

다변량 분석기법을 통한 플라즈마 공정 모니터링 기술

<http://dx.doi.org/10.5757/vacmac.2.4.27>

장해규, 고경범, 이호녕, 채희엽

Plasma Monitoring by Multivariate Analysis Techniques

Haegyung Jang, Kyongbeom Koh, Honyoung Lee, Heeyeop Chae

Plasma diagnosis and multivariate analysis techniques for plasma processes are reviewed. The principles and applications of optical emission spectroscopy (OES) and VI probe are discussed briefly. The research results of principal component analysis (PCA), one of the widely used multivariate analysis techniques for plasma process monitoring is discussed in this article.

1. 서론

플라즈마 공정은 반도체의 집적도가 높아짐에 따른 선풍 미세화에 필요한 공정이며, 현재는 반도체 및 디스플레이 패널 생산에서의 식각 및 증착 공정을 포함하여 각종 표면처리공정 등에 폭넓게 사용되고 있다 [1-3]. 그런데 플라즈마를 이용한 공정의 난이도가 계속 증가함에 따라, 공정 진행 중 반응기의 상태 변화 양상에 대한 정확한 파악이 중요해 졌으며, 또한 공정의 재현성 확보 및 공정조건 안전성 확보에 대한 필요성이 커지고 있다 [4]. 이러

한 요구들을 달성하기 위해서는 기판 위의 박막에 직접적으로 영향을 주는 플라즈마의 특성을 파악하는 것이 필수적이며, 이를 위해 여러 종류의 방법들이 사용되고 있다.

일반적으로 플라즈마의 물리적, 화학적 상태는 반응기의 형태, 반응기 내의 압력, 주입 가스, 인가된 전압 및 공정 진행 상황 등 다양한 변수들의 영향을 받아 결정된다 [5]. 이러한 다양한 변수들로 인하여, 공정 진행이 완료된 기판에 대하여 임의적인 표본을 추출하여 조사하는 것으로는 공정 진행에 최적의 조건을 구하기가 어려운 상황이다. 따라서 적절한 진단 도구를 이용하여 플라즈마의 물리적, 화학적 상태변화를 파악하고, 이를 통해서 플라즈마 반응기 내에서 실제로 발생하는 현상을 이해할 수 있을 때 정확한 공정 제어가 가능하다.

플라즈마의 실시간 진단을 위해 현재 사용되고 있는 기술은 크게 침습식(invasive)과 비침습식(non-invasive)으로 나눌 수 있다. Electrostatic probes(정전 탐침) 기법인 Single langmuir probe(단일 탐침)나 Double floating probe(이중 탐침)처럼 상대적으로 큰 교란을 주는 경우 침습식으로 볼 수 있다. 침습식의 경우 플라즈마에 일어나는 교란 때문에 제조현장에서 사용하기에 무리가 있지만, 비침습식에서 얻을 수 없는 정보를 얻을 수 있

〈저자 약력〉

- 장해규 저자는 2010년 성균관대학교 나노과학기술학과에 석박사통합과정으로 입학하였으며, 현재 다변량 데이터 분석기법을 활용한 플라즈마 공정진단에 관해 연구 중이다. (fromhk@skku.edu)
- 고경범 저자는 2015년 성균관대학교 화학공학부에 석사과정으로 입학하였으며, 현재 플라즈마 세정공정 개발에 관해 연구 중이다. (kkb0323@naver.com)
- 이호녕 저자는 2014년 성균관대학교 반도체디스플레이공학과에 석사과정으로 입학하였으며, 플라즈마 식각공정 및 장비의 최적화와 관련된 연구를 수행 중이다. (dewcomet@skku.edu)
- 채희엽 교수는 2000년 미국 Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.)에서 Plasma Chemical Kinetics 연구로 박사학위를 받았으며, 미국 Applied Materials의 Etch Division에서 연구원으로 2004년까지 근무하였다. 2004년부터 성균관대학교 화학공학부 교수로 재직중이며, 플라즈마 공정 및 장비, 양자점 발광소재 및 공정, 그래핀 소재 및 공정분야의 연구를 수행하고 있다. (hchae@skku.edu)

기 때문에 공정조건 확립에 사용할 수 있다 [5].

