

## 플라즈마 식각공정에서의 EPD(End Point Detection) 제어기에 관한 연구

### A Study on EPD (End Point Detection) Controller on Plasma Etching Process

°최순혁, 차상엽, 이석주, 이종민, 우광방

연세대학교 전기공학과 (Tel: 361-2767; Fax: 888-7870; E-mail: kbwoo@bubble.yonsei.ac.kr)

**Abstracts** Etching Process, one of the most important process in semiconductor fabrication, has input control part of which components are pressure, gas flow, RF power and etc., and plasma gas which is complex and not exactly understood is used to etch wafer in etching chamber. So this process has not real-time feedback controller based on input-output relation, then it uses EPD(End Point Detection) signal to determine when to start or when to stop etching. Various type EPD controller control etching process using EPD signal obtained from optical intensity of etching chamber. In development EPD controller we concentrate on compensation of this signal intensity and setting the relative signal magnitude at first of etching. We compensate signal intensity using neural network learning method and set the relative signal magnitude using fuzzy inference method. Potential of this method which improves EPD system capability is proved by experiences.

**Keywords** 플라즈마 식각공정, EPD(End Point Detection), 퍼지추론, 신경회로망

#### 1. 서론

반도체 생산공정은 하나의 완제품을 생산하기 위해 매우 복잡한 단위공정들로 구성되어 있다. 단위공정들 또한 여러 장비들이 복잡한 메카니즘을 가지고 웨이퍼 가공이 행해지며 만일 단위공정들에 소속된 각각의 장비들이 제기능을 발휘하지 못한다면 여기서 가공된 웨이퍼는 물론 전체 공정에도 경제적, 시간적 손실이 발생하게 될 것이다. 식각시스템은 반도체 생산공정에 있어서 주요 단위공정의 하나로서 여러 입력요소들( 압력, 가스, 전력 등)을 제어하는 다양한 입력제어부와 플라즈마를 이용하여 웨이퍼를 식각하는 식각반응실로 구성되어 있지만 반도체 대량생산 라인에서의 식각은 플라즈마의 물리적, 화학적 성질규명이 매우 어려워 확실한 입출력 관계에 의한 실시간제어가 이루어지지 못하고 있다. 따라서 식각의 시작과 종료 및 Overetch 등의 상황판단과 함께 이를 식각장비에 전달제어하기 위해 EPD(End Point Detection) 시스템을 활용하고 있다.

현재 반도체 양산라인의 식각공정에서 사용되는 EPD 장비는 여러가지 모델이 있지만 공통적으로 1) 플라즈마 식각반응실 외벽의 윈도우를 통해 반응실내부의 빛을 전송하는 Optical Fiber Cable, 2) 빛을 받아들여 이를 전압레벨로 전환해주는 Monochromator, 3) Monochromator에서 보내온 전압신호를 가지고 식각의 상황을 파악, 식각장비와 신호를 주고받는 EPD제어기로 구성되어 있다.[1] EPD 제어기에서 초기의 AGC(Auto Gain Control)과 전압신호의 A/D 또는 D/A 변환은 시스템의 성능에 많은 영향을 주지만 현재의 EPD 장비는 이러한 두기능의 오차에 대한 적절한 보상이 이루어지지 못하고 있다.

따라서 본연구에서는 플라즈마 식각공정에서 식각상황의 가장 중요한 지표를 제공하는 EPD 시스템의 성능향상을 위해 인공지능기법을 적용하였다. AGC(Auto Gain Control)에는 퍼지추론을, 전압신호의 보상에는 신경회로망 기법을 사용하였으며 실험을 통하여 EPD 시스템의 성능향상을 검증하였다.

#### 2. 플라즈마 식각공정과 EPD 시스템

여러 단위공정중에서 식각공정은 웨이퍼 표면에 증착된 박막의 불필요한 부분을 포토 레지스터 등을 마스크로 사용해서 제거함으로써 패턴을 가공한다.[2] 마스크 패턴은 photolithography에 의해 마스크에서 포토 레지스터로 전사되고, 박막의 패턴은 포토 레지스터의 윈도우를 통해서 노출된 부분을 부식시켜 형성된다. 식각공정 후에 포토 레지스터는 제거되어 박막형성과정이 완료된다.(그림 1)

