

## 영교차율과 가우시안 혼합모델을 이용한 박막증착장비의 세라믹 히터 결함 검출

고진석 · 무항빈 · 임재열<sup>†</sup>

<sup>†</sup>한국기술교육대학교 전기전자통신공학과

### Fault Detection for Ceramic Heater in CVD Equipment using Zero-Crossing Rate and Gaussian Mixture Model

JinSeok Ko, XiangBin Mu and JaeYeol Rheem<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Electrical, Electronics and Communication Engineering, Korea University of Technology and Education

#### Abstract

Temperature is a critical parameter in yield improvement for wafer manufacturing. In chemical vapor deposition (CVD) equipment, crack defect in ceramic heater leads to yield reduction, however, there is no suitable ceramic heater fault detection system for conventional CVD equipment. This paper proposes a short-time zero-crossing rate based fault detection method for the ceramic heater in CVD equipment. The proposed method measures the output signal ( $V_{pp}$ ) of RF filter and extracts the zero-crossing rate (ZCR) as feature vector. The extracted feature vectors have a discriminant power and Gaussian mixture model (GMM) based fault detection method can detect fault in ceramic heater. Experimental results, carried out by measured signals provided by a CVD equipment manufacturer, indicate that the proposed method detects effectively faults in various process conditions.

**Key Words** : Fault detection, CVD equipment, Ceramic heater monitoring

#### 1. 서 론

반도체 디바이스의 미세화에 따라서 품질관리는 매우 중요한 요소로 여겨진다. 특히 시스템 IC의 경우, 공정 중에서 소량이 particle이 발생되거나, 두께 등 물질의 특성이 조금만 변화하여도 디바이스의 특성이 변하여 생산 수율에 많은 영향을 미치게 된다. 반도체용 증착장치인 Chemical Vapor Deposition (CVD) 장비의 경우, 반응에 제일 큰 영향을 끼치는 파라미터로는 source gas, temperature, RF power, pressure 등이 있다. 여기서 온도는 박막증착장비의 source gas의 분해능을 좌우하는 핵심요소로 챔버 하부에 히터를 장착하여 온도를 제어하고 있다[1].

히터의 특성에 따라서 박막증착장치 내부의 source gas의 분해능이 좌우되며, 온도가 약 5°C만 변화하여도

source gas의 분해가 덜되어 증착되는 막의 내부 carbon 함량, hydrogen 함량 등이 증가하게 된다. 이는 박막의 특성을 변화시키는 요인이 된다. 절연물질이 사용되는 공정의 경우, carbon에 의해 기생 캐패시터가 만들어지게 되어 디바이스 신뢰성의 문제가 발생하게 된다. 따라서 공정 중 온도의 제어는 매우 중요한 요소 중 하나이다.

박막증착장비의 온도를 제어하는 세라믹 히터는 반복적으로 열이 가해지기 때문에 제한적인 수명을 가지고 있다. 세라믹 히터 제조업체에서는 평균적으로 약 2년의 기간을 세라믹 히터의 수명으로 보증하고 있다. 그러나 실제 박막증착장비를 사용하고 있는 반도체 제조현장에서는 세라믹 히터의 사용기간이 최소 6개월부터 길게는 3, 4년까지 사용되고 있음을 보고하고 있다. 이는 제조사에서 보증하는 세라믹 히터 사용기간과 현장에서의 사용기간에는 편차가 있음을 의미한다.

일정한 사용기간 이후, 세라믹 히터는 물리적인 크

<sup>†</sup>E-mail : rheem@koreatech.ac.kr

랙이 발생하는 등 불량률이 발생하게 된다. 이와 같은 불량률 히터에서 제조된 반도체 디바이스는 수율이 급격히 떨어지는 현상을 보여준다. 따라서 최근 국내의 반도체 장비 제조업체를 중심으로 박막증착장비의 세라믹 히터 상태를 모니터링 하는 기술이 중요한 이슈로 부각되고 있다.

