

EPD 신호궤적을 이용한 플라즈마 식각공정의 실시간 이상검출

Real-Time Malfunction Detection of Plasma Etching Process using EPD Signal Traces

차상엽, 이석주, 고택범, 우광방
(Sang-Yeob Cha, Seokju Yi, Taekbeom Koh, Kwang Bang Woo)

Abstract : This paper presents a novel method for real-time malfunction detection of plasma etching process using EPD signal traces. First, many reference EPD signal traces are collected using monochromator and data acquisition system in normal etching processes. Critical points are defined by applying differentiation and zero-crossing method to the collected reference signal traces. Critical parameters such as intensity, slope, time, peak, overshoot, etc., determined by critical points, and frame attributes transformed signal-to symbol of reference signal traces are saved. Also, UCL(Upper Control Limit) and LCL(Lower Control Limit) are obtained by mean and standard deviation of critical parameters. Then, test EPD signal traces are collected in the actual processes, and frame attributes and critical parameters are obtained using the above mentioned method. Process malfunctions are detected in real-time by applying SPC(Statistical Process Control) method to critical parameters. the Real-time malfunction detection method presented in this paper was applied to actual processes and the results indicated that it was proved to be able to supplement disadvantages of existing quality control check inspecting or testing random-selected devices and detect process malfunctions correctly in real-time.

Keywords : real-time malfunction detection, plasma etching process, end point detection, differentiation and zero-crossing method, critical parameters, statistical process control

I. 서론

반도체 생산공정은 복수의 단위공정들이 순서적으로 연결되어 구성되고, 반도체 디바이스의 품질과 생산성을 향상시키기 위해 각 단위공정의 품질관리검사가 수행된다. 반도체 생산의 단위공정은 25매 또는 50매의 웨이퍼를 한 단위로 처리하는 batch 생산방식으로 수행되고 처리된 한벌의 웨이퍼중에서 랜덤하게 추출된 표본을 검사한다. 하지만 랜덤하게 추출된 표본의 검사만으로는 처리된 모든 디바이스의 품질을 보장할 수 없고, 공정처리가 완료된 후에야 비로소 공정이상을 검출할 수 있으므로 이상이 발생한 공정에서 같은 이상이 반복되거나 다음공정에 이상이 과급되는 단점을 갖고 있다. 실제 반도체 생산라인에서는 플라즈마 식각공정을 수행하면서 EPD 장비의 화면에 나타나는 EPD 신호궤적을 공정운영자가 육안으로 감시하여 공정이상을 검출하고 있는 실정인데, 기준신호궤적과 비슷한 EPD신호궤적에 대해서는 육안검사에 의한 이상검출이 사실상 어렵고, 반복되는 육안검사에 의해 공정운영자는 쉽게 피로하게 되어 효율적인 이상검출방안이 요구된다.

최근 Baker[1] 등은 신경회로망을 이용한 RIE (Reacti-ve Ion Etching) 공정[2][3]의 시계열 모델링에 의해 실시간 공정이상검출이 가능함을 보였으나 이상검출 대상신호가 직접적인 지표가 되는 공정출력이 아니고 공정입력의 일종인 가스흐름을 이용하여 신경회로망을 이용한 관리도가 기존관리도보다 불량을 정상으로 보는 β -error는 작지만 정상을 불량으로 보는 α -error는 상당히 크다

는 Yazici[4] 등의 발표에 의해 문제점이 제기되었다. Flinchbaugh[5]등은 플라즈마 식각공정[6]에서 기준 EPD 신호궤적을 정의한 후 실제시험궤적과 기준신호궤적에 DTW(Dynamic Time Warping) 함수[7]를 적용하여 두 신호궤적을 대응시키고 영역별 특성파라미터를 추출, 비교하는 실시간 공정이상 검출 방안을 제안했다. 하지만 최적의 DTW 함수를 구하기 위해 사용되는 DP(Dynamic Programming) 알고리즘[8]은 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있고 DTW 함수의 성능에 영향을 미치는 실제 신호궤적의 시작점과 끝점이 정확하게 결정된 후에야 비로소 DTW 함수의 최적화가 가능하게 되어 실시간 공정이상검출의 적용이 사실상 어렵게 된다.

따라서 본 논문에서는 반도체 생산공정에서 필수적인 플라즈마 식각공정에서 이러한 단점보완을 위한 실시간 공정이상 검출에서 다음 단계에 의한 연구가 수행되었다.

- Monochromator와 데이터 수집장치를 이용하여 정상적인 식각공정에 대한 복수의 EPD 기준신호궤적을 저역통과필터를 통과시켜 잡음을 제거하고 수집한다.
- 수집된 신호궤적에 미분과 영점교차방법을 적용하여 특성점을 검출한다.
- 기저레벨(base level) 검사에 의해 신호궤적을 복수의 영역으로 나누고 특성점에 의해 결정되는 특성 파라미터(신호강도, 기울기, 시간 피크, 오버슈트)와 기호로 변환된 파형속성을 추출, 저장한다.
- 특성파라미터의 평균치와 표준편차의 계산에 의해 관리상한 UCL과 관리하한 LCL을 구한다.
- Monochromator와 데이터 수집장치를 이용하여 실제공정에서 시험할 EPD 신호궤적을 수집한다.
- 실제 신호궤적에 대해서 단계 2,3)을 적용하여 실제궤적의 특성점, 파형속성, 특성파라미터를 추출한다.
- 실제궤적의 특성파라미터에 대해서 통계적 공정관리기법을 적용하여 실시간 공정이상검출을

진행시킨다. 위의 실시간 공정이상검출 방안에서 단계 1)~4)의 기준신호궤적과 과형모양의 영역별 특성 파라미터 추출단계는 off-line으로 수행되지만, 단계 5)~7)의 이상검출단계는 각 scan마다 순서대로 수행되므로 실시간 공정이상 검출이 가능하다. 끝으로 제안된 실시간 공정이상 검출방안을 실제공정에서 적용하여 그 효율성이 검증된다.

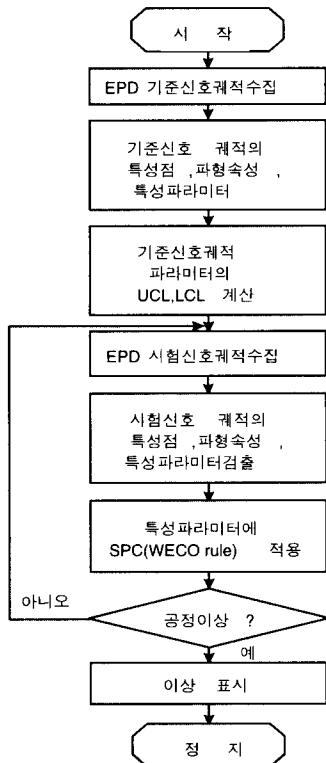


그림 1. 실시간 이상검출의 흐름도.

Fig. 1. Flowchart for real-time malfunction detection.

II. EPD 시스템과 다결정 실리콘 게이트 식각공정

본 논문에서는 실시간으로 공정이상 검출을 위한 대상 공정으로 MOS(Metal Oxide Semiconductor) 디바이스 생산의 핵심공정인 다결정 실리콘 게이트 식각공정을 선정했다.

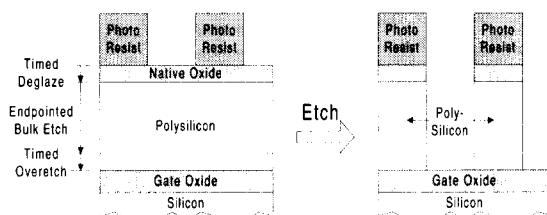


그림 2. 다결정 실리콘 게이트 식각공정(2 단계).

Fig. 2. Polysilicon gate etch process(2 Steps).

다결정 실리콘 게이트 식각공정의 목표는 하부의 게이트 산화막을 손상시키지 않고 다결정 실리콘 박막을 lithography 패턴에 따라 정밀하게 식각하면서 동시에 생산성 향상을 위해 신속하게 식각하는 것이다. 이를 위해 다결정 실리콘 게이트 식각공정은 1)설정시간 동안 자연 산화층을 식각하는 deglaze 공정, 2)EPD 장비[9]를 이용하여 식각의 끝점을 검출, 다결정 실리콘의 식각을 종료하는 이방성의 신속한 대량 식각, 3)다결정 실리콘과 oxide의 식각선택도(약 100:1)를 이용하여 불균일하게 남

아있는 다결정 실리콘을 설정시간 동안 서서히 식각하는 overetch의 3단계[10]로 수행되는데, 본 논문에서는 EPD 장비를 이용하여 식각의 끝점을 검출하는 예비단계로 1) 설정시간 동안 자연산화층을 식각하는 deglaze 공정, 2) 설정시간동안 다결정 실리콘을 식각하는 대량 식각의 2 단계(그림 2)에 의해 수행되었다.