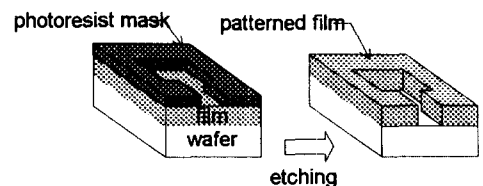


그림 1. Photoresist를 이용한 특정 film 식각  
Fig. 1. Film Etching using Photoresist

그림 1과 같이 특정 film을 플라즈마를 이용하여 식각하게 되면 반응가스는 고유한 파장의 빛을 내게되는데 이러한 빛의 세기는 film이 식각진행과 함께 감소하게 되고 마침내 일정상태를 유지하게 되면 Bulk 식각이 종료되고 Overetch를 수행하게된다. EPD 시스템은 이러한 특정 파장을 갖는 빛을 전압으로 변환하여 사용자에게 그 신호패적을 보여줄 수 있다.(그림 2)

그림 3은 반도체 생산라인에서 활용되고 있는 EPD 시스템의 구조로서 1)식각반응실의 빛을 Monochromator에 전달하는 광케이블, 2)빛의 세기를 일정한 전압레벨(0~10V)로 전환해주는 Monochromator, 3)이들을 제어하고 신호패적을 디스플레이하는 EPD 제어기로 구성되어 있다.

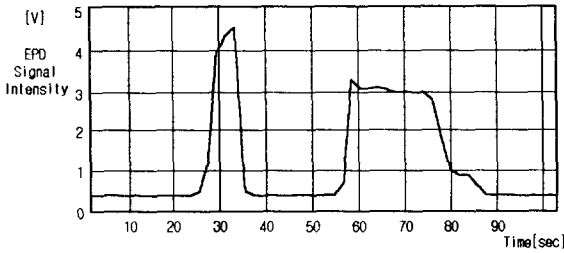


그림 2. End Point Detection을 위한 신호패적  
Fig. 2. Signal Trace for End Point Detectio

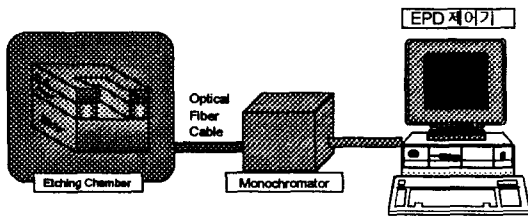


그림 3. EPD 시스템  
Fig. 3. EPD System

Monochromator에 내장되어 있는 PMT(Photomultiplier)는 빛과 전압과의 적절한 대응을 위해 PMT Gain이 필요하며 EPD 제어기는 사용자의 정의에 따라 PMT Gain을 줄 수 있지만 실제로 이는 많은 경험과 시행착오를 필요로 하기 때문에 초기화시간에 이를 자동적으로 설정해주는 AGC(Auto Gain Control) Tracking을 사용한다. End Point Detection 방법이 "FALLING EDGE" (반응물질이 식각됨에 따라 전압신호가 떨어지는 반응)인 경우, 식각시작신호가 들어오면 Monochromator로부터 들어오는 전압신호의 크기가 0.3이 되도록 Gain을 조정해야 하는데 전압신호를 백분율로 환산했을 때 초기의 전압레벨이 전체 범위의 30~60%일때 정상적인 End Point Detection이 가능하기 때문이다. 식각반응실의 내적변동은 Tracking 시간안에 Gain의 설정을 곤란하게 하는 경우가 자주 발생하며 Gain의 적절한 설정에 실패하면 EPD 제어기는 Tracking 시간의 종료시에 설정된 Gain을 그냥 사용하게된다.

한편 Monochromator에서 EPD 제어기로 들어가는 전압신호는 아날로그 신호지만 End Point Detection을 위해서는 A/D 변환된 신호를 사용한다. 디지털 전압신호는 A/D 컨버터의 디지털 분해능[3]때문에 미묘한 차이의 End Point Detection에서는 정확

성이 떨어지게 된다.