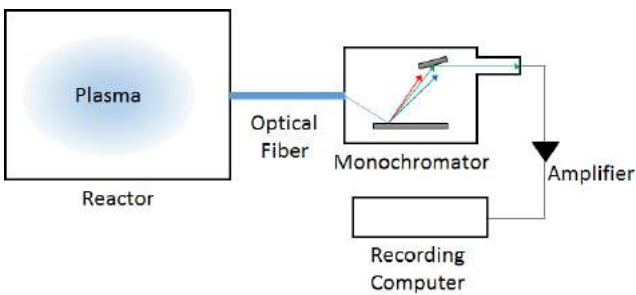
빛을 이용해서 플라즈마를 진단하는 광학적 진단 기법처럼 거의 교란을 주지 않는 경우나 VI probe를 이용하여 외부에서 반응기의 상태를 측정하는 경우 비침습식으로 분류할 수 있다. 대부분의 경우 광자들이 플라즈마에 주는 교란은 거의 무시할 만하며, 광학적 진단 방법의 대표적 예로는 빛 방출 분석 방법(optical emission spectroscopy, OES)이 있다.

그런데 현재 플라즈마 진단 도구는 크게 두 가지 문제로 인하여 그 활용에 제약이 있는 상태이다. 하나는 플라즈마 진단 도구를 통해 얻게 되는 변수의 개수가 너무 많고, 지속적으로 측정되므로 방대한 양의 데이터가 누적되므로 장비의 사용자가 어떤 변수를 관찰해야 하는지 알기가 어렵다는 것이다. 예를 들어 OES의 경우 측정변수로 약 800~2000 개의 파장별 강도가 측정되며, 사용자는 측정값들 중 공정에 적합한 관찰 대상을 선정해야 한다. 또 다른 하나는 최근 플라즈마 공정에서 물리화학적 반응 대상 면적이 좁아지면서 나타나는 측정신호의 민감도 하락 문제이다. 이러한 문제들은 소자의 선폭이 지속적으로 감소하게 된 것과 연관이 있으며, 문제의 해결을 위해 다변량 분석 기법을 이용한 빅데이터 분석 방법을 도입하게 되었다.

2. 플라즈마 진단기법 및 그 응용

2.1. Optical Emission Spectroscopy (OES, 빛 방출 분석)

플라즈마에서 방출되는 빛을 이용하여 플라즈마를 진단하는 광학적 진단 방법들 중, optical emission



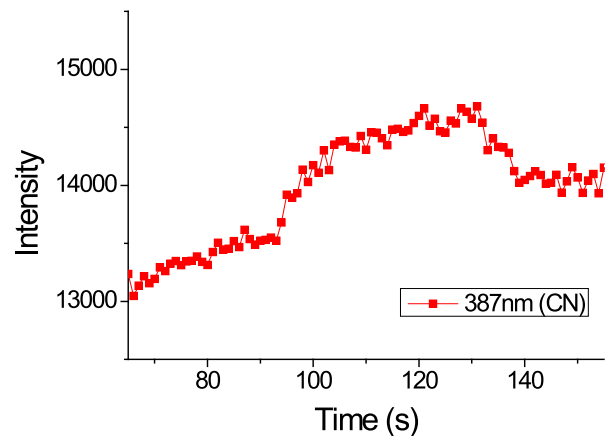
[Fig. 1] The scheme of OES for plasma diagnosis

spectroscopy (OES, 빛 방출 분석)는 장비개발과 양산공정 전반에 걸쳐 널리 쓰이는 진단 방법이다. 이는 플라즈마를 교란하지 않으면서 낮은 비용으로 중성종과 특정 이온의 존재 유무를 판단할 수 있는 진단 장비이기 때문이다 [2, 4].

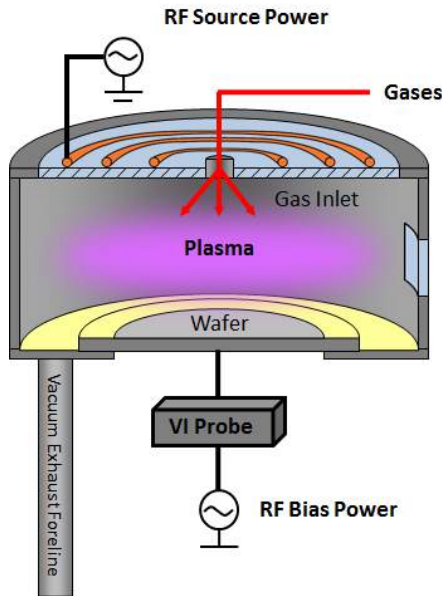
플라즈마 내 원소의 전자는 여기된 상태로부터 기저 상태로 떨어지면서 빛을 방출하게 되는데, 이때 방출되는 빛은 원소에 따라 고유의 파장 혹은 파장 범위를 가지게 된다. 이 특정 파장을 통해서 플라즈마 내에 존재하는 원소를 추정할 수 있고, 그 파장의 강도 변화로부터 원소의 양을 추정할 수 있으며, 이 원리를 이용한 진단장비를 OES라고 부른다.

