

# 8인치 웨이퍼의 온도균일도향상을 위한 고속열처리공정기의 최적 파라미터에 설계에 관한 연구

## (A Study on the Optimal Parameter Design of Rapid Thermal Processing to Improve Wafer Temperature Uniformity)

崔成圭\*, 崔鎮榮\*, 權旭鉉\*

(Seong-Gyu Choi, Jin Young Choi, and Wook Hyun Kwon)

### 요 약

이 논문에서는 고속열처리공정기(Rapid Thermal Processing, RTP)내에 웨이퍼(wafer)의 온도균일도오차(temperature uniformity errors)를 최소화하는 고속열처리공정기의 설계 파라미터를 제시한다. 링구조의 고속열처리공정기에서 웨이퍼의 온도 균일도에 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 램프링들(lamp rings)의 각각의 위치와 웨이퍼의 높이이다. 이 논문에서는 웨이퍼의 최적의 온도 균일도를 유지하는 램프 위치와 웨이퍼 높이를 찾는 방법을 제시한다. 제시된 방법을 8인치 웨이퍼에 적용하여 최적의 램프 위치와 웨이퍼 높이를 구한다. 최적의 램프 위치와 챔버내에서의 웨이퍼의 높이를 찾기 위해 고속열처리공정기내에 웨이퍼의 높이와 램프 위치를 가변 시키고, 이에 따른 웨이퍼의 온도 균일도 문제를 선형계획법(linear programming)문제로 설정하여 최적 위치를 구한다. 마지막으로 최적화하지 않은 고속열처리공정기와의 온도균일도를 비교하여 최적화한 고속열처리공정기내에 웨이퍼의 온도 균일도 향상을 보인다.

### Abstract

In this paper, design parameters of Rapid Thermal Processing(RTP) to minimize the wafer temperature uniformity errors are proposed. Lamp ring positions and the wafer height are important parameters for wafer temperature uniformity in RTP. We propose the method to seek lamp ring positions and the wafer height for optimal temperature uniformity. The proposed method is applied to seek optimal lamp ring positions and the wafer height of 8 inch wafer. To seek the optimal lamp ring positions and the wafer height, we vary lamp ring positions and the wafer height and then formulate the wafer temperature uniformity problem to the linear programming problem. Finally, it is shown that the wafer temperature uniformity in RTP designed by optimal parameters is improved to comparing with RTP designed by the other method.

### I. 서 론

고속열처리공정기(Rapid Thermal Processing, RTP)

\* 正會員, 서울대학교 電氣工學部  
(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

接受日字:1997年7月1日, 수정완료일:1997年9月22日

란 반도체 제조공정에서 웨이퍼(wafer)의 고속 가열 및 급속 냉각을 하는 기기이다. 웨이퍼 전체에 동일한 온도를 얻어 불량 IC를 줄이고 생산 수율을 높이는 것이 반도체 생산의 목표라 할 수 있는데 고속 열처리 공정기가 가져야 할 가장 중요한 특성이 바로 웨이퍼의 전 영역에서의 균일한 온도(uniform temperature) 분포<sup>[1-3]</sup>이다. 과거에는 기준 온도의 추적 성능에만

관심을 가져왔지만 현재 IC의 회로선 폭 감소화의 추세에 맞추어 웨이퍼 전체의 온도편차를 최소화하려는 균일한 온도 분포는 필수 불가결한 성능조건으로 떠오르고 있다.

고속열처리공정기는 이러한 온도균일도를 높이기 위해, 수차례 구조를 변경해 왔으며<sup>[4-7]</sup>, 그중 가장 두드러진 구조변경은 램프의 구조에서 나타난다. 램프의 구조는 고속열처리공정기 챔버의 천정에 일정 비율로 구성하여 단변수 제어를 하였던 것에서, 링구조로 램프를 배열하여 다변수 제어를 수행하게 변경되고 있다<sup>[8-12]</sup>. 그러나, 링구조의 램프배열의 고속열처리공정기는 웨이퍼의 최대온도균일도를 얻을 수 있는 램프 위치를 고려하지 못한 채, 고속열처리공정기를 설계하여 최소의 온도 오차를 설계 당시부터 안고 있다는 문제점이 있었다. 또, 고속열처리공정기를 시행착오에 의해 설계하고 제작하고 반복을 여러 번 시행함으로써, 많은 손실을 가져왔다. 이에 대해 본 논문에서는 웨이퍼의 온도균일도를 얻기 위한 고속열처리공정기의 램프링의 위치와 웨이퍼 높이의 최적 파라미터를 제시한다.

Norman<sup>[8]</sup>은 최초로 사용하고 있는 고정된 램프 위치의 고속열처리공정기에 대해 온도 균일도 한계를 분석하였다. 또 Cho 등<sup>[9]</sup>은 4인치 웨이퍼에 대해 웨이퍼의 열손실량(Heat Loss Profile, HLP)과 열류량(Heat Flux Profile, HFP)의 차를 최소화시킴으로써, 최적의 열류량을 보상하는 고속열처리공정기의 램프의 위치를 제안하였다.

