

# 하중 혼합감도함수를 이용한 RTP 시스템의 건설제어기 설계

## Robust Controller Design for RTP System using Weighted Mixed Sensitivity Minimization

°이 상 경\*, 오 도 창\*\*, 박 흥배\*

\*경북대학교 전자전기공학부(Tel: +82-53-950-5548; Fax: +82-53-950-5505; E-mail: leesk@palgong.kyungpook.ac.kr)

\*\*건양대학교 정보전자공학부(Tel: +82-461-30-5369; Fax: +82-461-736-4079; E-mail: docoh@konyang.ac.kr)

**Abstracts** In this paper, we present an  $H^\infty$  controller design of RTP system satisfying robust stability and performance using weighted mixed sensitivity minimization. In industrial fields, RTP system is widely used for improving the oxidation and the annealing in semiconductor manufacturing process. The main control factors are temperature control of wafer and uniformity in the wafer. The control of temperature and uniformity has been solved by PI control method. We improve robust stability and performance of RTP system by the design of  $H^\infty$  controller using the weighted mixed sensitivity function. An example is proposed to show the validity of proposed method.

**Keywords**  $H^\infty$  Control, RTP system, mixed sensitivity minimization problem, loop shaping

### 1. 서 론

반도체 웨이퍼를 고속 열처리할때 웨이퍼별로 작은 반응실에서 가열, 가공, 냉각된다. 고속 열처리 공정은 집적회로(IC)의 웨이퍼 가공 공정에 다양하게 사용되는 새로운 기술이다. 웨이퍼 가공 공정에는 세척(cleaning), 소둔(annealing), 산화(oxidation), 질화(nitridation), 화학적 증기 증착(chemical vapor deposition) 등이 있다. 현재 집적회로 가공에 있어서 웨이퍼의 열처리는 배치가공(batch process)으로써 많은 웨이퍼를 동시에 큰 오븐에 의해 이루어지며, 수 십분에서 수 시간이 소요되므로 산업현장에서는 생산량이 많은 제약에 받는다. RTP는 좁은 공간에서 웨이퍼별로 가공 온도를 가열되고 냉각된다. 반응실 벽은 몰로 냉각되어 상온을 유지한다. 따라서 가공 단계가 완료될 때까지 수 십초만이 필요하다. RTP 시스템을 설계할때 가장 중요한 문제의 하나는 온도제어를 위한 시스템 모델링인데, 69년 Hu[8]에 의해 열방사, 열전달, 열용량 등에 대한 이론들이 발표되면서 88년 Lord[10] 및 Hill[7]에 의해 RTP의 모델에 대한 상세한 연구가 있었다. 특히 92년 스탠포드 대학의 Norman 등[12]에 의해 RTP 시스템에 대한 모델링 방법이 완성되었고, 이를 바탕으로 스탠포드 대학과 Integrated System사간의 공동연구가 진행되면서 RTP의 온도제어에 대한 제어기 설계연구가 가속되었다. 제어기를 설계할때 또 다른 문제는 고유의 복잡한 비선형의 열특성을 갖고 있다는 것이다[6]. 온도제어는 웨이퍼내의 온도 균일성을 유지하는 것과 주어진 규격대로 따라가는 온도 추적성이다[3,4]. 특히 최 등[1]은  $H^\infty$  2자유도 모델정합 제어기 설계방법[8]을 이용하여 온도 균일성을 개선하기 위한 건설제어기를 설계하였다.

본 논문에서는 [2]에 소개된 하중 혼합감도함수를 이용하여 RTP 시스템의 건설안정성과 성능을 보장하는  $H^\infty$  제어기의 설계기법을 제시하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제시한 제어기 설계기법의 타당성을 보인다.