다결정 실리콘 박막을 신속정밀하게 식각하기 위해서는 대량 식각률을 크게, 그리고 균일하게 식각이 되도록 하여 overetch 시간을 최소화할 수 있도록 한다. 그림 3에 mono chromator[11]와 데이터 수집장치를 이용하여 실시간(감시주기 0.2초)으로 식각반응실의 EPD 신호궤적을 계측하기 위한 EPD 시스템을 보인다.

식각시스템에서는 식각반응실에서 플라즈마 식각이 수행될 때 화학반응에 의해 물질이 생성되거나 소멸되면서 화학물질 특유의 파장을 갖는 빛을 방출하는데 광섬유 케이블에 의해 식각 chamber와 접속된 monochromator는 식각시 화학물질이 방출하는 광파장의 강도를 감지하여 EPD 신호궤적으로 변환 출력한다. 신호변환, AD변환기능을 갖춘 Data Translation사의 DT-2831 신호수집 보드[12]와 DT-VEE 데이터 수집 소프트웨어[13]를 이용하여 저역통과 필터에 의해 잡음이 제거된 EPD신호궤적을 0.2초의 주기로 수집하고 데이터 수집장치인 486 PC의 하드디스크에 저장한다.(그림 3에서 EPD 시스템은 EPD 신호궤적을 수집하여 식각의 끝점을 검출하고 공정이상을 검출하지 않는다.)

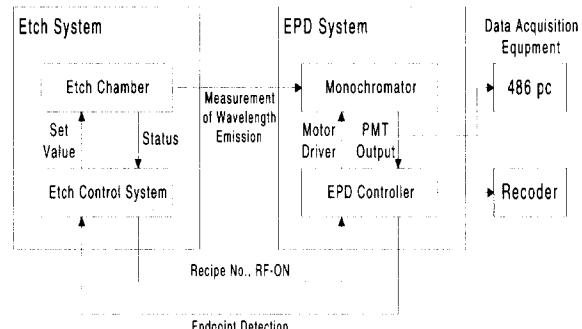


그림 3. EPD 신호궤적을 계측하기 위한 EPD 신호수집 시스템.

Fig. 3. EPD signal acquisition system for measuring EPD signal traces.

본 연구를 위해 선정된 플라즈마 식각장비는 Protech Etching System이고 사용된 EPD 장비와 Monochromator는 Xinix사의 EPD system[11]이다.

표 1. 입력요소와 범위.

Table 1. Input parameters and ranges.

입력 요소 [단위]	범위	
	하한값	상한값
Pressure[mT]	2.6	8
Source Power[W]	960	1440
Bottom Power[W]	112	200
Cl2 [sccm]	60	100
O2 [sccm]	0	19
Back-He[T]	6	14

Protech 식각장비로 다결정 실리콘 게이트 식각공정을 운전하기 위한 입력변수는 실험계획법에 의해 다수의 후보 입력변수 중에서 출력에 대한 주효과와 교차효과, 그리고 장비의 특성을 고려하여 선택된다. 선택된 입력변수중에서 식각시간[sec]과 웨이퍼의 온도[°C]를 제외한 6개의 공정입력변수의 범위와 단위를 표 1에 나타낸다.

선택된 공정출력변수는 다결정 실리콘의 식각률과 균일도이며 식각두께는 그림 4와 같이 웨이퍼상의 13개 측정지점에서 opti-probe 2000 시스템[14]을 사용하여 측정되고, 식각전 두께에서 식각후 두께를 빼서 계산된다.

다결정 실리콘의 식각률을 계측하기 위해 제작된 시험판은 웨이퍼 형이 pwpt 15725, 직경이 199.50 ~ 200.50mm(8인치), 두께가 725mm(=1/1000 인치)인 실리콘 웨이퍼상에 제작되었다.

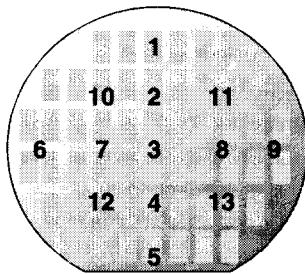


그림 4. 식각두께 계측을 위한 13 지점.

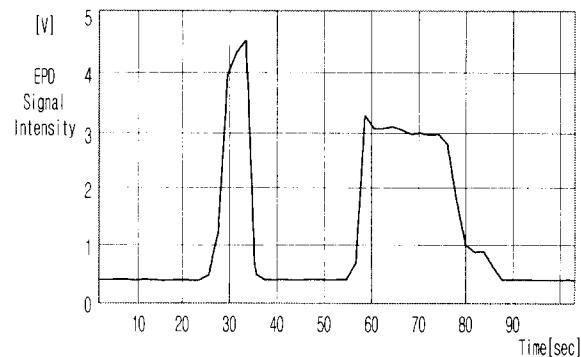
Fig. 4. The 13 points of measurements for etch thickness.

출력변수로 선정된 식각률은 다결정 실리콘의 평균수직식각률 [$\text{Å}/\text{min}$]을 의미하며, 균일도는 (1)에서 구해진다.

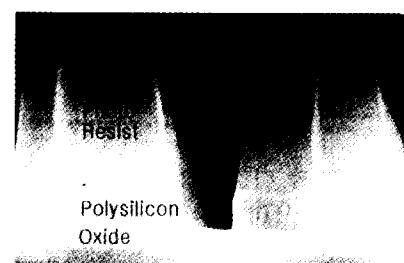
$$U = \frac{R_{max} - R_{min}}{2R_{avg}} \quad (1)$$

여기서 R_{max} , R_{min} , R_{avg} 는 웨이퍼의 13개 지점에서 측정한 다결정 실리콘의 최대, 최소, 평균수직식각률이다. 대량 식각공정을 수행하면서 생성되거나 소멸되는 화학물질의 광파장 강도를 monochromator로 검색한 결과 2780Å(SiCl)의 광파장 강도가 가장 변화가 큰 것으로 나타나서 감시 광파장을 2780Å으로 설정했다. 정상적인 2단계의 다결정 실리콘 게이트 식각공정을 수행하면서 monochromator로 수집한 EPD 신호궤적과 vertical SEM (Scanning Electron Microscope) 사진을 그림 5에 보인다. 그림 5(a)에서 처음에 EPD 강도가 기저레벨에 있다가 플라즈마 활성화를 위한 RF 전력이 입력(ON)되면 EPD 신호강도가 급격히 증가하고 RF 전력이 OFF되면 급격히 감소하는데 이때 설정된 시간동안 자연산화층을 식각, 제거하는 “deglaze” 공정이 수행된다. 다시 RF 전력이 입력(ON)되면 EPD신호강도가 급격히 증가하다가 안정상태를 보이는데 이때 설정된 시간동안 다결정 실리콘의 식각되는 대량식각이 수행된다. 그리고 이후 EPD 신호강도가 안정상태에서 급격히 감소하는 부분이 생기는데, 이부분에서 식각의 끝점이 검출된다. 이후 설정시간동안 일정레벨을 유지하다가 RF 전력이 OFF되면 EPD 신호강도는 기저레벨로 복귀되고 이것으로 하나의 2단계 다결정 실리콘 게이트 식각공정이 끝나게 된다. 양산라인의 경우, 정해진 recipe에 의한 EPD 신호궤적은 폴리머의 발생 등으로 그 형태가 변형될 수 있지만 이러한 신호궤적의 불일치는 일정한 경향을 갖고 있으며 디

