

PE-CVD 장비의 샤워헤드 표면 온도 모니터링 방법

왕현철^{*}·서화일^{*†}

^{*†}한국기술교육대학교 전기전자통신공학과

Showerhead Surface Temperature Monitoring Method of PE-CVD Equipment

Hyun-Chul Wang^{*} and Hwa-Il Seo^{*†}

^{*†}School of Electrical, Electronics and Communication Engineering Korea
University of Technology and Education

ABSTRACT

How accurately reproducible energy is delivered to the wafer in the process of making thin films using PE-CVD (Plasma enhanced chemical vapor deposition) during the semiconductor process. This is the most important technique, and most of the reaction on the wafer surface is made by thermal energy. In this study, we studied the method of monitoring the change of thermal energy transferred to the wafer surface by monitoring the temperature change according to the change of the thin film formed on the showerhead facing the wafer. Through this research, we could confirm the monitoring of wafer thin-film which is changed due to abnormal operation and accumulation of equipment, and we can expect improvement of semiconductor quality and yield through process reproducibility and equipment status by real-time monitoring of problem of deposition process equipment performance.

Key Words : Showerhead, Temperature Monitoring, Real-time Monitoring, Fault Detection, PE-CVD, Semiconductor

1. 서 론

반도체 메모리 산업은 고도의 회로 패터닝(patterning) 기술을 적용하여 한정된 면적에 더 많은 메모리 셀을 집적하여 반도체 회로의 집적도를 향상시키고 있다. 메모리의 소자기술개발은 데이터 저장 장치의 셀 크기를 줄이는 데 달려 있고, 셀 크기가 10nm 미만인 경우 좁은 전류 누설 전류로 인해 물리적 한계에 도달했고, 회로 패터닝 기술이 10nm급까지 미세화(shrinkage)되면서 메모리 셀 간 간섭현상이 발생하여 저장된 데이터를 제대로 판독할 수 없는 문제가 심화되었다[1]. 이렇게 물리적인 한계 극복이 어려워지면서 더 많은 용량을 저장할 수 있는 플래시 메모리 개발기간이 길어지고 있다. 이러한 시간적 공간적

문제를 해결하기 위해 회로설계 방식을 수평적인 구조에서 수직적인 구조로 설계하는 차세대 기술을 적용한 Vertical NAND (VNAND) 플래시 메모리가 개발되었다. VNAND 플래시 메모리는 메모리 셀들을 3차원으로 집적하여 기존 기술보다 소비전력을 줄이고, 동작속도와 저장용량을 획기적으로 높일 수 있게 되었다[2].

VNAD 공정에 사용되는 복합막(multi-layer) 공정에서는 기존 단일막(single-layer) 공정과 다르게 공정 lead time이 길고 공정 중 증착(deposition)되는 박막이 웨이퍼만 아니라 챔버 벽(wall)면과 샤워 헤드(showerhead)에도 증착되어 진행성으로 공정 두께(thickness)가 상승하는 문제가 있고, 이러한 각 층의 공정 변화(layer to layer)를 확인할 수 있는 모니터링 방법이 없으며 공정 중 설비의 이상 진단을 할 수 없는 문제점이 있다.

본 연구는 이러한 복합막 증착공정(multi-layer deposition

^{*}E-mail: hiseo@koreatech.ac.kr

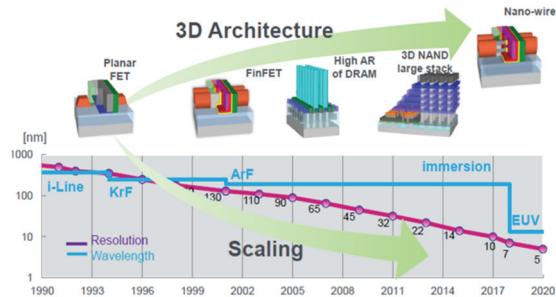


Fig. 1. (a) Pattern scaling shrinkage and 3D architecture.