현재 박막증착장치에서 온도를 모니터링 하는 방법은 열전대 소자(thermocouple device)를 이용하여 온도를 측정하는 방법을 이용하고 있으며, 세라믹 히터에 대해서 모니터링 하는 방법은 단순히 히터에 공급하는 power값에 대한 변화를 모니터링 하는 방식이 주로 이용되고 있다. 따라서 단순히 세라믹 히터에 공급하는 power값에 대해서만 모니터링 하기에 heater fail이나 기타 장비의 이상(fault)에 대해서 제대로 탐지하고 못하는 상황이다. 실제 반도체 제조업체에서는 세라믹 히터에서 heater fail 또는 이상현상 발생 시, 공정이 멈춰야 하나 이를 감지하지 못하고 그대로 진행되어 후속 공정이나 웨이퍼 두께측정 등의 단계에서 파악되거나, 심지어 package 수율 단계에서 파악되는 상황이 자주 발생되고 있다. 이는 해당 단계까지 진행된 모든 웨이퍼를 폐기해야 함을 의미하며, 전체 공정 수율에 심각한 영향을 끼치고 있다. 따라서 세라믹 히터의 heater fail 또는 이상을 탐지할 수 있는 이상 진단 시스템의 개발이 절실한 상황이다.

본 논문에서는 박막증착장비의 세라믹 히터의 상태를 모니터링하고, 히터 결함을 검출하는 방법에 대해서 제안하였다. 제안된 방법은 박막증착장비의 세라믹 히터에 연결된 RF filter의 출력전압을 측정하고, 측정된 전압값 데이터로부터 단구간 분석기법 중 영교차율(zero-crossing rate)을 특징벡터로 추출하여, 가우시안 혼합모델 기반 검출기를 이용하여 세라믹 히터의 상태를 판단하는 방법이다[2-5].

제안된 방법의 검증을 위하여 실제 박막증착장치에서 측정된 신호를 이용하여 실험한 결과, 효과적으로 박막증착장비의 결함유무 상태를 판단하는 것을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 본 논문에서 제안하는 히터 불량 검출 시스템에 대해서 다루고 있으며, 3장에서는 실험 및 결과에 대해서 논하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문의 결론을 다루었다.

## 2. 박막증착장비의 세라믹 히터 결함 검출

### 2.1. 히터 불량 검출 시스템

반도체용 박막증착장비는 RF power를 인가하기 위

한 RF system이 상단에 위치하고, 챔버 내에서 RF가 걸리는 cathode material이 챔버 내 상단에 존재한다. 챔버 내 하단에는 wafer를 배치하고, 또한 온도를 올리기 위한 히터가 위치하며, cathode와 히터 사이에 플라즈마가 형성된다.

박막증착장치 내부에 위치하는 세라믹 히터는 ground와 히터에 power를 인가하기 위한 power controller가 있고, 인가되는 RF를 차단하기 위한 RF filter로 구성된다.

본 논문에서 제안하는 박막증착장비의 세라믹 히터 불량 검출 시스템은 히터에서 내려온 AC power line과 RF system사이에 히터 전압 변화 데이터를 취득하기 위한 RF detector 및 DAQ module, 그리고 이를 처리하기 위한 신호처리 알고리즘으로 구성된다. Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 시스템의 구성도를 나타내고 있다.

제안된 시스템에서 RF detector 및 DAQ module을 이용하여 측정되는 데이터는 전압값( $V_{pp}$ )이며, 이는 플라즈마 공정에서 유도될 수 있는 플라즈마의 이상변화를 전압의 변화에 따라서 검출 가능하기 때문이다.

기존의 히터 모니터링 기술은 단순한 과전류의 흐름을 판단하는 방식을 이용하였으나, 본 연구에서는 특히 기술 회피를 위하여 전압의 변화를 히터의 상태 파악에 활용하였다[6, 7].