OES 장치는 그림 1과 같이 플라즈마로부터 빛을 집광하고 또한 측정장치로 유도하는 렌즈와 광섬유, 집광된 빛을 파장별로 분광하는 모노크로미터(monochromator), 그리고 이 분광된 빛에 대해 파장별로 각각의 강도를 측정하기 위한 포토멀티플라이어(photomultiplier)나 포토다이오드(photodiode) 같은 광 검출기로 이루어져 있다 [6, 7]. 플라즈마에서 나오는 빛은 아주 넓은 범위의 주파수를 가지지만, 일반적으로 OES에서 사용하는 영역은 200 ~ 1000 nm 이다.

플라즈마의 파장방출 원리에서 살펴본 바와 같이, 플라즈마에서 방출되는 빛의 파장별 강도(optical emission spectra)는 플라즈마를 구성하는 원자 및 분자에 따라 변화하게 된다. 즉, 식각 부산물이나 반응가스과 관련된 특정 파장의 변화를 추적하여 그 파장과 관련된 물질의 존



[Fig. 2] The measured emission intensity of 387 nm wavelength related to CN from SiN_x etching

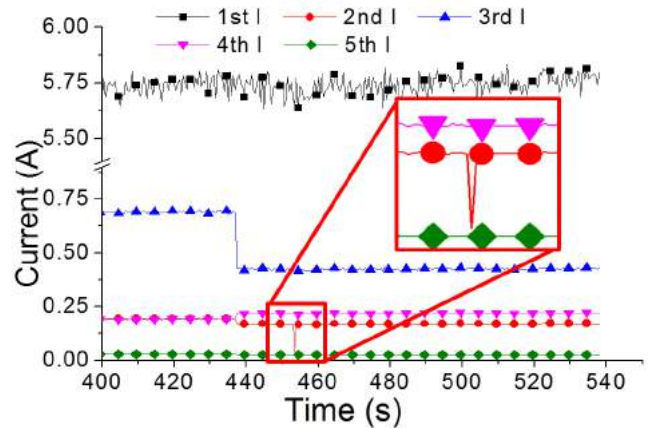


[Fig. 3] The scheme of inductive coupled plasma with VI probe

재 유무를 알 수 있다. 예를 들어 웨이퍼 위에 증착된 SiN_x 박막을 Fluorocarbon 계열의 물질로 플라즈마 식각(plasma etching)한다고 하면, OES를 이용하여 식각 과정에서 생성되는 식각 부산물인 CN과 관련된 파장의 강도가 커졌다가 식각 종료시점에서 약해지는 것을 볼 수 있을 것이다. 결과적으로 플라즈마를 이용한 식각 공정에서 식각 종료점 검출(endpoint detection)이 가능하게 된다 [8]. 즉, 식각하는 물질이 모두 제거됨으로 인하여 식각하는 물질과 반응가스와의 반응으로 생성되는 식각 부산물(etch product)이 없어지고, 그에 따른 식각 부산물과 관련된 파장의 강도 감소로 식각종료점을 검출한 것이다. 그림 2는 SiN_x 박막을 CF_4 플라즈마를 이용하여 식각하는 공정에서 나타나는 부산물인 CN과 관련된 파장 387 nm의 파장 강도 변화를 나타내었다.