### 2. RTP 모델

#### 2.1 시스템 개요

RTP는 반도체 제조공정 중에서 가장 중요한 첨단기술의 하

나이며 기존의 전기 튜브 방식과 비교할때 처리 기능이 다양하고 온도를 200°C/초 이상 증가시킬 수 있기 때문에 짧은 시간에 작업을 할 수 있어 경비를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 RTP는 웨이퍼별로 약간 다른 공정 환경에서 작업되지만 좋은 균일성을 유지하는 장점이 있다. 대표적인 RTP 시스템은 그림 1에 나타난다.

RTP 시스템은 웨이퍼별로 등은 조건으로 대기압 또는 저압에서 빠르게 가열하며 작업을 한다. 반응실은 석영, 실리콘 카바이드, 스테인레스 스틸, 또는 석영 창문을 가진 알루미늄으로 구성되어 있다. 램프와 반응실 사이에 투명한 창문이 있으며 빛은 램프에서 웨이퍼로 빛을 통과하게 하고 아랫창은 웨이퍼 온도의 원거리 측정 또는 자외선 빛을 웨이퍼에 응용할 수 있게 한다. 웨이퍼는 강력한 램프 어레이에 의해 발생하는 가시광선과 적외선에 의해 가열된다. 램프 어레이에 요구되는 전력은 전형적으로 수 십KW이며 다이어그램은 그림 2에 주어진다.

온도측정 시스템은 웨이퍼 온도를 정하기 위해 제어 루프내에 위치하며, 여러점에서의 온도측정은 시스템 파라미터 추출 및 온도 프로파일의 제한제어를 위해 필요하다. 웨이퍼 가까이 위치한 센서는 웨이퍼를 오염시킬 수 있고 반응실의 환경에 의해 기능이 떨어지기 때문에 웨이퍼의 온도를 측정할때 어려운 점이 있다. 온도 감지를 위해 사용하는 일반적인 방법은 반응실 밖에 한개이상의 고온계를 사용하는 것이다. 빛은 반응실의 창문을 통해 고온계로 지나간다. 램프 설계 및 센서의 종류에 상관없이 정확한 온도제어가 요구된다.

#### 2.2 모델

최근 여러개의 램프어레이 및 고온계 센서를 가진 시스템에 대한 RTP 모델이 연구되었다[12]. 제어기 설계를 위해 Norman 등[12]이 제시한 모델을 사용한다. 웨이퍼 내에서 열전도는 편미분에 의해

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

$$\text{경계조건: } \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial r} = 0; r=0 \\ k \frac{\partial T}{\partial r} = q_e; r=R \end{array} \right.$$

로 주어진다[12]. 여기서,  $T$ 는 온도,  $k$ 는 열전도도,  $\rho$ 는 질량밀도,  $C_p$ 는 비열,  $q_b$ ,  $q_c$ ,  $q_e$ 는 각각 웨이퍼에서 방사되는 열 및 대류열, 그리고 램프열이 웨이퍼에 흡수되는 열이다. 여기서 사용된 접근방식은 웨이퍼를  $I$ 개의 동심원으로 나눈다. 한개는 원통이고 나머지는 동심원이다.  $i$ 번째 동심원 온도의 시간에 대한 미분식은

$$\dot{T}_i = \frac{q_i}{m_i C_p(T_i)} \quad (2)$$

로 주어지고, 여기서  $m_i$ 는  $i$ 번째 동심원의 질량이다.  $I$ 번째 요소로 유입되는 전체 열량은

$$q_i = q_i^{em} + q_i^{ab} + q_i^{cond} + q_i^{conv} + q_i^{dist} \quad (3)$$

와 같이 5가지 성분의 합으로 나타낼 수 있다. 열전도의 모델은 온도의 미분으로 근사화되며  $i=1, \dots, I$ 에 대해 식 (2)와 (3)은 식 (1)과 같이 독립변수 시간에 따른 미분방정식을 가지는 시스템으로 근사화된다. 여기서  $q_i^{em}$ 는 웨이퍼에서 발생하는 방사열,  $q_i^{ab}$ 는 웨이퍼로 흡수되는 방사열,  $q_i^{cond}$ 는 웨이퍼 반지름 위치에 따른 전도열,  $q_i^{conv}$ 는 웨이퍼와 반응실 내로 주입되는 가스사이의 발생하는 대류열,  $q_i^{dist}$ 는 외란을 나타내며 모델에 포함되지 않고 전달되는 열 및 모델 파라미터 또는 모델 구조의 오차에 의한 열을 나타낸다.