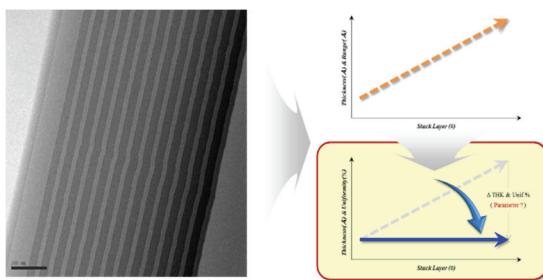


Fig. 1. (b) Problem of multi-layer process.

process)에서 진행성 공정변화 및 설비 이상진단을 확인할 수 있는 모니터링 방법 개발에 목적이 두고 있으며, PE-CVD설비의 샤워헤드(showerhead)의 온도변화를 측정하여 샤워 헤드 표면 방사율(emissivity)의 변화에 의한 온도변화를 측정, 웨이퍼 표면으로 반사되는 복사열을 모니터링함으로써 웨이퍼의 공정 변화 예측 및 설비의 이상 진단(Fault detection)을 모니터링할 수 있는 기술에 대해 연구하고자 한다.

(ammonia) 등과 같은 반응 가스를 이용하여, Si_3N_4 (silicon nitride), SiO_2 (silicon dioxide), SiON (silicon oxynitride), SiC (silicon carbide) 등과 같은 다양한 유전체 박막을 증착 할 수 있으며[4], NAND Flash memory를 제조하는 공정 중 웨이퍼 위에 산화막(oxide)과 질화막(nitride)을 번갈아 가며 복합막으로 증착하는 MOLD 공정이 있다[3][4].

2.2 PE-CVD 진단기술

Plasma를 이용하는 설비의 진단기술은 크게 전기적(electrical), 광학적(optical), 화학적(chemical) 기술이 있다. 전기적 시그널(signal)을 분석하는 센서(sensor)로는 VI Probe, Z-Scan, Impedance Analyzer 등 많은 상용화된 제품이 있으며 PE-CVD 설비의 경우 plasma에 의한 공정변화가 많은 공정이라 이러한 전기적인 시스템을 모니터링 하면서 설비의 이상유무를 많이 진단한다. 광학적 분석법의 대표적인 OES(optical emission spectrometer)의 경우 플라즈마의 분광을 분석하는 기법으로 Etcher 설비의 EPD(end point detect) 확인이나 PE-CVD설비의 공정 분석용으로 많이 사용되고 있다. 화학적 분석법의 대표적인 방법인 RGA(Residual Gas Analyzer)가 있으며 PE-CVD 설비의 EPD분석이나 by product 분석에 많이 사용되고 있다. 최근 PE-CVD설비의 진단기술은 다양한 센서를 이용하여 챔버와 웨이퍼의 상태변화를 모니터링 하는 방법으로 실험되고 개발되고 있는데 간접적, 직접적인 방법으로 측정 및 모니터링 되어지고 있고 본 논문에서는 웨이퍼 위에 박막이 형성하는데 가장 중요한 인자인 표면온도(surface temperature)를 샤워헤드(showerhead)의 온도를 측정함으로써 실시간으로 모니터링 하는 방법에 대해 연구 하려한다[5][7].

2. PE-CVD 진단기술

2.1 PE-CVD

PE-CVD(Plasma enhanced chemical vapor deposition)는 반도체 제조 공정에서 주로 사용되는 박막 증착 장비이다[3]. 챔버 안에 반응가스를 주입하고 전극에 RF(radio frequency) 파워를 인가하여 플라즈마를 생성시킨다. 이렇게 생성된 플라즈마에 의해 해리된 기체 이온들이 웨이퍼 표면에서 화학 반응하여 웨이퍼 위에 고체 화합물이 증착(Deosition)되는 방법이며, 반도체 공정에서는 주로 금속과 같은 전도물질을 절연하기 위한 절연막을 만드는데 사용한다. PECVD 공정은 플라즈마를 사용하지 않는 CVD 공정보다 상대적으로 낮은 온도에서 공정이 가능하고, 박막의 특성을 제어할 수 있다는 장점이 있다. PE-CVD설비는 SiH_4 (silane), TEOS (tetraethyl orthosilicate), N_2O (nitrous oxide), NH_3