2.2. VI probe (I-V monitor)

주 주파수 이외에도 고조파(harmonics)의 전압, 전류 및 위상차의 등을 검출할 수 있는 센서로, 1979년 K. Ukai의 RF 임피던스의 측정을 시작으로 발전해 왔다 [9]. 이후 reflected power, RF 전류, RF 위상차, DC bias, 그리고 peak-to-peak 전압 등 다양한 전기적 신



[Fig. 4] An example of etching process fault detection: Abnormal power delivery

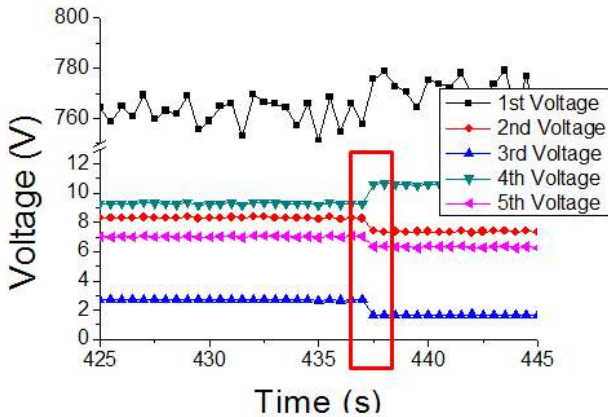
호들을 측정하여 플라즈마를 모니터링하는 용도로 사용하였다 [10, 11]. 또한 신호의 민감도 개선 및 응용을 위하여 RF의 고조파를 분석하거나 [12, 13], 인공 신경망회로 분석 기법 [14] 및 등가회로 분석 [15] 등의 접근이 이뤄졌다.

일반적으로는 플라즈마 발생에 사용되는 전극 또는 코일과 RF matching network 사이의 전력선로에 삽입되며, 반응기 전체를 일종의 등가회로로 보고 전기적 특성 변화를 측정하는 진단 장비를 말한다. 그림 3은 VI probe를 유도결합플라즈마 식각장치의 ESC 근처에 장착한 경우의 예를 나타내고 있다.

VI probe는 전류와 전압, 위상차, 반사파(reflect power) 등을 측정하고 고속 푸리에 변환을 통해 고조파를 측정결과로 보여주는데, 이 물리량들은 플라즈마 및 반응기의 상태에 매우 예민하게 반응한다. 즉 플라즈마 밀도, 전자 온도 및 플라즈마 내에 존재하는 물질의 조성 변화나 반응기 표면 상태의 작은 변화도 측정되는 값에 영향을 준다. 이러한 이유는 위에서 언급한 바와 같이 반응기 전체를 등가회로로 봤을 때, 플라즈마는 도체가 되고 쉬스(sheath)는 커패시터(capacitor), 코일(coil)은 인덕터(inductor)가 되는데 회로를 구성하는 요소 중 하나에 변화가 오면 전체 회로에 영향을 주기 때문이다 [15].

VI probe의 적용 예는 다음과 같다.

- 전달 전력 측정 : RF 전력 공급 장치에서 공급되는



[Fig. 5] SiO₂ etching endpoint detection by VI probe

에너지는 Matching box와 전송선로를 지나며 일부 손실되어 최초로 공급한 에너지보다 적은 에너지가 플라즈마로 전달된다. 따라서 실제로 전달되는 전력을 측정함으로써 공정 변수를 조정할 때 보다 정교한 접근을 가능케 한다 [16].

- 공정 상태 변화 추적 : 반응기의 공정변화를 탐지, 기록, 추적하는데 이용할 수 있다. 한 예로, <그림 4>에서 볼 수 있는 것처럼 RF 전력 전달 과정에 나타나는 이상 현상에 대한 탐지가 가능하다. 또한 플라즈마 반응기 시스템을 등가회로로 해석할 경우, 플라즈마 내 전자농도를 계산할 수 있다 [15, 17].
- 식각 공정에서의 식각종료점 검출(etching endpoint detection) : 공정의 종료 시에 나타나는 플라즈마의 조성 변화와 웨이퍼 위의 박막상태 변화는 쉬스 및 플라즈마에 영향을 끼치며, 이는 회로 전반에 영향을 주므로 측정값에 변화가 나타나게 된다. 아래는 wafer 위의 좁은 면적(2%)에 형성되어 있는 SiO₂ 박막을 식각할 때 측정값의 변화를 나타낸 그림 5이다. 여러 변수들에서 변화를 감지할 수 있으며, 이 지점이 식각종료점이 된다 [18].
- 반응기 세정시 종료점 검출(cleaning endpoint detection) : 세정공정은 반응기 벽에 흡착되어 있던 불순물들을 제거하는 공정으로, 불순물이 제거됨에

따라 식각공정에서와 마찬가지로 반응기의 임피던스가 변하게 되고, 이 변화를 감지하여 세정종료시점을 알아낼 수 있다.

