

고속 열처리 공정 시스템에서 웨이퍼 상의
다중점 계측에 의한 온도분포 추정 기법 연구
심영태, 구진모, 김학배

A Prediction Method of Temperature Distribution on the Wafer
in a Rapid Thermal Crossing System with Multipoint Sensing

Yeungtae Shim, Jinmo Koo, Hagbae Kim

Abstract - 웨이퍼내의 온도 균일도를 확보하는 것은 고속열처리공정장비(RTP)에 있어서 입력신호 수집을 통해 달성해야 할 중요한 제어 요소이며, 이러한 온도의 균일도를 향상시키기 위해서는 웨이퍼의 각 지점에 대한 정확한 온도 계측이 필수적으로 선행되어야 한다. 그러나 RTP의 구조적 특징과 동작특성 때문에 정확한 온도계측이 매우 어려운 면이 있다. 온도계측은 주로 고온계를 통해 이루어 지는데 대류와 복사등 여러 가지 원인에 의해서 웨이퍼내에 온도가 불균일하게 되는 경우 한정된 개수의 고온계로 온도 분포를 정확히 추정할 수 없는 한계를 지니고 있다.

본 논문에서는 RTP 공정을 열역학적으로 접근하여 단일점 온도 계측에 의한 전체 온도 분포 추정 기법을 연구하고 이것을 다중점 온도 계측에 의한 온도 분포 추정 기법으로 확장발전시켜 웨이퍼에 상대적으로 영향을 끼치는 요소중 예측 불가능하거나 측정 불가능한 요소까지 포함하여 최소의 측정치를 활용하여, 적절한 제어입력 유도에 필요한 형태로 웨이퍼상의 온도계측을 가능하게 하였다.

1. 서 론

최근 랩트 가열방식에 의한 고속 열처리 공정(RTP)을 이용한 공정기법이 주문생산 반도체(ASIC) 등의 다품종 소량생산 라인뿐만 아니라 고집적 메모리 소자(1G 이상)의 생산에 있어서 그 중요성이 크게 주목받고 있다. RTP 시스템은 랩트에 의한 열과 공정 가스를 이용하여 다양한 운용형태의 열처리를 수행한다. 일반적으로 공정 온도범위는 보통 600~1000°C이며 최대 1400°C까지 가능하다. 이 장비는 저압과 대기압과 비슷한 압력에서도 단일 웨이퍼 공정을 수행할 수 있으며 담금질(annealing), 클리닝(cleaning), 산화(oxidation), 화학적 증기 증착(Chemical Vapor Deposition, CVD), 질화(nitridation), 에피 성장(epitaxial growth)등에 이용되며 실리콘 공정 중 각종 불순물 이온의 주입 후 결합제거와 활성화, 다결정 실리콘에 주입된 이온의 활성화, 실리콘아이드의 형성과 열처리, 알루미늄을 비롯한 금속 박막의 열처리 및 형성에 사용될 수 있다[1].

RTP 장비의 개발이 오래전에 이루어졌음에도 불구하고 광범위하게 사용되지 않았던 것은 웨이퍼내의 온도 균일도가 기존의 노(furnace)보다 좋지 않았고 생산성에서도 노 방식과 비교가 될 수 없었기 때문이다. 따라서 웨이퍼내의 온도 균일도를 확보하는 것은 RTP 장비에 있어서 매우 중요한 제어 요소이며 온도의 균일도를 높이기 위해서는 웨이퍼의 각 지점에 대한 정확한 온도 계측이 필수적으로 선행되어야 한다[2]. 일반적으로 RTP 시스템에서의 온도 계측은 웨이퍼에 열전대(thermocouple)를 부착하거나 고온계(pyrometer)를 통해 이루어진다. 고온계는 웨이퍼 표면으로부터 방사된 방사열을 이용하여 특정 파장 대역 내의 복사 에너지만을 전달받아서 방사강도(radiant intensity)를 온도로 변환시킨다. 주로 300°C이하의 온도의 측정은 열전대를 이용하며 그 이상의 고온에서는 고온계를 이용한다[3].