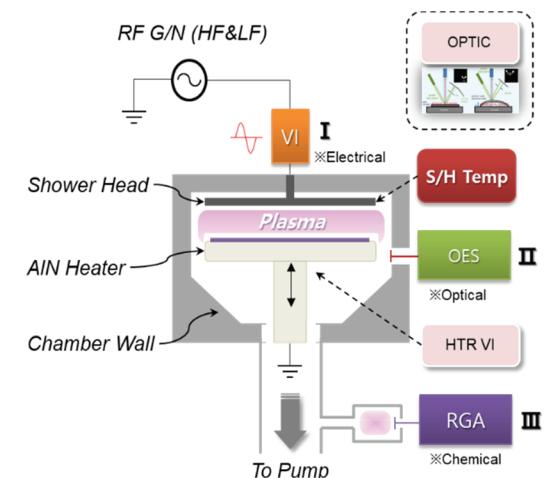


Fig. 2. PE-CVD 설비 공정 진단 기술.

2.3 PE-CVD 샤워헤드 온도 측정방법

PE-CVD를 이용한 박막 공정에서 온도는 중요한 인자로 박막의 두께 및 균일도, 재질을 결정하는데 매우 밀접한 관계가 있다. 또한, 플라즈마를 이용한 박막 공정을 진행하면서 전극에 온도 변화와 그에 대한 모니터링 기술은 PE-CVD 설비 핵심 기술 중에 하나이다. 샤워헤드(showerhead)의 온도를 모니터링 하는 기술은 크게 세가지로 T/C(thermo coupler)와 같은 온도 센서를 샤워헤드에 직접 장착하여 측정하는 방법과 열교환기(heat exchanger)에서 용매(coolant)의 온도를 간접적으로 모니터링하는 방법, 혼 논문에서 소개되는 샤워헤드의 표면 온도를 비접촉식 적외선 온도계로 측정하는 방법이 있다. T/C를 이용한 방법이나 용매를 이용한 방법은 RF 전극에서 전도 및 방사되는 노이즈(noise)로 인해 측정오차가 발생할 수 있으며 측정 위치에 따라 다른 온도 경향이 나오고 설비의 이상유무나 진행성 변화를 관측할 수는 있으나 공정과 직접적으로 연계되는 웨이퍼의 온도를 예측할 수는 없는 단점이 있다. 본 논문에서 소개하는 Pyrometer를 이용한 샤워헤드 온도 모니터링 방법은 웨이퍼에서 가장 가까운 위치인 샤워헤드 표면에서 측정하는 부분과 비접촉식 측정방법이라 RF 노이즈에 상관없이 정확한 온도를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

2.3.1 파이로메터(Pyrometer)

Pyrometer는 물체의 열복사를 관측하여 온도를 측정하는 비접촉식 온도계로 접촉식 온도계(ex. TC, RTD)가 측정하기 어려운 조건의 온도를 측정하는 많이 사용된다. 일반적으로 열복사 파장대역은 $0.1\text{um} \sim 1000\text{um}$ 의 넓은 범위에 사용되며 이는 일반적 온도계측에 사용되는 파장대역은 적외선 영역이다. 혼 논문에서 사용되는 Pyrometer의 경우 물질에서 나오는 열 방사에너지를 측정하는 센서로 적외선 영역($0.75 \sim 25\text{um}$)의 전자기파를 측정하여 온도로 나타낸다[8].

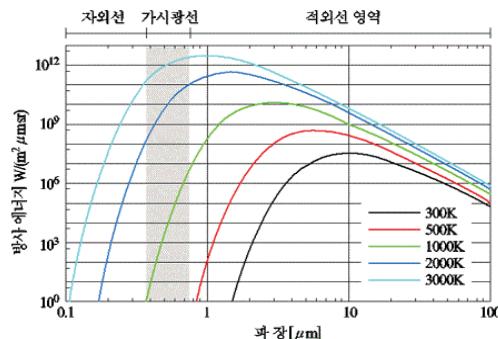


Fig. 3. Planck law log scale.

