

실시간 제어를 위한 고속 열처리 공정에서 웨이퍼 온도 분포 추정 기법

A Prediction Method of Temperature Distribution on the Wafer for Real-Time Control in a Rapid Thermal Process System

심 영 태, 이 석 주, 김 학 배
(Yeungtae Shim, Seok-Joo Yi, and Hagbae Kim)

Abstract : The uniformity of temperature on a wafer is one of the most important parameters to control the RTP (Rapid Thermal Process) with proper input signals. It is impossible to achieve the uniformity of temperature without the exact estimation of temperature at all points on the wafer. Therefore, it is difficult to understand the internal dynamics as well as the structural complexities of the RTP, which is a primary obstacle to measure the distributed temperatures on the wafer accurately. Furthermore, it is also hard to accomplish desirable estimation because only a few pyrometers are available in the general equipments. In the paper, a thermal model based on the chamber geometry of the AST SHS200 RTP system is developed to effectively control the thermal uniformity on the wafer. First of all, the estimation method of one-point measurement is developed, which is properly extended to the case of multi-point measurements. This thermal model is validated through simulation and experiments. The proposed work can be utilized to building a run-by-run or a real-time control of the RTP.

Keywords : RTP, thermal modeling, temperature estimation, chamber geometry, run-by-run control

I. 서론

최근 램프 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 램프에 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, 실리콘사이드의 형성과 열처리, 알루미늄을 비롯한 금속 박막의 열처리 및 형성에 사용될 수 있다[1].

RTP 장비의 개발이 오래전부터 이루어졌음에도 불구하고 광범위하게 사용되지 않았던 것은 웨이퍼내의 온도 균일도가 기존의 노(furnace)보다 좋지 않았고 생산성에서도 노방식과 비교가 될 수 없었기 때문이다. 따라서 웨이퍼내의 온도 균일도(uniformity)를 확보하는 것은 RTP 장비에 있어서 매우 중요한 제어 요소이며 온도의 균일도를 높이기 위해서는 웨이퍼의 각 지점에 대한 정확한 온도 제

측이 필수적으로 선행되어야 한다[2]. 일반적으로 RTP 시스템에서의 온도계측은 웨이퍼에 열전대(thermocouple)를 부착하거나 고온계(pyrometer)를 통해 이루어진다. 고온계는 웨이퍼 표면으로부터 방사된 방사열을 이용하여 특정 좌장 데역 내의 복사 에너지만을 전달받아서 방사강도(radiant intensity)를 온도로 변환시킨다. 주로 300 °C 이하의 온도의 측정은 열전대를 이용하며 그 이상의 고온에서는 고온계를 이용한다[3].

그러나 대부분의 RTP 장비에서 중앙에 한 개의 고온계만이 설치되어 있어서 정확한 계측이 불가능하며 따라서 온도를 추정하는 기법이 필요하게 된다. 또한 여러 개의 고온계가 설치되어 있을 때 또한 불균형하게 측정된 값들로부터 정확한 웨이퍼상의 온도분포를 추정하는 기법도 아울러 개발이 되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 선대칭 형태의 램프에 대하여 임의의 단일점 온도 계측에 의한 웨이퍼 온도 추정기법을 개발하고 이를 바탕으로 공정종료 후가 아닌 진행중에 in-situ 센싱에 의한 on-line 제환제어를 가능하게 하고 적절한 계산시간을 갖는 다원점 온도계측에 의한 온도추정기법을 개발하여 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 확인하는 것을 주된 내용으로 한다.

II. 웨이퍼 상의 온도분포 추정

본 연구에서는 연구소에 보유중인 AST SHS200MA RTP 시스템을 모델로 하였다. 이 시스템은 그림 1과 같이 동일한 높이의 직선 형태의 텅스텐-할로겐 램프를 열원으로 각각 n개의 램프가 웨이퍼의 윗면과 아랫면에서 웨이퍼를 가열하는 모델이다. 램프가 직선형이므로 이 경우에는 원통좌표계보다 직교좌표계를 사용하는 것이 유리하다.