그러나 대부분의 RTP장비에서 중앙에 한 개의 고온계만이 설치되어 있어서 정확한 계측이 불가능하며 따라서 온도를 추정하는 기법이 필요하게 된다. 또한 여러개의 고온계가 설치되어 있을 때 또한 불균형하게 측정된 값들로부터 정확한 웨이퍼상의 온도분포를 추정하는 기법도 아울러 개발이 되어야 한다.

따라서, 본 논문에서는 선대형 형태의 랩트에 대하여 임

의 단일점 온도 계측에 의한 웨이퍼 온도 추정기법을 개발하고 이를 바탕으로 다원점 온도계측에 의한 온도추정기법을 개발하여 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 확인하는 것을 주된 내용으로 하였다.

2. 웨이퍼 상의 온도 분포 추정

우선 웨이퍼상의 온도 분포 추정을 위해서 웨이퍼 내의 열속(heat flux)을 직교좌표계의 x, y, z 방향으로 표현해보자. 미소 체적소 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 를 정의하면 에너지 보존 법칙에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$\left(\begin{array}{c} \text{체적소 } \Delta x \Delta y \Delta z \text{ 내부에서} \\ \text{생성된 열 에너지 율} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{체적소 } \Delta x \Delta y \Delta z \text{로} \\ \text{입사된 전체 열 흐름율} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{체적소 } \Delta x \Delta y \Delta z \text{의} \\ \text{내부 에너지 증가율} \end{array} \right) \quad (1)$$

웨이퍼 내에서 발생된 에너지가 없기 때문에 체적소 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 내부에서 생성된 에너지 율은 0이 되고 체적소 전도, 대류와 복사에 의해서 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 로 입사된 전체 열 흐름율은 체적소 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 의 내부 에너지 증가율과 같게 된다. 대류에 의한 열전달은 공정에 따라 다르고 웨이퍼에 미치는 영향이 상대적으로 적기 때문에 이 논문에서는 고려를 하지 않았다. 따라서 전도에 의해 흡수한 에너지를 Q_c , 복사에 의해 흡수한 에너지를 Q_r , 그리고 체적소의 질량을 m , 체적소의 비열을 c_w 라 하면 $Q_c + Q_r = mc_w \frac{\partial T}{\partial t}$ 가 되고, $m = \Delta x \Delta y \Delta z * \rho_w$ 와 같이 되므로 식(2)가 성립된다.

$$\Delta x \Delta y \Delta z * \left(-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + q_{rad} \right) = \Delta x \Delta y \Delta z * \rho_w c_w \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

웨이퍼내의 열전도율이 일정하다고 가정하면 x, y, z 방향으로의 열속 요소인 q_x, q_y, q_z 의 연관관계는 다음과 같이 주어진다. 또한 T 를 웨이퍼의 온도, k 를 열전도율, 그리고 q_{rad} 를 단위체적 당 전달받은 복사에너지(radiative energy)라 하면 식(3)이 정의된다.

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

식(2)에서 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 를 소거하고 식(3)을 대입하면 식(4)가 유도된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{rad} = \rho_w c_w \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

웨이퍼의 두께는 직경에 비해 매우 작으므로 z 축으로의 온도변화를 고려하지 않으면 좌표 (x, y) 에 대한 2차원 열전도 방정식은 식(5)와 같이 주어진다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_{rad}}{k} = 0 \quad (5)$$

이 때, 복사에너지 q_{rad} 는 식(6)과 같이 주어진다.

$$q_{rad} = \alpha_w \phi - \epsilon_w \sigma T^4 \quad (6)$$

여기서, ϵ_w 는 웨이퍼의 방사율(emissivity), σ 는 스테판-볼츠만 상수, α_w 는 웨이퍼의 흡수율(absorptivity), 그리고 ϕ 는 랩트에 의한 복사력(radiative power)을 나타낸다[4].