고속열처리공정기에서 웨이퍼의 온도 균일도 오차를 최소화하기 위해서는 램프의 위치도 중요하지만, 챔버 내에서 웨이퍼의 높이도 온도 균일도에 중요한 영향을 미친다. 또, 최근 웨이퍼의 크기가 커지면서, 4인치 이상의 웨이퍼 가공이 일반화되었다.

본 논문에서는 8인치 웨이퍼에 대한 램프 위치 뿐만 아니라 챔버내에서 웨이퍼의 높이를 최적화시키기 위해 고속열처리공정기내에 웨이퍼의 높이와 램프 위치의 가변에 따른, 온도 균일도 문제를 선형계획법(Linear Programming)문제로 설정하여 최적 위치를 구한다. 또한, 열류보상이 아닌, Norman<sup>[8]</sup>의 분석에 기반하여 온도 자체에 대한 문제로 설정하여 최적 위치를 구하는 방법을 제안한다.

제 II 장에서는 고속열처리공정기에 대한 구조를 소개한다. 제 III 장에서는 고속열처리공정기의 최적

설계를 위해서 필수적인 고속열처리공정기의 모델링에 관해 논한다. 제 IV 장에서는 최적화하고자 하는 고속열처리공정기의 사양을 제시하고, 이 사양에 대한 웨이퍼의 온도오차식을 보이며 최적의 웨이퍼의 높이와 램프링의 위치를 찾는 알고리즘을 제시한다. 제 V 장에서는 주어진 사양의 고속열처리공정기에 대해 최적 위치를 찾는 알고리즘에 대한 모의실험을 수행하고 고속열처리공정기가 가지는 최소의 온도 균일도 오차 및 최적 고속열처리공정기 파라미터를 도출한다. 제 VI 장에서는 본 논문에 대한 결론을 내린다.

## II. 고속열처리공정기 구조

일반적으로 링구조의 램프를 가진 고속열처리공정기는 그림 1과 같이 구성되어 있다.

고속열처리공정기는 크게 열의 원천인 링구조를 가지는 램프군(lamp rings)과 웨이퍼(wafer)를 내장하고 있는 챔버(chamber), 그리고 웨이퍼의 온도를 감지하는 온도 감지 센서(sensor)로 구성되어 있다. 챔버내의 웨이퍼의 위쪽 면에서는 텅스텐-할로젠 링구조의 램프군에 의해 발산된 빛의 광을 웨이퍼가 흡수하게 되어 있다. 수 kW의 전력(power)을 소모하는 강력한 텅스텐-할로젠 램프들로 구성되어 있다. 필요한 전력량은 웨이퍼의 크기나 고속열처리공정기 챔버의 구조, 그리고 제조 공정에 따라서 결정된다. 기존의 일정한 비율로 일자형 램프나 둥근 램프를 구성하여 단변수 제어만을 했던 구조의 고속열처리공정기는 램프마다 똑같은 전력에 의해 똑같이 빛이 방사되어 웨이퍼의 위치에 따라 고르지 못한 온도 분포를 유지하게 한다. 왜냐하면 고속열처리공정기내에 웨이퍼는 가스나 대기 중에 노출되어 있으며 대기의 온도는 가열되지 않고 웨이퍼 자체만 가열되기 때문에 웨이퍼의 가장자리 모서리 부분은 대기나 가스에 의한 온도 하강 효과를 일으켜 중심부와는 다른 온도 분포를 유지하게 된다. 이러한 단점 때문에 여기서 사용한 모델은 3종의 링으로 램프를 묶어서 각각을 따로 따로 제어할 수 있는 링구조의 램프에 의한 모델이다. 그림 2는 고속열처리공정기 윗면의 램프에 대한 배열을 나타낸 것이다. 램프는 챔버의 중심점을 중심으로 링형식으로 둥근 램프들이 균을 이루어 구성되어 있다. 이 논문에서 고려된 시스템은 그림 2와 같이 3링으로 구성되어 있으며 각각은 최고전력이 1kW인 램프이다. 온도 측정 부분

은 웨이퍼의 다양한 위치를 측정하기 위하여 여러 부분에서 온도 측정을 한다. 이 논문의 고속열처리공정기는 웨이퍼의 20곳을 측정하도록 되어 있는 시스템이다. 실측시는 온도 측정 오차가 발생하지만, 최적 고속열처리공정기 설계 알고리즘의 모델에서는 이러한 오차는 무시되었다.

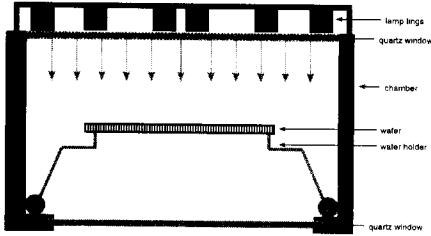


그림 1. 링구조의 램프를 가진 고속열처리공정기의 구조  
Fig. 1. Structure of rapid thermal processing with lamp ring.