스플레이상에서 보정될 수 있다[15]. 또한 사용자가 인식할 수 없는 입력이상이 발생한 경우, 예를 들어 전력이 식각장비의 계기값과 실제 공급되는 값이 다르면 EPD신호궤적은 기준으로 삼는 EPD 신호궤적과 달라지게 된다. 신호궤적의 차이는 웨이퍼의 식각강태를 좌우하는 식각률의 변동을 의미하며 이러한 상태에서 고정된 시간만큼의 overetch가 완료되면 과도한 식각에 의한 “under etch” 또는 잔류 polysilicon이 발생하게 된다. 공정입력을 인위적으로 변화시켜 이상을 발생시켰을 때 나타나는 2개의 EPD 이상신호궤적과 SEM 사진을 그림 6과 그림 7에 보인다. 그림 6(a)에 보인 EPD이상신호궤적을 그림 5의 EPD기준신호궤적과 비교할 때 육안으로도 공정이상이 발생했음을 쉽게 알 수 있고 정상적인 식각률을 초과하여 over etching후에는 그림 6(b)의 SEM사진과 같은 under Etch상태가 된다. 그림 7(a)의 EPD이상신호궤적은



(a)

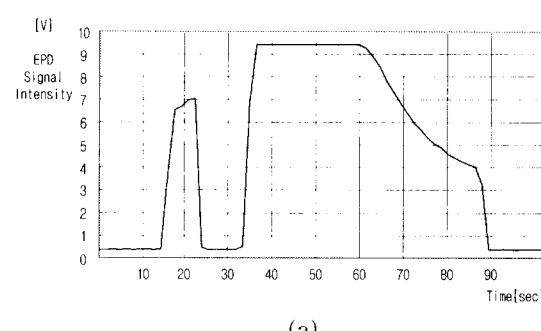


(b)

그림 5. 게이트 식각공정의 EPD 신호궤적(a) 및 vertical SEM 사진(b).

Fig. 5. Reference EPD signal trace(a) and vertical SEM picture(b) of gate polysilicon etch process.

기준신호궤적과의 육안비교에 의해서는 이상검출이 용이하지 않지만 (b)에 의하면 polysilicon이 잔류되어 있음을 확인할 수 있다.



(a)

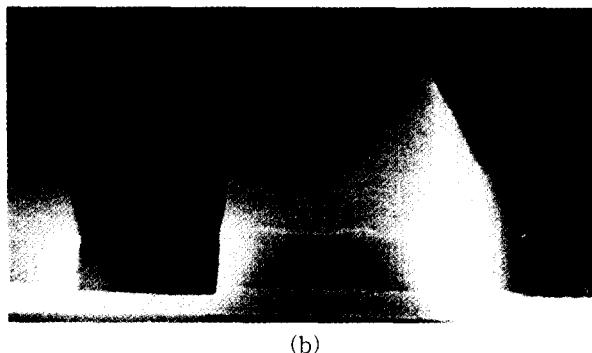


그림 6. 공정입력을 변화시킨 경우의 EPD 이상신호 케적(a)과 SEM 사진(b).
Fig. 6. Abnormal EPD signal traces(a) and SEM picture(b) when process inputs are varied.

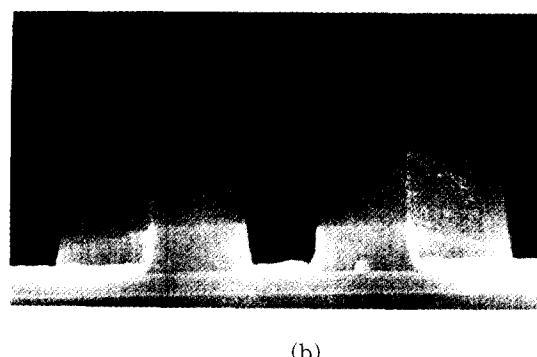
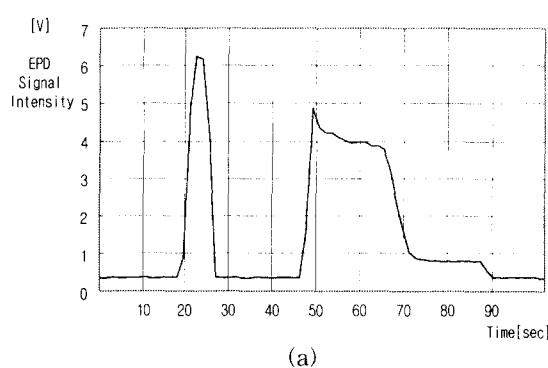


그림 7. 기준신호케적과 비슷한 EPD 이상신호케적(a)
SEM 사진(b).
Fig. 7. Abnormal EPD signal trace resembled reference
(a) and SEM picture(b).

III. EPD 신호케적에 의한 식각공정의 이상검출 알고리즘

1. EPD 신호케적의 미분

특성점 검출을 위해 본 연구에서 사용하는 미분 알고리즘은 심전도의 해석에서 많이 사용되고 있는 “최소자승법”[16]으로, 홀수개의 샘플링된 데이터에 가장 근접하는 함수를 구하는 근사치 방법이다. 이 방법은 얻어진 데이터와 구하려는 함수간의 오차를 다음과 같이 최소화한다. 구하고자 하는 함수의 i 번째 값이

$$P(x_i) = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 \quad (2)$$

이고, 주어진 데이터의 갯수가 9라고 하면 x_i 는 다음 집합의 값을 갖는다.

$$x_i \subset \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\} \quad (3)$$

i 번째 주어진 데이터와 근사화 함수간의 오차는 b

$$\begin{aligned} e_i &= p(x_i) - y_i \\ &= a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 - y_i \quad k-4 \leq i \leq k+4 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 k 는 근사함수에서 미분을 구하기 위한 중심점을 의미한다.

9개의 원데이터와 근사화함수간의 평균자승오차는

$$e_i^2 = \sum_{i=k-4}^{k+4} (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 - y_i)^2 \quad (5)$$

이 오차를 최소화하기 위하여 (5)를 미지의 계수 a_0 , a_1 , a_2 에 대하여 각각 편미분하여 0이 되도록 하고 이 식들을 풀어 정리하면 a_1 의 값은 (6)과 같다.

$$60a_1 = \sum_{i=k-4}^{k+4} x_i y_i \quad (6)$$

(2)의 근사화함수를 x_i 에 대하여 미분하고 중심점($x_k = 0$ 일 때)에서 미분치를 구하면

$$\begin{aligned} P'(0) &= a_1 \\ &= \frac{1}{60} (-4y_{k-4} - 3y_{k-3} - 2y_{k-2} - y_{k-1} \\ &\quad + y_{k+1} + 2y_{k+2} + 3y_{k+3} + 4y_{k+4}) \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 본 연구에서는 0.2초의 감시주기로 양자화된 EPD 신호케적의 특성점을 검출하기 위해 (7)의 1차미분을 사용한다.

2. 영점교차에 의한 특성점 후보의 검색

신호케적에서 특성점을 찾기 위해 본 연구에서는 원신호의 미분치를 이용하여 기울기가 변화하는 점의 위치를 찾는다[17]. 그림 8에서 보는 바와 같이 파형 $f(t)$ 가 주어졌을 때 이 파형의 미분치 $f'(t)$ 는 그림 8의 하단과 같이 되고, 이 경우 기울기가 변화하는 변곡점이 a, b, c의 3점에서 나타난다. 미분치를 구하기 위한 점을 기준으로 양 옆의 기울기를 서로 곱한 값의 부호를 이용하여 특성점 후보들의 위치를 찾는다. 점 a의 경우, 점 a를 중심으로 양 옆의 점들의 기울기를 곱한 값은 0이 되고, 우측의 기울기가 0이 아니므로 점 a는 특성점이 된다. 점 c의 경우는 좌측의 기울기가 0이 아니므로 역시 특성점이 된다.

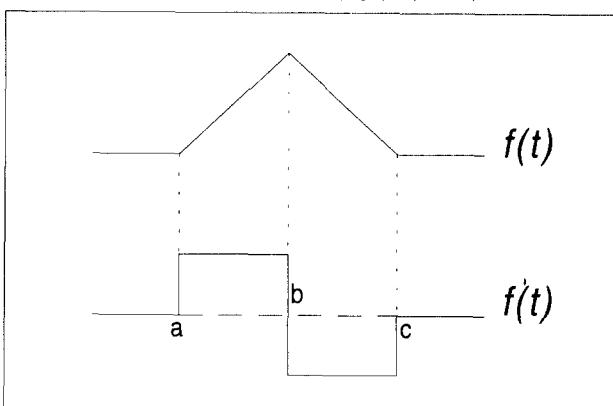


그림 8. 영점교차를 이용한 특성점 후보의 검출.