VI probe에서 나오는 신호는 푸리에 변환을 통해 고조파 형태로 변환되어 사용자가 확인 가능한데, 이 고조파들의 물리화학적 의미가 개별적으로 명확히 규명되어 있지 않다. 이는 반응기를 등가회로로 해석하는 본 진단장비의 특성상, 반응기 형태 및 크기에 크게 영향을 받을 수밖에 없는 구조 때문이며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 상황이다.

2.3. 다변량 분석 기법의 적용을 통한 진단 민감도 향상 : 주성분분석

서론에서와 언급한 바와 같이, 현재 플라즈마 진단 도구를 사용할 때의 문제점인 방대한 양의 데이터 누적과 신호의 민감도 향상을 위하여 다변량 분석 기법을 도입하고 있다. 그 중 대표적인 예로는 주성분분석(Principal Component Analysis) 기법을 플라즈마 진단에 도입한 것으로, 실시간 공정진단과 동시에 이상진단의 민감도 향상이 가능하다 [8, 18, 19].

주성분분석이란 해석하고자 하는 다차원의 데이터가 있을 때 정보의 손실을 최소화 하면서 2~3차원의 데이터로 축약하는 데이터마이닝 기법으로, 단순한 통계적 분석뿐만 아니라 공정시스템 분야, 패턴인식 등의 분야에서 자주 사용되는 방법이다. 이 방법은 산재되어 분포되어 있는 데이터의 주요한 패턴을 파악하는데 있어서 효과적인 결과를 제시해 주기 때문에, 대량의 자료를 압축하여 몇 개의 새로운 주성분만으로 중요한 정보를 이끌어 내는데 유용하게 사용되고 있다.

이 주성분분석방법은 대상의 자료 X의 공분산 S를 고유값분해 (eigenvalue decomposition) 방법에 의해 다음과 같이 분해한다. 우선 공분산 S는 아래와 같이 계산되며, X는 k개의 변수에 대하여 n번 관찰된 자료를 모은 행렬이다.

$$S = \left(\frac{1}{n-1} \right) X^T X$$

이렇게 계산된 공분산 S에 대해 아래와 같이 고유값 분해를 시행하면 k개의 로딩벡터(ρ_j)와 고유값(λ_j)이 나온다.

$$Sp_i = \lambda_i p_i$$

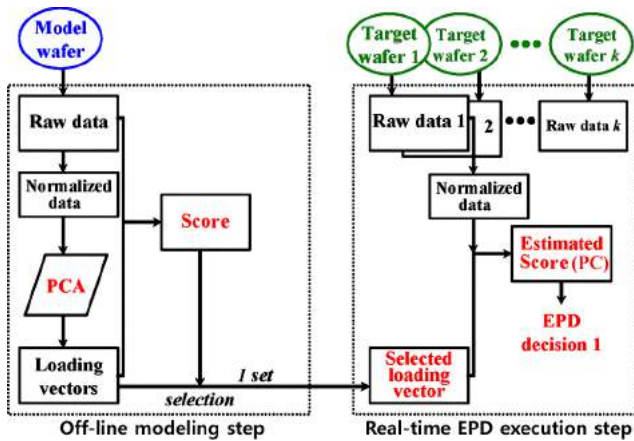
이 중 가장 큰 고유값을 가지는 벡터를 첫 번째 주요인자 (principal component) 벡터, 두 번째 큰 것을 두 번째 주요인자 벡터라고 칭한다. 계산된 로딩벡터(ρ_i)는 다시 계산의 편의를 위해 로딩행렬($P=[\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \dots \ \rho_k]$)의 형태로 정리하고 아래와 같이 계산을 하게 되면, 자료 X 는 다음과 같이 로딩벡터에 의해 새로운 줄여진 좌표로 사상(projection) 될 수 있다. 여기서 계산된 행렬의 값을 스코어(score)행렬이라 부르며 마찬가지로 스코어벡터(t_i)의 집합($T=[t_1 \ t_2 \ t_3 \ \dots \ t_k]$)이라고 볼 수 있다.

$$T = XP$$

이렇게 계산된 스코어벡터는 고유값이 큰 로딩벡터에서 계산된 것일 수록 자료 X 의 정보를 많이 담은 것이다. 이러한 특성은 각 스코어벡터들은 서로 수학적으로 직교(orthogonal)하도록 선형변환된 것이기 때문이다.