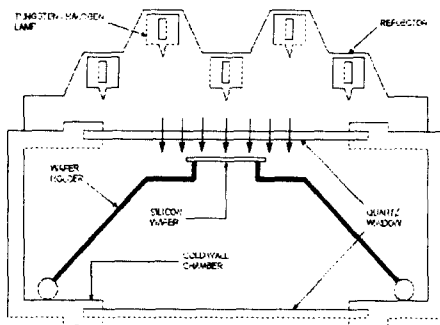


그림 1. RTP의 개략도  
Fig. 1 Schematic of RTP.

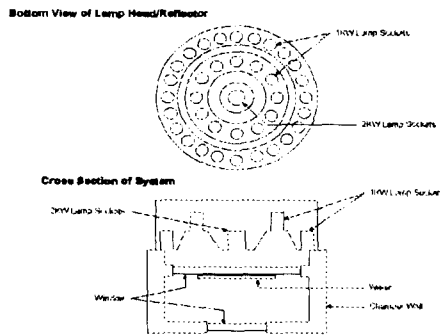


그림 2. 동심원 링으로 배열된 텨스텐-할로젠 램프의 단면도  
Fig. 2 One-sided heating using tungsten-halogen lamps arranged in concentric ring.

### 3. 온도제어기 설계

#### 3.1 RTP에 대한 제어 규칙

RTP에 대한 일반적인 규칙은 램핑(ramping)동안  $\pm 2.5K$ 이하의 온도편차를 가지는 공정 레시피(recipe)를 통한 균일한 온도 프로파일을 유지하고 최대 1.5K와 평균 0.5K보다 작은 정상상태의 온도편차를 가지며 가능한 정정시간을 빠르게 하면서 램핑의 끝부분의 오버슈트는 5K이하 유지하여야 한다.

#### 3.2 RTP의 선형화 모델 이용

각 선형화된 모델은 3개의 입력과 3개의 출력을 가지며 20개의 상태를 가지고 있다. 입력은 3개의 다른 전력 크기를 가진 램프군이며 출력은 웨이퍼의 3점의 다른 위치에서 측정된 온도이다. 본 논문에서는 동작온도 1000K에서 얻어진 선형화된 모델을 MATLAB 프로그램을 이용하여 제어기를 설계한다.

#### 3.3 제어기 설계

제어기 설계의 목적은 건실안정성과 좋은 성능을 보장하는 것이다. 제어기 설계의 여러가지 방법 가운데 하중 혼합감도함수를 채택한 이유는 비선형 RTP 모델을 선형화하는 과정에서 유발되는 모델오차를 취급하고, RTP 작업 영역내의 공기 온도 및 압력변화와 같은 외란에 대해 건실성을 유지하기 위해서이다. 따라서 루프셰이핑을 위한 하중함수, 감도최소화를 위한 하중함수, 보조감도최소화를 위한 하중함수를 이용하여 RTP 시스템의 건실안정성과 성능을 동시에 유지한다.

본 논문에서는 Glover 등[5]의  $H^\infty$  제어기 설계 알고리즘과 루프셰이핑 방법[11]을 이용한다. 루프셰이핑 방법은  $H^\infty$  설계방법의 안정성이 보장된 상태에서 얻어진 성능과 건실성을 시행착오방법으로 구하는 것이다. 저주파에서 성능을, 고주파에서는 건실안정성을 얻는 것이 적합하다. 루프셰이핑 설계절차는 그림 3과 같이 아래와 같이 요약된다.

