

CUSUM 제어 차트를 이용한 플라즈마 장비 임피던스 정합망 센서정보의 실시간 감시

김우석*, 김병환*

*세종대학교

초록

본 연구에서는 반도체 플라즈마 장비 감시를 위한 CUSUM 제어 차트 설계기법에 관해 연구하였다. CUSUM 제어차트에 관여하는 설계변수의 다양한 조합에 대하여 플라즈마 장비의 감시 성능을 평가하였다. 평가를 위해 RF 정합망 감시시스템을 이용하여 플라즈마 임피던스 정합에 관여하는 정합변수에 대한 실시간 데이터를 수집하였으며, 여기에는 임피던스와 상위치에 대한 전기적 정보, 그리고 반사전력에 대한 정보가 포함된다. 평가결과, 설계변수의 조합에 대하여 감시 성능이 크게 달랐지만, 각 센서 정보의 감시 성능을 증진시키는 설계변수의 조합이 있었음을 확인하였으며, 이는 각 종 다양한 센서정보 별 CUSUM 제어 차트의 설계가 필요함을 의미한다.

1. 서론

플라즈마 공정은 반도체 소자제조를 위한 박막의 증착과 패터닝 (Patterning)에 핵심적으로 이용되고 있다. 플라즈마는 공정변수 (소스전력, 압력 등)에 매우 민감하게 반응을 한다. 챔버내로 전달되는 공정변수에 이상 (Anomaly)이 발생할 경우 플라즈마 상태가 달라지며, 이에 따라 챔버 (Chamber) 내에 발생하는 플라즈마 밀도, 전자온도, 플라즈마 전위, 그리고 라디칼 농도가 변화하게 되고, 이는 공정특성 (예컨대, 식각률, 균일도, 증착 두께, 박막 균일도)의 변화를 초래하게 된다. 플라즈마 특성의 변화는 제조되는 공정의 질 (Quality)을 저하시키며, 이는 소자수율의 저하로 이어져 소자제조업체에 막대한 손실을 초래하게 된다. 나아가서, 플라즈마 이상이 적시에 탐지가 안 될 경우, 장비의 가동이 중단되는 상황도 초래될 수 있으며, 이는 소자생산성을 줄이는 주요 이유가 되고 있다. 따라서, 소자생산성과 수율의 확보를 위해서는 플라즈마 공정을 엄격히 감시하는 기법이 요구되고 있다.

Sandia Lab 의 연구진은 Optical emission spectroscopy (OES)-기반 플라즈마 감시시스템을 개발한 바 있다 [1]. 즉 OES 를 이용해 수집되는 특정 라디칼의 Peak 을 추적하여 플라즈마 상태를 감시하였다. Texas (Austin)대학 연구진 [2], LSI Logic [3], Arizona 대학 연구진 [4] 등은 RF 임피던스 센서를 이용한 감시 기술을 보고한 바 있다. 즉 챔버 안 임피던스를 저항과 리액턴스 성분으로 분해하여 공정변수에 따른 민감도를 플라즈마 감시에 응용하였다. OES 나 RF 임피던스 센서를 설치하지 않고 장비 부품인 RF 정합망 (Match network) 감시에 기초한 진단방식이 보고된 바 있다 [5]. 본 감시기술에서는 Signal Flow Diagram 을 설계하여

챔버 임피던스 정합에 관여하는 두 임피던스와 상 (Phase) 모터의 전기적 위치를 감시하였으며, 기존의 OES 와 RF 센서방식과는 달리 장비부품을 직접 플라즈마 감시에 응용하였다는 점에서 구분된다. 조지아 공대 연구진은 장비외부 변수 (RF 전력, 압력 등)의 실시간 정보를 CUSUM 제어차트 [6]에 연계하여 플라즈마 감시를 시도한 바 있다 [7]. 그러나 CUSUM 제어 차트 설계에 관여하는 인자에 대한 분석이 없었으며, 소자제조업체에서 경험적으로 이용하고 있는 변수가 이용이 되고 있는 실정이다. 반도체 장비에서 수집되는 다양한 센서정보를 감시하기 위해서는 해당 센서의 감시에 적합한 CUSUM 제어차트가 필요하며, 이를 위해서는 설계변수의 영향에 대한 분석이 요구된다.

본 연구에서는 CUSUM 제어차트 설계에 관여하는 변수의 영향을 고찰하며, 이를 RF 정합망 감시를 위해 수집된 데이터에 적용한 결과를 보고한다.