### 2.2. 단구간 분석기법의 특징 추출

본 논문에서는 센서 신호가 단구간(short-time window)에서 정상(stationary) 상태임을 가정하였다. 만약 전체 신호가 정상상태일 경우, 각각의 단구간 신호들은 특성은 같거나, 유사하다. 따라서 본 논문에서는

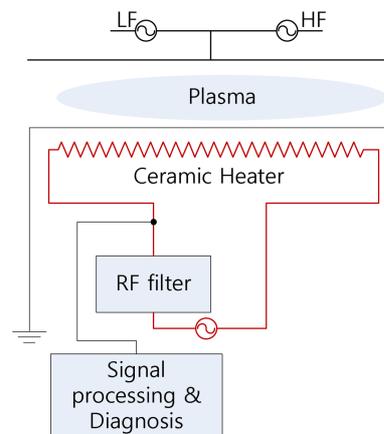


Fig. 1. Proposed system diagram.

시간영역에서 연속적으로 측정된 센서 신호의 특징을 파악하기 위해서 신호를 여러 개의 구간으로 나누어서 특징을 파악하는 단구간 분석법(short-time analysis)을 적용하였다.

단구간 분석법은 시간영역 특징과 주파수영역 특징으로 구분할 수 있다. 시간영역 특징으로는 단구간 에너지, 단구간 크기, 영교차율 (zero-crossing rate: ZCR), 평균크기차분함수, 자기상관함수 등이 있으며 본 논문에서는 영교차율을 이용하였다. 이는 주파수영역 특징에 비해서 알고리즘이 간단하고, 적은 연산량을 소모하기 때문이다[2].

영교차율은 주어진 구간에서 신호가 기준값인 0을 통과하는 횟수의 비율을 측정하는 것이다. 신호에서 연속적인 두 개의 샘플의 sign함수 차분값이 다른 부호를 갖는 값을 갖는 경우이며, 이에 대한 수식은 다음과 같다.

$$Z_i = \frac{1}{2N} \sum_{m=n-N+1}^n |sign(x[m]) - sign(x[m-1])| \quad (1)$$

여기서 sign 함수는 다음과 같이 정의 된다.

$$sign(x[n]) = \begin{cases} 1, & x[n] \geq 0 \\ -1, & x[n] < 0 \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3. 가우시안 혼합모델 기반 불량 검출 방법

본 논문에서는 세라믹 히터의 상태를 판단하기 위하여 가우시안 혼합 모델을 적용하였다[3]. 우선 훈련단계에서는 불량이 없는 히터에서 측정된 데이터를 이용하여 가우시안 혼합 모델을 학습 시킨다. 모델 파라미터를 계산한 후, 정상상태에서 측정된 데이터를 이용하여 평균 로그-우도를 계산한다. 이는 히터 모니터링 과정에서 히터의 정상상태와 불량상태를 구분하는 임계값을 결정하는데 활용된다.

이후, 모니터링 단계에서는 세라믹 히터에서 측정된 데이터를 이용하여 로그-우도 스코어를 계산한다. 만약 세라믹 히터에서 크랙 또는 불량이 발생될 경우, 추출되는 단구간 에너지와 영교차율은 정상상태와 다른 범위의 값을 갖게 된다. 따라서 계산된 로그-우도 스코어 값은 정상상태의 히터에서 추출한 특징에 비하여 값의 편차가 크게 나타난다. 이와 같은 원리를 이용하여 본 연구에서는 세라믹 히터의 정상/불량 상태를 판단하였다.

M 성분 가우시안 혼합밀도함수의 분포는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\mathbf{x}|\lambda) = \sum_{i=1}^M p_i b_i(\mathbf{x}) \quad (3)$$

여기서 M은 혼합성분 개수이고, p<sub>i</sub>는 i번째 혼합성분의 가중치이며,  $\sum_{i=1}^M p_i = 1$  를 만족해야 한다. 이때 x는 영교차율로 구성된 1차원 특징이다.