Fig. 8. Detection of the critical point candidate by zero-crossing.

점 b의 경우는 기울기의 곱이 음수가 되는데, 이 경우에는 양 옆에서 기울기의 부호가 바뀌는 상위정점이나 하위정점의 특성을 보이므로 특성점으로 인식한다. 서로의

기울기를 곱한 값이 0이면 그 점은 시작점 또는 끝점 후보가 되며, 음수이면 그 점은 상위나 하위정점의 후보가 된다. 그러나, 후보점들은 기저선상에 있는 작은 잡음까지도 검출하게 되므로 이 후보점들의 적합성을 판별해야 한다.

3. 특성점 후보의 속성결정

영점교차에 의하여 검출된 특성점 후보들은 각각의 속성을 갖는데, 이 가운데에는 잡음에 의한 속성도 포함될 수 있으며 특성점 후보들에 대한 적합성 판정이 필요하고, 후보점들의 속성을 결정하는 파라미터들은 1)현후보점에서 다음 후보점까지의 평균 기울기, 2)전후보점에서 현후보점까지의 평균 기울기, 3)현후보점의 위치, 4)현후보점의 높이, 5) 1)과 2)에 의해 결정되는 속성 등이다. 결정된 후보점 속성의 형태는 그림 9와 같이 6가지로 구분된다. 여섯가지 구분속성은 “어떤 파형이 기저선상에서 시작되려면 hu나 hd의 속성을 갖는 시작점을 거치고 ud나 du의 속성을 갖는 상위나 하위정점을 거쳐서 uh나 dh의 속성을 갖는 끝점을 거치게 된다.”는 예측을 기반으로 한다.

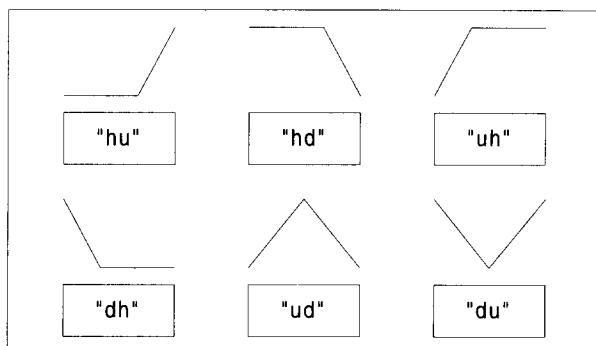


그림 9. 후보점 속성의 6가지 형태.

Fig. 9. The six patterns of attributes of candidate point.

이와같은 예측에서 검출된 특성점 후보의 속성을 결정하는 알고리즘의 흐름도를 그림 10에 보인다.

본 논문에서 양과 음의 기울기 문턱치 α_P , α_N 은 정상적인 15배의 식각실험에서 최대값과 최소값을 계산하여 $\alpha_P=0.015$, $\alpha_N=-0.01$ 로 결정했다. 결정된 특성점 후보들의 속성은 잡음으로 인한 성분을 검출하는 병합단계에서 특성점 후보들의 적합성을 판정하는 변수로 사용된다.

4. 연속이산 신호비교에 의한 잡음제거

신호에 유입된 잡음을 후보점으로 잘못 인식하는 것을 제거하기 위한 알고리즘은 실험을 통하여 연속적으로 들어오는 신호 가운데 잡음성분들이 갖는 현상을 확인하고, 이 성질을 이용하여 일정한 조건들을 만족하는 피크를 잡음으로 간주하여 특성점 배열에서 삭제하는 알고리즘이다[18],[19]. 신호에서 나타나는 피크들을 P_1 , P_2 , P_3 , …으로 나타날 때, i 번째 피크 P_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_i = (P_{x_i}, P_{y_i}) \quad (8)$$

여기서 P_{x_i} 는 후보점의 x좌표(시간), P_{y_i} 는 후보점의 y좌표(전압)이다. 실험을 통하여 대부분의 잡음성분의 피크 P_{i-1} 은 근접한 피크들 P_{i-3} , P_{i-2} , P_i 와 다음 조건들을 만족하는 것으로 나타난다.

조건 1 :

$$(P_{y_{i-3}} \leq P_{y_{i-1}} \wedge P_{y_{i-2}} \leq P_{y_i}) \vee (P_{y_{i-3}} \geq P_{y_{i-1}} \wedge P_{y_{i-2}} \geq P_{y_i}) \quad (9-a)$$

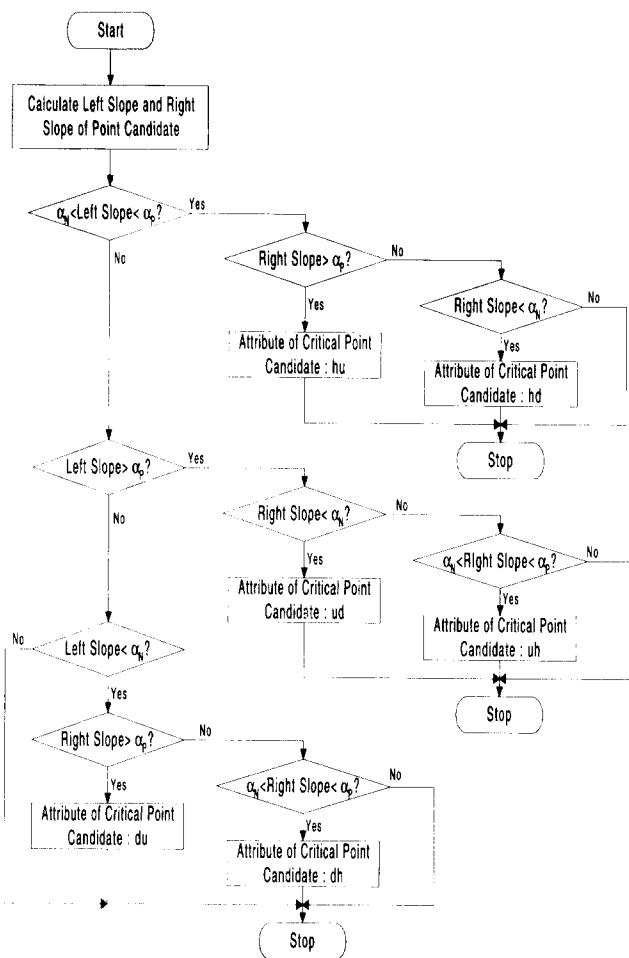


그림 10. 후보점 속성을 결정하는 알고리즘의 흐름도.

Fig. 10. Flowchart of the algorithm to determine attribute of candidate point attribute.

조건 2 :

$$|P_{y_{i-1}} - P_{y_{i-2}}| \leq \epsilon_y \quad (9-b)$$

조건 3 :

$$|P_{x_{i-1}} - P_{x_{i-2}}| \leq \epsilon_x \quad (9-c)$$

여기서 ϵ_x , ϵ_y 는 각각 피크의 지속시간과 크기차이에 대한 문턱치이다. α 를 계산한 EPD 신호계적의 분석과 샘플링시간(0.2초)에 의해 $\epsilon_x=0.6$ 초로, ϵ_y 는 생산공정에서 EPD 신호계적이 수평한 구간에서의 수평선을 기준으로 변동량의 최대값인 0.3V로 설정하였다.

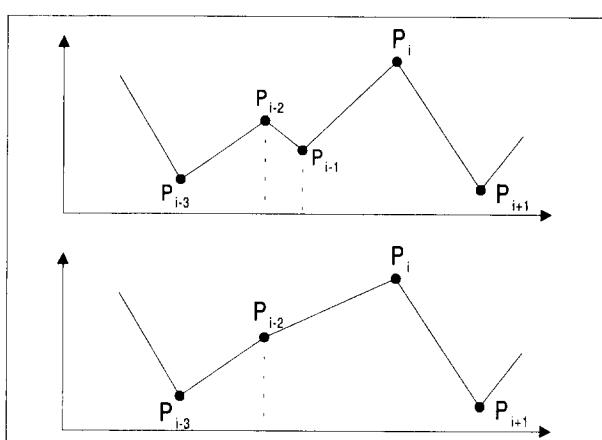


그림 11. 잡음에 의한 피크 P_{i-1} 제거된 결과.

Fig. 11. Result after rejecting the noisy peak P_{i-1} .