본 연구에서는 신속하고 정확한 AGC Tracking을 위해 퍼지추론제어 기법을 도입하였다. 퍼지는 애매하고 정성적인 지식을 기초로 추론할 수 있기때문에 비선형적인 제어나 이동로봇의 자율주행과 같은 인간적 사고에 가까운 형태의 실시간 제어에 그 특성을 잘 발휘하고 있다.[4] "If(전건부)... then(후건부)...."의 제어규칙에서 전건부에는 입력들의 멤버쉽함수가, 후건부에는 출력의 함수로 구성되며 이러한 규칙의 반복추론을 통하여 제어가 이루어지게 된다. 전압신호의 크기는 A/D변환을 거치면서 A/D Converter의 분해능[8] 때문에 원래의 Analog 값과 차이가 생기는데 이러한 현상은 장비마다 조금씩 차이를 보이게 된다. 본 개발에서는 이러한 A/D 변환에 의해서 생길 수 없이 생기는 비선형적 편차를 없애기 위해 신경회로망을 사용하였다.[5] 다층신경회로망은 비선형학습에 뛰어나며 식각공정의 경우 공정의 모델링을 위해서도 이미 활용되고 있다. 사용된 신경회로망은 FFBP 알고리즘에 의해 디지털 전압을 입력으로, 변환전의 아날로그 전압을 출력으로 학습한뒤 이를 이용하여 A/D 변환에 의한 편차를 보상한다.

### 3. 실험 및 결과

#### AGC Tracking을 위한 퍼지추론제어

AGC Tracking을 위해 전압신호(0~10V)를 정규화시킨 값과 0.3과의 오차를 입력으로 하고 PMT Gain을 출력으로 하는 퍼지추론기를 구성하였으며 식각시작과 함께 초기시간이 종료될때 전압신호가 3V에 설정되도록 PMT Gain을 조정하는 것이 이 제어기의 목적이다. 이를 블록 선도로 나타내면 그림 5와 같다.

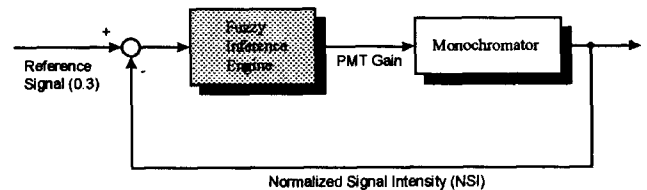


그림 5. AGC Tracking을 위한 퍼지추론 제어기  
Fig. 5. Fuzzy Inference Controller for AGC Tracking

표 1. 퍼지추론 규칙

Table 1. Fuzzy Inference Rules

$$\text{Error} = 0.3 - \text{NSI}$$

- |                           |                       |
|---------------------------|-----------------------|
| Rule 1 : If Error is NVB, | then PMT Gain is PG1. |
| Rule 2 : If Error is NB,  | then PMT Gain is PG2. |
| Rule 3 : If Error is NS,  | then PMT Gain is PG3. |
| Rule 4 : If Error is ZO,  | then PMT Gain is PG4. |
| Rule 5 : If Error is PS,  | then PMT Gain is PG5. |
| Rule 6 : If Error is PB,  | then PMT Gain is PG6. |

퍼지 추론의 규칙[5]은 표 1과 같이 전건부의 퍼지언어변수 Error를 NVB, NB, NS, ZO, PS, PB의 여섯 가지로 나누었으며, 후건부의 퍼지 언어 변수 PMT Gain은 PG1, PG2, PG3, PG4, PG5, 그리고 PG6로 나누었다. NVSI (Normalized Voltage Signal Intensity)값은 0에서 1 사이의 값이기 때문에 Error는 -0.7에서 0.3까지의 값을 갖게된다. 그리고, PMT Gain 값은 8bit 컨버터에 의한  $0\sim 2^8$ 까지의 ASCII 값이므로, 이들 각 언어변수에 대한 소속도 함수 (Membership Function)를 그림 6과 같이 구성할 수 있다.