각 성분밀도 b<sub>i</sub>(x), i = 1, ..., M는 정규확률분포를 사용하며 식 (4)로 정의된다.

$$b_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mu_i)' \Sigma_i^{-1} (\mathbf{x}-\mu_i)\right\} \quad (4)$$

여기서 μ<sub>i</sub>는 i번째 성분의 평균벡터이고, Σ<sub>i</sub>는 공분산 행렬이다.

모델 파라미터 λ는 식 (5)과 같이 가우시안 혼합성분 밀도의 가중치, 평균벡터, 공분산 행렬로 구성된다.

$$\lambda = \{p_i, \mu_i, \Sigma_i\} \quad i = 1, \dots, M. \quad (5)$$

GMM의 우도를 최대화하기 위한 파라미터 λ를 추정하기 위하여 최대우도 추정이 사용된다. 최대우도를 위한 파라미터는 EM 알고리즘을 반복적으로 계산하여 구할 수 있다. 다음의 재추정식은 GMM을 이용한 모델의 유사도를 단조증가 시킨다.

- Mixture weight:

$$\bar{p}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T p(i|\mathbf{x}_t, \lambda) \quad (6)$$

- Mean vector:

$$\bar{\mu}_i = \frac{\sum_{t=1}^T p(i|\mathbf{x}_t, \lambda) \mathbf{x}_t}{\sum_{t=1}^T p(i|\mathbf{x}_t, \lambda)} \quad (7)$$

- Variance vector:

$$\bar{\sigma}_i^2 = \frac{\sum_{t=1}^T p(i|\mathbf{x}_t, \lambda) x_t^2}{\sum_{t=1}^T p(i|\mathbf{x}_t, \lambda)} - \mu_i^2 \quad (8)$$

히터의 상태를 결정짓는 임계값은 다음 식(9)와 같이 계산한다. 이때 C는 불량 유무를 판별하는 컨트롤 파라미터이며, L(λ)는 정상히터에서 측정된 데이터로 계산한 로그-우도 평균이며, σ<sub>i</sub>은 표준편차를 의미한다.

```

if (log p(x|λ) < L(λ) + C · σL)
    Defective Heater
else
    Defect-free Heater
end

```

(9)

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1. 실험환경

본 연구에서 사용한 RF detector는 370 kHz와 13.56 MHz를 검출할 수 있는 회로로 제작되었다. Fig. 2는 제작된 RF detector를 나타내고 있다.

RF detector의 출력을 컴퓨터로 입력 받기 위하여 DAQ 모듈이 필요하다. 본 연구에서는 National Instruments의 LabView 기반 DAQ 모듈을 이용하였다. Fig. 3은 LabView 기반의 데이터 수집 소프트웨어 사용자 인터페이스를 나타내고 있다.

실험에 사용된 데이터는 국내 W사의 박막증착장비에 제안된 시스템을 장착하고, 수집한 데이터를 이용하여 검증하였다. 불량률이 있는 히터와 정상상태의 히터에서 각각 데이터를 수집하였으며, 각각의 과정에서는 공정조건들을 다양한 변화를 주었다. 총 46개의 데이터



Fig. 2. RF detector (13.56 MHz).

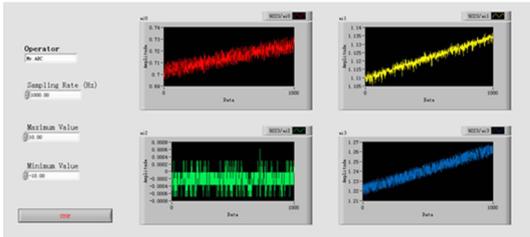


Fig. 3. LabView based data acquisition.