RTP 시스템에서는 일반적으로 텅스텐-할로겐 랩트를 이용하여 복사에너지를 웨이퍼에 전달한다. 이러한 경우 웨이퍼 표면에 전달되는 방사 전력은 랩트에 의해 직접 전달되는 1차적인 방사 전력과 반사판에 반사되어 재 흡수되는 2차적인 방사 전력으로 나누어지게 된다.

2.1 램프에 의한 1차 방사전력

램프는 균일하게 빛을 방사하는 직선형태의 필라멘트(filament)로 가정하였다. 이에 대한 개념적인 구조도는 그림 1에 잘 나타나 있다.

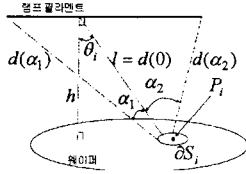


그림 1. 웨이퍼와 램프 필라멘트와의 기하학적 관계

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 웨이퍼위에 임의의 한 미소표면 δS_i 를 잡고, 직선 램프의 양단에 대한 각도를 각각 α_1, α_2 , l 를 램프의 방사강도(source radiant intensity), h 를 웨이퍼와 램프의 최단거리, d 를 두 표면 사이의 거리라고 정의하면 램프에 의한 1차 방사 전력은 식(7)과 같게 된다.

$$\phi_1 = \frac{lh\delta S_i}{r} \int_{-\alpha_1}^{\alpha_2} \cos^3 \alpha d\alpha = \frac{lh\delta S_i}{r} \left[\sin \alpha - \frac{\sin^3 \alpha}{3} \right]_{-\alpha_1}^{\alpha_2} \quad (7)$$

2.2 가상 영상에 의해 재 흡수된 2차 방사 전력

온도가 증가하면 웨이퍼에서 나오는 복사열이 많아져서 웨이퍼 자체도 하나의 열원의 구실을 하게 된다. 이렇게 웨이퍼에서 나온 빛은 반사판에 부딪혀 가상의 영상을 갖게 된다. 이 때, (ρ, φ) 를 미소표면 δS_e 의 중심점 P_e 에 대한 극좌표라 하고, (ρ_0, φ_0) 를 웨이퍼상의 미소표면에 대한 가상영상의 극좌표, H 를 반사판의 높이라 하면, $\delta S_e = \rho d\rho d\varphi$ 로 쓸 수 있고 가상 영상에 의해 재 흡수된 2차 방사 전력은 식(8)에 의해 계산할 수 있게 된다.

$$\phi_2 = \delta S_e L H^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{H^2 + (\rho \sin \varphi - \rho_0 \sin \varphi_0)^2 + (\rho \cos \varphi - \rho_0 \cos \varphi_0)^2}{d^3} d\rho d\varphi \quad (8)$$

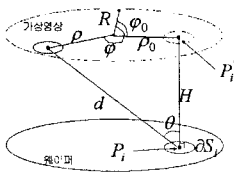


그림 2. 웨이퍼와 가상 영상과의 관계

결국 $\phi = \phi_1 + \phi_2$ 로 식(6)에 대입하여 웨이퍼상의 온도 분포를 쉽게 구할 수 있게 된다.

2.3 열전도 방정식의 차분방정식으로의 이산화

식(5)의 해를 구할 때 그대로 미분방정식의 형태로 계산하는 것은 불가능하므로 이것을 근사화시킬 필요가 있다. 따라서 웨이퍼 표면을 그림 3과 같이 가로 세로를 일정한 크기 l 을 갖는 격자형태로 이산화시켜 차분방정식으로 근사화시키는 것이 합리적이다.

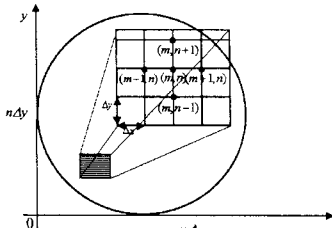


그림 3. 유한 차분방정식을 구하기 위한 웨이퍼의 분할 구조

그림 3에서 $T_{m,n}$ 를 절점 (m,n) 에서의 웨이퍼 온도라 하면 열전도 미분방정식의 유한 차분방정식을 구할 수 있다. $T_{m,n}$ 를 절점 (m,n) 에서의 웨이퍼 온도라 하면, Δx 가 매우 작을 때, 절점 $(m+1/2, n)$ 에서 x 에 대한 온도의 1차

