

화학기상증착 진공공정의 실시간 진단연구

전기문^{a,b,*} · 신재수^b · 임성규^c · 박상현^c · 강병구^d · 윤진욱^e · 윤주영^a · 신용현^a · 강상우^{a,*}

^a한국표준과학연구원, 대전 305-340

^b대전대학교 신소재공학과, 대전 300-716

^c나노융합랩센터, 대전 305-806

^dNanotek, 서울 153-790

^eHCT, 이천 467-866

(2010년 10월 20일 받음, 2010년 12월 18일 수정, 2011년 1월 19일 확정)

본 연구에서는 새롭게 개발된 센서인 *in-situ* particle monitor (ISPM)와 기존센서의 기능을 업그레이드 한 센서인 self-plasma optical emission spectroscopy (SPOES)를 이용해 화학기상증착 진공공정을 진단하였다. 본 연구에서 사용된 증착공정 장비는 silane 가스를 이용한 silicon plasma enhanced chemical vapor deposition과 borophosphosilicate glass 증착 장비이다. 두 장비의 증착 또는 클리닝 조건에서의 배출되는 오염입자와 배기가스를 개발된 센서를 이용해 공정상태를 실시간으로 진단하는 것과 개발된 센서의 센싱 능력을 검증하고자 하는 목적으로 연구가 진행되었다. 개발된 센서는 장비 배기구 설치되었으며, 공정압력, 유량, 플라즈마 파워 등의 공정변수 변화에 따른 오염입자 크기 및 분포와 배기 부산물의 변화를 측정하고, 측정 결과의 상호 연관성을 분석하였다.

주제어 : 실시간 진단, 오염입자, 배기부산물, *In-situ* particle monitor, Selfplasma optical emission spectroscopy

I. 서 론

실시간 측정 진단 기술 개발은 CVD (chemical vapor deposition), etcher 등 주요 장비 개발 및 공정 최적화에 공동으로 필요한 기반 기술이며, 반도체 소사업체와 반도체용 장비 부품 업체는 디스플레이 태양전지 생산시스템까지 기술 파급 효과가 큰 원천기술이다.

특히 차세대 반도체 제조를 위한 첨단 진공 공정 step 수는 증가 추세에 있으며, 이와 더불어 공정 비용도 증가하고 있는 상황이다(약 48%인 진공공정 비율은 5년 내 5% 이상 증가 예상된다).

최근 공정이 더욱 미세화 되면서 진공 공정 및 계측 시스템 정밀도 향상은 효율 극대화로 연결되며 수율 향상에 직접적인 영향을 미치고 특히 32 nm급 이하의 나노 반도체 기술을 확보하기 위해서는 공정 미세화, 공정 난이도 향상 및 산포 증가에 따른 수율하락에 대비하고 허용오차를 보다 정밀하게 관리 하는 것이 필요해지고 있다.

기존에 사용하는 wafer to wafer 공정 관리보다 진일보

한 실시간 단위공정 관리 기술이 요구되고 있으며, 단순한 공정진단/제어가 아닌, 공정 중의 문제를 예지함으로써 문제를 원천적으로 차단할 수 있는 실시간 진공공정 원천기술의 개발이 더욱 요구되고 있는 실정이다. 이러한 이유로 실시간 측정 진단 기술을 개발하고 이를 공정제어에 적용하고자 하는 것이 기술 개발 흐름의 대세이다.

반도체 선폭이 >50 nm 수준으로 줄어들어 따라 제어해야 할 오염입자의 크기도 점차 작아지고 있다. 반도체 공정 중이나 반도체 공정 장비에서 발생하게 되는 입자는 반도체 생산 수율에 가장 큰 영향을 끼치는 원인으로 파악되고 있으며, 생산 수율을 저하시키는 원인 중 약 70%가 이와 관련된 것으로 알려져 있다 [1]. 반도체 제조공정 중에 발생하는 오염입자는 반도체 수율을 저하시켜 생산량을 감소시키는 원인으로 이슈화되고 있다.