그림 11은 잡음성분의 피크가 삽입된 파형에서 잡음피크가 제거되는 방법을 보여준다. 특성점 후보들은 4개씩 짝을 지어 피크들이 잡음에 의한 것인지를 검색한다. 만약 앞의 조건들을 만족하는 피크가 발견되면 잡음에 의한 것으로 간주하여 후보점 배열에서 그 피크를 삭제하고 다시 앞의 피크를 기준으로 다시 검색을 시작한다.

5. 특성요소 추출

2단계의 다결정실리콘 게이트 식각공정을 수행하면서 monochromator에서 출력된 EPD 기준신호궤적에 미분과 영점교차방법을 적용하여 검출된 특성점, 영역, 특성요소를 그림 12에 보인다.

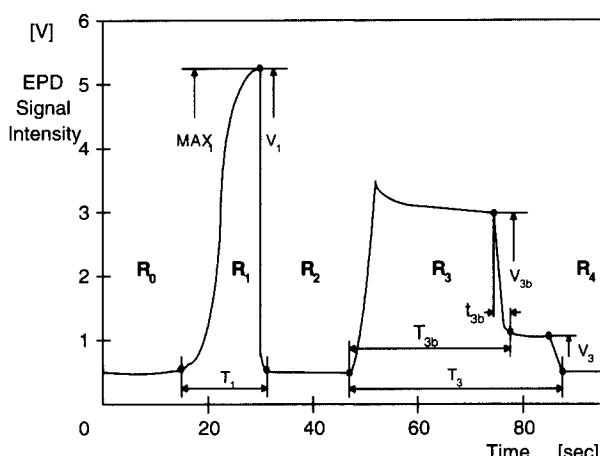


그림 12. 2단계 EPD 기준신호궤적의 특성점, 영역, 특성 파라미터.

Fig. 12. The critical points, regions and critical parameters of the 2 step reference EPD signal trace.

그림 12에서 EPD 신호궤적상의 점은 미분과 영점교차방법을 적용하여 얻은 특성점이고, EPD 신호궤적은 기저레벨 검사에 의해 $R_0 \sim R_4$ 의 영역으로 구분된다. 대량식각의 식각률은 식각시간 T_3 과 다결정실리콘 박막의 두께에 의해 (12)와 같이 계산되고, 균일도는 식각 끝점의 기울기 V_3/t_3 과 상관관계를 갖는데, 기울기가 크면 클수록 균일하게 식각된다[20].

$$R_{poly} = T_{poly}/T_{3b} \times 60 \quad (10)$$

여기서 R_{poly} 는 다결정실리콘의 분당 수직식각률 [A/min]이고, T_{poly} 는 다결정실리콘 박막의 두께이며, T_3 는 그림 11의 대량식각시간[sec]이다. 그러므로, 대량식각의 식각률과 균일도를 포함한 다결정실리콘 게이트 식각공정의 이상을 검출하기 위해 표 2와 같은 특성파라미터를 선정했다.

6. 특성파라미터에 의한 statistical process control

공정관리는 Shewhart에 의해 통계적 관리의 개념과 관리도가 고안된 이래 공정의 중요한 파라미터 변동을 축소시켜 공정성능 개선을 위해 널리 사용되어 왔다. 통계적 공정관리는 공정 상태가 안정되어 제품의 품질이 만족스럽다고 판단되는 기간동안에 생산된 제품의 특성을 추출하여 그 공정에 대한 통계적 분석을 시행한 후에 추후 생산되는 제품의 특성치를 이러한 통계적 분석에 비교함으로써, 공정운전상태의 이상유무를 판별하는 기법이다[21]. 공정이 정상상태에 있을 때 그 공정에서 생산되는 제품의 특성은 생산환경의 여러가지 요인에 의해 임의의 정규분포를 이루며 변동한다고 보고, 추후 생산되는

제품의 특성이 이러한 정규분포를 벗어나지 않을 경우에는 통계적 관리상태에 있다고 본다. 만약 이상원인이 발생하여 제품의 특성이 정규분포를 벗어나면 통계적 관리상태가 깨진다고 보고, 이를 위해서 새로운 제품특성을 측정할 때마다 공정이 관리상태에 있다는 가설을 검증한다. 이런 가설을 검증하는 일반적 방법으로 그림 13과 같은 관리도를 사용하며, 정상상태의 정규분포 평균값과 표준편차에 의해 설정된 중앙값과 상한값, 하한값을 토대로 생산되는 제품의 특성값을 관리도에 표시해 나가면서, 다음과 같은 Western Electric Rule[22]에 의해 공정이상의 발생유무를 판별하게 된다.

표 2. EPD 신호궤적의 특성파라미터.

Table 2. Critical parameters of EPD signal traces.

번호	파라미터	설명
1	T_1	Deglaze 식각시간
2	V_1	Deglaze 식각강도
3	MAX_1	Deglaze 최대식각강도
4	T_{3b}	Bulk 식각시간
5	V_{3b}	Bulk 식각강도
6	S_{3b}	Endpoint 기울기 ($=V_{3b}/t_{3b}$)
7	T_3	Bulk 식각설정시간
8	V_3	Overetch 식각강도

1) 하나의 데이터가 $3-\sigma$ 관리한계를 벗어난 경우.

2) 3개의 연속 데이터 중에서 2개가 $2-\sigma$ 경보한계를 태어난 경우.

3) 5개의 연속 데이터 중에서 4개가 $1-\sigma$ 한계를 벗어난 경우.

4) 8개의 연속 데이터가 중심선의 한쪽에만 있는 경우.

5) 7개의 연속 데이터가 계속 상승 또는 하강하는 경우.

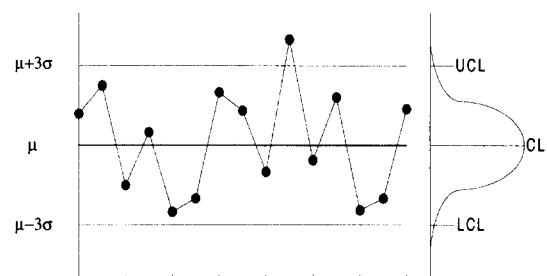


그림 13. \bar{x} 관리도와 가설검정.

Fig. 13. \bar{x} control chart and hypothesis testing.

본 연구에서는 다결정 실리콘의 게이트 시각공정의 이상을 검출하기 위해서 표 2와 같은 특성파라미터를 선정하고 정상상태의 식각을 여러번 반복한 후 각 특성파라미터의 평균값 (\bar{x})과 표준편차(σ)를 계산하여 중앙값 CL과 상한값 UCL, 하한값 LCL을 다음과 같이 구한다.

$$CL = \bar{x}, UCL = \bar{x} + 3\sigma, LCL = \bar{x} - 3\sigma \quad (11)$$

그리고 실제공정에서 시험할 신호궤적을 수집하고, 미분과 영점교차 방법을 적용하여 특성점을 검출하고, 특성파라미터를 추출한 후 이를 관리도에 표시해 나가면서 위의 Western Electric Rule을 적용하여 공정이상을 판별한다.

7. 다결정 실리콘 게이트 식각공정의 이상검출알고리즘

2단계에 걸친 다결정실리콘 게이트 식각공정(①deglate 공정 ②대량 식각)의 EPD 시험신호궤적에서 공정이상 검

출을 위한 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1 : 영역 R0의 기저레벨 검사

- ① 만일 EPD < LBL이면, 이상검출. ② 만일 (EPD가 계속해서 BL- 2σBL ~ BL+ 2σBL을 벗어난 시간) > UBT, 이상검출. ③ 만일 최종 특성점의 속성이 hu 또는 du이고 EPD > UBL, 다음 단계로.

여기서 BL은 기저레벨(Base Level)의 평균값이고, σBL은 기저레벨의 표준편차이고, UBL(Upper Base Level)과 LBL(Lower Base Level)은 UBL = BL+ 3σBL, LBL = BL- 3σBL이며, UBT(Upper Base Time)은 2σBL을 벗어날 수 있는 최대허용시간이다.

