으로 분석한 결과 Figure 4와 같이 최빈입경인 약 110 nm 입자의 존재를 확인하였으며, 추후 연구에서 이미지 분석을 통하여 입경분포 측정 결과와 비교 한다면 더욱 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 입자성분을 분석하기 위해 포집된 입자에 대하여 FEI 사의 energy

dispersive spectroscopy(EDS, model: SIRION)로 분석한 결과를 Table 2에 정리하였다. Boron(원자번호 5)의 경우 결합 에너지가 약 1 keV로서 EDS 측정한계로 인하여 분석이 되지 않았지만, 분석된 입자는 주로 SiO₂에 boron과 phosphorus가 도핑된 입자일 것으로 추측된다. boron을 측정하기 위해서는 FT-IR spectroscopy나 inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy(AES) 등을 이용한 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Figure 5는 PSG 공정에서 공정순서 1-5 단계 중 (a) ISPM과 (b) PBMS 모니터링 방식을 이용하여 발생하는 입자를 측정된 결과이다. 공정은 3회를 수행하였으며, PBMS에서는 3번째 공정에서 측정하였다. 약 1600 초까지는 1-2회 공정, 약 1600 초 이후는 3회 공정을 나타낸다. 또한, 1600 초부터 1700 초까지는 1, 2단계, 1900 초까지는 3단계, 2000 초까지

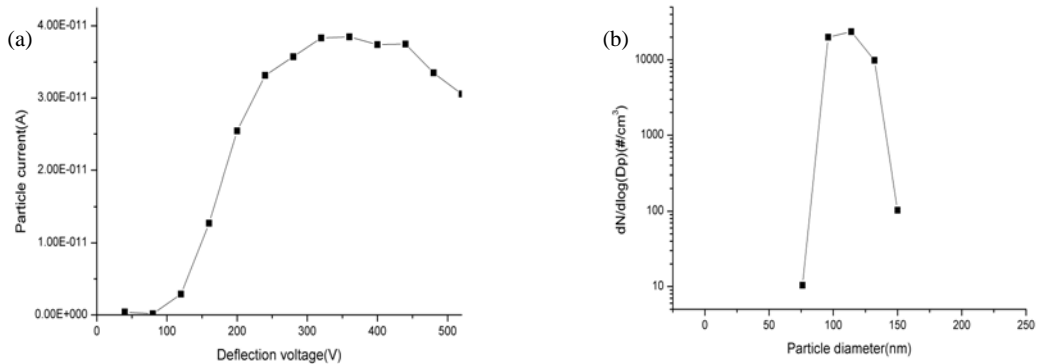


Figure 3. (a) Particle current measurement as a function of deflection voltage by the PBMS, (b) particle size distribution by data inversion of Fig. 3 (a) on BPSG deposition process.

Table 2. EDS analysis of BPSG particles sampled by PBMS TEM grid.

| Elements | Weight % | Atomic % |
|----------|----------|----------|
| B | 0.00 | 0.00 |
| O | 58.50 | 71.67 |
| Si | 31.85 | 22.23 |
| P | 9.64 | 6.10 |
| Total | 100.00 | 100.00 |

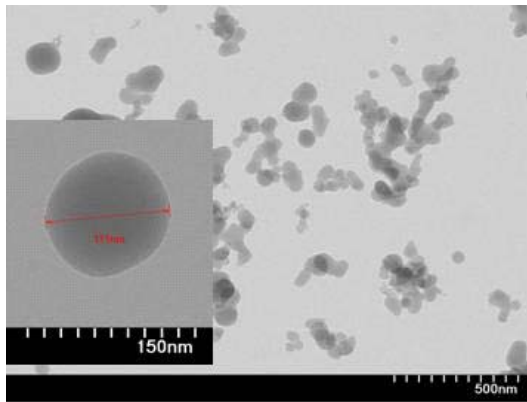


Figure 4. TEM micrographs of BPSG particles sampled by TEM grid in PBMS.

는 4단계를 나타낸다. 측정결과 3번째 공정의 1, 2단계에서 ISPM에서는 입자가 측정되지 않았으나, PBMS는 약 1×10^{-13} A 대의 입자전류가 측정되었다. 이는 PBMS의 경우 ISPM에서 측정하지 못하는 260

nm 이하의 입자들이 측정된 것으로 판단된다. 또한, BPSG 공정에서와 마찬가지로 ISPM에서는 입자발생이 안정적인 증착공정 (3단계)에서 시간에 따라 변동이 심하게 나타났으나, PBMS에서는 균일한 입자전류를 나타냈다.