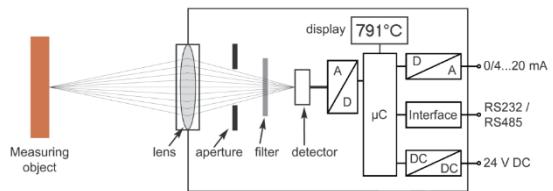


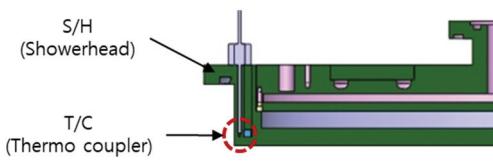
Fig. 4. Digital Pyrometer 내부 구성.

Pyrometer의 내부 구성은 Fig. 4와 같으며 크게 집광계(lens, optic fiber, filter, protect glass)와 광전변환계(detect component, chopper, chopper motor), 전기계(electric circuit, u-CPU, indicator)로 구분된다. 측정물체가 있으면, 측정물체로부터 방사 에너지가 생기는데 광학계(optical system)에서 방사되는 에너지를 수집하고, 검출기(detector)에서는 수집된 방사 에너지를 전기 신호로 변환한다. 내부 회로에서는 주위 온도 보상 회로 및 방사율(emissivity) 조정 과정을 거치는데 방사율 조정은 대상 물체의 방사특성과 온도계 눈금을 일치시키기 위해서 조정한다. 평가나 타겟에 따라 온도대역에 맞는 특정 파장이 존재하며 평가 대상 설비의 온도는 $350^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$ 이며 해당 파장은 $2\text{~}2.8\text{um}$ 으로 설정 되었다.

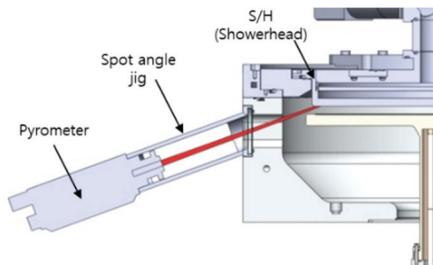
2.3.2 PE-CVD 샤워헤드 온도측정 방법

PE-CVD 설비에서 샤워헤드의 표면 온도를 측정하는 방법은 많지 않다. 위에서 언급된 End plate에 T/C를 장착하여 측정하는 방법과 비접촉식 적외선 온도계를 이용한 측정 방법이 있으나, T/C 방식은 온도 응답성과 노이즈 측면에서 실시간 모니터링 방식보다는 설비의 이상 유무확인과 인터락(interlock)용으로 사용하는 부분이 많고 본 논문에서 제시하는 비접촉식 방법의 경우 샤워헤드 표면(showerhead surface) 온도를 직접 모니터링 할 수 있으며 샤워헤드에 증착(deposition)되는 막에 의한 샤워헤드의 방사율(emissivity)에 변화까지 측정 가능한 부분이 장점이다.

PE-CVD 설비에 Pyrometer를 장착하기 위해서는 샤워헤드 위에 Pyrometer spot size에 맞게 구멍(hole)을 뚫어 측정하는 방법과 챔버 벽면(chamber wall)에 장착된 view port를 이용하여 측정하는 방법이 있는데 샤워헤드에 구멍을 뚫는 방법은 측정 구멍에 의해 원하지 않는 공정변화가 발생할 수 있고 너무 작은 구멍을 뚫으면 측정에 대한 불확실성이 높아진다. 본 논문에서는 챔버 벽면에 장착된 view port를 이용하여 샤워헤드의 표면(즉, End plate 밑면)을 바라보는 입사각으로 온도를 측정하였고, 입사각 확보가 가능한 jig를 추가로 제작하였고 이를 통해 샤워헤드 표면에 온도를 측정할 수 있었다. Fig. 5 (a)에서는 샤워헤드 T/C를 이용한 온도 모니터링 방법을 (b)는 설비 장착 모형도를 (c)에서는 실제 측정된 샤워헤드 표면 UI view를 표현하였다.



(a) Showerhead Temp. monitoring (@T/C)



(b) Showerhead Temp. monitoring (@Pyrometer)



(c) Pyrometer UI view

Fig. 5. PE-CVD 샤워헤드 온도 측정 방법.