대부분의 반도체 공정은 저압환경에서 이루어지며, 이 때 발생하는 입자를 제어하기 위해서는 저압환경에서 측정할 수 있는 측정시스템이 필요하다. 하지만 실시간으로 입자의 양을 측정할 수 없으며, 비용이 많이 든다는 단점이 있고

* [전자우편] swkang@kriss.re.kr

더욱이 측정주기를 짧게 하면 대량의 웨이퍼 사용으로 인해 비용이 증가하게 된다는 어려움을 가지고 있어 공정 중에 입자를 측정할 수 있는 대안기술이 필요한 실정이다.

반도체 칩의 생산수율을 향상시키기 위하여 생산 환경의 오염제어에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 현재 보편적으로 사용되는 입자 측정 방법은 공정 후 반도체 웨이퍼 표면상의 입자를 측정할 수 있는 light scattering 원리를 가진 surface scanner 방법이다. 반도체 제조공정 중 입자오염을 모니터링하기 위해서는 입자의 광학적 빛 산란 방식의 in-situ particle monitor (ISPM)이 더 유용하게 사용될 수 있으며 가격 경쟁력이 높다 [2,3].

반도체 및 디스플레이 제조회사들은 공정 진행의 각종 변수들을 실시간으로 모니터링하면서 제조 설비의 불량 발생 요인을 사전에 차단하기 위해 챔버 내로 유입되는 물질의 양을 측정할 수 있는 센서가 필요한데, 기존의 conventional OES (optical emission spectroscopy)는 공정 챔버에서 플라즈마 방전 시 발생하는 빛을 viewport를 통하여 측정 시 non-plasma 공정의 경우나 viewport의 오염 및 설치 문제 등으로 사용이 제한적이다 [4-6]. SPOES (self-plasma optical emission spectroscopy)는 공정 챔버의 배기가스를 이용한 self-plasma 방전을 통해 성분을 측정하는 센서로 설치, 분해, 이동이 용이한 장점을 가지고 있다. CVD, ALD, etcher 등의 공정에 적용되어 새로운 대안으로 급부상하고 있는 실정이다. 이를 이용해 fault detection, cleaning end point detection 등의 기능으로 반도체 및 디스플레이 제조 공정의 이상 상태 감지 및 공정 최적화에 사용될 수 있을 것으로 기대된다 [7-9].

본 연구에서는 새롭게 개발된 ISPM과 이렇게 센서의 기능을 업그레이드한 SPOES를 이용하여 공정을 진단하고 개발된 센서들의 효용성을 검증하고자 하였다. SPOES의 경우 기존 센서보다 챔버 임피던스 매칭을 개선하여 기존 전극 대비 약 3배 정도 효율을 개선하여 챔버 내 균일한 plasma 방전 및 열에 의한 연결 안정성 확보를 하였다. 두 종류의 센서를 활용하여 다양한 공정 조건에서의 입자 분포 변화를 실시간으로 모니터링한 결과와 챔버로부터 배출되는 배기 부산물을 모니터링한 결과를 비교 분석하여 상호 연관성을 찾고자 노력하였다.

II. 실험방법

본 실험에서는 두 가지 종류의 증착시스템을 사용하여 센서 능력을 검증하였다. 첫 번째 장비는 표준연 진공센터에서 보유하고 있는 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) 장비(Fig. 1(a))로 이 장비는 silane (SiH_4) 가스를 이용해 Si 증착이나 SiO_2 증착공정을 수행할 수 있다. 두 번째 장비는 나노종합팩센터 (NNFC)에서 보유하고 있는 BPSG (borophosphosilicate glass) 증착장비이다 (Fig. 1(b)). 이 장비는 CVD 공정을 이용해 BPSG를 증착하고 증착 후 챔버 클리닝 공정도 수행하기 때문에 다양한 공정 환경에서 센서를 검증할 수 있는 장점을 가지고 있다.