Figure 6은 증착공정 (3단계)에서의 PBMS 스캐닝 방식을 통해 입자분포를 측정한 결과이다. (a)는 편향전압에 따른 입자전류 측정결과이며, (b)는 이를 입자분포로 환산한 결과이다. 측정결과 입자크기 및 농도는 약 80 nm, 7×10^4 #/cm로 측정되었다. 주목할 만한 것은 BPSG 공정은 PSG에 대비하여 입자크기는 증가하였고 농도는 감소하였는데, 이는 TEB 공급에 의해 PSG 공정보다 반응기체의 농도가 증가하여 화학반응이 다양해지고, 기체상들 간의 평균자유 행정이 짧아져서 충돌빈도가 증가하여 이를 통해 입자의 응축성장이 보다 활발하게 일어났기 때문으로 판단된다.

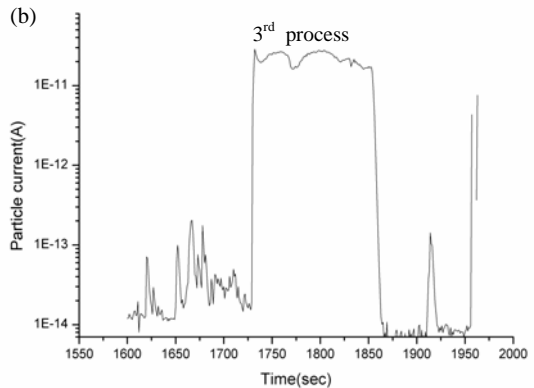
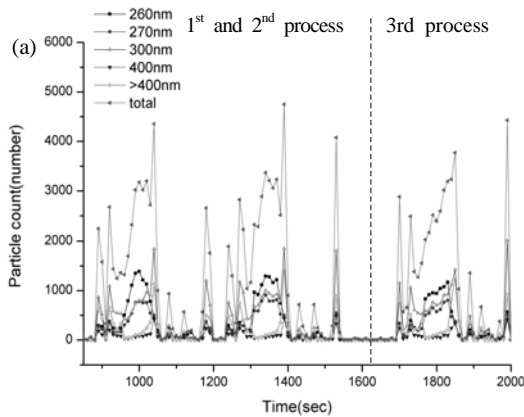


Figure 5. ISPM (a) and PBMS (b) monitoring for measuring PSG particles.

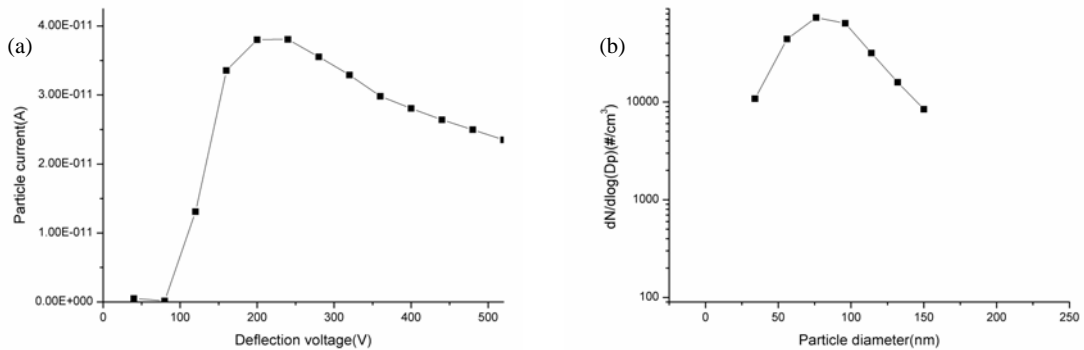


Figure 6. (a) Particle current measurement as a function of deflection voltage by the PBMS, (b) particle size distribution by data inversion of Figure 6 (a).