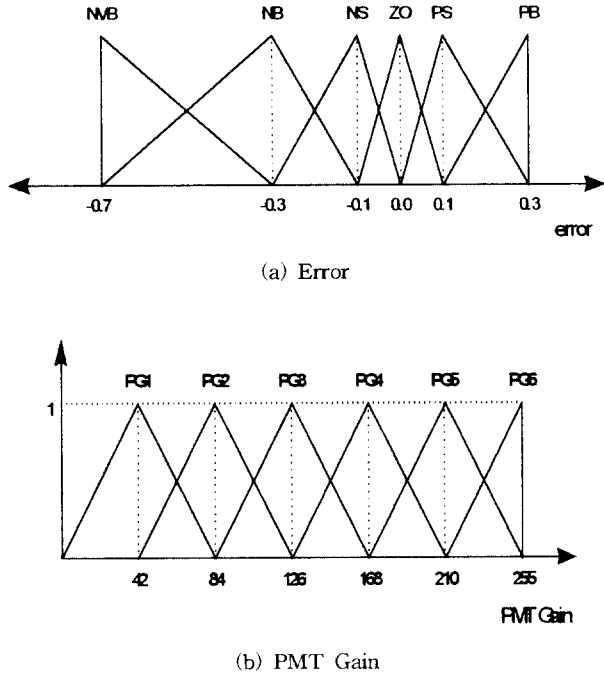


그림 6. 각 언어 변수의 소속도 함수  
Fig. 6. Membership Function of Linguistic Variable

그림 7은 이와 같은 퍼지 추론의 과정을 보여준다. 먼저 Monochromator로부터 정규화된 전압신호가 들어오면 0.3을 기준으로 전압차(Error  $e_1$ )를 계산하고 전건부의 멤버십 함수의 형태에 따라 각 규칙의 적합도  $w_i$ 를 계산한다. 그리고 각 규칙마다 후건부의 추론 결과를 구한 다음에 이 결과를 종합하여 후건부의 하단과 같이 후건부 멤버십함수의 빗금친 부분을 모은 도형을 얻을 수 있다. 이것을  $B^0$ 로 정의하면 마지막으로 식 (1)과 같이  $B^0$ 의 무게중심을 구할 수 있고 이 값이 규칙 전체의 추론 결과  $y^0$ 와 같게 된다.

$$y^0 = \frac{\int B^0(y) y dy}{\int B^0(y) dy} \quad (1)$$

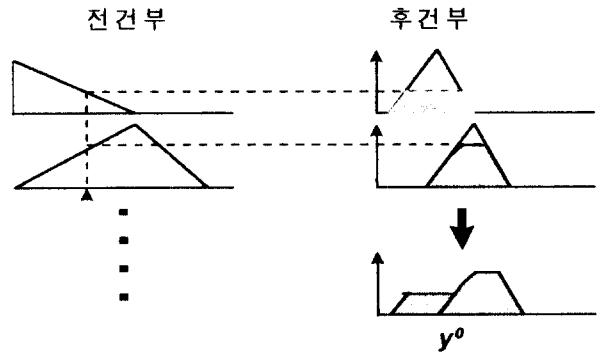


그림 7. 추론과정  
Fig. 7. Inference Step

위와 같은 퍼지추론을 이용한 AGC Tracking에서 Tracking 시간의 비교(그림 8)는 퍼지추론 제어기의 성능이 우수함을 알 수 있다. 또한 AGC Tracking의 실패율도 60회의 실험을 기준으로 기존의 Tracking이 8회, 퍼지추론의 경우는 단 한번뿐이었다.

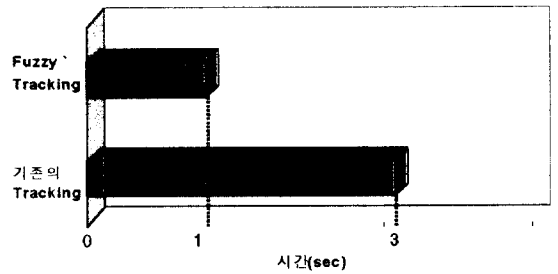


그림 8. AGC Tracking 시간  
Fig. 8. AGC Tracking Time

#### 전압신호의 A/D 변환보상을 위한 신경회로망 기법

사용된 신경회로망은 A/D 변환을 거쳐 디지털로 변환된 값을 입력으로, 변환되기 전의 실제 값을 출력으로 하여 36개 데이터를 갖고 학습하였다. 학습이 완료된 신경회로망을 프로그램상의 A/D 변환 뒤에 삽입하면 변환되기 전의 실제값과의 편차를 없앨 수 있다.[6] 그림 9의 신경회로망은 은닉층을 갖는 다층 신경회로망으로서 A/D 변환후의 값을 입력, A/D 변환전의 실제의 전압의 크기를 출력으로 한다. 은닉층의 노드수는 6개이고 입력층과 은닉층의 -1은 Threshold를 조정하기 위해 넣어주는 값이다. 그림 10은 36개의 입출력 데이터로서 A/D 변환전의 값(Monochromator에서 들어오는 실제의 전압크기), A/D 변환후의 값(학습전), 신경회로망을 통과한 값(학습후)을 비교한 그래프이다. 전압의 크기가 증가할수록 A/D 변환후의 값에 오차가 발생하며 신경회로망의 추가가 이를 잘 보상함을 알 수 있다.