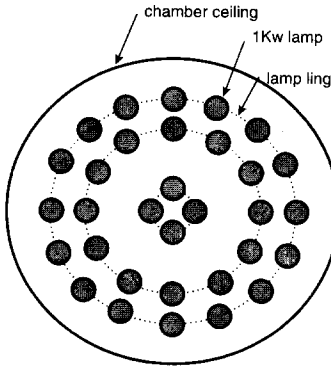


그림 2. 링구조의 고속열처리공정기 램프 배열  
Fig. 2. Lamp array of rapid thermal processing with ring.

### III. 고속열처리공정기 모델

이 장에서는 중심축 대칭형의 고속열처리공정기내의 웨이퍼에 대해 열역학 모델링을 한다. 원통의 웨이퍼를 가정하고 수치적인 근사화법에 의해 모델을 나타내며, 이와 같은 모델링 기법은 고속열처리공정기의 모델을 잘 나타냄이 알려져 있다<sup>[8,9,13,14]</sup>.

웨이퍼의 열류량은 비선형 성질을 가지며 수치적인 근사화법에 의해 가장 쉽게 이 양들을 표현 할 수 있다. 수치적 근사화법으로 나타내기 위해, 웨이퍼를 중심이 같은 원  $I$ 개로 분할하면 하나(중심축에 가장 가까이 있는 원)는 원통이 되며 나머지는 중심이 빈 원

통, 즉 고리 모양이 된다.  $r_i^{out}$ 는  $i$ 번째의 외경,  $r_i^{in}$ 를 내경,  $r_i^{cen}$ 를 중경,  $i$ 번째 웨이퍼의 분할 조각의 질량을  $m_i$ , 광원에 노출된 면적을  $A_i$ 라하고 중심반경  $r_i^{cen}$ 에서의 온도를  $T_i$ 라 하면,  $T_i$ 에 대한 시간의 미분 방정식은

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

로 나타내지며  $C_p(T_i)$ 는 비열이다. 여기에서 순열류  $q_i$ 는 각각 다음 열류들의 합으로 표현된다.

$$q_i = q_i^{em} + q_i^{ab} + q_i^{cond} + q_i^{conv}$$

여기서 웨이퍼에 의해 방출된 방사열인  $q_i^{em}$  항은 각각의 웨이퍼가 회색 빛이고 불투명하다고 하다고 가정하며 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzman)의 법칙에 의해  $q_i^{em} = -\epsilon_i \sigma A_i T_i^4$ 로 나타내진다. 여기서  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzman) 상수이고  $\epsilon_i$ 는  $i$ 번째의 평균 방사율을 나타낸다.  $i$ 번째 웨이퍼에서 흡수된 방사열은  $q_i^{ab} = \sum_{j=1}^J L_{i,j} P_j + \sum_{i=1}^I W_{i,i} q_i^{em} + q_i^{wall}$ 이다. 여기서 계수  $J$ 는 램프링의 수,  $L_{i,j}$ 은  $j$ 에서 방사된 광원과  $i$ 번째 웨이퍼에 흡수된 광원의 비율(fraction)이고  $W_{i,i}$ 는 웨이퍼의 부분  $i$ 에서 방사된 열류량과  $i$ 번째 웨이퍼에서 흡수된 열류량에 대한 비율이다. 그리고  $q_i^{wall}$ 는 고속열처리공정기의 벽에서 방사되어 흡수된 열을 의미한다.  $P_j$ 는  $j$ 번째 램프링에 의해 공급된 전력량이다. 또 전도에 의한 열류는 유한 차분 근사화 방정식을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$q_i^{cond} = -(2k_{i,i-1} \frac{T_i - T_{i-1}}{r_i^{cen} - r_{i-1}^{cen}} \pi r_i^{in} Z + 2k_{i,i+1} \frac{T_i - T_{i+1}}{r_{i+1}^{cen} - r_i^{cen}} \pi r_i^{out} Z)$$

여기서  $Z$ 는 웨이퍼의 두께이다. 대류열은  $q_i^{conv} = -h_i A_i \cdot (T_i - T_{gas})$ 로 표현되며, 여기서  $T_{gas}$ 는 주변 가스의 온도이고  $h_i$ 는 평균 열전도 계수이다.

이상의 식을 벡터와 행렬 형태의 모델로 나타내면,

$$q = K^{rad} T^4 + K^{cond} T + K^{conv} (T - T_{gas}) + LP$$

$$\dot{T} = (Cm)^{-1} q \tag{1}$$

이다. 여기서  $L$ 은  $L_{i,j}$ 를 요소로 갖는  $I \times J$  행렬,  $P$ 는  $P_j$ 를 요소로 하는  $J$ 차 벡터이며  $K^{rad}$ ,  $K^{cond}$ ,  $K^{conv}$ 는 웨이퍼 각각의 방사 열전달량, 전도 열전달

량, 복사 열전달량을 나타내는  $I \times I$  계수 행렬이고,  $C, m, T$ 는 비열, 질량, 온도를 나타내는  $I$ 차 벡터이다.