도함수는 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1/2, n} \approx \frac{T_{m+1, n} - T_{m, n}}{\Delta x} \quad (9)$$

그리고, 이와 같은 과정을 거쳐 $\Delta x = \Delta y = l$ 의 단위격자로 쪼개면 절점 (m, n) 에서의 식(10)의 유한 차분방정식(finite-difference approximation)을 구할 수 있다.

$$(T_{m-1, n} + T_{m+1, n} + T_{m, n-1} + T_{m, n+1} - 4T_{m, n}) + q_{rad} \frac{l^2}{k} = 0 \quad (10)$$

그러나 절점 (m, n) 이 웨이퍼의 가장자리 경계선(boundary)에 위치한 경우에는 대류에 의한 열전달의 영향이 중앙부분에 비하여 클 수 있다. 따라서 대기의 온도가 웨이퍼의 온도와 동일하다고 보고, 웨이퍼의 가장자리에서 대기와 열전달이 없는 단열평면으로 보고 계산을 할 수 있고, 이 경우 가장적인 절점들에 대하여 $T_{m+1} = T_{m-1}$, $T_{n+1} = T_{n-1}$ 의 조건을 만족한다.

$$(2T_{m-1, n} + 2T_{m, n-1} - 4T_{m, n}) + q_{rad} \frac{l^2}{k} = 0 \quad (11)$$

결국 각 절점에 대한 유한 차분 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$A * T = \frac{l^2}{k} * Q \quad (12)$$

T 는 각 절점의 온도를 나타내는 행렬이며, Q 는 각 절점에 가해진 q_{rad} 를 정리한 행렬이다.

2.4 단일 센서의 온도측정에 의한 전체 온도 추정

식(12)에서 A 행렬이 singular한 형태가 된다. 이것은 웨이퍼 표면의 온도분포가 정할 수 없는 무한대의 해를 갖고 있고 실측된 일정한 한 점의 온도의 변화에 따라 전체 온도분포가 평형하게 변화한다는 것을 의미한다. 실측된 한 점의 온도에 대응하는 전체 온도분포를 구하기 위해서는 적절한 식의 변형이 필요하다.

$$A = [A_{.1} \ A_{.2} \ \dots \ A_{.n}] = \begin{bmatrix} A_{1.1} \\ A_{2.1} \\ \vdots \\ A_{n.1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

A 를 식(13)과 같이 여러 개의 행렬의 조합으로 나타낼 수 있는데 이 형식으로 식(13)으로부터 식(14)를 얻을 수 있다.

$$A_{i.} * T = \sum_{j=1}^n a_{ij} * t_j = \sum_{j=1, j \neq k}^n a_{ij} * t_j + a_{i,k} * t_k = \frac{l^2}{k} * \rho_i \quad (14)$$

또한 위식은 결국 식(15)와 같이 변형될 수 있다.

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n a_{ij} * t_j = \frac{l^2}{k} * \rho_i - a_{i,k} * t_k \quad (15)$$

A' , T' , Q' 을 식(16)과 같이 정의하면 결국 식(17)과 같이 식(12)의 변형된 식이 나온다.

$$A' = [A_{.1} \ A_{.2} \ \dots \ A_{.k-1} \ A_{.k+1} \ \dots \ A_{.n}] \quad (16)$$

$$T' = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{k-1} \ t_{k+1} \ \dots \ t_n]^T, \quad Q' = \frac{l^2}{k} * Q - A_{.k} * t_k$$

$$A' * T' = Q' \quad (17)$$

T' 가 $(n-1) \times 1$ 행렬이고 A 의 rank가 $n-1$ 이므로 pseudo-inverse를 취해 유일한 T' 를 구할 수 있다.

결국 k 번째 격자의 온도를 알았을 때 전체 온도분포 T_k 는 $[t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{k-1} \ t_k \ t_{k+1} \ \dots \ t_n]^T$ 가 된다.