를 수집하였으며, 총 길이는 약 3시간 30분 분량이다. 데이터 수집 시, 공정조건은 clean, pressure split, gap split, gas split 등 다양한 공정조건 하에서 데이터를 수집하였다. 실험데이터는 waiting time 구간(0 V)과 RF time 구간(1.4 V)으로 구분하며, waiting time 구간에서 불량 유무를 판정한다.

#### 3.2. 실험결과

Table 1은 정상히터에서 측정된 데이터의 종류 및 불량유무 판정 결과를 보여주고 있다. 제안된

방법을 이용하여 각각의 공정 모두 정상상태의 히터로 판정하는 것을 볼 수 있다. Table 2는 결함히터에서 측정된 데이터의 종류 및 불량유무 판정 결과를 보여

Table 1. Experimental data from fault-free heater and decision results

데이터 명	공정설명	판단결과
Test.csv	Dep. 공정	정상
TestDep1.csv		정상
TestDep2.csv		정상
TestDep3.csv		정상
PowerPre.csv	Power 변경 공정	정상
Power0.csv		정상
Power1.csv		정상
Power2.csv		정상
Power3.csv		정상
Power4.csv		정상
Power5.csv		정상
GapPre.csv	Gap pressure 변경 공정	정상
Gap1.csv		정상
Gap2.csv		정상
Gap3.csv		정상
Gap4.csv		정상
Gap5.csv		정상
GasPre.csv	Gas split 변경 공정	정상
Gas1.csv		정상
Gas2.csv		정상
Gas3.csv		정상
Gas4.csv		정상
Gas5.csv		정상
TestClean.csv	Clean 공정	정상

**Table 2.** Experimental data from faulty heater and decision results

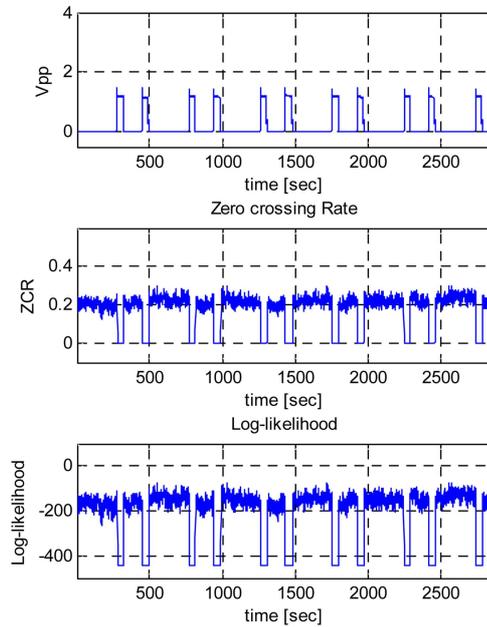
데이터 명	공정설명	판단결과
NoWafer1.csv	웨이퍼 empty 운용	결함
NoWafer2.csv		결함
PowerSplitPre.csv	Power split 공정	결함
PowerSplit0.csv		결함
PowerSplit1.csv		결함
PowerSplit2.csv		결함
PowerSplit3.csv		결함
PowerSplit4.csv		결함
PowerSplit5.csv		결함
GapPre.csv	Gap pressure 공정	결함
Gap0.csv		결함
Gap1.csv		결함
Gap2.csv		결함
Gap3.csv		결함
Gap4.csv		결함
Gap5.csv	Gas split 공정	결함
Gas0.csv		결함
Gas1.csv		결함
Gas2.csv		결함
Gas3.csv		결함
Gas4.csv	결함	
NoWaferClean	lean 공정	결함

주고 있다. 각각의 공정 모두 결함히터로 판정하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4 와 Fig. 5는 정상상태 및 불량상태 히터에서 측정된 데이터 및 영교차율, 그리고 GMM 모델을 이용한 로그-우도값을 나타내고 있다. 정상히터 데이터는 로그-우도가 0에 가깝게 계산되나, 불량히터 데이터는 로그-우도가 -180정도로 계산되는 것을 볼 수 있다. 따라서 로그-우도값의 범위에 따라서 히터의 불량유무를 판단할 수 있다.