#### IV. 고속열처리공정기의 램프와 웨이퍼의 최적위치 설계

##### 1. 고속열처리공정기의 최적 설계 알고리즘

설정된 웨이퍼의 온도값과 실제 온도값들의 차의 절대값 중 최대값을 웨이퍼의 최대온도균일도오차라고 정의하자. 이러한 최대온도균일도오차의 정의에 의해 웨이퍼의 최대 온도균일도를 얻으려면, 이 최대온도균일도오차를 최소화하면 된다. 따라서, 웨이퍼의 최대온도균일도는 선형계획법문제에 고속열처리공정기 모델을 적용하여 이때의 해값인 각각의 램프전력량을 적용하여 얻을 수 있다. 이와 같은 방법을 응용하여, 고정된 위치가 아닌 램프의 움직임과 웨이퍼의 위치의 변화에 따른 최소 온도 균일도 오차를 이끌어 내며, 이때의 램프와 웨이퍼의 최적 위치를 찾는 것이다.

웨이퍼의 최대온도균일도오차는 다음과 같이 설정된 온도  $T^{set}$ 와 전력에 의해 공급된 온도와의 차이가 됨을 알 수 있다.

$$\max_i |T_i(P, L) - T^{set}| = \|T(P, L) - T^{set}\|_{\infty}, \quad i = 1, 2, \dots, I$$

여기서  $\|\cdot\|_{\infty}$ 는  $\cdot$ 의  $\infty$ 놈(norm)이고  $T_i(P, L)$ 는  $i$ 번째 분할된 웨이퍼에서의 일정한  $P$ 전력과  $L$ 에 의한 웨이퍼의 온도를 나타내며,  $L$ 은 챔버와 램프의 기하학적인 구조에 의해 정해진다<sup>[18, 15]</sup>. 따라서 가변적인 전력  $P(0 \leq P \leq P_{max})$ 와  $L$ 에 대해 웨이퍼의 최대온도균일도를 얻기 위해서는 최대온도오차를 최소화시키면 된다. 즉,

$$\text{Minimize}_{P, L} (\|T(P, L) - T^{set}\|_{\infty}), \quad 0 \leq P \leq P_{max} \quad (2)$$

하지만, 위의 식은 가변 전력  $P$ 와 가변 구조  $L$ 이라는 두 개의 변수 때문에 직접 선형계획법문제에 적용할 수 없다. 따라서, 위의 문제를 다음과 같은 단계에 의해 문제를 풀고자 한다.

단계 1 : 선형계획법문제를 풀려면  $P, L$ 중 어느 한 변수는 고정시켜야 문제를 풀 수 있다. 여기에서는 기하학적인 구조를 고정시킨다. 즉, 어느 한 웨이퍼 높이와 램프 위치를 선정하여  $L$  변수를 상수화한다. 이

때의  $L$ 은 뷰팩터이론(view factor theory)에 의해 구할 수 있다<sup>[18, 15]</sup>. 이에 따라, 식(2)를

$$\text{Minimize}_P (\|T(P) - T^{set}\|_{\infty}), \quad 0 \leq P \leq P_{max} \quad (3)$$

로  $P$ 만의 함수로 나타낸다.

단계 2 :  $P$ 변수에 대해 선형계획법문제를 푼다. 하지만,  $T(P)$ 는 비선형 함수이므로, 적절한 선형화방법 등을 이용하여 선형계획법문제에 적용한다. 이때 최대 온도균일도오차를 최소화시키는 최적의  $P$ 를 구할 수 있다. 이에 대한 자세한 설명은 2절에서 한다.

단계 3 :  $T(P)$ 는 비선형 함수이므로, 어느 특정한 온도에서 최적의 파라미터가 전체의 동작온도에 대해 최적일 수 없다. 따라서 여러 온도를 고려하여야 하며, 고속열처리공정기시양의 (5)에서와 같은 여러  $T^{set}$ 에 대해 최대 온도의 균일도 오차를 구한다. 식(3)을

$$\text{Minimize}_{P_1, P_2, \dots, P_n} \left\| \begin{array}{l} \|T(P_1) - T_1^{set}\|_{\infty} \\ \|T(P_2) - T_2^{set}\|_{\infty} \\ \vdots \\ \|T(P_n) - T_n^{set}\|_{\infty} \end{array} \right\|_{\infty}, \quad 0 \leq P \leq P_{max}$$

와 같이 여러 온도에 대해 나타낼 수 있다.

단계 4 : 위와 같은 최적화식에 의해 램프와 웨이퍼의 고정된 한 위치에서의 최대온도균일도오차를 구하고 설계하려는 고속열처리공정기시양의 (3)에서의 사양에서와 같이, 램프와 웨이퍼의 위치를 설정된 간격만큼 이동시킨 후 단계 1 - 단계3을 반복한다. 이때 최대의 온도균일도오차가 최소인 웨이퍼 높이와 램프의 위치가 우리가 찾고자 하는 최적의 설계 위치이다.

그림 3은 이상의 설계절차를 순서도(flow chart)로 나타낸 것이다.