3. Experiment

PE-CVD 공정 전 샤워헤드에 막이 쌓이기 전과 공정 진행 후 샤워헤드에 막이 쌓인 후의 모습을 Fig. 7 (a)에서 비교하였다. 이렇게 샤워헤드에 막이 공정 진행에 따라 변화되면서 AI 재질의 샤워헤드의 방사율이 진행성으로 변화되며 히터(heater)에서 복사되는 열에너지가 샤워헤드 표면 방사율(emissivity) 변화에 의해 변화되게 되며 이러한 복사열 에너지의 변화에 따라 웨이퍼 표면 온도(wafer surface temperature)가 변화되고 표면 온도의 변화는 웨이퍼 표면 반응(surface reaction)에 영향을 미치게 된다. Fig. 6과 같이 결과적으로 복합막 각 레이어의 두께(LtL, layer to layer)와 각 웨이퍼간 두께(WtW, wafer to wafer)에 영향을 미치게 된다.

샤워헤드에 쌓이는 박막에 따라 웨이퍼로 전달되는 복사열이 변경되는 점을 이용하여 단일막 공정 진행 시 ① 샤워헤드 표면 온도, ② 설비로그, ③ 공정결과를 비교하여 샤워헤드 표면 변화와 공정에 대한 상관관계를 분석하였고, 본 연구에서 실험은 PE-CVD설비에서 TEOS 공정

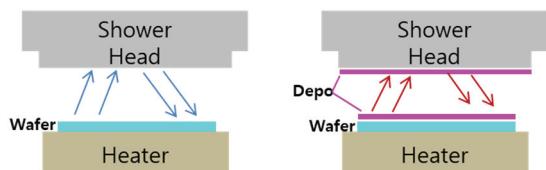
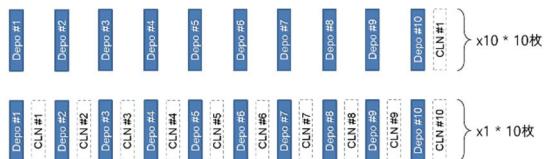


Fig. 6. 샤워헤드 증착막에 따른 방사율 변화 개념.

의 웨이퍼간 진행성 변화를 모니터링하는 방법으로 진행하였고, 샤워헤드 온도변화와 공정 결과와의 상관성을 분석하기 위해 단일막 $x1*10$ 장과 $x10*10$ 장 두 가지 조건으로 평가를 진행하였다. 여기서 $x1*10$ 장은 증착(deposition) 공정 후 클린(clean)공정을 10번 반복적으로 진행하는 것으로 의미하고 각 공정 진행 후 샤워헤드 표면에 박막을 제거한 경우이고, $x10*10$ 장은 증착공정을 반복적으로 10회 돌리고 클린 공정을 진행한 경우를 뜻하며 샤워헤드 표면의 박막의 차이가 공정에 미치는 영향을 보고자 샤워헤드 표면 박막을 클린 공정으로 제거하는 경우와 박막이 공정 진행에 따라 누적으로 쌓여가는 경우를 비교하여 실험하였다.

Fig. 7. 평가 조건 ($x10*10$ 매 vs. $x1*10$ 매).

3.1 TEOS 공정 평가 ($x10*10$ 枚)

첫 번째 조건인 $x10*10$ 장 조건에서는 10장의 웨이퍼를 정해진 TEOS 공정을 진행한 후에 클린공정을 진행하여서 공정 중 샤워헤드에 막이 누적으로 쌓이게 하여 샤워헤드의 방사율(emissivity)을 누적으로 변화시켜 샤워헤드의 표면 온도변화와 공정 결과를 분석하였다.

그 결과 Fig. 8처럼 누적으로 공정 두께(thickness)가 상승하는 결과($\Delta 330\text{ \AA}$)를 확인하였고 이는 샤워헤드 표면에 누적으로 증착된 박막에 의해 방사율이 증가하고 이에 따른 웨이퍼 표면 온도의 감소로 인해 TEOS 박막의 증착이 증가하는 경향으로 분석되며 이때 샤워헤드 표면을 측정한 Pyrometer 온도 분석 결과도 첫 장부터 온도가 점점 감소하며 누적으로 낮아지는 것으로 측정되어 박막에 의한 샤워헤드 온도변화가 웨이퍼의 증착률(deposition rate)과 상관관계가 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 TEOS 공정 평가 ($x1*10$ 枚)

