

트랙장비용 쿨 플레이트를 이용한 웨이퍼 온도제어 시스템 설계

최영진, 오병주

한남대학교 전자공학과

전화 : 042-629-8256 / Fax : 042-629-7519

Design of temperature control system using cool-plate of track equipment

Young-jin Choi, Byung-ju Oh

Abstract

This paper propose a method for the temperature control using cool-plate in the track equipment. The employed control algorithm is PID control algorithm. The control gains are found using relay auto-tuning algorithm. After that the gains are adjusted manually in trial and error. The control hardware circuit is designed and implemented in the lab. The controlled temperature reached the desired value within $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ accuracy.

I. 서론

반도체의 제조공정에서 웨이퍼의 온도제어는 생산되는 웨이퍼의 품질에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라 목표온도(23°C)에 도달 되는 시간의 단축은 웨이퍼 생산 시간을 단축하는데 중요한 요인으로 작용한다. 반도체 생산 공정에서의 온도제어는 고 정밀 분야에 속하며 목표온도에 도달했을 때, $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위를 만족해야 한다.[2]

본 논문에서는 현재 사용되고 있는 PID 알고리즘의 적용과 PID 계수를 구하기 위해 계전기 동조 방법을 적용한 후 인터페이스 하드웨어를 직접 설계하고 구현

하여 실 시스템에 적용하여 보았다. 본 논문에서는 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 의 온도오차 범위를 갖는 웨이퍼의 온도제어를 위해서는 웨이퍼의 열적인 특성과 온도제어라는 제어 응답의 지연을 고려한 제어 방법으로 구간분할 제어법을 사용하였다.

II. 쿨 플레이트를 이용한 웨이퍼 온도제어 시스템

2.1 쿨 플레이트 시스템

반도체 제조공정에서 150°C 정도로 가열된 웨이퍼의 온도를 상온 23°C 로 오차 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 갓을 면서 40초 안에 냉각하기 위해서 쿨 플레이트 시스템을 이용한다. 쿨 플레이트 시스템은 제어 알고리즘이 탑재된 제어기와 쿨 플레이트, 쿨 플레이트 전력공급기 등으로 이루어져 있다. 쿨 플레이트는 열전소자와 열을 전달이 좋은 금속을 이용한 금형 틀로 이루어져있는데, 실제 발열과 흡열을 하는 것은 열전소자이다. 아래 그림1. 에 쿨 플레이트의 내부 구성을 간단히 나타내었다.

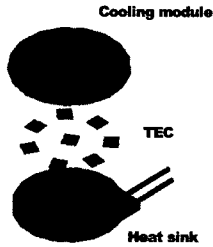


그림 1. 쿨 플레이트 내부 구성도

쿨 플레이트를 중심으로 한 웨이퍼 온도제어 시스템은 그림 2와 같다.

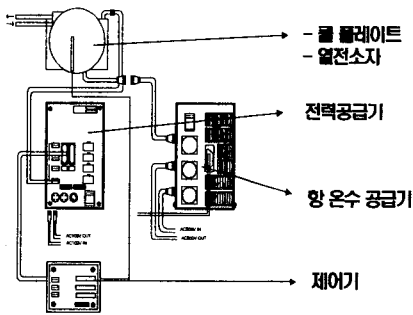


그림 2. 쿨 플레이트 시스템 구성도

웨이퍼의 온도제어는 가열된 웨이퍼가 로봇 팔에 의해 쿨 플레이트 위에 올려진 후, 열전소자의 발열과 흡열을 통해 이루어진다. 열전소자는 펨티어 효과를 기반으로 열적으로 병렬, 전기적으로 직렬로 연결된 반도체에 직류 전력을 가하였을 경우 한쪽 면은 발열을 한쪽 면은 흡열을 나타는 현상을 이용하여 제작된 열 모듈이다. 열전소자의 발열량과 흡열량은 열전소자에 공급되는 전력을 제어함으로써 열전소자의 발열량과 흡열량을 제어한다. 본 논문에서는 8개의 열전소자를 이용하였으며 공급전력으로는 최대 20V 350W의 출력을 갖는 전력공급기를 사용하였다.

2.2 제어기 구성도 및 H/W

제어기는 마이크로세서를 이용한 메인제어부와 온도 센서를 위한 센서 부, 센서 값 변환을 위한 ADC 부분과 출력을 위한 DAC 부분으로 나누어져 있으며, 전력 공급기와 인터페이스를 위해서 I/O 부분이 추가되었다.