- ① 하중함수  $W_1$ 과  $W_2$ 를 이용하여 공칭플랜트  $G$ 의 특이치  $W_1 W_2$ 는 셰이프된 플랜트  $G_s$ 를 구성한다.
- ②  $G_s$ 에 대한 케환제어기  $K_\infty$ 는  $H^\infty$  제어기 설계 알고리즘을 이용하여 얻는다.
- ③ 최종 케환제어기  $K$ 는  $H^\infty$  제어기와 하중함수  $W_1$ 과  $W_2$ 의 조합으로  $K = W_1 K_\infty W_2$ 로 주어진다.

감도최소화는 외란제거에 초점을 두므로 RTP 시스템은 감도최소화 뿐만 아니라 건실안정성을 동시에 만족하는 혼합감도  $H^\infty$  제어기법이 필요하다. 하중 혼합감도최소화 문제에 대해 페루프시스템은 그림 4에 주어지며  $W_r(s)$ 는 감도최소화를 위한 하중함수,  $W(s)$ 는 보조감도최소화를 위한 하중함수,  $w$ 는 외부 입력,  $y$ 는 측정된 출력,  $r$ 은 기준입력이다.

그림 4에서  $w$ 에서  $z_1$ 로 나타나는 보조감도함수는

$$\frac{z_1}{w} = W_r G K (I + G K)^{-1} \quad (4)$$

로 주어지고  $w$ 에서  $z_2$ 로 나타나는 감도함수는

$$\frac{z_2}{w} = W_s (I + G K)^{-1} \quad (5)$$

이고, 여기서  $K = \alpha(s) K_\infty$ 이다. 혼합감도최소화 문제는

$$\min_{K(s)} \left\| \begin{array}{c} W_r(I + GK)^{-1} \\ W_s GK(I + GK)^{-1} \end{array} \right\|_{\infty} \quad (6)$$

로 나타낸다.  $H^{\infty}$  제어기 설계 알고리즘을 사용한 표준플랜트는

$$P = \begin{bmatrix} W_r & -W_r G \\ 0 & W_s G \\ I & -G \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 표현되고 (7)을 상태공간으로 나타내면

$$P = \begin{bmatrix} a_g & 0 & 0 & 0 & -b_g \\ b_{ux}c_g & c_{ux} & 0 & b_{ux} & -b_{ux}d_g \\ 0 & 0 & a_{wtg} & 0 & b_{wtg} \\ d_{ux}c_g & c_{ux} & 0 & d_{ux} & -d_{ux}d_g \\ 0 & 0 & c_{wtg} & 0 & d_{wtg} \\ c_g & 0 & 0 & I & -d_g \end{bmatrix} \quad (8)$$

이고, 여기서  $G_s$ ,  $W_r G$  그리고  $W_s$ 는

$$G_s = \begin{bmatrix} a_g & b_g \\ c_g & d_g \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$W_r G = \begin{bmatrix} a_{wtg} & b_{wtg} \\ c_{wtg} & d_{wtg} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$W_s = \begin{bmatrix} a_{ux} & b_{ux} \\ c_{ux} & d_{ux} \end{bmatrix} \quad (11)$$

로 정의한다.

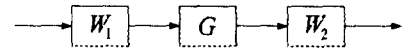
그림 4에서 시행착오법에 의해 선택된 하중함수는

$$\alpha(s) = 10^8 \times \begin{bmatrix} 0.0000 & 0 & 0 & 0.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0000 & 0 & 0 & 0.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0000 & 0 & 0 & 0.0000 \\ 0.1500 & 0 & 0 & 0.0002 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4000 & 0 & 0 & 0.0003 & 0 \\ 0 & 0 & 2.4999 & 0 & 0 & 0.0005 \end{bmatrix} \quad (12)$$