2. 실험 방법

정합데이터를 실시간으로 수집하기 위해 개발된 정합망 감시시스템의 개요도는 그림 1에 도시되어 있다 [5].

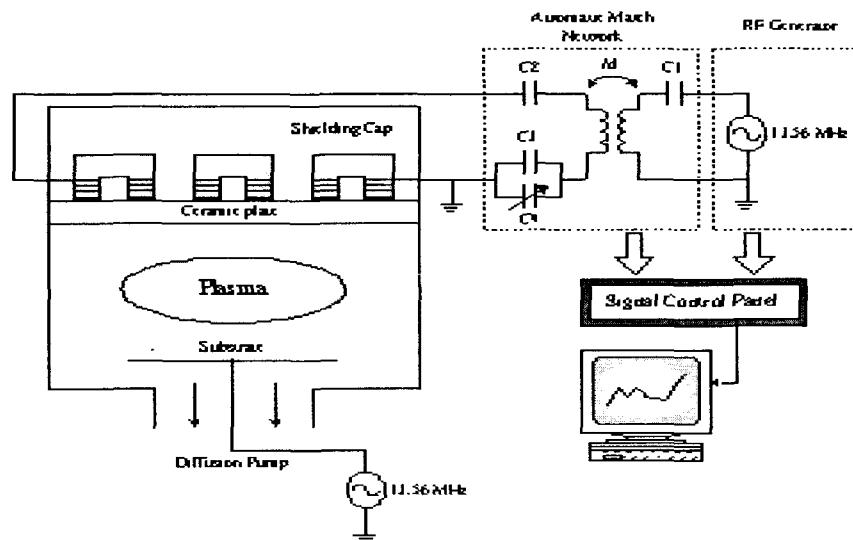


그림 1. 실시간 정합 감시 시스템.

그림 1 에서와 같이 정합망은 세 개의 고정 캐패시터 (C1, C2, C3), 가변 진공 캐패시터 (C4), 그리고 가변 상호 인덕턴스 (M)으로 구성이 되어 있다. 가변 변압기는 4 권의 주코일과 3 권의 보조 코일로 이루어져 있다. 주 코일이 보조 코일 내에서 임피던스 (Impedance) 모터에 의해 회전될 때, M 은 Zero Coupling 을 위해 140 Ω 에서 Maximum Coupling 을 위해 100 Ω 으로 변화한다. 주 코일은 보조코일의 M 과 결합된 부하 (Load)가 50 Ω 이 될 때까지 회전하게 된다. 동시에, 보조코일은 임피던스를 순수 저항적 (Resistive)으로 되게 하기 위해 상 (Phase) 모터를 이용하여 회전이 된다. 실시간 정합 데이터를 수집하기 위해, 다기능보드 (PCI-20428W-1)가 신호제어패널 (EASTDAS-5BP)에 접속되었으며, 패널에서의 I/O 은 I³ BUS™ 을 경유하여 보드의 프로그래밍과 데이터 Register 와 교신을 한다.

데이터 수집을 위해 Visual Designer 를 이용하여 Flow Diagram 을 구성하였으며, 이를 실행할 때 정합망 관련 변수가 PC 에 도시되며, 관련 데이터가 저장이 되게 된다. 플라즈마 조건을 변화시키며, 정합 변수에 대한 데이터를 수집하였으며, 매 실험에서 임피던스와 상 모터의 초기위치는 동일한 5.94 와 6.80 V 에 각 기 고정하였다. 수집된 정합망 변수에는 임피던스와 상위치에 대한 전기적 위치, 그리고 반사 (Reflected) 전력 등이다.

3. 실험결과 및 고찰

CUSUM 제어 차트는 공정변수의 미세 변이를 탐지하는 역할을 한다. 미세 변이는 다음의 수식을 통해 시간에 따라 축적이 된다.

$$S_H(i) = \max[0, x - (\mu + b) + S_H(i-1)] \quad (1)$$

$$S_L(i) = \max[0, (\mu - b) - x + S_L(i-1)] \quad (2)$$

여기서 x 는 Mean Value(평균), μ 는 Target Value(목표치)이며 b 는 다음과 같이 정의된다.

$$b = \tan(2\theta \delta_x) \quad (3)$$

여기서, δ_x 는 Standard Deviation(표준편차) θ 는 Aspect Angle이라 칭하며, 결정 구간 (Decision Interval) h 는 다음과 같이 정의된다.

$$h = 2d \delta_x \tan(\theta) \quad (4)$$

시간에 따라 축적되는 미세변이의 심각도 (Severity)는 다음의 식에 의해 Belief 값으로 변환된다.

$$s(S_{H/L}) = \frac{1}{1 + \exp[-(\frac{S_{H/L}}{h}) - 1]} \quad (5)$$

본 연구에서는 d 와 θ 값의 변화를 주어 다수의 (d, θ) 의 조합에 따른 감시 성능을 평가하였다. 평가에 이용된 데이터는 소스전력이 500 W, 압력이 15 mTorr, O_2 유량이 75 sccm일 때 수집하였다.