접수일자 : 1999. 9. 18., 수정완료 : 2000. 5. 6

심영태 : 연세대 공대 전기·컴퓨터공학과 석사과정

이석주 : KIST 지능제어연구센터 박사후 과정

김학배 : 연세대 공대 전기·컴퓨터공학과 교수

* 본 논문은 학술진흥재단 대학부설 중점연구소 지원사업에 의해서 연구하였습니다

식에 의해 계산할 수 있게 된다[5].

$$\Phi_2 = \delta S_e L H^2 \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{\rho}{H^2 + (\rho \sin \varphi - \rho_0 \sin \varphi_0)^2 + (\rho \cos \varphi - \rho_0 \cos \varphi_0)^2} d\rho d\varphi \quad (8)$$

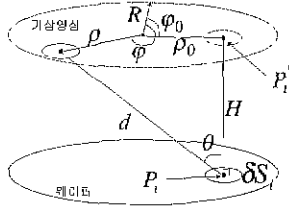


그림 3. 웨이퍼와 가상 영상과의 기하학적 관계.
Fig. 3. Geometrical arrangement between reflexed radiation and wafer.

결국 $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ 로 (6)에 대입하여 웨이퍼상의 온도분포를 용이하게 구할 수 있게 된다.

4. 열전도 방정식의 차분방정식으로서의 이산화

(5)의 해를 구할 때 그대로 미분방정식의 형태로 계산하는 것은 불가능하므로 이것을 근사화시킬 필요가 있다 따라서 웨이퍼 표면을 그림 4와 같이 가로 세로를 일정한 크기 l 을 갖는 격자형태로 이산화시켜 차분방정식으로 근사화시키는 것이 합리적이다.

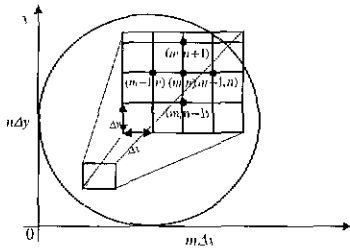


그림 4. 유한 차분방정식을 구하기 위한 웨이퍼의 분할 구조.
Fig. 4. Wafer structure for finite-difference equation.

그림 4에서 $T_{m,n}$ 를 절점 (m, n) 에서의 웨이퍼 온도라 하면 열전도 미분방정식의 유한 차분방정식을 유도할 수 있다. $T_{m,n}$ 를 절점 (m, n) 에서의 웨이퍼 온도와 하면, Δx 가 매우 작을 때, 절점 $(m+1/2, n)$ 에서 x 에 대한 온도의 일차 도함수는 다음과 같이 근사화될 수 있다.

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

그리고, 이와 같은 과정을 거쳐 $\Delta x = \Delta y = l$ 의 단위격자로 쪼개면 절점 (m, n) 에서의 (10)과 같은 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 온도

가 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.

$$AT = \frac{l^2}{k} Q \quad (12)$$

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

5. 단일 센서의 온도측정에 의한 전체 온도 추정

계산과정 중에 (12)에서와 같이 행렬 A 가 singular한 형태가 된다. 이것은 웨이퍼 표면의 온도분포가 정할 수 없는 한 개의 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.

$$A = [A_{*1} \ A_{*2} \ \dots \ A_{*n}] \quad A_{*i} = [a_{i1} \ a_{i2} \ \dots \ a_{in}] \quad Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

A 를 (13)과 같이 여러 개의 행렬의 조합으로 나타낼 수 있는데 이 형식을 이용하여 (12)로부터 (14)를 유도할 수 있다.

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

또한 위 식은 결국 (15)와 같이 변형될 수 있다.

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

A' , T' , 그리고 Q' 을 (16)과 같이 정의하면 결과적으로 (12)로부터 변형된 형태인 (17)이 유도된다.

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

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

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

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 $[t'_1 \ t'_2 \ \dots \ t'_{k-1} \ t_k \ t'_{k+1} \ \dots \ t'_n]^T$ 와 같게 된다.