센서의 성능검증 및 공정진단을 위해 각 장비의 배기구에 ISPM과 SPOES를 설치하고 공정 변수에 따른 측정결과를 수집하였다. 설치된 모습은 Fig. 2와 Fig. 3에 확인할 수 있다. 두 센서 모두 배기구 라인에 설치되었으며 최대한 챔버 가까이 설치하였다.

두 센서는 서로 인접하게 위아래로 붙어 있다. ISPM의 경우 측정의 용이성 때문에 배관 중간에 삽입하는 형태로 개발되었으며, SPOES의 배관라인에 샘플추출포트를 제작

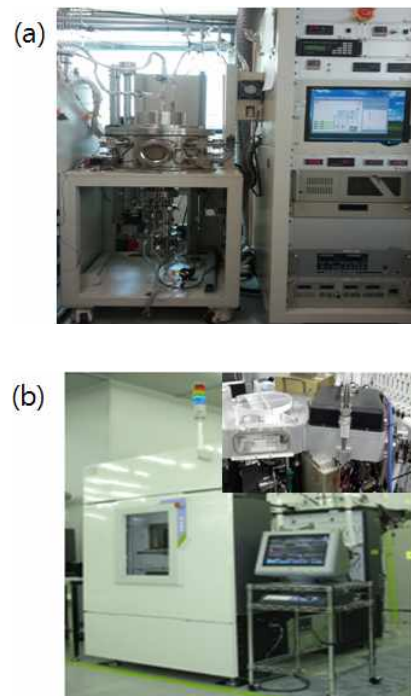


Figure 1. (a) The PECVD system in KRISS. (b) BPSG deposition system in national nanofab center (NNFC).

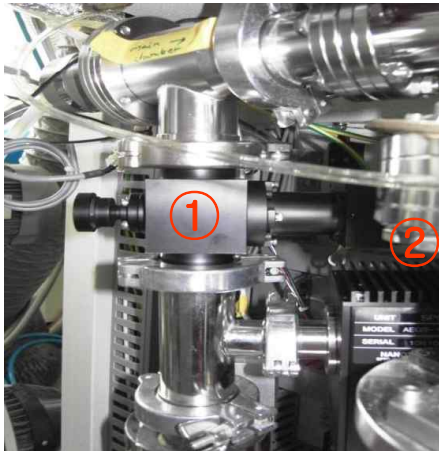


Figure 2. The sensors installed at the KRISS PECVD system. ① ISPM and ② SPOES

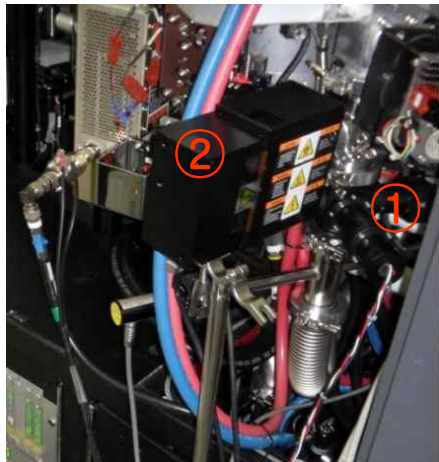


Figure 3. The sensors installed at the NNFC BPSG system. ① ISPM and ② SPOES

하여 그 곳에 설치되었다.

표준연에서 보유하고 있는 PECVD 장비의 공정 변수는 공정압력, 유량, 플라즈마 파워, 화학소스 종류 등이며 각각의 조건에서 발생하는 오염입자 크기 및 분포와 반응 후 배출되는 배기 부산물의 종류를 ISPM과 SPOES 장비를 이용하여 측정하였다. 일정한 기체 유량을 진공챔버로 공급하기 위해 MFC (mass flow controller)를 사용하였으며, 반응기체로는 초고순도 Ar (99.9999%), SiH₄를 사용하였다. 챔버는 루즈펌프와 로터리 진공펌프를 사용하여 감압시켰으며, 챔버내 압력은 CDG (capacitance diaphragm gauge, MKS Instruments) 압력센서로 측정하였다.