단계 2 : 영역 R1의 자연산화층 식각검사

- ① EPD의 기저레벨 복귀시간이 $T_{1-} - 3\sigma_{T_1} \sim T_{1+} + 3\sigma_{T_1}$ 을 벗어나면 이상검출. ② 영역 R1의 특성점을 시간에 대해서 역추적하여 파형속성이 hd 또는 ud인 특성점을 검출하고, 특성점의 EPD가 $V_{1-} - 3\sigma_{V_1} \sim V_{1+} + 3\sigma_{V_1}$ 을 만족하는가를 검사한다. 영역 R1내의 특성점이 이를 만족하지 못하면 이상검출. ③ 영역 R1의 최대 EPD가 $\text{MAX1} - 3\sigma_{\text{MAX}_1} \sim \text{MAX1} + 3\sigma_{\text{MAX}_1}$ 을 벗어나면 이상검출. ④ 이상을 수행하고 EPD가 기저레벨로 복귀되면 다음 단계로.

단계 3 : 영역 R2의 기저레벨 검사 (단계 1의 수행과 동일)

단계 4 : 영역 R3의 대량 식각검사

- ① EPD의 기저레벨 복귀시간이 $T_{3-} - 3\sigma_{T_3} \sim T_{3+} + 3\sigma_{T_3}$ 을 벗어나면 이상검출. ② 영역 R3의 특성점을 시간에 대해서 역추적하여 파형속성이 hd 또는 ud인 특성점 P②를 검출하고 특성점 P②의 EPD가 $V_{3-} - 3\sigma_{V_3} \sim V_{3+} + 3\sigma_{V_3}$ 을 만족하는가를 검사한다. 영역 R3내의 특성점이 이를 만족하지 못하면 이상검출. ③ P② 이전의 특성점을 시간에 대해서 역추적하여 파형속성이 dh인 특성점 P③와 시각 t③, EPD V_{P_3} ,를 검출하고, 대량 식각시간 tb를 (14)와 같이 계산한다.

$$tb = t③ - t③ \quad (12)$$

여기서 t3은 영역 R3의 시작시각이다. 대량 식각시간 tb 가 $T_{3b-} - 3\sigma_{T_{3b}} \sim T_{3b+} + 3\sigma_{T_{3b}}$ 을 벗어나면 이상검출. 영역 R3내의 특성점이 이를 만족하지 못하면 이상검출. ④ P③ 이전의 특성점을 시간에 대해서 역추적하여 파형속성이 hd 또는 ud인 특성점 P④와 시각 t④, EPD V_{P_4} ,를 검출하고, 특성점 P④의 EPD V_{P_4} 가 $V_{3b-} - 3\sigma_{V_{3b}} \sim V_{3b+} + 3\sigma_{V_{3b}}$ 을 벗어나면 이상검출. 영역 R3내의 특성점이 이를 만족하지 못하면 이상검출. ⑤ 식각끝점 기울기를 (15)와 같이 계산된다.

식각끝점 기울기 =

$$(V_{P_4} - V_{P_3}) / (T_{P_4} - T_{P_3}) \quad (13)$$

식각끝점 기울기가 $S_{3b-} - 3\sigma_{S_{3b}} \sim S_{3b+} + 3\sigma_{S_{3b}}$ 를 벗어나면 이상검출. ⑥ 영역 R3의 2번째 특성점부터 P④간의 모든 특성점에 대해 다음 값을 계산한다.

$$OV = \max \{ |V_{P_i} - V_{P_3}|, \text{ 여기서 } P_i \text{는 영역 R3의 2 번째 특성점부터 P④간의 모든 특성점} \} \quad (14)$$

만일 OV가 $OV_{3b-} - 3\sigma_{OV_{3b}} \sim OV_{3b+} + 3\sigma_{OV_{3b}}$ 를 벗어나면 이상검출.

IV. 실험 및 결과고찰

1. 이상검출 실험

제안된 이상검출방법을 이용하여 공정이상의 검출을

시험하기위해 공정의 입력을 의도적으로 변화시키면서 공정이상의 검출여부를 조사하고 이결과를 Opti-probe 2000으로 식각률을 측정하여 공정이상을 검출한 결과와 비교분석한다. 이를 위해 다음과 같은 실험이 순서대로 수행되었다.

단계 1 : 공정 recipe에 의한 15회의 정상운전

단계 2 : 한 입력의 변화

16, 17회 : 압력이 공정 recipe 보다 1mT만큼 적게 그리고 많이 입력된 경우, 18, 19회 : source전력이 공정 recipe 보다 120W만큼 적게 그리고 많이 입력된 경우, 20, 21회 : bottom전력이 공정 recipe 보다 14W만큼 적게 그리고 많이 입력된 경우, 22, 23회 : Cl2흐름율이 공정 recipe보다 10%만큼 적게 그리고 많이 입력된 경우, 24, 25회 : O2흐름율이 공정 recipe 보다 13.3%만큼 적게 그리고 많이 입력된 경우, 26, 27회 : 2회의 정상운전

단계 3 : 여러입력의 동시변화

28회~32회 : 연속 5회의 정상운전, 33, 34회 : 2회의 정상운전, 35회 : 압력이 공정 recipe보다 1mT 만큼 많이, Cl2흐름율이 공정 recipe 보다 10% 만큼 적게 입력된 경우, 36회 : source전력이 공정 recipe 보다 120W 만큼 적게, bottom전력이 공정 recipe 보다 14W만큼 적게 입력된 경우, 37회 : 압력이 공정 recipe보다 1mT만큼 적게, bottom전력이 공정 recipe 보다 14W만큼 많이 입력된 경우, 38회 : source전력이 공정 recipe 보다 120W 만큼 적게, Cl2 흐름율이 공정 recipe보다 10%만큼 많이 입력된 경우, 39회 : 압력이 공정 recipe보다 1mT 만큼 적게, source전력이 공정 recipe 보다 120W만큼 많이 입력된 경우, 40회 : bottom전력이 공정 recipe 보다 14W만큼 많이, O2 흐름율이 공정 recipe 보다 13.3%만큼 많이 입력된 경우, 41회 : Cl2 흐름율이 공정 recipe보다 10%만큼 적게, bottom전력이 공정 recipe 보다 14W만큼 많이, O2 흐름율이 공정 recipe 보다 13.3%만큼 많이 입력된 경우, 42회 : source전력이 공정 recipe 보다 120W 만큼 많이, bottom 전력이 공정 recipe 보다 14W만큼 많이, Cl2 흐름율이 공정 recipe보다 10%만큼 많이 입력된 경우, 43회 : 압력이 공정 recipe보다 1mT만큼 적게, source전력이 공정 recipe 보다 120W 만큼 많이, bottom전력이 공정 recipe 보다 14W만큼 많이 입력된 경우

위의 실험은 약 3주에 걸쳐 3단계로 나누어 수행되었는데 시간이 오래 경과되어 실험을 새로 시작할 때에는 식각장비의 성능을 검증하기 위해 1회의 정상운전을 수행했다.

2. 이상검출결과

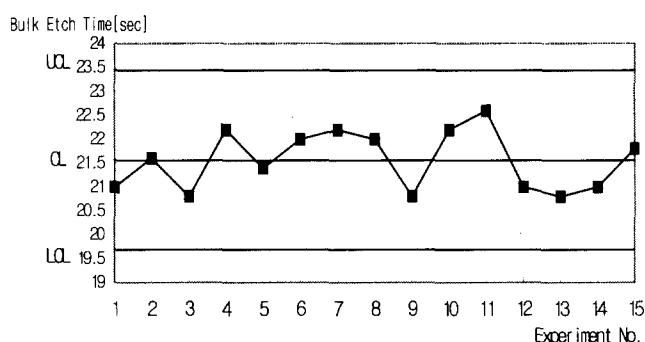
위의 단계 1에서 공정 recipe로 15회의 정상운전을 수행하면서 수집된 EPD 기준신호파라미터에 대한 평균과 표준편차를 표 3에 보인다. 공정을 운전하면서 공정이상의 발생여부를 검출하기 위해 통계적 공정관리 기법을 적용하여 EPD 신호파라미터에서 추출된 특성파라미터를 개별측정치 관리도 (X관리도)에 나타낸다. 그럼 14는 공정 recipe로 15회의 정상운전을 수행한 후 EPD 기준신호파라미터를 수집한 안정된 공정상태의 대량 식각시간과 endpoint 기울기를 나타내는 X 관리도인데 이 관리도에서는 각 특성 파라미터는 자연적인 원인에 의해 변동되고 이상원인에 의한 공정이상은 검출되지 않는다.