6. 다중 센서의 온도측정을 통한 전체 온도 추정 분포

그림 4에서 웨이퍼의 중앙에 한 개의 고온계와 주변에 i 개의 고온계가 설치되어 있을 때 각각의 고온계가 설치된 점을 라 하고 직교좌표계 (m, n) 에 대응하는 한 점을 $P(m, n)$, T_k 의 직교좌표계 (m, n) 에 대응하는 특별한 한 점의 온도를 라고 정의한다. 이때 공정 중에는 가장자리 효과나 대류, 진공도, 복사열, 그리고 그 밖의 예측할 수 없

는 원인 등에 의해 각각의 i 개의 T_k 가 서로 일치하지 않을 수 있다. 따라서 각각의 점에서 추정된 온도분포를 이용한 합리적인 예측방법이 필요하다. 이러한 방법의 일종으로 T_k 에 대해 부분별 가중치를 주고 이를 합산하는 방법을 모색하였다. 웨이퍼의 위의 임의 점 $P(m, n)$ 과 k 번째 고온계의 위치 P_k 와의 거리를 $D(m, n, k)$ 를 (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 온도분포는 $T(m, n, k) W(m, n, k)$ 이며 최종 예상 온도 분포 $T(m, n, e)$ 는 (19)와 같은 형태로 유도될 수 있고 이는 웨이퍼의 각 격자상의 중심온도를 추정하는데 핵심적으로 사용되게 된다.

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

III. Smulation 및 고찰

본 논문에서 유도된 식들에 의한 시뮬레이션을 통한 수치예제를 확인하기 위해 설정한 웨이퍼의 기본적인 값들은 표 1과 같다. 이 값들은 본 연구소에서 보유/운용하고 있는 RTP기종인 AST SHS200 모델을 기초로 한 것이다.

1. 단일 센서 계측에 의한 온도 분포

웨이퍼 표면을 충분히 작은 격자로 나누기 위해서 웨이퍼 평면을 가로 40 개 및 세로 40 개를 기준으로 하여서 총 1600개의 격자로 구분하였다. 이 경우 중간 계산에서 $40^2 \times 40^2$ 크기의 행렬이 나오는데 격자를 너무 작게 나눌 경우 더욱 정밀한 계산값이 나오지만 계산량이 너무 폭주하게 되어(explasion) 계산시간이 길어져서 실제 표면온도와 계산치간의 시간지연이 생기므로 온도곡선이 damping 하는 원인이 될 수 있다. 보통 웨이퍼의 중앙에 고온계를 설치하는데 이것은 RTP챔버의 특성에 따라 그 위치가 변경될 수 있다. 그림 5는 웨이퍼의 중앙 상단끝점에 고온계를 설치하여 그 값이 1200°C로 측정되었을 경우 전체 웨이퍼의 온도추정분포를 시뮬레이션한 값이다. 그림에서와 같

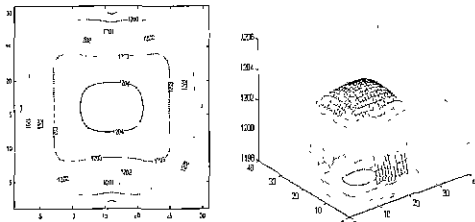


그림 5. 단일점 계측에 의한 온도추정분포.
Fig. 5. The distribution of estimated temperature by one-point measurement.

표 1. 함수의 상수값들.

Table 1. Constants of the function.

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_r (대류 열 전달 계수)	$2.60 \times 10^3 [Wcm^{-2} K^{-1}]$

이 웨이퍼 표면의 임의의 단일점의 센서계측에 의한 온도분포의 시뮬레이션 결과로 중앙에서 가장자리로 갈수록 온도가 감소하는 양상을 보였다.

2. 다중 센서 계측에 의한 온도 분포

여기서 $W(m, n, k)$ 의 함수를 어떻게 지정해 주느냐에 따라 실측된 값에 대한 의존도가 결정된다. 확률적으로 실측된 점의 온도가 가장 신뢰도가 높으며 그 지점과 가까울수록 신뢰도가 높아지고 멀어질수록 신뢰도가 낮아지므로 이에 근거하여 다음과 같은 세 가지 경우를 고려하였다.

- i) $W(m, n, k) = 1/D(m, n, k)^S$, 여기서 S 는 Sensitivity임
- ii) $W(m, n, k) = (MAX(D(m, n, k), 0 \leq k \leq i) - D(m, n, k))^S$
- iii) $W(m, n, k) = e^{S \cdot (MAX(D(m, n, k), 0 \leq k \leq i) - D(m, n, k))}$

각각의 방법을 이용하여 그림 6과 같이 웨이퍼 위의 다섯 부분에 임의로 불균형한 값을 주고 검증을 해보았다.

