

RTP시스템의 프로파일작성을 위한 PID제어기 설계

홍성희, 최수영, 박기현  
 \*성균관대학교 전기 전자 및 컴퓨터 공학부

PID controller design for profile of the RTP system

Sunghee Hong, Sooyoung Choi, Kiheon Park  
 \*The Dept. of Electrical & Computer Eng., Sung-Kyun-Kwan Univ.

**Abstract** - RTP(Rapid Thermal Processing)은 IC제조 공정과 관련된 열처리 과정에 사용되는 단일 웨이퍼 프로세스 기술이다. 반도체 웨이퍼를 고속 열처리할 때 웨이퍼별로 작은 반응실에서 가열, 가공, 냉각된다. 현재 사용되는 반도체 열처리장비는 고온로(furnace)에 의해 대부분 이루어지지만, 시간이 많이 걸려서 주문형반도체 생산과 같은 다양한 종류의 웨이퍼를 소량 생산하는 데는 부적절하다. 이에 매우 적은 시간이 소요되는 RTP장비가 많이 연구되고 있다. 그러나 RTP는 예기치 못한 몇 가지의 문제점을 일으킨다. 그중 하나는 웨이퍼 표면에 분포된 온도의 불 균일성이다. 이러한 불 균일성은 웨이퍼의 표면에 심각한 왜곡(distortion)을 일으켜 좋지 못한 결과를 가져오게 한다. 이번 논문의 목적은 RTP시스템을 수학적으로 모델링하고, 이를 이용하여 멀티 램프 시스템의 입력값을 조절하여 이미 배치된 램프에 대한 최적의 온도 균일도에 알맞은 각 램프입력을 구하여 램프 입력 프로파일을 만들고 또한 이를 이용하여 외란에 대한 PID 제어기 설계를 목표로 한다.

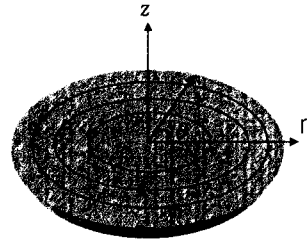


그림1. 웨이퍼의 모델링

위의 식에서 램프의 구조를 원형으로 고정하면  $\theta$ 에 대해 무관한 것이 되며, 또한 웨이퍼의 두께는 매우 얇으므로 그 두께를 무시하면 아래와 같은 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{q_b(r) + q_t(r)}{Z} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

1. 서 론

RTP(Rapid Thermal Processing)은 IC(Integrated Circuit) 제조 공정과 관련된 열처리 과정에 사용되는 단일 웨이퍼 프로세스 기술이다. 현재 집적회로 가공에 있어서 웨이퍼의 열처리는 배치가공(batch process)으로써, 많은 웨이퍼를 동시에 큰 오븐에 의해 이루어지며, 수 십 분에서 수 시간이 소요되므로 산업현장에서는 생산량이 많은 제약을 받는다. 그러나 RTP는 좁은 공간에서 짧은 시간에 웨이퍼별로 램프에 의한 높은 가공 온도에서 가열되고 냉각된다. 가공 단계가 완료될 때까지는 수십 초만이 필요하다. 램프의 파워는 각각 개별적으로, 혹은 그룹 전체가 동시에 웨이퍼의 온도제어를 위해 조절되어 지는데, 이 논문에서 우리는 균일도를 잘 이루면서 기준입력에 따른 온도 추종이 잘 이루어지도록 개루프 형태와 폐루프 형태를 모두 이용하는 형태의 제어 방법을 사용한다.

