

플라즈마 식각 공정에서 의사결정 알고리즘을 이용한 실시간 식각 종료점 검출

Real Time Endpoint Detection in Plasma Etching Using Decision Making Algorithm

노 호 택*, 박 영 국*, 한 승 수**

Ho-Taek Noh*, Young-Kook Park*, Seung-Soo Han**

Abstract

The endpoint detection (EPD) is the most important technique in plasma etching process. In plasma etching process, the Optical Emission Spectroscopy (OES) is usually used to analyze plasma reaction. And Plasma Impedance Monitoring (PIM) system is used to measure the voltage, current, power, and load impedance of the supplied RF power during plasma process. In this paper, a new decision making algorithm is proposed to improve the performance of EPD in SiO_x single layer plasma etching. To enhance the accuracy of the endpoint detection, both OES data and PIM data are utilized and a newly proposed decision making algorithm is applied. The proposed method successfully detected endpoint of silicon oxide plasma etching.

요 약

플라즈마 식각 공정에서 식각 종료점 검출은 중요한 요소이다. Optical Emission Spectroscopy (OES) 는 플라즈마 반응을 분석하는데 사용한다. 그리고 Plasma Impedance Monitoring (PIM) 은 플라즈마 공정 중에 RF power에 의한 voltage, current, power, impedance를 분석하는데 사용한다. 본 논문에서는 새로 제안하는 의사결정 알고리즘을 이용하여 single layer 산화막 플라즈마 식각에서 식각 종료점 검출의 성능을 향상시키는 것을 제안한다. 식각 종료점 검출의 정확도를 높이기 위해 OES 데이터와 PIM 데이터들을 의사결정 알고리즘에 모두 적용하여 사용한다. 제안된 방법은 SiO_x 플라즈마 식각에서 식각 종료점을 정확하게 검출한다.

Key words : Endpoint Detection (EPD), Decision Making Algorithm, Optical Emission Spectroscopy (OES), Plasma Impedance Monitoring (PIM), Hidden Markov Model (HMM)

* Dept. of Information and Communication Engineering, Myongji University

★ Corresponding e-mail : authorshan@mju.ac.kr 031-330-6118

※ Acknowledgment: This work was supported by the Technology Innovation Program, (No. 10058109) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MI, Korea).

Manuscript received Nov 6, 2015; revised Dec 14, 2015 ; accepted Dec 16, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

고집적화 된 반도체 소자의 미세화가 진행되면서 반도체 제조 공정에서 정확한 컨트롤의 필요성이 증가하고 있다. 정확한 식각 컨트롤 기술은 목표 레이어를 제거하기 위해 과다 식각과 과소 식각을 방지해야한다. 고집적 반도체 소자의 제조에서, 플라즈마 식각동안 정확한 식각 종료점 검출은 중요한 요소이다. 최근에는 식각 종료점을 검출하기 위해 다양한 센서들이 반도체 제조 장비에 설치되었다.