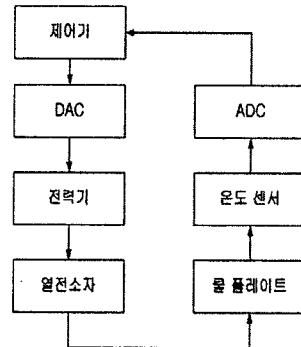


그림 3. 제어시스템 흐름도

온도센서는 Pt-1000 저항성 온도센서를 사용하였으며, 0.42/1℃의 특성을 갖는다. 하드웨어 구현에 있어 온도센서를 위한 센서부의 정확도가 전체 제어 영역에 많은 영향을 미치는 만큼 잡음과 증폭부분을 고려하여 Op-Amp를 이용한 3단 증폭기를 설계, 제작하여 사용하였다.

III. 제어 알고리즘 및 실험

열전소자에 공급되는 전력을 제어하기 위하여 사용된 알고리즘은 PID제어법을 사용하였다. PID 제어법을 수행하기 위하여 그 계수를 얻고자 계전기 동조과정을 수행하였으며, 시뮬레이션과 실제 시스템에 계전기 동조법을 수행하여 그 계수를 얻었다. 본 논문에서는 계전기 동조법은 Åström과 Hägglund[3]가 제안한 동조식을 이용하여 응답과형으로부터 계수를 산출하였다.

3.1 PID 제어법

이산형 PID제어를 위하여 식 1. 과 같이 제어량을 이산화 하고 각각의 항은 식 2.를 이용하여 계산하였다.

[4,5]

$$u(t) = u_0 + u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (1)$$

$$u_p(t) = K_p e(t)$$

$$u_i(t) = u_i(t-1) + K_p \alpha e(t)$$

$$u_d(t) = \gamma u_d(t-1) + K_p \gamma N(y(t) - y(t-1)) \quad (2)$$

여기서 $\alpha = \frac{h}{T_i}$, $\gamma = \frac{T_d}{(T_d + hN)}$, N =어거의 잡음 제거를 위한 필터형 계수이다.

3.2 계전기 동조법

Åström과 Hägglund이[3] 제안한 계전기 동조법을 수행하기 위하여, 웨이퍼 온도제어 시스템을 1차시간 지연을 갖는 모델로 의사 모델하여 시뮬레이션 한 결과 그림 3. 와 같은 결과를 얻었다.

파형 분석을 위하여 사용된 식은 Åström과 Hägglund 이 제안한 식을 따랐으며 그 식은 다음과 같다.

$$K_u = \frac{4 * A_r}{\pi A_o}$$

$$K_p = K_u \cos \omega_m$$

$$T_i = \frac{T_u}{4 * \pi} (\tan \omega_m + \sqrt{1 + \tan^2 \omega_m}) \quad (3)$$

$$T_d = \frac{T_i}{4}$$

(여기서 A_r =계전기 파형의 크기, A_o =출력파형의 크기, T_u =한계응답 주기이다. 위상여유도 $\omega=80^\circ$ 로 설정하였다.)

그림 5.의 파형을 분석하여 $K_p=2.7929$, $T_i=3.6383$, $T_d=0.9096$ 의 계수를 얻을 수가 있었다. 얻어진 계수로 실제 시스템을 제어하여 그림 4. 와 같은 결과를 얻었다.

계전기 동조법을 이용하여 구한 계수들을 이용하여 PID 알고리즘을 수행한 결과는 그림 5. 와 그림 7.이다.

3.3 구간분할제어법

수차례 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1. 온도제어는 다른 제어분야와 달리 제어출력에 대한 플랜트 응답에 대한 시간지연 항이 길다.
2. 온도제어분야는 제어 대상의 물성(비중)을 고려한 제어법이 필요하다.

위와 같은 결과를 이용하여 본 논문에서는 구간 분할제어 방법을 이용하여 온도제어를 수행하였다.

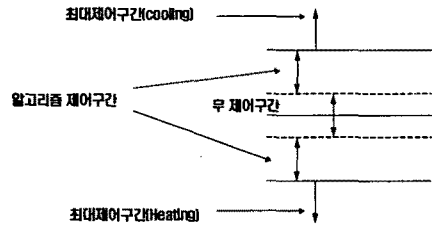


그림 4. 구간 분할제어법 적용을 위한 제어 구간분할

구간 분할은 무 제어구간과 알고리즘 제어구간, 최대제어구간 으로 분할하였다. 그림 4.의 가운데 실선은 목표온도이며, 실선의 위아래의 점선 영역은 무 제어구간의 설정 범위이다. 점선 위아래의 실선 밖의 영역은 최대제어구간의 범위이다.