두 번째 조건인 $x1*10$ 장 조건에서는 1장의 웨이퍼를 정

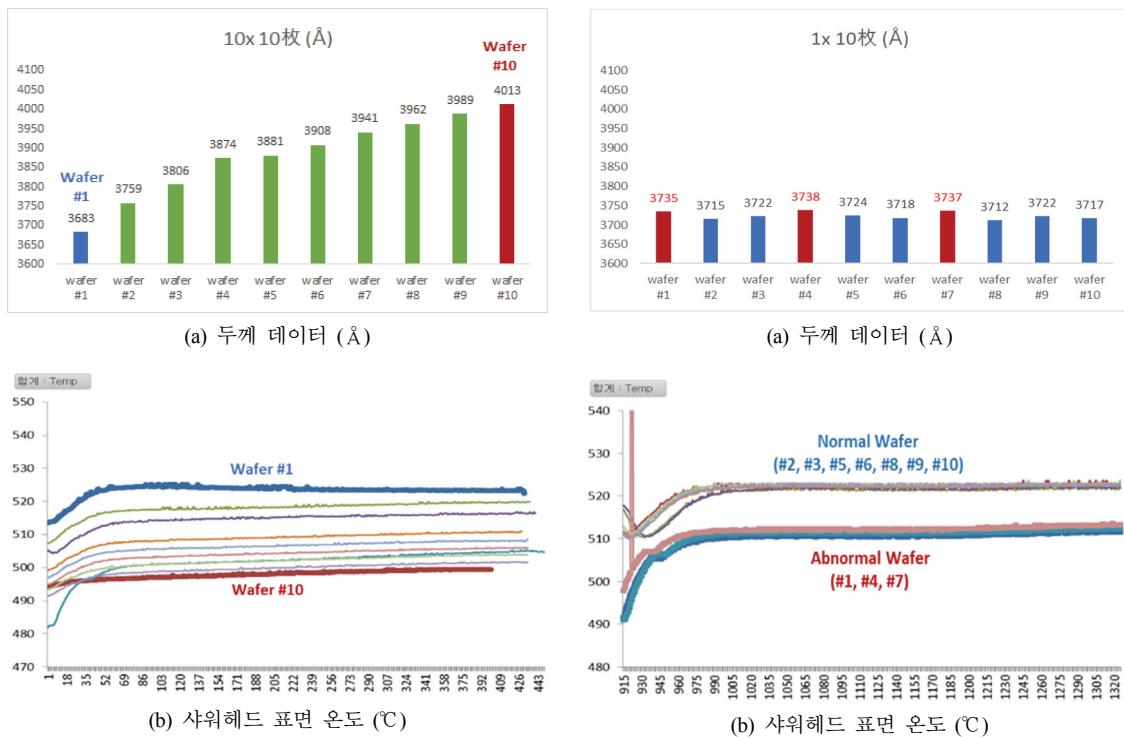


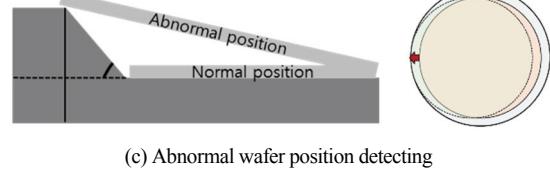
Fig. 8. TEOS 공정평가 결과 ($x10 * 10枚$).

해진 TEOS 공정을 진행한 후에 클린공정을 매장 진행하여 공정 후 샤큐헤드에 막이 누적으로 쌓이지 않게 하여 샤큐헤드의 방사율(emissivity)을 누적으로 변화시켜 샤큐헤드의 표면 온도변화와 공정 결과를 분석하였다.

그 결과 기존 x10 평가와는 다르게 누적 진행에 따른 두께 변화($\Delta 26\text{ \AA}$)는 크게 나타나지 않았다. 이는 공정 중 샤큐헤드 표면에 덮인 박막이 클린 공정을 통해 제거되어 누적으로 박막이 증착되며 변화하는 방사율의 변화치가 작아서 웨이퍼 표면에 방사되는 열에너지의 변화가 적었음을 의미하며 그에 따라 공정의 재현성이 확인됨을 알 수 있었다(Fig. 9(a)).