Optical Emission Spectroscopy (OES)는 플라즈마에 직접 닿지 않고 측정을 하는 비침투식 방법의 장점이 있기 때문에 플라즈마 상태를 모니터링 하는 공정에 가장 널리 사용되고 있는 센서이다. OES는 플라즈마 챔버로부터 방출된 빛의 파장에 대한 세기를 수집하고, by-product의 화학적 또는 물리적 상태를 모니터링 할 수 있다. 하지만, OES 데이터의 양이 너무 방대하고 데이터에 노이즈가 있어서 정확한 분석 방법을 사용하지 않으면 데이터를 해석할 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해서 OES Signal to Noise Ratio (OES-SNR)와 Principal Component Analysis (PCA), linear regression method, expanded Hidden Markov Model (eHMM)을 OES 데이터에 적용시켰다. 일반적으로 OES 데이터만을 이용하여 플라즈마 식각에서 식각 종료점을 검출하는 방법을 많이 사용하고 있다. 하지만, 다른 센서를 추가함으로써 식각 종료점 검출의 정확도를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 식각 종료점 검출의 정확도를 향상시키기 위해 Plasma Impedance Monitoring (PIM) 센서를 OES 센서와 같이 사용하였다. PIM은 RF power 매칭 장치에 설치되는 전기 센서이며, 플라즈마 공정 중에 공급되는 RF power의 voltage, current, power, impedance를 측정하기 위해 사용된다. Voltage, current, power, impedance들로 되어 있는 PIM 데이터는 플라즈마 챔버의 상태를 분석하는데 사용된다. 그러므로 PIM 데이터와 OES 데이터를 같이 분석하여 OES 데이터만을 사용했을 때보다 식각 종료점 검출의 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 새로운 의사결정 알고리즘을 제안하였으며, 이를 이용해서 SiOx single layer 플라즈마 식각에서 식각 종료점 검출의 성능을 향상시키는 방법을 제안한다. 이 방법은 OES와 PIM 데이터를 사용하는 것으로, 다음과 같이 진행한다. 먼저 OES를 이용하여 챔버 안에서 일어나는 플라즈마 intensity 데이터를 수집한다. 수집한 OES 데이터에서 OES-SNR을 이용하여 의미 있는 파장들을 선택한다. 이렇게 선택된 파장의 데이터에 PCA 알고리즘을 적용하여 차원 축소를 하고나면, 종료점 이전 구간과 종료점 이후 구간의 intensity 차이가 증가하게 된다. 차원 축소된

PCA 데이터에 선형 회귀 모델을 만들고, 이 선형 회귀 모델에 eHMM 알고리즘을 적용시키면 OES 식각 종료점이 검출된다. 여기서 eHMM은 식각 종료점 이전에서 이후로의 상태 전이 확률을 검출하기 위해서 사용된다.

네 개의 PIM 데이터 (voltage, current, power, impedance) 는 다른 특징을 가진 네 개의 PIM 모델들을 만드는데 사용된다. 이 모델들에 eHMM 알고리즘을 사용하여 각각 식각 종료점을 검출하게 되는데, 일반적으로 OES에 의한 식각 종료점 검출이 신뢰성이 높기 때문에 식각 종료점을 검출하는데 기준점을 OES 모델에서 검출된 식각 종료점으로 한다. 네 개의 PIM 모델에서 검출된 식각 종료점이 OES 모델에서 검출된 식각 종료점의 $\pm 10\%$ 시간 이내에 들어가는지 아닌지를 판단하여 최종 식각 종료점을 검출한다.

본 논문에서는 기존의 OES 데이터만을 사용한 방법과 비교하여 성능이 향상되었음을 보여 주었다. 그림 1은 본 논문에서 사용한 방법의 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

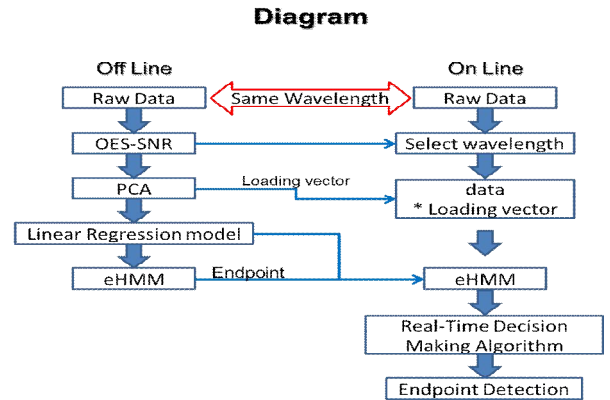


Fig. 1. Block diagram of Endpoint detection
그림 1. 종료점 검출의 블록 다이어그램

II. 본론

1. DECISION MAKING ALGORITHM

가. OES-SNR

OES는 플라즈마 챔버로부터 광학 데이터를 수집하는 가장 잘 알려진 센서 중 하나이다. 하지만, 원자마다 여러 파장이 존재하기 때문에 식각 종료점 검출을 위해 중요한 OES 파장을 선택하는 것은 쉬운 일이 아니다. 가장 잘 알려진 방법