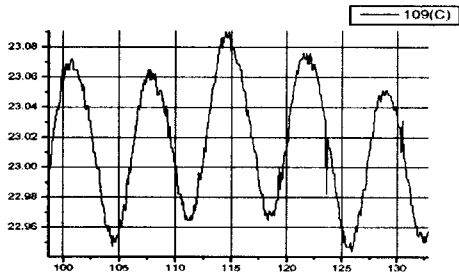
무 제어구간은 웨이퍼의 비중을 고려하여 수차례 실험 결과 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 로 설정하였다. 최대제어구간은 목표온도로 빠르게 정착시키기 위하여 사용하였다.

구간 분할 제어법을 적용하여 웨이퍼의 온도제어를 수행하였다.

IV. 결론

실 플레이트에 대한 계전기 한계응답을 구한 뒤, PID 제어법을 이용하여 웨이퍼의 온도제어를 수행하였다. PID의 계수는 계전기 한계응답을 통해서 얻었으며, 그 식은 식3.과 동일한 수식을 통해서 연산하였다. 실험 환경은 실온 21°C , 항온수 20°C , 웨이퍼는 150°C 까지 가열한 후에 쿨 플레이트를 이용하여 냉각을 실시하였으며, 목적온도 23°C 까지 냉각을 실시하며 오차 범위 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 를 갖게 하기 위하여 실험하였다. 계수 조정은 계전기 동조법을 이용한 PID제어법을 이용하여

으며, 성능향상을 위하여 구간분할제어법을 첨가하여 사용하였다.



$$\phi_m = 80 \text{ deg } K_p = 28.6561, T_i = 9.0957 T_d = 2.2737$$

그림 5. 실 시스템에 계전기 프로그램을 이용한 진동실험

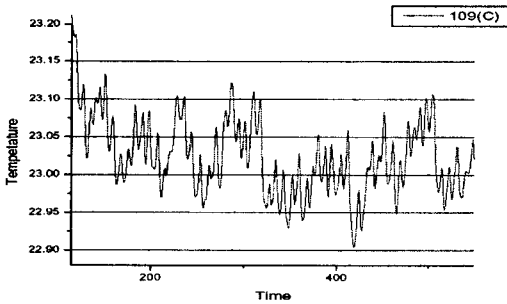


그림 6. 계전기 진동파형에서 얻은 계수를 이용한 온도제어

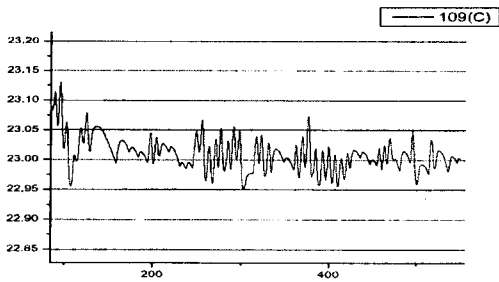


그림 7. 구간분할제어법을 적용한 온도제어

V. 향후 과제 및 적용방안

실험결과 온도제어라는 분야에서는 온도에 대한 대상체의 비중을 고려한 온도제어가 꼭 필요하며, 시스템 응답에 대한 시간지연항의 고려가 필요하다. 뿐만 아니라, 오차범위가 적은 경우의 온도제어일 경우 무제어구간의 고려가 반드시 필요하다. 향후 본 논문은 웨이퍼의 온도제어 뿐만 아니라 정밀한 온도제어 분야인 병원체 실험, 화학물 합성, 제조, 원자력 분야 등에 활용 될 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] Isaksson, A. J., and Graebe, S. F. Analytical PID parameter expressions for higher order systems. *Automatica*, Vol.35 : 1121-1130.(1999)
- [2] Voda, A., and I. D. Landau A method for the auto-calibration of PID controllers, *Automatica*, Vol.31, No.1 : 44-53 (1995)
- [3] Åström, K. J., and Hägglund, T. "PID controllers: Theory, design and tuning"(2nd ed.). Research-Triangle Park, NC: Instrument Society of America. (1995)
- [4] Loron, L. Tuning of PID controllers by the non-symmetrical optimum method. *Automatica*, Vol.33, No.1 :103-107.[4] (1997)