Table 1은 표준연 장비 운용 recipe이다. 전체적인 공정 조건은 SiH₄ 유량 10~30 sccm, 공정 압력은 0.5~5 Torr,

Table 1. Process recipe for PECVD in KRISS.

Ar 150 sccm + SiH ₄ 15 or 20 sccm				
상온(33°C)	0.5 Torr	1.5 Torr	3 Torr	5 Torr
100 W				
200 W				
300 W				
400 W				
500 W				

Table 2. Process recipe for a BPSG process in NNFC.

Deposition temperature		420~460°C
Reactor pressure		200 Torr
Gas	O ₂	2,000~6,000 sccm
	O ₃	
	He	
Precursor	TEOS	50~200 mgm
	TEPO	
	TEB	

플라즈마 파워는 100~500 W 범위에서 변화시키면서 실험을 진행하였으며, 압력과 플라즈마 파워에 따른 오염입자 발생량을 확인할 수 있었다. 표의 검은 부분의 공정조건에서는 오염입자가 발생하지 않는 부분을 표시한 것이다.

Table 2는 나노종합팹센터에서 보유하고 있는 BPSG 장비의 공정 recipe 예이다. 다양한 종류의 기체의 유량을 2,000~6,000 sccm 범위에서 조절할 수 있으며, 화학소스의 유량도 조절할 수 있도록 제작되었다.

III. 결과 및 토의

Fig. 4(a)는 표준연 PECVD 장비를 압력 1.5 Torr, 플라즈마 파워 100 W, Ar (운반기체) 유량 150 sccm, SiH₄ 유량 15 와 20 sccm으로 설정하고 ISPM을 이용해 오염입자 크기를 측정한 결과이고, Fig. 4(b)는 다른 조건은 유지하고, 플라즈마 파워만 100 W에서 200 W로 상향한 후 오염입자를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 입자 크기는 측정구간은 4구간으로 나누었다. 지금은 4구간으로 다소 넓게 구간을 나눠 측정값을 보여주지만 추후 측정 알고리즘이나 표준입자 교정을 통해 더욱 정교하게 나누거나 더 넓은 신뢰구간을 제시할 수 있을 것으로 생각된다.