2. 본 론

2.1 RTP 시스템의 모델링

그림1과 같이 웨이퍼를 원통좌표시스템에 의해 표현하여 열전도 방정식을 표시하여 보면,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (k \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

T : 온도, k : 열전도도,  $\rho$  : 질량 밀도,  $C_p$  : 비열

경계조건:  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$  (r=0일 때),  $k \frac{\partial T}{\partial r} = q_{edge}$  (r=R일 때)

여기서  $q_b$ : 웨이퍼의 bottom으로 들어가는 열유량  
 $q_t$ : 웨이퍼의 top으로 들어가는 열유량  
 $Z$ : 웨이퍼의 두께

위에서 구한 식을 유한 요소법에 의해 전개를 하기 위해 그림1에서와 같이 웨이퍼를 20개로 분리한다. 그래서 각각의 부분들간의 열유량의 관계를 구하여 전개하면, 아래와 같이 20개의 벡터로 표시된 열유량들로 나타낼 수 있다.

$$q = K^{rad} T^s + K^{cond} (T) T + K^{conv} \left( T - \begin{bmatrix} T_{gas} \\ \vdots \\ T_{gas} \end{bmatrix} \right) + LP + q^{wall} + q^{dist} \quad (3)$$

$K^{rad}$ : 복사항,  $K^{cond}$ : 전도항,  $K^{conv}$ : 대류항, LP: 램프 위,  $q^{wall}$ : 벽에서 반사되는 열유량,  $q^{dist}$ : 각종 외란항

위의 식은 전체 열유량(즉 웨이퍼의 한 구간에서의 전체 열유량)은 복사, 대류, 전도, 각종 외란항의 합으로 표현된다는 의미이다. 이러한 총 열유량에 의해 웨이퍼의 온도는 다음 식에 의해 변화하게 된다.

$$\dot{T} = C^{-1} q \quad (4)$$

2.2 시뮬레이션

시뮬레이션은 Matlab에 있는 Simulink를 이용하였으나 각각의 램프파워는 모두 같은 이득값을 주어 입력하였다.

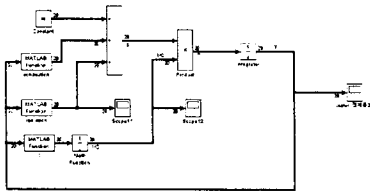


그림 2. 전체 시뮬레이션도

위와 같은 형태로 시뮬레이션을 하였을 때, 즉 램프 파워의 이득 값을 제어하지 않고 모두 같은 값으로 하였을 경우에는 아래의 결과와 같이 대략 35℃에서 40℃ 정도의 웨이퍼의 온도 불균일도가 발생한다.

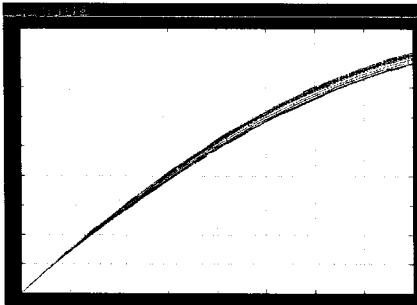


그림 3. 웨이퍼 20구간에서의 온도 곡선

이와 같은 온도 균일도 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 방법을 사용한다.

$a_1 a_2 a_3 a_4 a_5$ 는  $20 \times 1$ 행렬을 갖는 벡터이고 물리적인 의미는 웨이퍼 반지름에 대한 램프 파워 값이다.  $b$ 도  $20 \times 1$ 행렬을 갖는 벡터로 각 웨이퍼 반지름에 대한 균일도를 맞춘 목표 파워 값이다. 이때 우리는  $a_1 a_2 a_3 a_4 a_5$  각각에 독립적인 파워를 값을 공급하여  $b$ 에 나타난 목표치에 도달하여야 하므로 이것을 수식으로 표현하면

$$K_1 a_1 + K_2 a_2 + K_3 a_3 + K_4 a_4 + K_5 a_5 = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5] \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \end{bmatrix} = A \cdot K \geq b \quad (5)$$

이때  $b$ 값에 대해서  $\|AK - b\|_2^2$  값이 최소가 되는  $K$ 행렬을 찾으면

$$K = A^+ \cdot b \quad (6)$$

이와 같은 방법으로 램프의 파워 값들에 대한 균일도 프로파일을 작성하여 이에 다른 램프 이득 값을 입력하여 주면 다음과 같은 온도 출력 곡선이 나오게 된다.