실제로는 5개 내외의 스코어행렬에 대부분의 정보가 집약되는 경우가 많고, 따라서 수학적으로는 다음과 같이 각각의 스코어벡터와 로딩벡터의 곱에 잔여량 행렬($\tilde{X} = \tilde{TP}^T$)를 더한 값으로 표현이 가능하다 [20, 21].

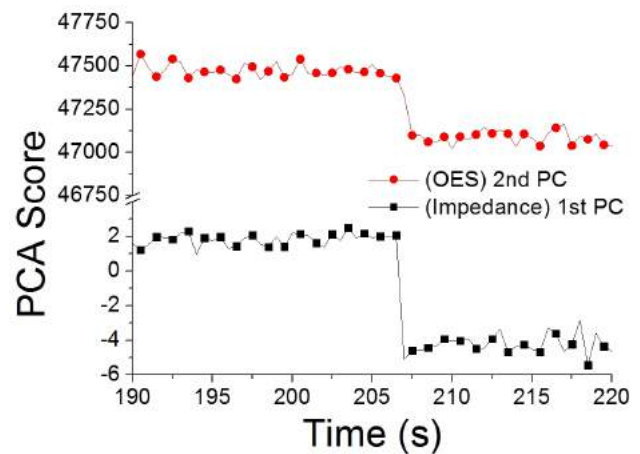
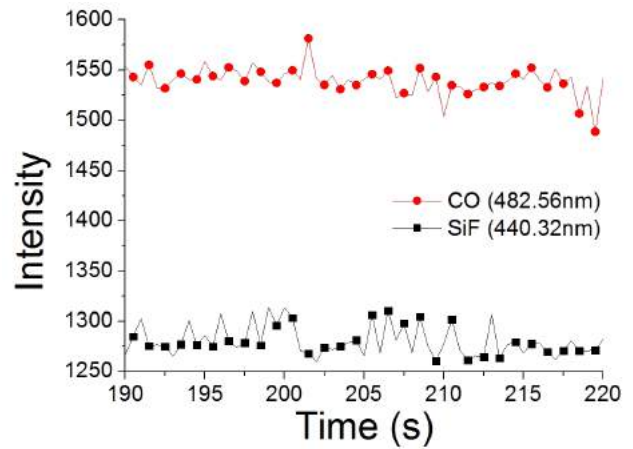
$$X = TP^T + \tilde{X} = TP^T + \tilde{TP}^T$$



[Fig. 6] The modified principal component analysis (mPCA) model for real-time etching endpoint detection[18]

(2) 실시간 식각 종말점 검출

기존의 OES를 이용한 단과장 추적방식의 식각종료점 검출 기법은 식각 면적이 전체 웨이퍼 대비 수 퍼센트 이하로 작아지면서 검출 신호에 비해 잡음이 상대적으로 많이 증가하여 종료점 검출이 어려워졌으며, 이러한 한계점을 극복하기 위하여 주성분 분석방법을 이용할 수 있다. 만약 OES를 이용해서 측정된 파장의 수가 많지 않을 때에는, 지속적인 주성분분석과 이에 따른 스코어 값의 변화를 관찰하여 실시간 식각 종말점을 검출이 가능하다. 그러나 현재 주로 사용되는 OES의 경우 보통 200 nm



[Fig. 7] The result of SiO₂ etching endpoint detection: A comparison of OES raw data, OES with mPCA, and VI probe with mPCA

에서 1,000 nm에 이르는 전 파장 대역에 걸쳐 1,000 ~ 3,000개 정도의 파장을 0.1 ~ 1초 정도의 간격으로 받고 있는데, 실제로 식각 종말점을 실시간으로 검출하기 위해서 분석하려는 파장의 수를 늘리는 방법은 프로세서에 굉장한 부담이 가해지기 때문에 주성분분석기법을 단순히 적용하기가 어려워진다. 따라서 기존의 주성분분석기법을 일부 수정하여 그림 6과 같은 새로운 모델을 만드는 것이 필요하다.

대부분의 통계처리 방법이 그러하듯, 주성분분석 역시 마찬가지로 데이터를 표준화함으로써 얻을 수 있는 이익이 많은 것으로 알려져 있다. 그러나 빅데이터를 실시간으로 처리하는 과정에서 프로세서에 걸리는 부담을 줄이기 위해 그림 6은 model wafer에서 얻은 평균과 표준편차가 반복되는 공정에서 일정하다는 가정을 통해 프로세서에 걸리는 부담을 줄인 것이다. 그림 7은 식각공정에서 OES와 VI probe 결과에 주성분분석을 적용한 결과와 단파장분석 결과를 비교한 것으로, 주성분분석을 통하여 민감도가 향상된 식각종료점 분석이 가능하다 [18].