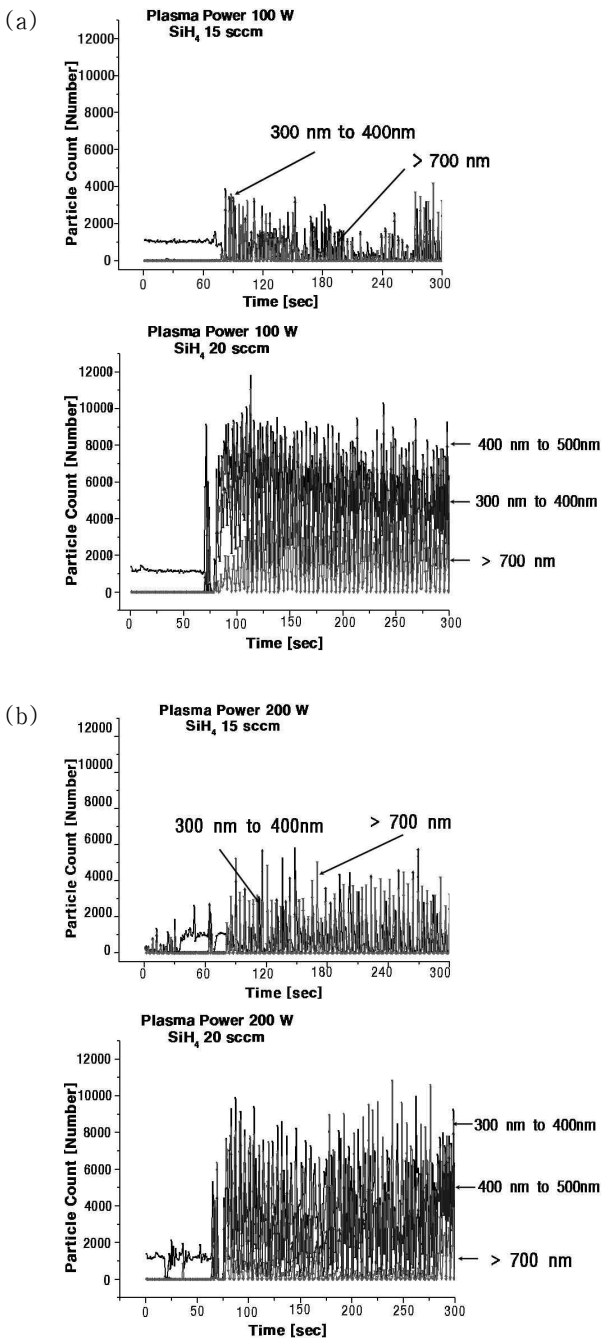


Figure 4. (a) The monitoring result of particle sizes at 100 W (plasma power). (b) The monitoring result of particle sizes at 200 W (plasma power).

Fig. 4(a), (b)는 Table 2에서 제시한 공정조건 중 오염 입자 발생수가 가장 많은 공정조건의 데이터만을 대표적으로 선출한 데이터이다.

Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 초기 약 60초 동안 오염입자가 발생하지 않는 이유는 공정주기인 purge 단계와 측정단계의

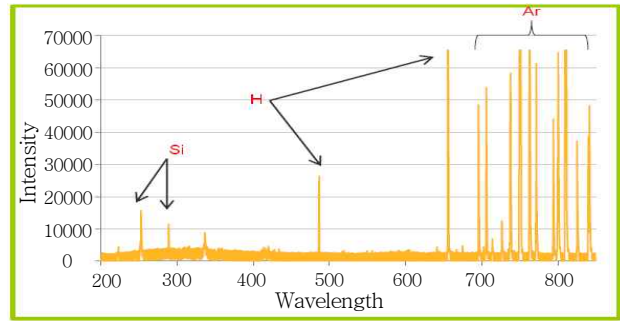


Figure 5. The optical emission spectrum measured by SPOES at the 20 sccm SiH₄ flow rate.

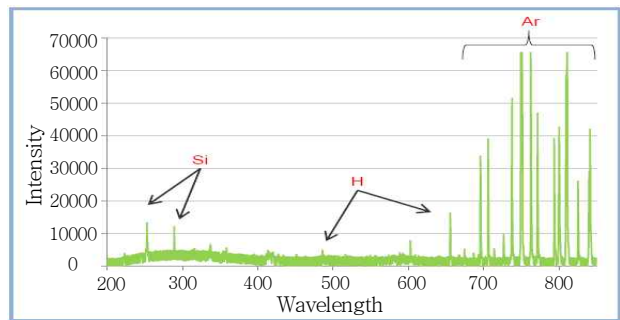


Figure 6. The optical emission spectrum measured by SPOES at the 15 sccm SiH₄ flow rate.

짧은 주기 차이로 인해 나타나는 현상으로 초기 60초 이후의 데이터를 가지고 입자의 변화를 확인 하였다. SiH₄ 유량을 15에서 20 sccm으로 증가시켰을 때는 오염입자 발생수의 급격한 증가를 확인할 수 있었다. 다른 공정 변수인 플라즈마 파워의 증가(100에서 200 W)는 총 측정 입자수는 약간 증가하였지만 특이하게도 생성된 입자크기는 작아지는 것을 알 수 있었다. 이로부터 유량의 증가는 입자수를 변화시키고 플라즈마 파워는 입자크기에 변화를 준다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5와 6은 Table 1의 공정 조건 중 가장 오염입자의 발생수가 많은 공정 조건으로 공정 Start 후 60 sec 이후 측정 데이터이다. 공정 압력이 1.5 Torr로 일정할 때 SiH₄ 유량을 변화시켰을 때(15 & 20 sccm) 측정되는 OES peak를 나타내고 있다.