##### 2. 웨이퍼의 최대온도균일도오차의 최소화

설정된 온도에서 램프전력에 의해 최적 온도 균일도를 얻기 위해 선형계획법문제를 설정하여 최적 해를 구하려 한다. 하지만, 식(2)에서  $T(P)$ 는 비선형함수이므로 직접 선형계획법문제에 이용할 수 없다. 따라서, 다음과 같이 2단계의 선형계획법을 적용하여 정상상태에서의 온도균일도를 최적화한다. 먼저, 열류(heat flux)를 일치시켜 이때의 최적 전력  $\hat{P}$ 를 얻는다. 즉, 정상상태에서 웨이퍼가 온도를 유지하기 위한 열류량은 식(1)에서  $\dot{T} = 0$ 이므로

$$q^{need} = -K^{rad} T^{set4} - K^{cond} T^{set} - K^{conv} (T^{set} - T_{gas})$$

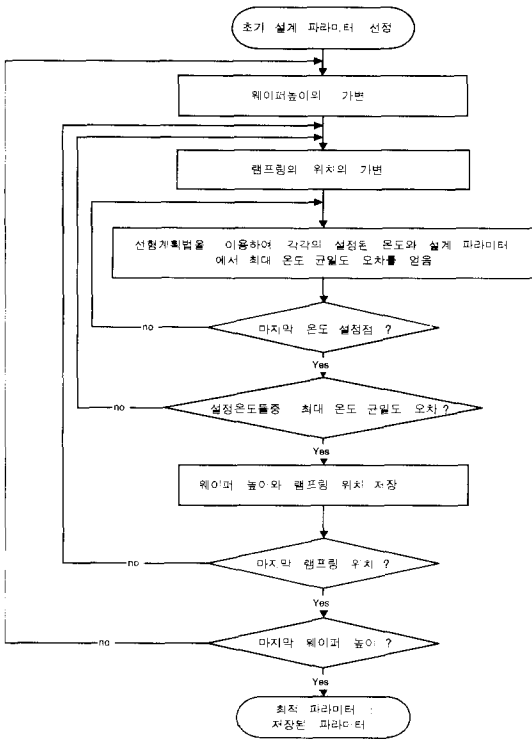


그림 3. 고속열처리공정기의 램프링과 웨이퍼의 최적 위치 설계절차  
 Fig. 3. Design flow of optimal lamp ring positions and the wafer height for RTP.

으로 나타나며, 이에 대해 램프에서 웨이퍼에 공급해주는 열류량은  $LP$ 로 나타낼 수 있으며 따라서 열류량을 최대로 일치시키기 위해서는

$$\text{Minimize } P \|LP - q^{\text{need}}\|_{\infty}, \quad 0 \leq P \leq P_{\text{max}}$$

위와 같이 설정된 문제의 최적의 해를 선형계획법문제를 풀어 최적의 값을 찾고자 한다.

이상을 선형계획법(LP)문제의 최소최대오차문제(minimax-error problem)에 맞추어 재구성하면

$$\text{Minimize } [0 \dots 0 \ 1] \begin{bmatrix} P \\ e \end{bmatrix}$$

$$\text{제약조건: } \begin{bmatrix} L & -1_N \\ -L & -1_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ e \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} q^{\text{need}} \\ -q^{\text{need}} \end{bmatrix}$$

$$\text{단, } 0 \leq P \leq P_{\text{max}}$$

여기서,  $-1_N$ 은  $N \times 1$  벡터이고  $e (= \|LP - q^{\text{need}}\|)$ 는 열류량 불일치의 최대 오차이다. 이때의 최적  $P$ 값을  $\hat{P}$ 라고 하면,  $T(\hat{P})$ 는 설정치 온도  $T^{\text{set}}$

에 근접한 온도이다. 따라서, 온도  $T$ 에 관한 비선형 방정식을 이 동작점 부근에서 선형근사화하여, 선형계 획법문제를 풀려고 한다. 이 동작점근방에서의 선형근사

$$T(\hat{P} + \Delta P) \approx T(\hat{P}) + D_P T(\hat{P}) \Delta P$$

여기서  $D_P T(\hat{P})$ 는  $T$ 에 대한  $P$ 의 편미분이다.

정상상태이므로  $q = 0$ 이며,  $P$ 에 관해 편미분하여 다시 정리하면,

$$D_P T \approx -(4K^{\text{rad}} \text{diag}(T)^3 + K^{\text{cond}}(T) + K^{\text{conv}})^{-1} L.$$

따라서, 정상상태에서 온도균일도오차를 최소로 하는 전력  $P$ 는

$$\text{Minimize } \|D_P T(\hat{P}) \Delta P - (T^{\text{set}} - T(\hat{P}))\|_{\infty},$$

$$-\hat{P} \leq \Delta P \leq P^{\text{max}} - \hat{P}$$

$\Delta P^*$ 가  $\Delta P$ 의 해라면,  $\hat{P} + \Delta P^*$ 가 식(3)을 최소화시킨다<sup>[8]</sup>.

### V. 8 인치 웨이퍼를 위한 최적 위치 설계

상기 제시된 방법에 의해 일반화된 8인치 웨이퍼를 위한 고속열처리공정기의 램프 위치 및 웨이퍼 높이를 최적 설계한다. 설계하고자 하는 고속열처리공정기의 사양은 다음과 같다.

(1) 웨이퍼의 직경은 201.6mm(8인치)이며 두께는 0.725mm이다. 웨이퍼는 불투명하며, 방사율은 0.6으로 한다. 웨이퍼는 20개의 링으로 분할하여 수치모델을 구한다.