으로는 by-product 원자나 etchant 원자들에 해당하는 파장들을 선택해서 식각 종료점을 검출하는 것이다. 그러나 이 방법은 선택된 파장이 의미 없는 파장이거나 노이즈가 포함되어 있는 파장일 확률이 있기 때문에 분석하기가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 OES-SNR을 사용하며, 이는 다음과 같이 정의된다[1][2]:

$$OES - SNR = \Delta mean / std \quad (1)$$

$\Delta mean$ 은 주 식각 구간과 과다 식각 구간의 평균값의 차이이고, std 는 전체 데이터의 표준편차이다. 식각이 진행됨에 따라 처음에 많이 발생하던 by-product가 시간이 지날수록 감소하기 때문에 by-product 성분은 OES-SNR의 양의 값으로 나타나고, 반대로 etchant는 처음에 많은 양을 소비하다가 식각이 끝나감에 따라 소비되지 못하고 남아있기 때문에 OES-SNR에서 음의 값으로 나타난다.

나. PCA

PCA는 차원 감소 방법으로 잘 알려져 있다. 주성분 분석이라고도 불리며, 이는 요인분석의 한 종류로 서로 상관되어 있는 변수들의 공통 요인을 이용하여 분석하는 기법이다.

PCA는 데이터의 특징을 잘 나타내는 고유의 주성분들을 대표 주성분 축으로 한다. 그런 뒤 주성분 축을 기준으로 데이터를 사영시키는데, 최소의 정보 손실로 광범위한 데이터를 대표하는 특정한 성분만을 찾아낼 수 있다는 것에 의의를 둔다. PCA의 입력 데이터는 다음과 같이 구한다:

$$X = t_1 P_1^T + t_2 P_2^T + \dots + t_k P_k^T + E \quad (2)$$

여기서 t_i 는 샘플들의 정보를 가지고 있는 스코어 벡터이고, P_i 는 시스템의 정보를 포함하고 있는 로딩 벡터이다. P_i 벡터는 공분산 행렬의 고유벡터이다.

주성분 축은 고유벡터와 고유값을 통해 구해줄 수 있다. 고유벡터와 고유값에 대한 표현을 아래와 같다:

$$Cov(X)P_i = \lambda_i P_i \quad (3)$$

여기서 λ_i 는 $Cov(X)$ 의 고유값이다[2][3]. 본 논문에서는 off-line 모델링 과정 중에 OES-SNR을 통해 선택한 식각 신호들을 사용해서 고유값을 계산하여 식각 상태를 정의한다. 추출된 주 특징들은 on-line 데이터를 사용하여 식각 종료점을 검출하는데 사용된다[4].

다. 선형 회귀 모델을 이용한 eHMM

선형 회귀 모델은 segmental 상태의 추정 모델을 설정하는데 사용되는데, 본 논문에서는 식각 종료점 이전 구간(주 식각 구간)과 식각 종료점 이후 구간(과다 식각 구간)의 추정 모델을 만드는데 사용된다. 그림 2에서, regression 1은 식각을 시작하는 곳에서부터 식각의 상태가 변화하는 곳까지의 구간을 의미하고 regression 2는 식각의 상태가 변화하는 곳 이후인 구간을 의미한다.