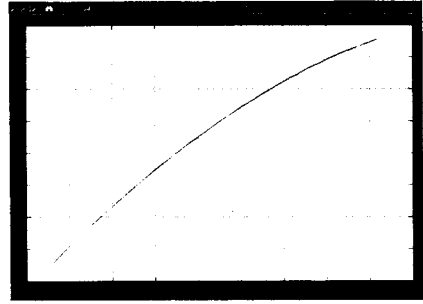


그림 4. 웨이퍼의 온도 곡선

이러한 게인 프로파일을 이용하여 램프파워를 조절하여 웨이퍼를 가열하면 균일도를 유지한 상태로 온도를 증가시킬 수가 있게 되므로 처음에는 MIMO시스템이었던 것이 SISO시스템으로 바뀌어 제어가 쉽게 됨을 알 수 있다.

### 2.3 제어기 설계

RTP시스템은 여러 가지 온도 제한 조건이 있다. 하나는 온도 균일도를 유지하여야 한다는 것이고, 다른 하나는 600℃와 1000℃에서는 기체주입에도 불구하고 그 온도를 일정한 시간동안 유지하여야 한다. 전자의 조건은 이득 값의 조정으로 해결하였고, 후자의 조건은 PID 제어기를 이용하여 해결하고자 한다.

#### 2.3.1 개루프 프로파일을 위한 제어기

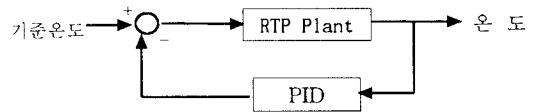


그림 5. PID 제어기 설계

아래 그림에서와 같은 형태의 기준온도를 넣어 주면, 웨이퍼의 실제 온도는 균일도를 이루면서 증가하게 되고, 적당한 PID 계수값들을 잘 튜닝하게 되면 기준온도를 잘 따라가게 할 수 있다. 이때 튜닝은 시행착오적인 방법으로 하였다.

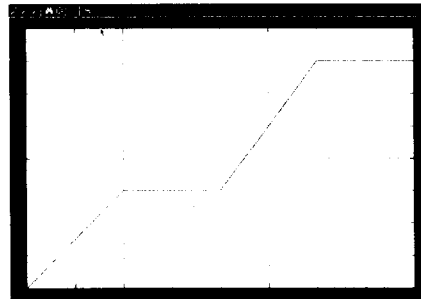


그림 6. 웨이퍼의 기준온도

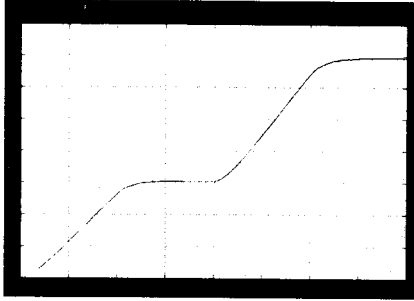


그림 7. 웨이퍼의 실제 온도

이상과 같은 방법으로, 지금까지 구한 램프입력 데이터를 가지고 다시 오픈 루프형태로 RTP를 제어할 수 있도록 프로파일(시간에 따른 램프 이득값)을 모두 작성하여, PC상에 입력한다(그림 8참조). 이를 토대로 오픈루프의 상태에서 다시 RTP시스템에 입력으로 넣으면 처음의 폐루프 시스템과 같은 형태의 출력이 나온다는 것을 쉽게 알 수 있다. 이러한 데이터를 토대로 하여 다시 아래와 같은 제어기를 설계하자.