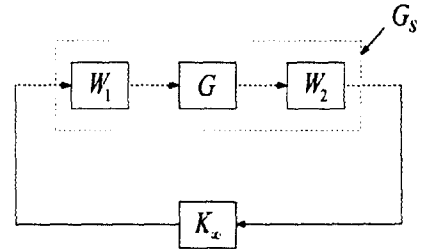
$$W_r = \frac{0.002}{s + 0.002}$$

$$W_s = \frac{s}{s + 10000}$$

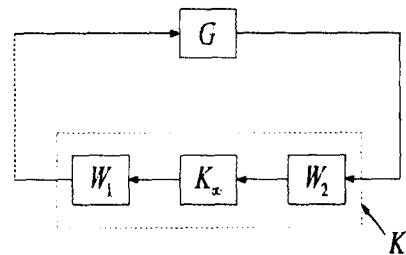
이다. 따라서 구하여진 하중함수와 공칭시스템으로부터 식 (7)과 같은 표준플랜트를 구성하고, 식 (8)과 같은 상태공간의 표준플랜트로 변형하여 Glover [5]등이 제시한  $H^{\infty}$  제어기 설계 알고리즘을 이용하면 견실성과 안정성을 동시에 꾀하는 제어기를 구할 수 있다.



(a) 셰이프된 플랜트  
(a) The shaped plant



(b)  $H^{\infty}$  제어기  
(b)  $H^{\infty}$  controller



(c) 최종 제어기  
(c) Final controller

그림 3. 루프셰이핑 설계 절차  
Fig. 3 The loopshaping design procedure.

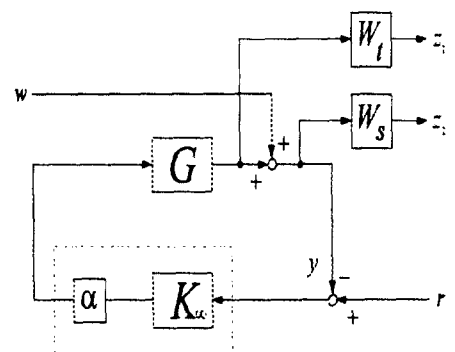


그림 4. 혼합감도 문제를 위한 페루프 시스템  
Fig. 4 The closed loop system for mixed sensitivity problem.

#### 4. 시뮬레이션 결과

RTP 시스템에 대한 시뮬레이션 결과로부터 최종제어기  $K(s)$ 의 차수는 55차이며  $\gamma$ 값은 0.0078로 매우 작은 값으로 나타났다. 외란제거 효과 및 출력 파형은 그림 5, 6에 주어진다. 외란은 단위 계단입력 신호에서 2초 지연을 가진 1K의 계단입력을 사용한다. 외부입력신호의 1 상태에만 외란을 인가하였을 경우, 설계한 제어기의 외란 제거능력은 그림 5에서 알 수 있다. 외란이 인가된 2초에서 외란의 영향을 받음을 알 수 있으나 곧 외란의 영향이 감소되었다. 그리고 1000K에서 출력 특성은 램핑(ramping)동안  $\pm 2.5K$ 이하의 온도편차를 가지는 공정 레시피(recipe)를 통한 균일한 온도 프로파일을 유지하고 최대 1.5K와 평균 0.5K보다 작은 정상상태의 온도 편차를 가지며 가능한 정정시간을 빠르게 하면서 램핑의 끝부분의 오버슈트는 5K 이하 유지하는 3.1에서 제시하는 규격을 만족하고 있음을 그림 6에서 알 수 있다. 시뮬레이션 결과에서  $H^\infty$  제어기는 외란 제거효과와 좋은 출력 추적성을 나타낸다. 그러므로 RTP 시스템에 대하여 제안한 혼합감도함수를 이용한 제어기 설계기법은 외란에 대해 좋은 성능과 견실 안정함을 보인다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 RTP 시스템에 대한 하중 혼합감도함수를 이용한 견실제어기 설계방법을 제안하였다. 제어기는 스탠포드 대학의 모델링 결과와 1000K에서 선형화된 상태 변수값을 이용하여 설계하였다. 하중 혼합감도함수를 이용하여 설계한  $H^\infty$  제어기는 RTP 시스템의 감도최소화와 견실안정성을 보장할 수 있다. 외란 제거능력과 추적성을 시뮬레이션을 통하여 외란에 대해 견실 안정성이 보장되고 좋은 추적성을 가짐을 확인할 수 있었다. 그리고 향후 진행 과정은 선형화로 근사화하지 않은 비선형 RTP 모델에 대한 설계한 제어기의 견실 안정성과 성능을 검증하는 것과 실제 RTP 시스템에 제안한 제어기를 부착하여 기존의 PI 제어기와 성능을 비교하는 것이다.