이 결과로부터 SiH₄ 유량의 증가는 Si 피크 뿐만 아니라 H 피크도 증가시킨다는 것을 알 수 있다. 특히 H 피크의 변화가 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 공정변화 측정결과는 증착 장비에 유입되는 가스의 종류를 실시간으로 측정할 수 있다는 것을 의미하고 센서의 유용성이 높다는 것을 확인시켜준 결과라고 생각된다. 정량적

으로는 SiH₄ 유량 증가 시 Si (252.5 nm) 피크강도가 약 500 증가한 측정 데이터 값을 얻을 수 있었고, H (486.1 nm) 피크 강도는 약 19,000 증가하였다.

Fig. 7은 공정 전 idle 단계와 공정 진행 후 측정된 스펙트럼을 비교한 결과이다. idle 단계 즉 SiH₄를 주입하지 않을 때는 Si와 H 관련 피크들이 보이지 않는다. 이는 SiH₄의 유량조절이 정확히 되어지고 있고 장비가 최적의 상태임을 간접적으로 확인할 수 있으며 SPOES를 활용해 공정안정성 및 신뢰성도 진단할 수 있음도 확인할 수 있었다. 지금까지의 결과는 표준연에서 보유하고 있는 PECVD 장비의 진단결과이다. 본 연구에서는 연구용 장비 진단뿐만 아니라 양산장비 평가에서도 개발된 센서의 유용성을 검증하기 위해 양산용 장비인 나노종합팹센터에서 보유하고 있는 BPSG 장비에도 센서를 부착해 공정상태를 측정하였다.

Fig. 8과 나노종합팹센터의 BPSG 장비 배기구를 통해 내부 클리닝 때 배출되는 부산물을 측정한 결과를 보여준다. BPSG 장비의 경우 증착 완료 후 플라즈마를 이용해 내

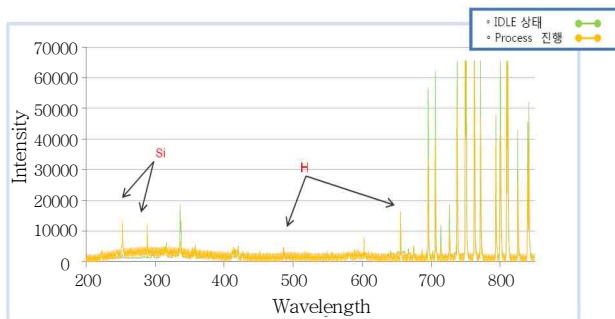


Figure 7. The variation of the full spectrum after & before the process.

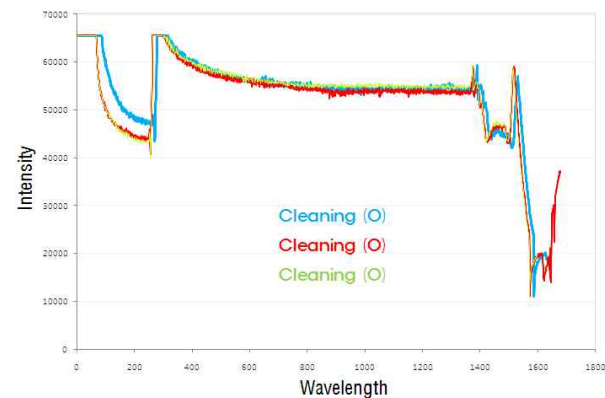


Figure 8. The spectra measured at the cleaning step by SPOES (3 times measurement).