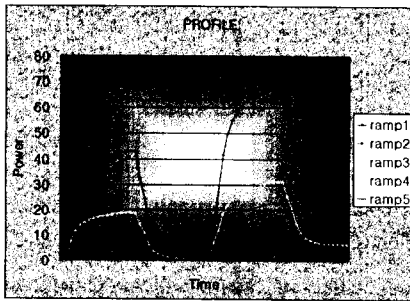


그림 8. 개방루프 램프 프로파일

### 2.3.2 폐루프 위한 제어기

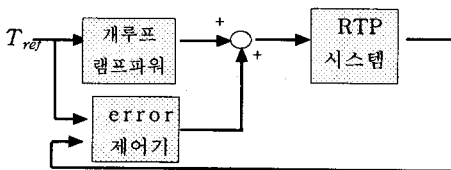


그림 9. 실제 시스템의 제어 방법

위의 그림 9는 개루프 제어와 폐루프제어를 합하여 놓은 것이다. 여기서 에러 제어기의 역할은 개루프제어를 통해 발생할 수 있는 기준입력과의 오차를 보상하기 위한 것이다. 위의 그림은 산업현장에서 사용하는 일반적인 제어기(feedback-only)와는 다른 형태의 제어기로서 이러한 제어기를 사용하는 이유는 다음 두가지로 요약할 수 있다. 첫째로 RTP는 가열하기 전부터 기준온도에 대한 정보를 모두 알고 있으나, 일반적인 제어는 전적으로 causal이므로 기준온도에 대한 미래의 값을 예상할 수 없다. 둘째는 일반적인 제어는 수백℃의 온도오차나 1-2℃ 가량의 적은 오차까지도 둘 다 제어를 하도록 설계한다. 그러므로 두가지의 오차신호를 다 제어하는 것보다 한가지의 오차만을 전담하여 제어하도록 하는 것이

훨씬 쉬운 방법일 것이다. 그래서 RTP시스템에서는 개루프 제어를 통해 수백 도의 온도제어를 하고 여기서 발생하는 여러 가지 외란에 의한 몇 ℃가량의 에러는 feedback제어를 통해 제어를 하는 방식이다.

### 3. 결 론

이번 논문에서는 이미 확정된 램프구조를 가지고, 각각의 램프파워를 조절하여 균일도를 유지하면서 기준온도에 대한 웨이퍼의 온도상승이 이루어지고, 또한 각종 외란에도 기준온도를 잘 추종하기위해 PID제어기를 설계하였다. 또한 RTP의 가장 큰 문제점들중의 하나였던, 짧은 구간동안의 온도 급상승으로 인한 제어기의 순간적인 기준온도와의 커다란 오차를 오픈루프와 폐루프의 두가지 제어 방법으로 해결할 수 있게 하였다. 온도 균일도 문제와 기준 온도 추종문제를 모두 풀기 위해 최소자승법을 이용한 램프파워를 모두 구하여, 이 프로파일된 데이터들을 입력하였다. 이로 인해 처음에는 다중입력 다중출력의 MIMO시스템이던 것이 SISO로 바뀌어 균일도문제는 고려하지 않고, 온도 추종에만 작동하는 제어기를 설계하는 방식이므로, 기준 온도 추종문제에도 쉽게 이용할 수 있었다.

이 논문에서 쓰인 RTP시스템은 원형의 구조를 가진 램프 각자가 파워를 조절하는 방식인데, 꼭 원형을 이루지 않더라도 램프의 파워 분포를 이용하여, 벡터가 아닌 행렬의 형태로 표현하면, 최소 자승법이라는 같은 문제로 귀착될 것이므로, 이와 같은 RTP제어 방식은 여러 가지의 램프구조를 가지고 있는 현재의 RTP시스템에 모두 적용이 가능할 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Lord, H. A., "Thermal and Stress Analysis of Semiconductor Wafer in a Rapid Thermal Processing oven," IEEE Trans. Semicond. Manufact.,
- [2] Knutson, K. L. et al., "Thermal Effects of Gases in Rapid Thermal Processing," In. Mater. Res. Soc. Proc., 1991
- [3] Norman, S. A. et al., "Wafer Temperature Control in Rapid Thermal Processing," Ph. D. Thesis, Stanford University, 1992
- [4] Badgwell, T. A. et al., "Modeling and Control of Microelectronics Materials Processing," Com. Chem. Eng., Vol. 19, No.1
- [5] Campbell, S. A. et al., "Transient Effects in Rapid Thermal Processing," IEEE Trans. Semicond. Manufact., Vol. 5., No. 4, November 1992