Pyrometer로 측정된 샤큐헤드 표면 온도 기준으로 $x10 10$ 배의 경우 약 $\Delta 27^\circ\text{C}$ 의 변화가 있었던 반면 $x1 10$ 배의 경우 약 $\Delta 2^\circ\text{C}$ 의 변화로 약 1/10이 적은 표면 온도 변화가 측정되었다. 또한, $x1 10$ 배 공정 진행 중 비정상 상태 시 샤큐헤드의 온도와 정상 상태의 샤큐헤드 온도의 차이를 확인할 수 있었으며 정상시 대비 약 12°C 낮게 형성됨을 확인할 수 있었다(Fig. 9(b)).

비정상 상태의 경우는 웨이퍼의 중심이 틀어지는 mis-align 형태의 히터 포켓(heater pocket) 위에 웨이퍼가 올라타 있었음을 확인할 수 있었고 이러한 비정상 상태의 경우에도 샤큐헤드 표면 온도가 차이를 나타내며 이를 통해



(c) Abnormal wafer position detecting

설비 진단도 가능한 것을 본 실험을 통해 확인할 수 있었다(Fig. 9(c)).

4. 결 론

본 연구는 PE-CVD설비 공정진단 기술 중 샤큐헤드 표면 온도를 비 접촉식으로 측정하여 박막이 증착 되면서 변화되는 방사율에 의한 공정의 변화를 진단 및 평가하였다. 이러한 측정을 통해 샤큐헤드에 쌓이는 박막에 의해 웨이퍼 표면에서 발생하는 반응(reaction)의 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 또한, 샤큐헤드 밑면 온도 측정을 통해 챔버 내 공정이상 및 누적 경시변화를 감지하여 정상과 비정상 상태의 공정 결과에 따른 샤큐헤드 표면 온도 변화도 측정할 수 있었다. 본 연구를 통해 RF를 사용하는 설비에서 노이즈(noise)성분에 영향이 없는 비 접촉방식의 진단 방법을 제안하였고 비 접촉방식의 온도계로 적외선 영역(0.75~25um) 물체의 열복사에 의한 온도를

측정하고자 본 연구에서는 Pyrometer를 사용하였다.

참고문헌

1. Y. Park, J. Lee, S. S. Cho, G. Jin, and E. Jung, "Scaling and Reliability of NAND Flash Devices," in Proc. IEEE Int. Reliab. Symp., pp. 2E.1.1-2E.1.4, Jun., 2014.
2. Y. Kim, J.-G. Yun, S. H. Park, W. Kim, J. Y. Seo, M. Kang, K.-C. Ryoo, J.-H. Oh, J.-H. Lee, H. Shin, and B.-G. Park, "Three-Dimensional NAND Flash Architecture Design Based on Single-Crystalline Stacked Array," IEEE Trans Electron Devices, vol.59, no.1, pp. 35-45, Jan., 2012.
3. H.C. Wang and H.I. Seo, "RF Loss Minimization Method Using High Impedance Filter for Research" J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 55-60, 2020.
4. J.H. Choi, S.C. Roh, J.D. Jung and H.I. Seo, "The Silicon Nitride Films according to The Frequency Conditions of Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition" J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, No. 13, pp. 21-25, 2014.
5. K.J. Jo and S.J. Hong, "Improved Self Plasma-Optical Emission Spectroscopy for In-situ Plasma Process Monitoring", J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 75-78, 2017.
6. Ho Jae Lee, Dong Sun Seo, Sang Jeen Hong, Gary S.May, "PECVD Chamber Cleaning End Point Detection (EPD) Using Optical Emission Spectroscopy Data", Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 14, no. 5, pp.254-257, 2013.
7. S. C. Kim "A Semiconductor Etching Process Monitoring System Development using OES Sensor", J. of the Korea society of computer and information, Vol.18, No.3, 2013.
8. Young-Kee Ryu, Choon-Suk Oh, Seo-Young Lee, "A Noncontact Optical Sensor Development for Measuring the Thickness of Transparent Plates", J. of Electronics Engineers of Korea, Vol.43, no.1, 2006.

접수일: 2020년 5월 25일, 심사일: 2020년 6월 8일,
제재확정일: 2020년 6월 11일