단계 1에서 15회의 정상운전을 수행하고 수집된 EPD 신호파라미터에서 추출한 각종 특성 파라미터의 평균과 표준편차로부터 개별 측정치 관리도의 중심선, 관리 상한선, 관리 하한선을 결정한 다음, 단계 2에서 하나의 공정입력

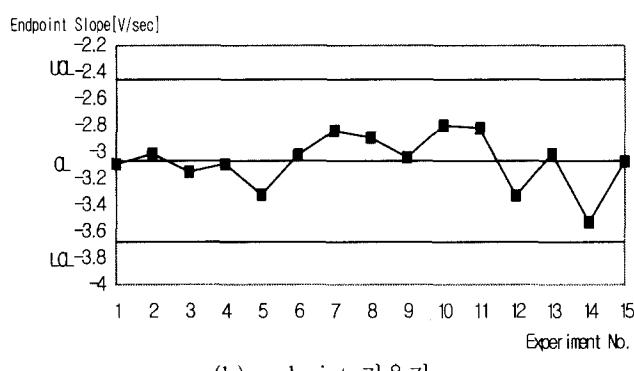
표 3. EPD 기준신호궤적의 특성파라미터의 평균과 표준편차.

Table 3. Mean and standard deviation of critical parameters of reference EPD signal traces.

No.	Parameter	Avg.	Std.	Description
1	T_1 [sec]	10.24	0.56	Deglaze Time
2	V_1 [V]	4.58	0.12	Deglaze Intensity
3	MAX_1 [V]	4.59	0.12	Max. Deglaze Intensity
4	T_{3b} [sec]	21.56	0.62	Bulk Etch Time
5	V_{3b} [V]	2.77	0.07	Bulk Etch Intensity
6	S_{3b} [V/sec]	-0.31	0.02	Endpoint Slope ($=V_{3b}/t_{3b}$)
7	T_3 [sec]	26.49	0.45	Bulk Etch Set Time
8	V_3 [V]	0.86	0.02	Overetch Intensity
9	BL [V]	0.4	0.02	Base Level



(a) 대량식각시간



(b) endpoint 기울기

그림 14. 안정된 공정상태일 때 개별측정치 관리도.

Fig. 14. Individuals chart when process state is stable.

씩 의도적으로 $\pm 10\%$ 정도 번갈아 변화시켰을 때 공정이상의 검출을 시험한다. 그림 15는 단계 2의 실험을 통해 수집된 EPD신호 궤적의 대량식각시간을 개별측정치 관리도에 나타낸 것이고 그림 16은 같은 조건의 실험을 수행하고 계측장비를 이용하여 측정한 식각률의 개별 측정치 관리도이다.

그림 15와 16을 비교하면, 16번째 실험을 제외한 모든 실험에서 두 관리도의 이상검출 결과가 일치하고 16번째 실험결과는 Opti-probe 2000으로 측정된 식각률의 관리도에서는 정상인 반면에 EPD 신호를 이용한

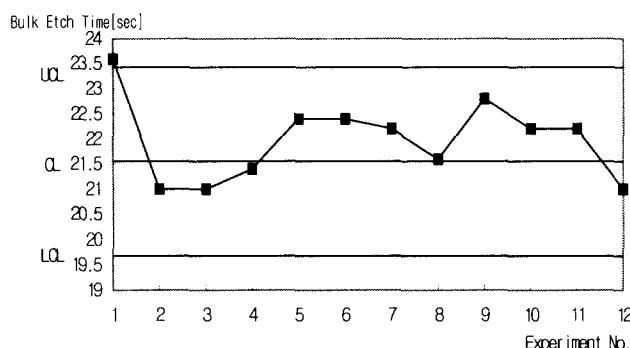


그림 15. EPD 신호궤적의 대량식각시간의 개별측정치 관리도.

Fig. 15. Individuals chart of bulk etch time of EPD signal trace.

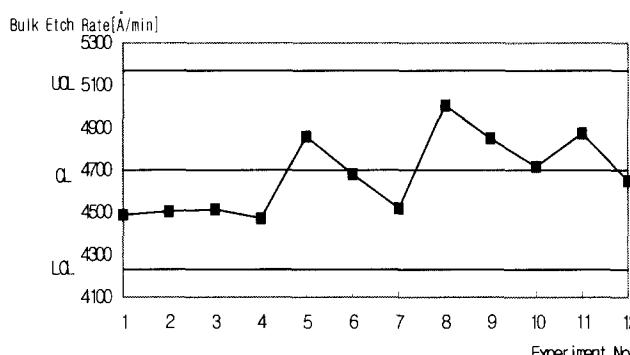


그림 16. Opti-probe 2000으로 측정된 대량식각률의 개별측정치 관리도.

Fig. 16. Individuals chart of bulk etch rate measured by Opti-probe 2000.

관리도에서는 불량으로 판정되었다. 16번째 실험의 대량식각시간은 23.6초이고 식각두께는 1650Å이므로 해당 수직식각률은 $4195 (=1650 \times 60/23.6)$ Å/min으로 계산된다. 예비실험결과에 의하면 공정 recipe에 의해 정상적으로 운전된 공정의 평균식각률이 4700 Å/min이며 실제생산공정에서 허용되는 출력오차는 $\pm 10\%$ 이므로 4230~5170 Å/min의 범위내에 들어가면 정상으로 판정할 수 있다. 그런데 Opti-probe 2000으로 계측된 16번째 실험의 식각률은 4488 Å/min이며 Opti-probe 2000으로 계측된 식각률과 대량식각시간을 환산한 식각률과의 출력오차는 293 Å/min이다. 이 출력오차는 4.5%정도가 되고, 출력허용오차인 10%보다는 작게 나타나므로 16번째 실험은 식각률이 범위의 경계값 부근에 위치하여 이중판정이 발생했다고 볼 수 있다.

다음에는 단계 3에서 여러공정입력을 위도적으로 동시에 크게 변화시켰을 때 공정이상의 검출을 시험한다. 그림 17은 단계 3의 실험을 통해 수집된 EPD 신호궤적의 대량식각시간을 개별측정관리도에 나타내고 그림 18은 같은 실험조건으로 실험을 수행하고 Opti-probe 2000으로 계측된 개별측정치 관리도를 나타낸다.

그림 17과 그림 18의 두 관리도에서 동시에 크게 변화된 여러공정입력에 의해 다수의 공정이상이 발생하고 38번째 실험과 42번째 실험에서 두 공정관리도의 이상검출 결과가 불일치하는 것을 볼 수 있다. 38번째 실험조건으로 3회 실험을 반복하여 재현성을 검증한 결과, 계측된 평균식각률이 3486 Å/min으로 나타났기 때문에 38번째

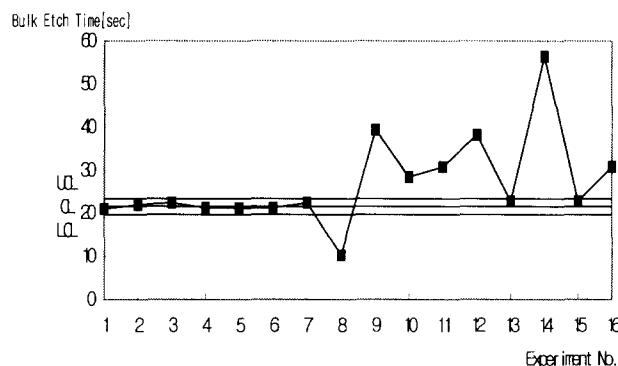


그림 17. EPD 신호궤적의 대량식각시간의 개별측정치 관리도.

Fig. 17. Individuals chart of bulk etch time of EPD signal trace.

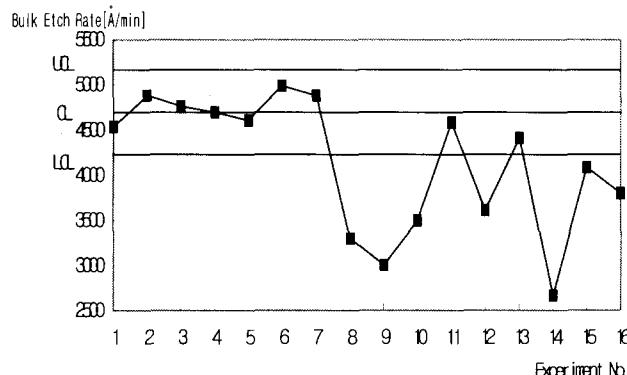


그림 18. Opti-probe 2000으로 측정된 대량식각률의 개별측정치 관리도.