부 클리닝을 수행하는데 이는 장비 재현성에 있어 가장 중요한 단계이다. 본 연구에서는 SPOES를 활용해 클리닝 단계의 신뢰성 및 재현성을 측정해보았다. 측정결과를 볼 때 매번 같은 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 이는 양산공정장비의 클리닝 단계가 재현성 있게 잘 운용되고 있다는 것을 반증하는 것이기도 하지만 측정된 센서도 높은 신뢰성을 가지고 있다는 것을 의미하기도 한다. 또한 일반적으로 배기구 배관은 오염에 있어 취약한 상태이지만 본 센서의 경우 측정하는 동안 오염에 의해 측정효율의 변화가 없었다. 이는 센서의 강한 오염 내성을 보여주는 것이다.

Fig. 9는 BPSG 공정을 지속적으로 모니터링한 결과를 보여준다. 증착과 클리닝 단계 모두 상당히 재현성 있는 결과를 얻을 수 있다. 증착단계에서 발생하는 부산물의 양이 클리닝 공정에서 발생하는 부산물 양보다 월등히 많은 것을 간접적으로 확인할 수 있으며 증착단계에서도 가스 주입 및 압력조절 등의 조건변화에 따라 측정되는 스펙트럼도 같이 연동하여 변화하는 것을 알 수 있다.

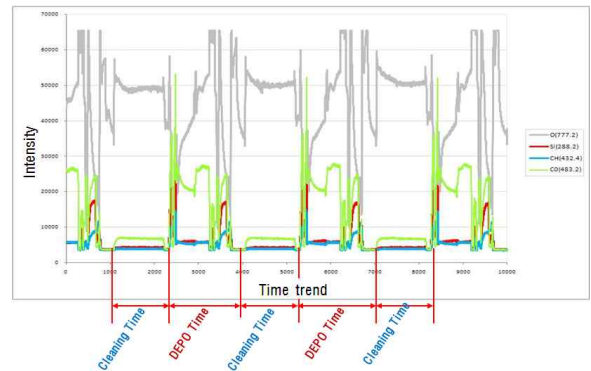


Figure 9. The monitoring result of the BPSG process.

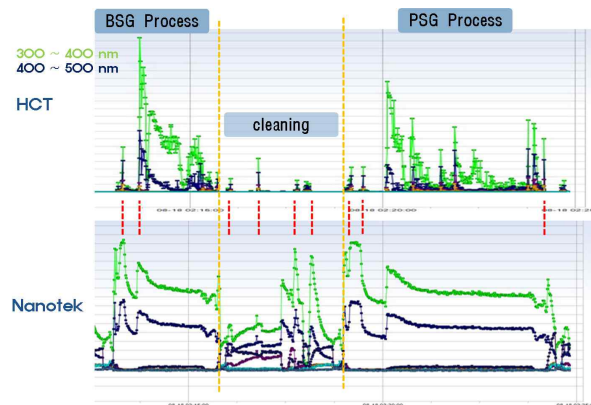


Figure 10. Correlation between results measured by ISPM and those by SP-OES.