2.5 다중 센서의 온도측정을 통한 전체 온도 추정 분포

그림 3에서 웨이퍼의 중앙에 한 개의 고온계와 주변에 i 개의 고온계가 설치되어 있을 때 각각의 고온계가 설치된 점을 P_k 라 하고 직교좌표계 (m, n) 에 대응하는 한점을 $P(m, n)$, T_k 의 직교좌표계 (m, n) 에 대응하는 특별한 한 점의 온도를 $T(m, n, k)$ 라 하자. 그런데 공정중에는 가장자리 효과나 대류, 진공도, 복사열, 예측할 수 없는 원인 등에 의해 각각의 i 개의 T_k 가 서로 일치하지 않는다. 따라서 각각의 점에서 추정된 온도분포를 이용한 합리적인 예측방법이 필요하다. 그 방법으로 T_k 에 대해 부분별 가중

치를 주고 이를 합산하는 방법을 모색하였다. 웨이퍼의 위 의 임의의 점 $P(m, n)$ 과 k 번째 고온계의 위치 P_k 와의 거리를 $D(m, n, k)$ 를 식(18)과 같이 정의한다.

$$D(m, n, k) = \|P(m, n) - P_k\| \quad (18)$$

$D(m, n, k)$ 를 이용한 weight함수를 $W(m, n, k)$ 라고 하면 k 번째 고온계에 대해 각 점에 대해 가중치를 적용한 온도 분포는 $T(m, n, k) W(m, n, k)$ 이며 최종 예상 온도 분포 $T(m, n, e)$ 는 식(19)와 같은 형태로 유도된다.

$$T(m, n, e) = \frac{\sum_{k=0}^n T(m, n, k) * W(m, n, k)}{\sum_{k=0}^n W(m, n, k)} \quad (19)$$

와 같이 된다.

3. SIMULATION 및 고찰

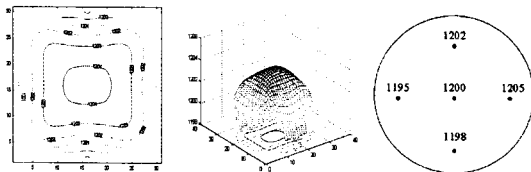
본 논문에서 유도된 식들에 의한 시뮬레이션을 통한 수치예제를 확인하기 위해 설정한 웨이퍼의 기본적인 값들은 표(1)과 같다.

표 1. 웨이퍼의 기본값(가정치)

입력변수 및 상수	설정값
램프의 간격	1.3cm
램프의 길이	20.8cm
웨이퍼의 직경	10.16cm
격자의 크기	0.254cm
웨이퍼와 램프의 최단거리	4cm
웨이퍼와 반사면의 최단거리	2cm
ϵ_w (웨이퍼의 방사율)	0.7
α_w (웨이퍼의 흡수율)	0.7
σ (스테판-볼츠만 상수)	$5.674 \times 10^{-12} [W^1 cm^{-2} K^{-4}]$
k (웨이퍼의 열 전도율)	$2.69 \times 10^3 [Wm^{-1} K]$
h_o (대류 열 전달 계수)	$2.60 \times 10^3 [Wcm^{-2} K^{-1}]$

3.1 단일 센서 계측에 의한 온도 분포

임의의 단일점의 센서 계측에 의한 온도분포의 시뮬레이션 결과로 중앙에서 가장자리로 갈수록 온도가 떨어지는 모습을 보였다.



(a) 단일점 계측에 의한 분포 (b) 다원계측점
그림 4. 단일점 계측에 의한 온도추정분포와 다원점

3.2 다중 센서 계측에 의한 온도 분포

여기서 $W(m, n, k)$ 의 함수를 어떻게 지정해주는냐에 따라 실측된 값에 대한 의존도가 결정된다. 확률적으로 실측된 점의 온도가 가장 신뢰도가 높으며 그 지점과 가까울수록 신뢰도가 높아지고 멀어질수록 신뢰도가 낮아지므로 이에 근거하여 여러 가지 합리적인 함수들을 생각할 수가 있고 본 논문에서는 세가지 경우를 다음과 같이 고려하였다.