## 5. 참고문헌

- [1] Model 1014 Endpoint Controller Instruction Manual, Xilinx, 1989.
- [2] S. M. Sze, "VLSI Technology", McGraw-Hill, 2nd Edition, p184-p215, 1988.
- [3] TTL Logic Data Book, Texas Instruments, 1991.
- [4] Mohammad Jamshidi, "Fuzzy Logic and Control, Software and Hardware Applications", Prentice Hall, vol. 2, p 262- 278, 1993.
- [5] Valluru B. Rao and Hayagriva V. Rao, "C++ Neural Networks and Fuzzy Logic", MIS Press, 1993.
- [6] Stephen I. Gallant, "Neural Network Learning and Expert System", MIT, 1993.
- [7] Adam Blum, "Neural Network in C++", John Wiley & Sons, 1992.
- [8] 편집부편, "D-A, A-D Interface", 도서출판 세운, 1987.

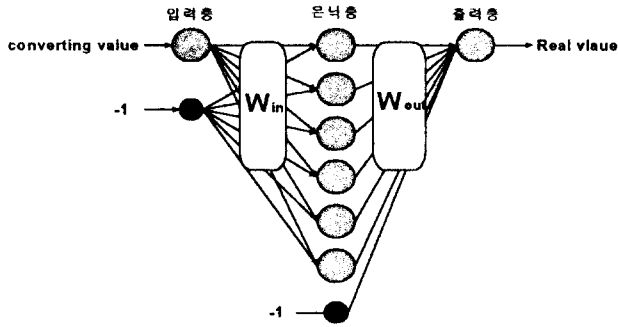


그림 9. A/D 변환보상을 위한 신경회로망  
Fig. 9. NN for A/D Conversion Compensation

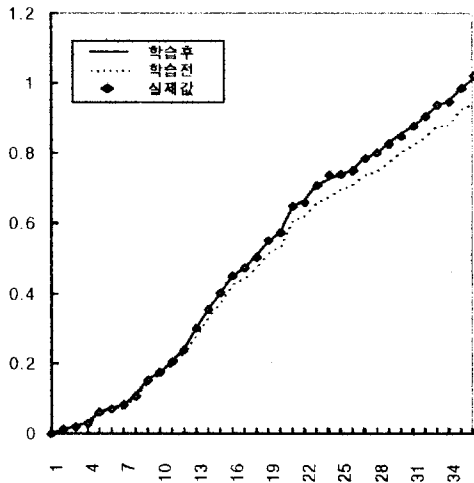


그림 10. A/D변환 및 학습에 의한 전압신호값  
Fig. 10. Voltage Signal of A/D Conversion and Learning

## 4. 결론

식각공정에서의 유일한 실시간 간접 출력지표가 되는 EPD 신호는 그 궤적이 미묘하게 변화하는 경우가 많으며 이를 위한 EPD의 전압신호는 매우 정확해야 한다. 만일 "Falling Edge"의 낙차가 적은 경우에 A/D변환에 의한 오차는 EPD를 불가능하게 할 수 있으므로 본 연구결과에서 신경회로망 기법에 의한 전압신호의 보상은 EPD의 정확성을 높여준다. 또한 AGC Tracking도 퍼지추론에 의해 보다 신속하게 이루어짐을 보였다. AGC는 다른 분야에서도 사용되고 있으므로 기법의 응용확장도 고려할 수 있다. 반도체 장비는 주장비는 물론 보조장비의 경우도 매우 고가이며 수입의존도가 매우 높다. EPD 장비의 경우도 예외는 아니며 본 연구에서 현재 개발하고 있는 EPD 장비는 이러한 기능의 추가로 장비의 수입대체효과외에 보다 성능이 우수한 반도체 주변장비를 기대할 수 있다. 앞으로의 과제는 이러한 정확한 EPD 신호에 의한 이상검출 및 그 원인을 분석하여 실시간 제어의 기반을 마련하는 것이다.