3. 결론

본 기고에서는 양산 공정에서 사용가능한 플라즈마 진단기법을 위주로 설명하기 위해 빛 방출 분석(OES)과 VI probe에 관해 살펴보고, 다변량분석 기법중의 하나인 주성분분석의 적용 예에 관해 살펴보았다. 이 외에도 현재 사용되는 플라즈마 진단 방법들이 여러 가지가 있지만, 비용이나 양산 공정의 적용 문제로 인해 실사용이 어려운 경우가 많아 주로 선행개발을 목적으로 사용하고 있으며, 플라즈마에 대하여 비침습식 실시간 진단기법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

또한 현재 반도체 및 평판디스플레이 산업의 발전으로 인해 플라즈마를 감시하고 반응기의 이상 유무를 사전에 차단할 수 있는 플라즈마 진단 장비들에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 수요 증가는 크게 두 가지 이유에서 나타났다고 할 수 있는데, 첫 번째는 기판 크기 증가로 인하여 수율이 낮아질 경우 감수해야 하는 피해액이 증가했기 때문이다. 두 번째는 소자의 밀도가 증가기존보다 훨씬 정밀한 공정제어가 필요하기 때문이다. 소자 밀도가 계속 증가하여 10 nm급 공정이 이루어지는 상황이며, 450 nm웨이퍼 공정에 대한 논의가 진행됨에 따라 플라

References

- [1] R. Mohan Sankaran (Ed.), Plasma processing of nanomaterials (CRC Press, Florida, 2012), pp.1-54.
- [2] S. J. Pearton. and D. P. Norton, Plasma Process. Polym. **2**, 16 (2005)
- [3] P. Mishra, Harsh and S. S. Islam, Superlattice Microst. **64**, 399 (2013)
- [4] J. M. Stilahn, K. J. Trevino and E. R. Fisher, Annu. Rev. Anal. Chem. **1**, 261 (2008)
- [5] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing (Wiley-Interscience, New Jersey, 2005), pp. 387-534.
- [6] A. Grill, Cold Plasma in Materials Fabrication: From Fundamentals to Applications (IEEE PRESS, New York, 1994), pp. 114-150.
- [7] G. S. Selwyn, AVS monograph series: Optical diagnostic techniques for plasma processing, edited by Woody weed (AVS Press, New Work, 1993), pp 27-80.
- [8] K. Han, E. S. Yoon, J. Lee, H. Chae, K. H. Han and K. J. Park, Ind. Eng. Chem. Res. **47**, 3907 (2008)
- [9] K. Ukai and K. Hanazawa, J. Vac. Sci. Technol. **16**, 385 (1979)
- [10] G. Fortunato, J. Phys. E Sci. Instrum., **20**, 1051 (1987)
- [11] V. Patel, B. Singh and J. H. Thomas III Appl. Phys. Lett. **61**, 1912 (1992)
- [12] M. N. A. Dewan, P. J. McNally, T. Perova and P. A. F. Herbert, Microelectron. Eng. **65**, 25 (2003)
- [13] P. Dubreuil and D. Belharet, Microelectron. Eng. **87**, 2275 (2010)
- [14] H. L. Maynard, E. A. Rietman, J. T. C. Lee and D. E. Ibbotson, J. Electrochem. Soc. **143**, 2029 (1996)
- [15] M. Kanoh, M. Yamage and H. Takada, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 1457 (2001)
- [16] M. A. Sobolewski, J. Vac. Sci. Technol. A, **24**, 1892 (2006)
- [17] M. A. Sobolewski and D. L. Lahr, J. Vac. Sci. Technol. A, **30**, 051303 (2012)
- [18] H. Jang, J. Nam, C. K. Kim and H. Chae, Plasma Process. Polym. **10**, 850 (2013)
- [19] K. Han, K. J. Park, H. Chae and E. S. Yoon, Korean J. Chem. Eng. **25**, 13 (2008)
- [20] S. J. Qin, J. Chemometr. **17**, 480 (2003)
- [21] A. J. Izenman, Modern Multivariate Statistical Techniques (Springer Science + Business Media, New York, 2008), pp. 107-313, 407-504, 597-632