- 1) $W(m, n, k) = \frac{1}{D(m, n, k)^S}$, S 는 sensitivity이다.
- 2) $W(m, n, k) = (MAX(D(m, n, k), 0 \leq k \leq i) - D(m, n, k))^S$
- 3) $W(m, n, k) = e^{S * (MAX(D(m, n, k), 0 \leq k \leq i) - D(m, n, k))}$

각각의 방법을 이용하여 그림 4-(b)와 같이 웨이퍼위의 다섯 부분에 임의로 불균형한 값을 주고 검증을 해보았다.

1)의 방법 ($k=1,2,3$)

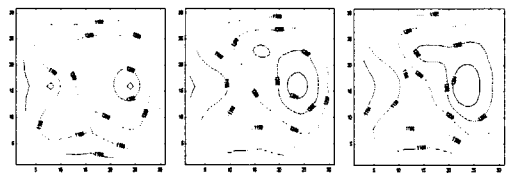


그림 5. 1의 방법에 의한 온도추정분포
2)의 방법 ($k=1,2,3$)

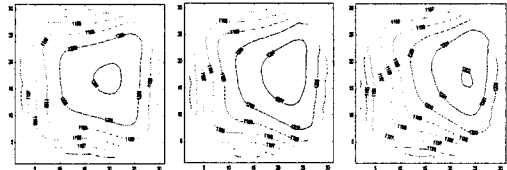


그림 6. 2의 방법에 의한 온도추정분포
3)의 방법 ($k=1,2,3$)

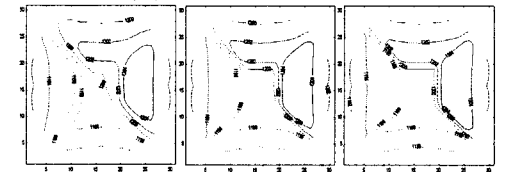


그림 7. 3의 방법에 의한 온도추정분포

4. 결론

RTP 공정의 열역학적 분석을 통하여 모델을 구성하였고 다원점 계측을 통한 입력이 있을 경우를 고려해 온도분포를 추정할 수 있는 방법은 제안하고 이에 대한 수치 예제를 시뮬레이션을 통하여 구현하였다. 다원점 계측을 통한 웨이퍼의 전체 온도 추정 분포를 구하는 것은 단일점 계측을 통한 방법의 단점인 온도불균형과 예측 불가능한 온도변화에 대한 부적응성을 극복하여 보다 정확하고 적용성이 강한 장점이 있다. 이를 실제 시스템에 도입하기 위해서는 웨이퍼 표면온도에 대한 실시간 계측과 그 기기의 반응실 구조에 대한 구체적인 모델링이 선행되어야 한다. 본 논문에서 고려한 1,2,3의 방식에서 1의 방식이 가장 일반적인 온도분포에 적합하고 온도편차가 심한 경우에는 3의 방식이 적합할 것이다. 이러한 방법은 다원점 온도 계측에 의한 온도 추정 분포를 도입한 DES(Discrete Event System) 모델링을 통하여 전체 시스템의 고장 포용을 포함한 실시간 제어 RTP 시스템을 구현할 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

- [1] B. DeHart, K. Johnsgard, "New developments in rapid thermal processing," *Solid State Technology*, pp. 107-109, February, 1996.
- [2] Gabriel G. Barna Lee and Keith Brankner, "MMST Manufacturing Technology-Hardware, Sensors, and Process", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol.7, no.2, May 1992.
- [3] S. A. Norman, "Optimization of wafer temperature uniformity in rapid thermal processing systems," submitted to *IEEE Transactions on Electron Devices*, June, 1991.
- [4] K. L. Knutson, S. A. Campbell, and F. Dunn, "Modeling of Three-Dimensional Effects on Temperature Uniformity in Rapid Thermal Processing of Eight Inch Wafers," *IEEE Trans. Semi. Manufact.*, vol. 7, no. 1, pp. 68-72, Feb. 1994