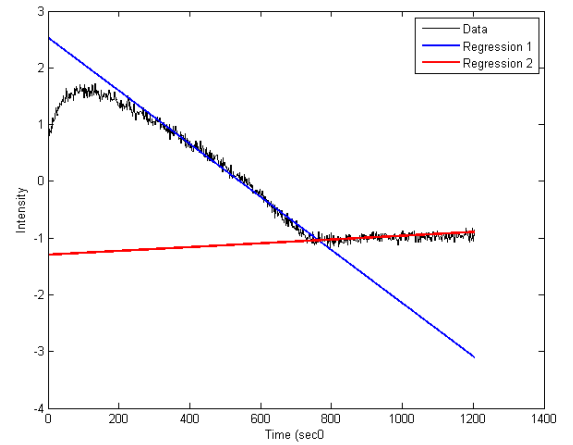


Fig. 2. Each state's observation model using linear regression model

그림2. 선형 회귀 모델을 이용한 각 상태의 관측 모델

종료점 검출은 eHMM을 사용한다. eHMM은 Hidden Markov Model의 비터비 알고리즘을 개선한 것이다. 비터비 알고리즘이란 데이터와 모델이 주어졌을 때 데이터가 어떤 상태천이를 거쳐 발생되었는지를 확률적으로 추정해서 알아내는 방법이며 현재의 상태는 바로 이전의 상태에 의해서만 영향을 받는다는 가정 하에 동작한다. 본 논문에서는 주 식각 구간과 과다 식각 구간을 나눠서 선형 회귀 모델을 만들고 주 식각 구간에서

과다 식각 구간으로 상태천이를 하는 확률이 제일 높은 것을 찾는 Markov 체인 규칙을 구성함으로써 식각 종료점으로 검출한다[1][5]. 그림 3에서 S1은 주 식각 구간이고, S2는 과다 식각 구간이다.

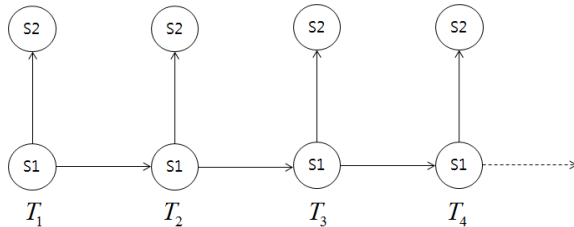


Fig. 3. The state transition of eHMM
그림 3. eHMM의 상태 천이

라. 의사결정 알고리즘

의사결정 알고리즘은 OES 데이터와 4개의 PIM 데이터 (voltage, current, power, impedance)를 사용하여 식각 종료점 검출의 성능을 향상시킨다. OES 모델과 PIM 데이터 모델들에 의해 각각의 식각 종료점을 검출하게 되고 의사결정 알고리즘에서 가중치를 주어서 최종 식각 종료점을 결정하게 된다.

PIM은 식각 공정이 진행되는 챔버 내부를 측정하는 센서가 아니라 RF 매칭 장치에 설치되는 센서이기 때문에 식각 종료점 검출에 약간의 시간차가 존재한다. 하지만 OES는 플라즈마의 상태를 직접적으로 측정하는 것으로 식각 종료점 검출의 시간차가 거의 존재하지 않는다. 그러므로 OES에 의해 검출된 식각 종료점은 PIM에 의해 검출된 식각 종료점보다 정확도가 높기 때문에 OES 식각 종료점에 가중치를 주어서 최종 식각 종료점을 결정하였다. OES 식각 종료점과 OES 식각 종료점이 -10% 사이에 PIM 모델로 검출된 식각 종료점이 하나라도 존재한다면, OES 식각 종료점이 최종 식각 종료점으로 검출된다. 만약에 그렇지 않고 OES 식각 종료점과 OES 식각 종료점의 +10% 사이에 PIM 모델로 검출된 식각 종료점이 하나라도 검출되면 검출된 PIM 식각 종료점이 최종 식각 종료점이 된다. 이 두 경우에 해당하지 않으면 OES 식각 종료점의 +10% 지점이 최종 식각 종료점으로 검출된다.

그림 4는 의사결정 알고리즘의 블록 다이어그램을 보여준다.