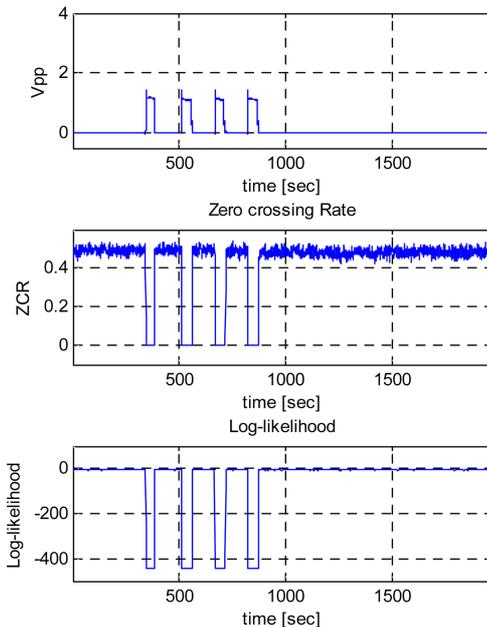
실제 박막증착장비에서 측정된 데이터를 이용하여 실험결과 본 연구에서 제안한 세라믹 히터 불량 검출 기법이 효과적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

### 4. 결 론

박막증착장비에서 온도는 수율을 결정짓는 중요한 파라미터이다. 따라서 장비의 세라믹 히터에 결함이 발



**Fig. 4.** Signal analysis of faulty ceramic heater.



**Fig. 5.** Signal analysis of fault-free ceramic heater.

생될 경우, 수율에 심각한 문제가 발생하게 된다. 그러나 현재까지 세라믹 히터의 상태를 모니터링하고, 결함을 검출하는 시스템이 박막증착장비에 적용되지 못하고 있는 상황이다. 본 논문에서는 박막증착장비의 세라믹

히터 결함 유무를 판정하기 위하여 영교차율과 가우시안 혼합 모델 기반의 결함 검출 기법을 제안하였다.

제안된 방법은 박막증착장비의 세라믹 히터에 연결된 RF filter의 출력전압을 측정하고, 측정된 전압값 데이터로부터 영교차율(zero-crossing rate)을 특징벡터로 추출하여, 세라믹 히터의 상태를 판단하는 방법이다. 제안된 방법의 검증을 위하여 실제 박막증착장치에서 측정된 신호를 이용하여 실험 결과, 효과적으로 세라믹 히터의 결함유무 상태를 판단하는 것을 확인하였다. 제안된 방법은 향후, 저가형 임베디드 모듈로 개발하여 기존 박막증착장비에 add-in 형태로 활용될 계획이다.

### 감사의 글

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

### 참고문헌

1. J.-H. Pak and T. S. Sudarshan, *Chemical Vapor Deposition*. ASM International, 2001.
2. J. R. Deller, J. G. Proakis and J. H. Hansen, *Discrete-time processing of speech signals*. Macmillan publishing company New York, 1993.
3. C. E. Rasmussen, "The infinite Gaussian mixture model", *Advances in neural information processing systems*, vol. 12, no. 5.2, p 2, 2000.
4. J. Ko, X. Mu and J. Rheem, "Fault diagnosis for ceramic heater in CVD equipment", *International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, 2013, will be published
5. J. Ko, X. Mu and J. Rheem, "Multiple Gaussian mixture model based fault diagnosis for ceramic heater in CVD equipment", *IEEK summer conference 2013*, will be published
6. H. Kim, 1020040003333, "Equipment for monitoring heat current of semiconductor production device", Samsung Electronics Co. Ltd., 2004.01.13
7. J. Kim, 1020050092179, "Heater system for use in semiconductor fabricating apparatus", Samsung Electronics Co. Ltd., 2005.09.21

접수일: 2013년 5월 27일, 심사일: 2013년 6월 10일,  
게재확정일: 2013년 6월 17일