Fig. 10은 두 가지 센서에서 측정된 결과를 상호 비교한 결과이다. 이 결과에서 알 수 있듯이 SPOES에서 측정된 산소피크의 강도가 높아지면 오염입자의 발생량도 많아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 산소가 입자의 발생 및 크기 제어 메커니즘에 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다. 이와 같이 두종류 센서의 결과를 상호 비교 분석한다면 실시간 공정진단과 증착 또는 식각 메커니즘도 규명할 수 있을 것으로 기대한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 새롭게 개발된 ISPM과 구동압력범위, 측정속도, 오염 내성 등을 업그레이드한 SPOES를 이용해 PECVD와 BPSG 공정을 진단하였다. 이러한 진단을 통해 장비 상태와 공정진행 상태를 실시간으로 확인할 수 있었다. 공정변수(압력, 유량, 플라즈마파워, 가스 종류 등) 변화에 따른 센서 측정능력을 확인하고 결과를 분석하였다. 측정결과 화학소스의 유량이 증가할수록 발생하는 오염입자수는 증가하였지만 플라즈마 파워가 증가할수록 발생하는 오염입자 크기는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. SPOES를 활용해서는 재현성 있게 공정상태를 진단할 수 있었다. 또한 화학소스(SiH_4)의 유량 증가에 따른 상대적 Si와 H 피크강도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 두 종류의 센서에서 측정된 결과를 비교 분석한 결과 반응부산물 중 산소의 양이 증가하는 순간 입자크기 및 발생량이 같이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 산소가 입자생성에 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다. 이러한 연구를 통해 센서 기반 공정진단 기술을 발전하게 되고 이는 장비 및 생산되는 소자 신뢰성도 함께 높일 수 있는 방법이라고 생각된다. 앞으로 다양한 센서를 통합적으로 운용할 수 있는

toolbox의 개발도 연구할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업으로부터 지원을 받아 수행되었습니다(10031858-2008-11).

참고문헌

- [1] J. F. O'Hanlon and H. G. Parks, *J. Vac. Sci. Technol. A* **10**, 1863 (1992).
- [2] L. Peters, *International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)*, (2007).
- [3] P. J. Ziemann, P. Liu, N. P. Rao, D. B. Kittelson, and P. H. McMurry, *J. Aerosol. Sci.* **26**, 745 (1995).
- [4] A theory for multiresolution signal decomposition : the wavelet representation, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **11**, 674-693, (1989).
- [5] S. G. Mallat, *Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models*. *IEEE Transactions on* **37**, (1989).
- [6] I. Daubechies, *Comm. Pure Appl. Math.* **41**, 909-996 (1988).
- [7] B. Kim and K. Kwon, *J. Appl. Phys.* **93**, 76 (2003).
- [8] B. Kim, S. Kong, and B. T. Lee, *J. Vac. Sci. Technol. A* **20**, 146 (2002).
- [9] R. W. Chen, H. Huang, C. J. Spanos, and M. Gatto, *J. Vac. Sci. Technol. A* **14**, 1901 (1996).

The Study on *In-situ* Diagnosis of Chemical Vapor Deposition Processes

Ki-Moon Jeon^{a,b}, Jae-Soo Shin^b, Sung-Kyu Lim^c, Sang-Hyun Park^c, Byoung-Koo Kang^d,
Jin-Uk Yun^e, Ju-Young Yun^a, Yong-Hyeon Shin^a, and Sang-Woo Kang^{a*}

^a*KRISS, Daejeon 305-340*

^b*Department of Advanced Materials Engineering, Dae Jeon University, Daejeon 300-716*

^c*NNFC, Daejeon 305-806*

^d*Nanotek, Seoul 153-790*

^e*HCT, Icheon 467-866*

(Received October 20, 2010, Revised December 18, 2010, Accepted February 21, 2011)

The diagnosis studies of the process of chemical vapor deposition were carried out by using *in-situ* particle monitor (ISPM) and self-plasma optical emission spectroscopy (SPOES). We used the two kinds of equipments such as the silicon plasma enhanced chemical vapor deposition system with silane gas and the borophosphosilicate glass depositon system for monitoring. Using two sensors, we tried to verify the diagnostic and *in-situ* sensing ability of by-product gases and contaminant particles at the deposition and cleaning steps. The processes were controlled as a function of precess temperature, operating pressure, plasma power, etc. and two sensors were installed at the exhaust line and contiguous with each other. the correlation of data (by-product species and particles) measured by sensors were also investigated.

Keywords : *In-situ* diagnosis, Contaminant particles, By-product, *In-situ* particle monitor, Selfplasma optical emission spectroscopy

* [E-mail] swkang@kriss.re.kr