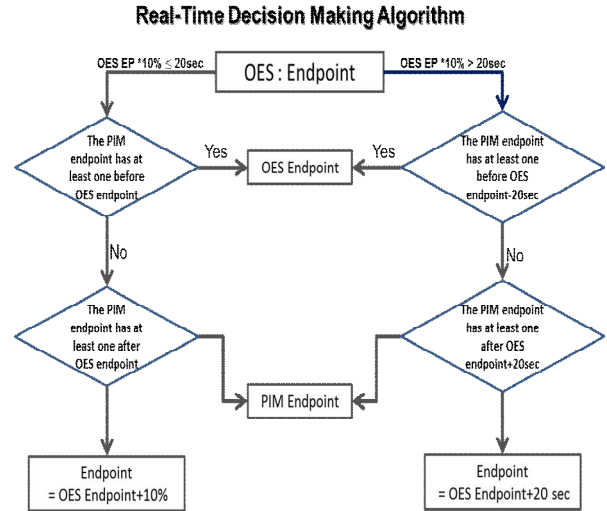


Fig. 4. Block diagram of Decision Making Algorithm
그림 4. 의사결정 알고리즘의 블록 다이어그램

2. EQUIPMENTS AND EXPERIMENT

실험한 장비는 플라즈마 사의 Miniplasma-Station을 사용하였으며, 데이터는 SiOx single layer 플라즈마 식각 실험을 통해서 얻었다. 예측한 식각 종료점은 식각율을 계산하여 추정을 하였다. 식각율은 박막두께를 식각 전과 식각 후에 측정하여 계산하였으며, 장비는 a-step과 reflectometer를 사용하였다. 식각 가스로는 CF4와 O2 가스를 사용하였다. CF4 가스는 Si 반도체를 식각하는데 주로 사용되며, O2는 식각 속도를 증가시키거나 포토레지스트를 식각하는데 사용된다.

실험에 사용된 시편은 퍼니스로 SiO2의 산화막을 올린 4인치의 웨이퍼를 사용하였고, 박막 두께 측정 부위는 5 곳의 서로 다른 곳을 선정하였으며, 측정 두께는 5 곳의 평균값을 사용했다. 실험은 표 1의 실험계획법을 이용하여 최적의 레시피를 찾고, 그 레시피를 이용하여 반복 실험을 하였다. 실험계획법은 중심 합성계획법 (central composite design)을 사용하여 계획하였고, 계획된 레시피를 각각 실험을 하여 식각율이 가장 높은 최적의 레시피를 찾았다. 표 2는 실험을 통하여 찾은 최적의 레시피이다.

Table 1. The Recipe by Design Of Experiment (DOE)

표 1. 실험계획법에 의한 레시피

Run Order	Std. Order	CF ₄	POWER	Pressure
1	2	40	450	20
2	1	20	350	20
3	4	20	450	40
4	3	40	350	40
5	6	30	400	30
6	5	30	400	30
7	11	30	400	30
8	7	40	350	20
9	12	30	400	30
10	10	40	450	40
11	8	20	450	20
12	9	20	350	40
13	20	30	400	30
14	18	30	400	46.33
15	13	13.67	400	30
16	16	30	481.65	30
17	17	30	400	13.67
18	15	30	318.35	30
19	14	46.33	400	30
20	19	30	400	30

Table 2. The Best Recipe

표 2. 최적 레시피

CF ₄	30
POWER	400
Pressure	30

반복 실험을 할 때, SP-OES와 PIM을 이용하여 OES 데이터들과 PIM 데이터들을 수집하였고, OES 데이터들은 OES-SNR를 이용하여 by-product 파장을 가진 데이터들을 선택하였다. 그림 5(a)는 OES의 모든 파장을 기록한 원 데이터이고, 그림 5(b)는 (식 1)에 정의된 OES-SNR를 계산한 결과를 파장별로 표시한 그림이다. 여기서 양의 값은 by-product 원소에 의한 파장이며 음의 값은 etchant 원소에 의한 파장이다. 본 연구에서는 by-product의 파장 중에서 변화량이 큰 파장들을 선택하였으며, 그 결과는 그림 5(c)에서 보여주고 있다.

OES-SNR에 의해 주 시각 구간과 과다 시각 구간의 intensity의 차가 큰 파장들을 선택하였지만 이 신호들을 직접 사용해서 시각 종료점을 검출하기에는 변화량이 크지 않아서 어려움이 따른

다. 이런 문제를 해결하기 위한 과정인 PCA를 사용하였다.