(2) 고속열처리공정기 챔버의 반경은 230mm이며, 챔버의 높이는 150mm이다.

(3) 챔버의 상단면은 원호모양으로 46개의 링구조로 분할한다. 각각의 간격은 평균 5mm이다. 챔버의 중심점을 중심으로 0-230mm사이를 링구조의 램프군은 약 5mm간격으로 움직일 수 있다. 또 챔버내에서 웨이퍼의 높이는 챔버바닥을 기점으로 30-120mm사이에서 10mm 간격으로 형성될 수 있다. 최적의 램프위치와 웨이퍼의 높이는 이상과 같은 위치 내에서 구한다.

(4) 램프 최대 전력의 한계때문에, 램프군의 전력의 한계를 정해 주어야 한다. 램프의 위치에 의한 램프개

수의 한계 때문에 챔버의 중심점에서 멀어질 수록 원호의 길이에 비례하여 램프군의 최대전력을 변화시켜야 한다. 램프 1개당 지름은 15mm이며 최대전력은 1kW로 정한다.

(5) 적용되는 고속열처리공정기의 반도체 공정 온도 조건은 600, 800, 1000℃의 3곳에서의 정상 상태 온도 조건을 가정한다.

(6) 웨이퍼의 형상은 대칭성을 고려하여, notch 가공 상태의 형상을 지닌다고 가정한다. 그림 4는 이러한 사양을 지닌 챔버의 파라미터를 나타낸 그림이다.

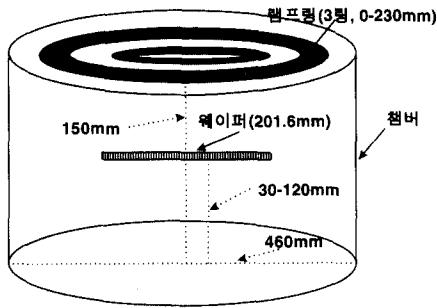


그림 4. 고속열처리공정기 챔버의 사양  
Fig. 4. Specification of RTP chamber.

위와 같은 고속열처리공정기사양에 대해, 최적화 단계 1에서 단계 4에 따라 행한다. 최적 위치를 구하기 위해서는 여러 단계를 거치면서 수많은 선형계획법문제를 풀어야 해를 얻을 수 있다. 선형계획법(LP)문제에 대한 해는 MATLAB의 lp함수에 의해 얻었다.

제 1절의 설계하려는 고속열처리공정기 사양에 따라 전사 모사 결과, 최적의 웨이퍼 높이는 고속열처리공정기 챔버바닥으로부터 60mm이고 램프링의 각각의 위치는 35.3, 83.9, 190.9 mm로 나타났다. 구해진 최적의 위치에서 600, 800, 1000℃간격으로 웨이퍼의 온도균일도오차를 그림 5에 나타냈다. 가로축은 웨이퍼 중심축을 0으로 잡고 가장자리로 갈수록 커지며 단위는 mm이다. 온도균일도의 불일치 오차는 1000℃에서 최대 0.0986℃를 나타냄을 알 수 있다. 이때의 온도균일도 최대오차가 중요한 이유는 제어 가능한 최대 온도균일도를 나타낸다. 즉, 어떠한 제어를 사용하더라도 지금의 기하학적인 구조에서는 웨이퍼 온도균일도가 0.0986℃내이며, 더 이상의 온도균일도를 얻을 수 없다는 점에서 이 수치는 중요한 역할을 한다.

그림 6은 챔버내에서 웨이퍼의 높이를 가변 시키고 램프링은 그 웨이퍼 높이에서 최적의 위치로 설정하였

을 때 온도균일도오차를 나타낸다. 가로축은 챔버바닥으로부터 웨이퍼의 높이를 나타낸다. 모의실험에 의하면, 대체로 챔버의 중간 높이 부분에서 좋은 온도균일도를 보이며, 웨이퍼의 높이 40mm에서 90mm정도까지는 우리가 설정한 온도에서 1℃이하의 온도균일도오차를 나타냄을 알 수 있다. 표 1은 웨이퍼 높이의 가변에 따른 램프링의 최적 위치를 나타낸다. 표 1에 의하면 램프링3(램프링중 챔버의 중앙부분에서 가장 멀리 떨어진 램프링)는 모두 웨이퍼보다 바깥부분에 있음을 알 수 있다. 웨이퍼의 가장자리에서 온도하강효과가 두드러지기 때문에 이 온도 하강을 보충해 주어야 하기 때문에 램프링3은 웨이퍼 바깥부분에서 웨이퍼의 가장자리에 가장 큰 영향을 주어야 한다는 것은 유추할 수 있는 결과이다. 그리고 고속열처리공정기를 설계할 때, 램프링1은 한 중앙에 두는 경향이 많으나, 최적위치는 모두 웨이퍼의 한 중앙에서 조금 떨어진 곳에 위치함을 알 수 있다. 표 1에 의하면 고속열처리공정기 설계시 중요한 점은 웨이퍼 위치를 램프와 가까운 곳에 위치하면 온도균일도오차가 상당히 커짐을 알 수 있다.