4. 결 론

본 논문에서는 실시간 나노입자 측정장비인 ISPM 및 PBMS를 이용하여 BPSG 및 PSG 박막 증착을 위한 CVD 공정 중 발생하는 오염입자 발생특성에 대해 비교·평가 하였다. 반응기의 배기라인에 ISPM 과 PBMS를 설치하고 500 nm 이하의 입자에 대해 조건 확보, 안정화, 증착, 배기 및 펌핑 단계에 따라 모니터링 한 결과 각 장비의 측정 범위에 의하여 약간의 차이만을 보이며 비슷한 경향의 입자발생분포를 나타내었다. 입자발생이 안정적으로 일어나는 증착 공정 중 PBMS를 통하여 입자분포를 측정한 결과 최빈입경이 BPSG의 경우 약 110 nm, PSG의 경우 약 80 nm로 나타났다. 이를 통해 BPSG 증착에 첨가된 TEB에 의한 화학종들의 다양한 반응에 의해 PSG의 경우보다 입자의 성장이 활발히 일어남을 확인하였다. 두 장비의 측정성능 평가에 있어서 ISPM은 입자 발생에 따라 변동이 심하게 나타났으나, PBMS의 경우 안정된 입자전류량을 나타내었고, 이는 앞서 기술한 바와 같이 각 장비의 측정 범위의 차이에 의하여 발생한 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 반도체 제조 공정 중 발생하는 오염 입자를 실시간으로 측정하는 기술에 대한 가능성을 확보하였으며, PBMS와 ISPM의 장·단점을 상호 보완하여 응용 한다면 반도체 제조 공정의 실시간 측정 기술로 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 기초기술연구회의 나노물질 안전성 평가기술 개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Armstrong, W. E. and Tolliver, D. L. (1974). A Scanning Electron Microscope Investigation of Glass Flow in MOS Integrated Circuit Fabrication, *J. Electrochem. Soc.*, 121, 307-310.
- Bowing, R. A. and Larrabee, G. B. (1985). Deposition and reflow of phosphosilicate glass, *J. Electrochem. Soc.*, 132, 141-145.
- Bowling, R. A., Larrabee, G. B., and Fisher, W. G. (1989). Status and Needs of In-Situ Real-time Process Particle Detection, *J. Environ. Sci.*, 32, 22-27.
- Dance, D. L., Burghard, R. W., and Markle, R. J. (1992). Reducing Process Equipment Cost of Ownership Through In Situ Contamination Prevention and Reduction, *Microcontamination*, 10, 21-27.
- Hara, T., Suzuki, H., and Furukawa, M. (1984). Reflow

- of PSG Layers by Halogen Lamp Short Duration Heating Technique, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 23, 452-454.
- Kim, T., Suh, S. M., Girshick, S. L., Zachariah, M. R., McMurry, P. H., Rassel, R. M., Shen, Z., and Campbell, S. A. (2002). Particle formation during low-pressure chemical vapor deposition from silane and oxygen; Measurement, modeling and film properties, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 20, 413-423.
- Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B., and McMurry, P. H. (1995). Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: II. Experimental Evaluation of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions, *Aerosol Sci. Technol.*, 22, 314-324.
- Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B., and McMurry, P. H. (1995). Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions, *Aerosol Sci. Technol.*, 22, 293-313.
- McMurry, P. H., Nijhawan, S., Rao, N., Ziemann, P., Kittelson, D. B., and Campbell, S. (1996). Particle-Beam Mass-Spectrometer Measurements of Particle Formation During Low-Pressure Chemical-Vapor-Deposition of Polysilicon and SiO₂-Films, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 14, 582-587.
- Nijhawan, S., McMurry, P. H., Swihart, M. T., Suh, S. M., Girshick, S. L., Campbell, S. A., and Brockmann, J. E. (2003). An experimental and numerical study of particle nucleation and growth during low-pressure thermal decomposition of silane, *J. Aerosol Sci.*, 34, 691-711.
- Peters, L. (1992). 20 good reasons to use in situ particle monitors, *Semicond. Int.*, 15, 52-57.
- Rao, N. P., Wu, Z., Nijhawan, S., Ziemann, P., Campbell, S., Kittelson, D. B., and McMurry, P. (1998). Investigation of particle formation during the plasma enhanced chemical vapor deposition of amorphous silicon, oxide, and nitride films, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 16, 483-489.
- Shen, Z., Kim, T., Kortshagen, U., and McMurry, P. H., Campbell, S. A. (2003). The Formation of Highly Uniform Silicon Nanoparticles in High Density Silane Plasmas, *J. Appl. Phys.*, 94, 2277-2283.
- Takahashi, K. M. and Daugherty, J. E. (1996). Current capabilities and limitations of in situ particle monitors in silicon processing equipment, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 14, 2983-2993.
- Ziemann, P. J., Liu, P., Rao, N. P., Kittelson, D. B., and McMurry, P. H. (1995). Particle beam mass spectrometry of submicron particles charged to saturation in an electron beam, *J. Aerosol. Sci.*, 26, 745-756.