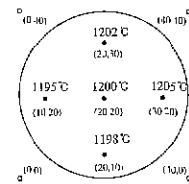


그림 6. 다원점 센서에 의한 계측 위치.
Fig. 6. The distribution of estimated temperature by multi-point measurement.

1)의 경우($S=1,2,3$)

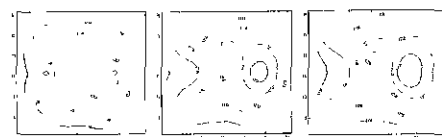


그림 7. i)의 방법에 의한 온도추정분포.
Fig. 7. The distribution of estimated temperature by method 1).

ii)의 경우($S=1,2,3$)

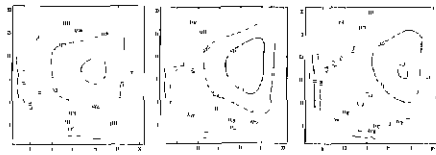


그림 8. ii)의 방법에 의한 온도추정분포.
Fig. 8. The distribution of estimated temperature by method ii).

iii)의 경우 (S=1,2,3)

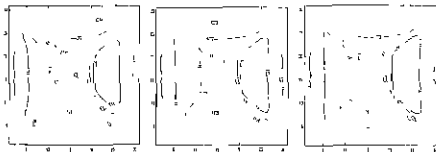


그림 9. iii)의 방법에 의한 온도추정분포
Fig. 9. The distribution of estimated temperature by method iii)

IV. 결론

RTP 공정의 열역학적 분석을 통하여 모델을 구성하였고 다원점 계측을 통한 입력이 있을 경우를 고려해 온도분포를 추정할 수 있는 방법은 제안하고 이에 대한 수치예제를 시뮬레이션을 통하여 구현하였다. 다원점 계측을 통한 웨이퍼의 전체 온도 추정분포를 구하는 것은 단일점 계측을 통한 방법의 단일점 온도불균형과 예측 불가능한 온도변화에 대한 부적응성을 극복하여 보다 정확하고 적응성이 강한 장점이 있다. 이를 실제 시스템에 도입하기 위해서는 웨이퍼 표면온도에 대한 실시간 계측(in situ-sensing)과 그 기기의 반응실 구조에 대한 구체적인 모델

링이 선행되어야 한다. 이러한 방법은 다원점 온도 계측에 의한 온도 추정 분포를 도입하여 웨이퍼의 불균형한 온도 분포를 신속하고 정확하게 추정할 수 있게 함으로써 실시간 시스템 구현이 가능하게 한다. 특히 DES(Discrete Event System) 모델링의 허부시스템에 포함시켜 전체 시스템의 고장 포용을 포함한 실시간 제어 RTP 시스템을 구현할 수 있으며, 이를 바탕으로 전체 반도체 공정의 수율을 향상시켜 생산비 절감효과를 기대할 수 있다

참고문헌

[1] B. DeHart and 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.
[5] M. N. Ozisik, *Basic Heat Transfer*, New York, McGraw-Hill, 1977.



심 영 태
1997년 2월 연세대 전기공학과 졸업.
동대학원 석사(2000). 2000~현재 한화
정보통신연구원. tel)016-341-1670.



이 석 주
1991년 연세대 공대 전기공학과 졸업.
동대학원 석사(1993). 동대학원 박사
(1999). 1999~현재 한국과학기술연구
원 지능제어연구센터 박사후 연구원.
siyi@amadeus.kist.re.kr



김 학 배
1965년 10월 10일생. 1988년 서울대 공
대 전자공학과 졸업. 1990년 미국 미시
간대 대학원 전기공학과(EECS) 졸업
(석사). 1994년 8월 동 대학원 졸업(공
학박사). 1994년 9월-1996년 9월 미국
National Research Council(NRC)
Research Associate st NASA Langley Research Center.
1996년 9월-현재 연세대학교 전기컴퓨터공학과 조교수.
관심분야는 실시간제어, 자동화공학. 고장허용기법, 신뢰
도 평가.
hbkim@yonsei.ac.kr, tel)02-361-2778, fax)02-362-2780