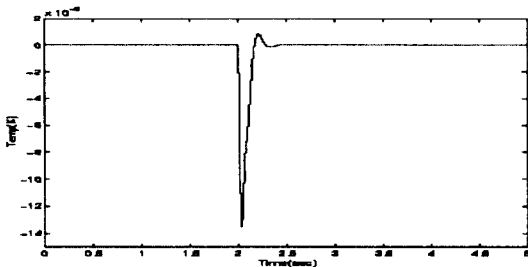


그림 5. 외란제거효과

Fig. 5 The effect of disturbance rejection.

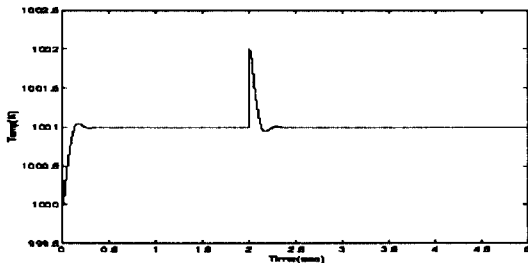


그림 6. 출력

Fig. 6 Output.

#### 참 고 문 헌

- [1] B. W. Choi, S. G. Choi, J. H. Park, and W. H. Kwon, "A robust controller design for uniform temperature control of nonlinear multivariable rapid thermal processor," *J. of Electrical Engineering and Information Science*, vol. 2, no. 2, 1997.
- [2] C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing Co., New York, pp. 121-155, 1992.
- [3] C. F. Elia, "RTP multivariable temperature controller development," *Proc of ACC*, pp. 907-911, 1994.
- [4] A. Emami-Naeimi, M. G. Kabuli, and R. L. Kosut, "Finite time tracking with actuator saturation: application to RTP temperature trajectory following," *Proc. IEEE CDC*, pp. 73-78, 1994.
- [5] Glover, K. and J. C. Doyle, "State-space formula for all stabilizing controllers that satisfy an  $H^\infty$  norm bound and relations to risk sensitivity," *Syst. & Contr. Lett.*, vol. 11, pp. 167-172, 1988.
- [6] M. Guntekin Kabuli and L. Kosut, "Improving static performance robustness of process," *Proc. IEEE CDC*, pp. 62-66, 1994.
- [7] C. Hill, S. Jones, and D. Boys, "Rapid thermal annealing-theory and practice," In R. A. Levy, editor, *Reduced Thermal Processing for ULSI*, pp. 143-180, Plenum Press, 1988.
- [8] S. M. Hu, "Temperature distribution and stress in circular wafers in a row during radiative cooling," *J. Appl. Phys.* 40: pp. 4413-4423, 1969.
- [9] D. J. N. Limebeer, E. M. Kasenally, and J. D. Perkins, "On the design of robust two degree of freedom controller," *Automatica*, vol. 29, no. 1, pp. 157-168, 1993.
- [10] H. A. Lord, "Thermal and stress analysis of semiconductor wafers in a rapid thermal processing oven," *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, 1(3): pp. 105-114, August, 1988.
- [11] McFarlane D. and K. Glover, *Robust Controller Design using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions*, Springer-Verlag, 1990.
- [12] S. A. Norman, "Wafer temperature control in rapid thermal processing," *Ph.D. Dissertation*, Stanford Univ., July, 1992.