Fig. 18. Individuals chart of bulk etch rate measured by Opti-probe 2000.

실험은 웨이퍼의 오염, 계측불량 등의 원인으로 식각률이 부정확하게 계측되었다고 판단된다. 그리고, 42번 째 실험의 대량식각시간은 22.8초이고 환산된 분당수직식각률은 $4088 (=1650 \times 60 / 22.8) \text{ Å/min}$ 으로 계산된다. 그런데 42번째 실험조건으로 실험을 수행하고 Opti-probe 2000으로 계측된 식각률은 4342 Å/min 이므로 이 계측값과 대량식각시간을 환산한 식각률과의 출력오차는 254 Å/min 이다. 이 출력오차는 5.4%이고 출력허용오차인 10%의 반정도가 되므로 42번째 실험의 식각률이 범위의 경계값 부근에 위치하여 이중판정이 발생했다고 볼 수 있다.

그러므로 EPD신호를 이용한 실시간 이상검출을 적용한 결과, 웨이퍼의 오염, 계측에 의한 식각률이 부정확하게 계측된 38번째 실험을 제외하면 2회의 이상검출 불량이 발생했다. 제안된 실시간 이상검출 방법의 검출불량률이 4.7%로 나타났고 검출불량은 식각률이 허용범위의 한계치 부근에 위치할 때 발생했으므로 심각한 문제가 되지 않는다고 판단된다. 물론 입력의 변화비율이 10%정도 일때의 검출불량률이므로 변화비율이 이보다 작은 경우라면 검출불량률은 상대적으로 증가할 것이다. 또한 모든 특성파라미터에 대한 CUSUM control chart를 작성해본 결과, 검출불량률은 7%였다. 오검출의 원인은 시간의 경과에 따른 monochromator 출력특성의 미세한 변화, 데이터 수집장치의 부정확한 검색과 계측기의 계측오차 등을 들 수 있고 앞으로 위의 원인에 의한 오검출을 방지하거나 보상하여 이상검출의 정확도를 향상하기 위한 연구가 필요하다고 하겠다.

V. 결론

본 논문에서는 플라즈마 식각공정의 이상을 실시간으로 정확하게 검출하기 위해 monochromator와 데이터 수집장치를 이용하여 수집된 EPD 신호궤적에 미분과 영점교차방법을 적용하여 특성점, 기호로 변환된 과정속성과 특성파라미터를 추출하고 특성파라미터에 대해 통계적 공정관리를 적용하여 공정이상을 실시간으로 검출하는 방안이 제시되었다. 제안된 실시간 이상검출방안을 실제 식각공정에 적용, 공정의 입력을 의도적으로 변화시키면서 공정이상의 검출여부를 조사하여 제안된 방법의 효율성을 검토했다. 실제공정에 시험해본 결과 제안된 방법은 식각된 모든 웨이퍼의 실시간 이상검출이 가능하게 되어 랜덤샘플의 추출을 이용한 기존 방법에 비해 다음과 같은 장점을 갖는 것으로 입증되었다. 1) 처리된 모든 디바이스 품질을 보장할 수 있다. 2) 이상발생공정에서 같은 이상이 반복되거나 다음 공정에 이상이 파급되는 것을 방지할 수 있다. 그리고 검출정확도 면에서는 계측기를 이용하여 식각률을 측정하는 기존의 방법과 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

앞으로 시간경과에 따른 monochromator 출력특성의 미세한 변화와 계측기의 계측오차를 보상하고 데이터 수집장치의 scan 정확도를 높여서 이상검출을 향상하는 것이 해결해야 할 과제라고 하겠으며, EPD 신호를 이용한 공정모델링과 공정제어 및 자기 진단에 대해서도 많은 연구가 필요하다고 생각한다.

참고문헌

- [1] M. D. Baker, C. D. Himmel and G. S. May, "Time series modeling of reactive ion etching using neural networks," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, vol. 8, no. 1, Feb., 1995.
- [2] S. M. Sze, *VLSI Technology*, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1988.
- [3] W. R. Runyan and K. E. Bean, *Semiconductor Intregrated Circuit Processing Technoligy*, Addison Wesley, 1990.
- [4] H. Yazici and A. E. Smith, "Neural nework control charts for location and variance process shifts," in *Proc. 1993 World Congr. Neural Networks*, vol. I , pp. 265-268, 1993.
- [5] B. E. Flinchbaugh, S. B. Dolins, A. S. Richardson, and J. R. Waxahachie, "Apparatus and method for production process diagnosis using dynamic time warping," US Patent 4861419.
- [6] D. M. Manos and D. L. Flamm, *Plasma Etching: An Introduction*, Academic Press, 1989.
- [7] D. O'Shaughnessy, *Speech Communication Human and Machine*, Addison Wesley, 1990.
- [8] Horwitz and S. Sahni, *Fundamentals of Computer Algorithms*, Computer Science Press Inc., pp. 198-208.
- [9] S. W. Butler and J. A. Stefani, "Supervisory run-to-run control of polysilicon gate etch using in situ ellipsometry," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, vol. 7, no. 2, pp. 193-201, May, 1994.
- [10] P. K. Mozumder and G. G. Barna, "Statistical feedback control of a plasma etch process,"

- [10] *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, vol. 7, no. 1, pp. 1-11, Feb., 1994.
- [11] Xinix EPD System User's Manual.
- [12] DT-2831 Hardware User's Manual.
- [13] DT-VEE Data Acquisition Software Reference Manual.
- [14] Opti-probe 2000 System Operation Manual.
- [15] P. Ebbing, "Method and apparatus for endpoint detection in a semiconductor wafer etching system," U.S patent 5097430, Oct., 15, 1991.
- [16] 이정환, "심전도 자동진단을 위한 파라미터 추출 알고리즘에 관한 연구", 석사학위논문, 연세대학교, 1993, 12.
- [17] 황선철, 이명호, "변곡비에 의한 ECG 신호의 특징점 검출 및 QRS 패턴분류", 전자공학회 학계종합학술대회, 1991.
- [18] R. J. Marshall, "The determination of peaks in biological waveforms," *Computer Biomedical Research*, vol. 19, pp. 319-329, 1986.
- [19] S. R. Dumpala, S. N. Reddy and S. K. Sarma, "An algorithm for the detection of peaks in biological signals," *Computer Programs in Biomedicine*, vol. 14, pp. 249-256, 1982.
- [20] P. K. Mozumder and G. G. Barna, "Statistical feedback control of a plasma etch process," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, vol. 7, no. 1, pp. 1-11, Feb., 1994.
- [21] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, 2nd ed. New York: Wiley, 1990.
- [22] D. M. Hawkins, "Multivariate quality control based on regression-adjusted variables," *Technometrics*, vol. 33, no. 1, pp. 61-76, Feb., 1991.



차상엽

1967년 2월 13일생. 1991년 연세대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정. 관심분야는 자동화 및 지능제어, 반도체 공정제어 및 센싱기법.



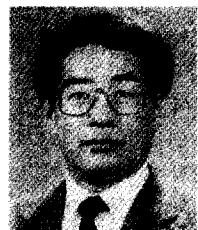
이석주

1991년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업(공학학사). 1993년 8월 동 대학원 졸업(공학석사). 1993년 9월~현재 동대학원 박사과정 재학 중. 주 관심분야는 퍼지 이론 및 신경회로망, 반도체 생산시스템 모델링 및 시뮬레이션, 고속 열처리 공정(RTP), 이상진단 등.



고태범

1955년 10월 28일생. 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(Ph.D)현재 금성하니웰 실장. 주요관심분야는 반도체 공정 및 인텔리전트 빌딩.



우광방

1934년 1월 25일생. 1957년 연세대 전기공학과 졸업(석사). 1962년 및 1964년 오레곤 주립대학 전기공학과에서 석사 및 박사학위 취득, 1966년~1971년 위싱تون대 전기공학과 조교수, 1971년 미국립 암연구소 책임연구원, 1980년 재미한국인과학기술자협회장, 1982년~현재 연세대학교 전기공학과 교수, 1992년~현재 연세대학교 자동화기술연구소 소장, 1995년 당학회 회장. 주요관심분야는 반도체 공정자동화 및 스케줄링, 인공지능제어기법, FMS.