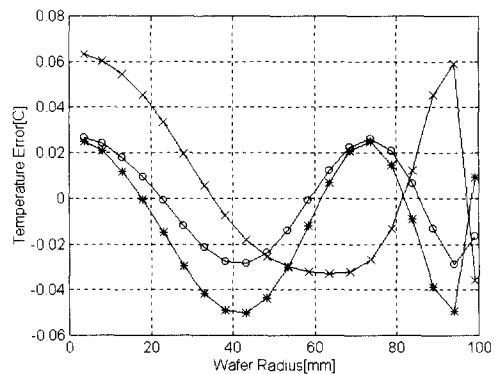


그림 5. 최적의 위치에서 600, 800, 1000℃에서 웨이퍼 온도 오차  
Fig. 5. Temperature errors of wafer at the optimal positions(case : 600, 800, 1000℃).

그림 7은 최적화하지 않고 거의 균등하게 램프링과 웨이퍼의 높이를 위치시킨, 즉 웨이퍼의 높이는 0에서 150mm범위 중에서 75mm를 선택하고, 램프링의 외경 위치를 각각 10, 115, 225 mm에 위치시킨 후의 온도 균일도 오차를 최적화시킨 후의 위치에서의 웨이퍼의 온도 균일도 오차 비교를 나타낸 그림이다. X-X-X 표시로 보이는 온도오차곡선은 균등각격 고

속열처리공정기를 나타내고, O-O-O 표시는 최적 위치인 경우의 고속열처리 공정기를 나타낸다. 각각, 600, 800, 1000℃ 온도에서의 웨이퍼 온도 오차를 보이고 있다.

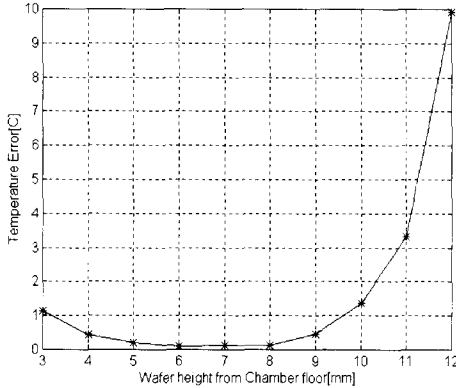


그림 6. 최적 램프 위치에서 웨이퍼의 높이 가변에 의한 온도오차의 변화

Fig. 6. Temperature errors according wafer height change at the optimal lamp positions.

표 1. 웨이퍼의 높이 가변에 의한 램프링의 최적 위치

Table 1. Optimal positions of lamp rings according to change the wafer height.

웨이퍼의 높이(mm)	램프링1의 외경위치(mm)	램프링2의 외경위치(mm)	램프링3의 외경위치(mm)	온도균일도 오차(°C)
30	35.3	57.4	224.4	1.1379
40	26.5	57.4	213.3	0.4451
50	30.9	79.5	207.7	0.2023
60	35.3	83.9	190.9	0.0986
70	30.9	79.5	179.8	0.1345
80	35.3	83.9	174.2	0.1189
90	35.3	83.9	174.2	0.4716
100	30.9	70.7	129.5	1.3663
110	30.9	70.7	118.3	3.3371
120	48.6	196.5	224.4	9.9315

표 2는 이때의 각 온도점에서의 최적화한 고속열처리공정기와 균일한 위치에서의 온도 오차를 비교한 표이다. 정해진 온도점에서 최적화한 고속열처리공정기내에서 웨이퍼의 온도오차는 0.0986℃내의 온도 균일도를 나타내지만, 균등하게 선정된 위치에서의 웨이퍼의 온도 균일도 오차는 4.8208℃내로 온도 균일도 오차 차이가 40배이상의 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

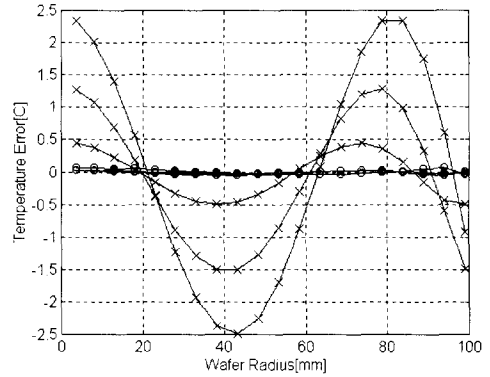


그림 7. 최적 위치인 경우와 균등간격으로 배치한 경우의 온도 균일도 오차의 비교

Fig. 7. Comparison of temperature uniformity errors to optimal positions and uniform rate positions(case : 600, 800, 1000℃)

표 2. 고속열처리공정기 설계 파라미터에 따른 웨이퍼의 온도 균일도 오차 비교

Table 2. Comparison of wafer temperature uniformity errors to design parameters of RTP.