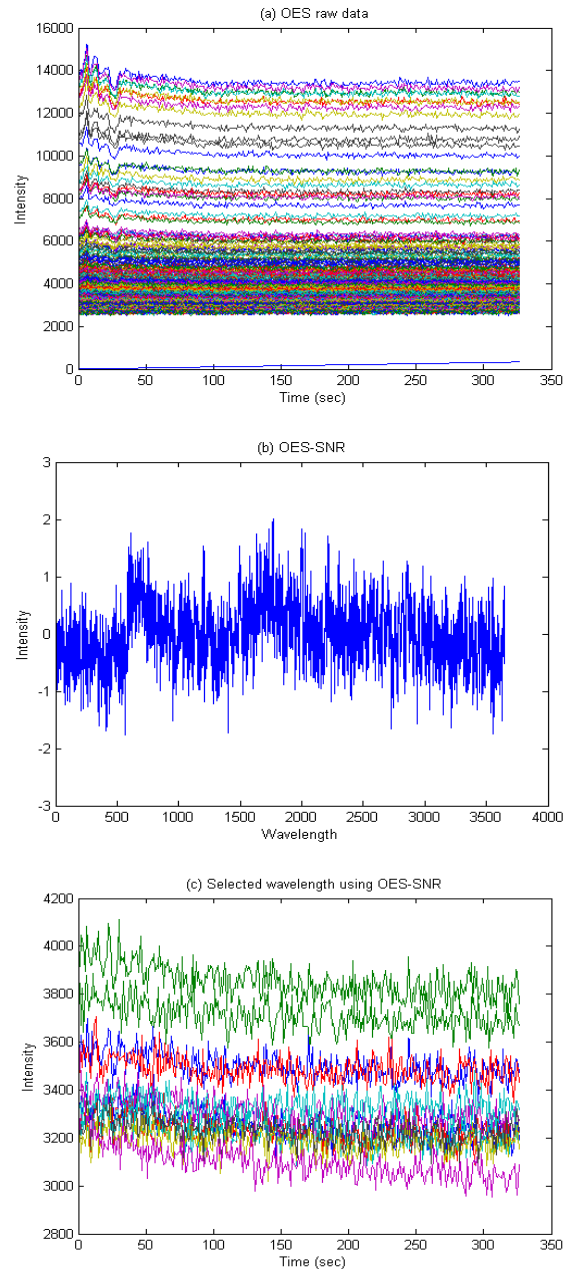


Fig. 5. (a) OES raw data, (b) Result of OES-SNR, (c) Selected wavelength using OES-SNR

그림 5. (a) OES 원 데이터, (b) OES-SNR의 결과, (c) OES-SNR에 의해 선택된 파장

그림 6은 그림 5의 선택된 파장들에 PCA를 적용한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 PCA 처리 전(그림 5)과 처리 후(그림 6)의 차이가 분명함을 볼 수 있으며, 이를 이용하면 시각 종료점 검출이 좀 더 용이하게 된다. PCA 처리한 OES 데이터에 선형 회귀를 이용하여 모델을

만들었으며, 이 모델에 eHMM 알고리즘을 이용하여 OES 데이터에 의한 식각 종료점을 검출하였다. 이러한 과정을 네 종류의 PIM 데이터들에도 적용하여 네 개의 PIM 데이터에 의한 식각 종료점을 각각 검출하였다. OES 모델에서 검출한 종료점과 PIM 모델에서 검출한 네 개의 종료점들에 새로이 제안한 의사결정 알고리즘을 적용하여 최종 식각 종료점을 결정하였다.