CUSUM 제어 차트를 수집된 3 정보에 적용한 결과가 그림 2-4에 도시되어 있다.

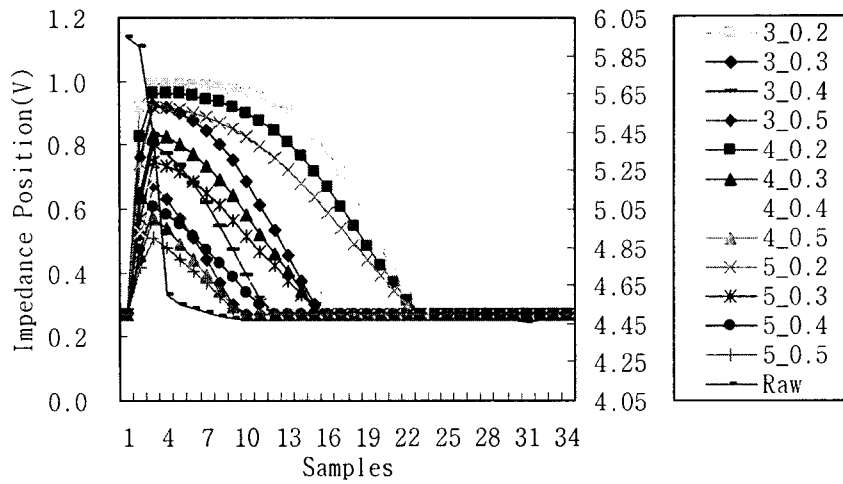


그림 2. 임피던스 정합위치의 CUSUM Belief에의 설계 변수의 영향

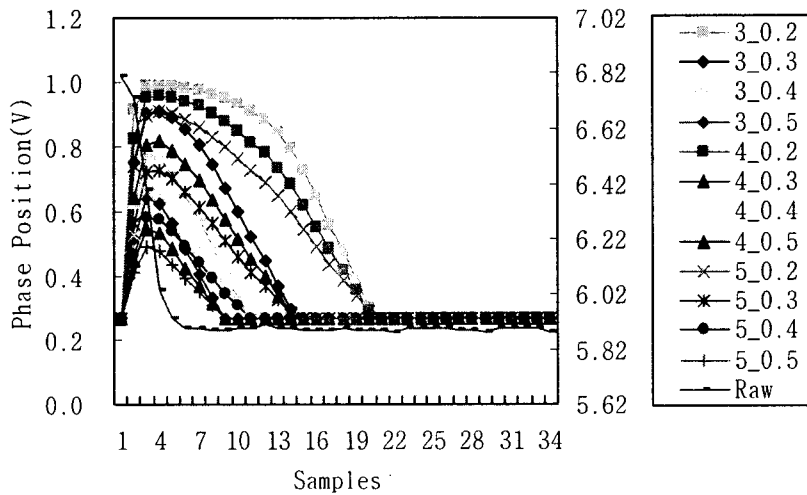


그림 3. 상위치의 CUSUM Belief에의 설계 변수의 영향

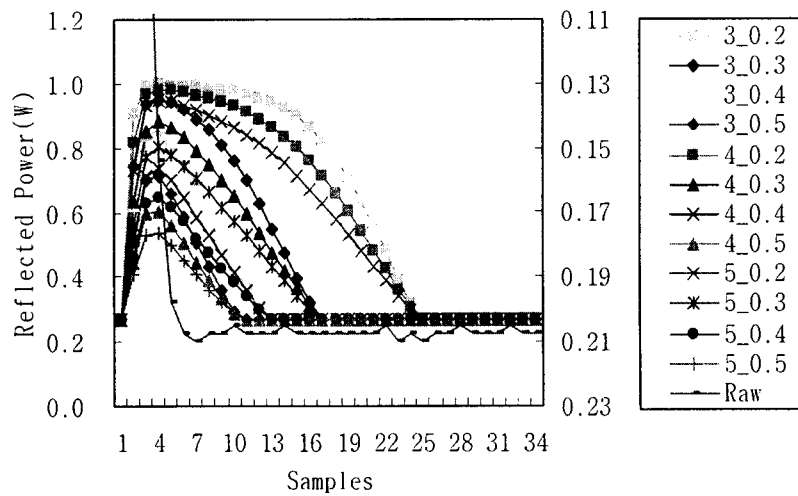


그림 4. 반사전력의 CUSUM Belief에의 설계 변수의 영향

Raw 데이터 대비 성능 분석을 위해 (d, θ) 의 조합에 따른 성능분석을 비교 평가한 결과가 표 1에 나타나 있다. 성능분석은 Raw 데이터가 시간에 따라 변화하는 변곡점을 얼마나 신속하게 추적할 수 있는지에 착안하여 실시하였다. 이를 위해 Raw 데이터의 변곡점이 발생하는 시간 (T) 을 계산하였으며, 그 결과가 표 1의 세번째 행에 나타나 있다. 그리고 각 조합별로 계산된 계산된 변곡점이 발생하는 시간과 T 간의 차이, 즉 D 에 대한 데이터가 표 1에 정리되어 있다. 표 1에서와 같이 임피던스 위치에 대해서는 $(3,0.5)$ 와 $(5,0.5)$ 에서, 상위치에 대해서는 $(3,0.5)$, $(4,0.5)$, 그리고 $(5,0.5)$ 에서, 그리고 반사전력에 대해서는 상위치와 동일한 조합에서 최적의 성능을 얻었다. 최적의 조합에서 알수 있듯이, 공통적인 사항은 θ 가 0.5에서 결정되었다는 사실이다.

표 1. (d, θ) 의 조합에 따른 성능 비교표

	Impedance Position(V)		Phase Position(V)		Reflected Power(W)	
	T	D	T	D	T	D
Raw	11	-	7	-	9	-
$(3,0.2)$	24	13	22	15	26	17
$(3,0.3)$	17	6	16	9	18	9
$(3,0.4)$	13	2	12	5	14	5
$(3,0.5)$	11	0	10	3	12	3
$(4,0.2)$	24	13	22	15	26	17
$(4,0.3)$	17	6	16	9	18	9
$(4,0.4)$	13	2	12	5	14	5
$(4,0.5)$	11	0	10	3	12	3
$(5,0.2)$	24	13	22	15	26	17
$(5,0.3)$	17	6	16	9	18	9
$(5,0.4)$	13	2	12	5	14	5
$(5,0.5)$	11	0	10	3	12	3

4. 결론