온도	600℃	800℃	1000℃
고속열처리 설계			
최적위치인 경우의 온도 균일도 오차	0.0751	0.0556	0.0986
균등 위치인 경우의 온도균일도오차	0.9353	2.7748	4.8208

## VI. 결 론

본 논문에서는 고속열처리공정기내의 웨이퍼 평면의 온도 균일도 오차를 최소화하기 위하여 온도 균일도에 중요한 영향을 미치는 고속열처리공정기내의 웨이퍼의 높이와 램프링의 최적위치를 구하였다. 여기에서 고려한 웨이퍼는 현재 일반적으로 사용되는 8인치 웨이퍼를 고려하였다. 최적화된 위치로 설계된 고속열처리공정기내에 웨이퍼의 온도균일도는 균일하게 배열된 램프링과 웨이퍼 높이의 고속열처리공정기내의 웨이퍼의 온도균일도와 비교하여 좋은 성능을 보임을 확인하였다.

본 논문에서의 고속열처리공정기에 대한 최적의 파라미터는 고속열처리공정기의 제어시스템구성이나 새로운 고속열처리공정기설계에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

※ 본 연구는 '96년도 교육부 반도체분야 학술연구조성비(ISRC 96-E-1061)에 의하여 연구되었다. 고속열처리공정기에 대한 조언과 도움을 준 스텐포드대학의 조영만 박사에게 감사한다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] S. A. Campbell, K. L. Ahn, K. L. Knutson, B. Y. H. Liu, and J. D. Leighton. "Steady-state thermal uniformity and gas flow patterns in a rapid thermal processing chamber. *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, vol. 4, no. 1, pp. 14-20, February 1991.
- [ 2 ] Ronald S. Gyursik, "A Model for Rapid Thermal Processing : Achieving Uniformity Through Lamp Control", *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, vol. 4, no. 1, pp. 9-13, 1991.
- [ 3 ] K. C. Saraswat, P. Apte, L. Booth, Y. Chen and et al, "Rapid Thermal Multiprocessing for a Programmable Factory for Adaptable Manufacturing of IC's", *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, vol. 7, no. 2, pp. 159-172, 1994.
- [ 4 ] K. C. Saraswat, M. Moslehi, D. Grossman, S. Wood, P. Wright and L. Booth, "Single Wafer Rapid Thermal Multiprocessing", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 146, pp. 3-13, 1989.
- [ 5 ] B. J. Cho, P. Vandenabeele and K. Maex, "Development of a Hexagonal-Shaped Rapid Thermal Processor Using a Vertical Tube", *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, vol. 7, no. 3, pp. 345-353, 1994.
- [ 6 ] P. Spence, C. Schaper and A. Kermani, "Concurrent Design of an RTP Chamber and Advanced Control System", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 387, pp. 75-86, 1995.
- [ 7 ] K. C. Saraswat, Y. Chen, L. Degertekin and B. T. Khuri-Yakub, "A New Flexible Rapid Thermal Processing System", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 387, pp. 35-47, 1995.
- [ 8 ] S. A. Norman, "Wafer Temperature Control in Rapid Thermal Processing", *Ph.D. Dissertation*, Stanford Univ., pp. 21-30, July 1992.
- [ 9 ] Y. M. Cho, A. Paulraj, T. Kailath and G. Xu, "A Contribution to Optimal Lamp Design in Rapid Thermal Processing", *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, vol. 7, no. 1, pp. 34-41, 1994.
- [ 10 ] C. F. Elia, "RTP Multivariable Temperature Controller Development", *Proc. of American Control Conf.*, pp. 907-911, 1994.
- [ 11 ] A. Emami-Naeini, 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.
- [ 12 ] P. J. Gyugyi, Y. M. Cho, G. Franklin, T. Kailath, and R. H. Roy, "Model-Based Control of Rapid Thermal Processing Systems", *Proc. IEEE Conf. on Control Applications*, pp. 374-381, 1992.
- [ 13 ] R. B. Fair (Ed.), *Rapid Thermal Processing : Science and Technology*, Academic Press, Inc., 1993.
- [ 14 ] H. A. Lord, Thermal and Stress Analysis of Semiconductor Wafers in a Rapid Thermal Processing Oven, *IEEE Trans. Semicond. Manufact.*, vol. 1, no. 3, pp. 105-114, Aug. 1988.
- [ 15 ] J.P. Holman, "Heat Transfer", *McGraw Hill*, 1989, pp. 384-400.



저 자 소 개



**崔 成 圭(正會員)**

1992년, 1994년 인하대학교 전기공학  
학과 학사, 석사 학위 취득. 1994년  
~ 1996년 서울대학교 제어계측신기  
술연구센터에서 연구원으로 CNC제  
어기 및 RTP 설계 연구에 참여. 현  
재 서울대학교 대학원 전기공학부 박

사과정



**崔 鎮 榮(正會員)**

1982년, 1994년, 1993년 서울대학교  
제어계측공학과에서 학사, 석사 및  
박사학위 취득. 1984년 ~ 1994년 한  
국전자통신연구소에서 연구원 및 선  
임연구원으로 TDX 개발 및 정보기  
술기초연구 참여. 현재 서울대학교

전기공학부 조교수

**權 旭 鉉(正會員) 第 32卷 B編 第 3號 參照**

현재 서울대학교 대학원 전기공학부