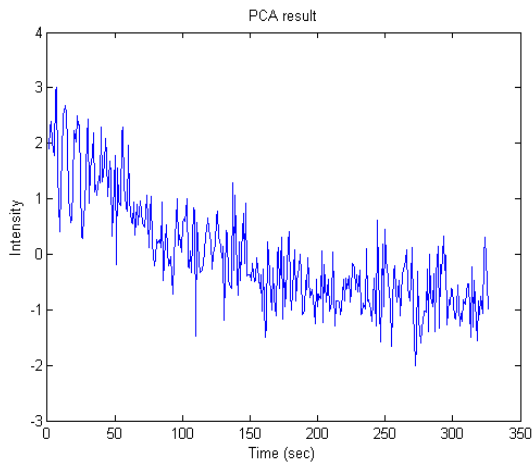


Fig. 6. PCA of selected wavelength
그림 6. 선택된 파장의 PCA 결과

3. RESULTS

표 3은 OES만을 사용해서 검출한 식각 종료점과 본 연구에서 제안한 의사결정 알고리즘을 사용해서 검출한 식각 종료점 결과를 보여준다. 오차율을 비교해 보면 OES 데이터만을 이용해서 eHMM을 적용하여 검출한 종료점은 평균 6.7%이고, 본 연구에서 제안한 의사결정 알고리즘에 의해 검출한 종료점은 평균 3.2%임을 알 수 있다. 의사결정 알고리즘에 의한 오차율이 기존의 알고리즘보다 높은 정확도를 보여주고 있는데, 이는 하나의 센서만을 사용한 기존의 식각 종료점 검출 알고리즘 보다는 다른 센서를 추가하고 의사결정 알고리즘을 이용하면 많은 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 보여준다.

Table 3. The Endpoint Detection Result
표 3. 종료점 검출 결과

	Endpoint Detection				
	predicted endpoint	OES		Decision Making	
		result	error rate	result	error rate
Run 1	117	108	7.7%	108	7.7%
Run 2	104	98	5.8%	106	1.9%
Run 3	104	96	7.7%	104	0%
Run 4	90	85	5.6%	93	3.3%
mean error rate			6.7%		3.2%

III 결론

본 논문에서는 새로운 의사결정 알고리즘을 사용하여 종료점을 검출하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 single layer 플라즈마 식각 공정에서 OES 데이터와 PIM 데이터들을 사용하여 식각 종료점을 검출하였고, OES 데이터만을 사용한 종료점 검출보다 약 52%의 오차율 성능 향상을 보여주었다. 이 방법은 정확한 식각 종료점의 검출 결과를 보이고 이는 고집적도의 매우 작은 집적 회로에 대한 향후 연구에서도 긍정적인 영향을 줄 것으로 사료된다.

References

[1] KIM, Seung-Gyun, et al. Endpoint Detection in Low Open Area Ratio Plasma Etching Using Hybrid Method. ECS Transactions, 44(1), pp.1081-1086, 2012.

[2] SHIN, Sung-Hwan, et al. Endpoint Detection for Single Layer Plasma Etch Using Hybrid Fuzzy Inference Systems. ECS Transactions, 60(1), pp.875-880, 2014.

[3] SMITH, Lindsay I. A tutorial on principal components analysis. Cornell University, USA, 51: 52, 2002.

[4] WHITE, David A., et al. Low open-area endpoint detection using a PCA-based T 2 statistic and Q statistic on optical emission

spectroscopy measurements. Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on, 13(2), pp.193-207, 2000.

[5] JEON, Sung-Ik, et al. Endpoint Detection Strategy in Bosch Process Using PCA and HMM. ECS Transactions, 44(1), pp.1087-1091, 2012.

BIOGRAPHY

Ho-Taek Noh (Student Member)



2014 : BS degree in Information and Communication Engineering, Myongji University.

He is currently a MS degree candidate at Myongji University

Young-Kook Park (Student Member)



2004 : BS degree in Information and Communication Engineering, Myongji University.

2006 : MS degree in Information and Communication Engineering, Myongji University.

He is currently a Ph.D degree candidate at Myongji University

Seung-Soo Han (Member)



1986 : BS degree in Electrical Engineering, Yonsei University.

1988 : MS degree in Electrical Engineering, Yonsei University.

1996 : Ph.D. degree in Electrical and Computer Engineering,

Georgia Institute of Technology.

He is currently a Professor in the department of Information and Communication Engineering, at Myongji University.