본 연구에서는 CUSUM 제어 차트의 설계 기술에 관해 연구하였으며, RF 정합망 데이터에 적용하였다. CUSUM 제어 차트의 설계변수를 변화시키며, 감시 성능을 비교평가 하였으며, 공통적으로 θ 가 0.5 에서 최적의 감시성능을 보였다. 임피던스 데이터를 제외하고는 결정된 θ 에서의 d 의 영향은 동일하였다. 결국, 감시 성능을 높이기 위해서는 각 센서정보별로 해당 센서에 적합한 CUSUM 제어차트의 설계가 필요한 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하는 System IC 2010 (시스템직접반도체기반기술개발) 사업과 ITRC의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] J. O. Stevenson, P. P. Ward, M. L. Smith, R. J. Markle, A plasma process monitor/control system, Surface and Interface Analysis, vol. 26, 124 (1998).
- [2] s. Bushman, T. F. Edgar, I. Trachtenberg. Radio frequency diagnostics for plasma etch systems, SPIE vol. 2336, 1994.
- [3] F. Bose, R. Patrick, H. Baltes, Measurement of discharge impedance for dry etch process control, SPIE vol. 2336, 101 (1994).
- [4] F. Bose, R. Patrick, H. P. Baltes, Electrical characterization of a processing plasma chamber. J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 15, no. 6, 2930 (1997).
- [5] B. Kim, C. J. lee, Monitoring plasma impedance match characteristics in a multipole inductively coupled plasma for process control, J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 18, no. 1, 58 (2000).
- [6] D. C. Montgomery, Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley & Sons, Singapore, 1985.
- [7] B. Kim, G. S. May, Real-time diagnosis of semiconductor manufacturing equipment using a hybrid neural network expert system," IEEE Trans. Comp. Package. Manufact. Technol. C, vol. 20, no. 1, 39 (1997).