

## 반응로 내 웨이퍼 배치의 온도장 분석 및 가시화

강승환<sup>\*</sup> · 이승호<sup>\*</sup> · 김병훈<sup>\*\*</sup> · 고한서<sup>†</sup>

### Analysis and Visualization of Temperature Field for Wafer Batch in Furnace

Seung-Hwan Kang, Seung Ho Lee, Byeong Hoon Kim and Han Seo Ko

**Abstract.** The temperature of the wafer batch in the furnace was calculated and its visualized temperature field was analyzed. The main heat transfer mechanisms from the heater wall to the wafers were radiation and conduction, and the finite difference method was used to analyze the complex heat transfer including those two mechanisms. The visualized temperature field shows that the direction of the heat flux in the wafer batch varies during the heating process, and the heat in the wafer batch diffuses faster by conduction within the wafer than by radiation between the wafers, in the condition of the constant temperature at the heater wall and cap.

**Key Words :** Wafer Temperature(웨이퍼 온도), Radiation Heat Transfer(복사 열전달), Finite Difference Method(유한차분법)

#### 기호설명

- A : Area
- $C_p$  : Specific heat
- F : View factor
- $F_o$  : Fourier number
- J : Radiosity
- q : Heat
- T : Temperature
- $\epsilon$  : Emissivity

#### 1. 서 론

현재 나날이 발전하고 있는 반도체의 중요성과 더불어 반도체 생산 기술 또한 그 중요성이 커지고 있다. 반도체는 실리콘 웨이퍼 위에 박막을 입히고 패턴을 그려 메모리나 여타 전자부품의 형태로 생산된다. 반도체 생산 공정에서 웨이퍼(Wafer) 위에 박막을 증착하는 방법 중 하나로 저압 화학 기상 증착법(Low Pressure Chemical Vapor Deposition; LPCVD)을 사용한다. LPCVD는 웨이퍼를 고

온으로 가열한 후, 저압인 환경에서 반응 가스를 주입하고 웨이퍼 위에서 반응을 일으켜 박막을 증착시키는 방법이다. 이 때 웨이퍼는 배치(Batch)의 형태로 쌓여 반응로(Furnace) 내 튜브(Tube)안에 위치하며, 열은 웨이퍼 배치의 측면에서 공급된다.

반도체 생산 공정에서 웨이퍼의 온도가 다를 경우 박막의 두께가 달라진다. 그래서 웨이퍼의 온도를 일정하게 유지시키는 온도 컨트롤이 중요하다. 하지만 실제로 고온의 반응로 내의 웨이퍼 온도를 알 수 있는 방법이 없어 생산 공정에 어려움이 있다. 따라서 반응로 내 웨이퍼 배치의 온도를 예측하고 온도장을 제어할 수 있는 방법에 대한 연구가 여러 방면으로 이루어져 왔다.

본 연구에선 반응로 내 웨이퍼 배치의 온도 예측 및 가시화 분석이 진행되었다. 반응로 내의 열전달은 복사와 전도가 주요하다고 가정하였고, 각 면은 확산 회체임을 가정하여 복사 열전달을 계산하였다. 특히 웨이퍼를 동심원으로 영역을 나누어 과도 상태를 계산함으로써 시간 및 위치에 따른 온도의 변화를 예측하고자 했다.

<sup>†</sup> 성균관대학교 기계공학부  
E-mail : hanseoko@skku.edu

<sup>\*</sup> 성균관대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 삼성전자 메모리사업부 D기술팀

## 2. 이론 및 계산 방법

### 2.1 복사 열전달 해석

각 표면이 확산 회체일 경우 각 면과 면 사이의 형상계수(View factor)를 통해 복사 열전달을 계산하는 방법이 소개되어 있다(1,2). 우선 원통형상을 Fig. 1과 같이 나타낼 경우, 원통 형상 내의 형상계수는 다음과 같이 제안되었다(3,4).

$$F_{12} = \frac{1}{2}(S - [S^2 - 4(r_2/r_1)^2]^{1/2}) \quad (1)$$

여기서

$$R_1 = r_1/L, R_2 = r_2/L, S = 1 + (1 + R_2^2)/R_1^2$$

열회로도를 이용하여 원통 내 면과 면 사이의 복사 열전달을 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있으며, 한 노드(Node)에서의 열 평형식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i)/\epsilon_i A_i} = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{(A_i F_{ij})^{-1}} \quad (2)$$

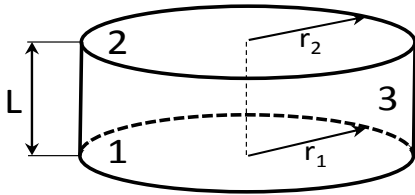


Fig. 1. Configuration of cylinder

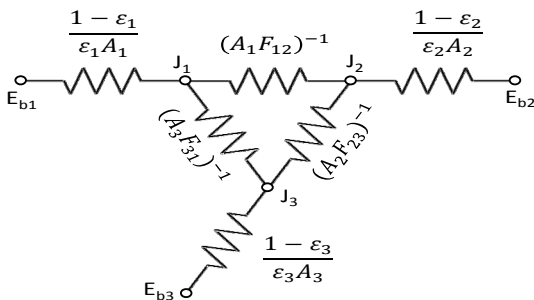


Fig. 2. Radiation thermal circuit

여기서  $E_{bi} = \sigma T_i^4$ 로서 한 면이 흑체일 때의 방사율이며  $\sigma$ 는 스테판 볼츠만 (Stefan-Boltzmann) 상수 ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ )이다.

각 면의 방사율 및 형상계수가 주어질 경우, 식 (2)를 각 노드에서 J에 대해 정리한 후 행렬로 변환하여 행렬식을 풀면 각 면의 온도에 대한 출사율(Radiosity)을 구할 수 있다. 또한 계산된 값을 통해 각 면의 순 열전달율을 구할 수 있다.

본 연구에선 원을 동심원으로 나누고 식 (1)을 사용하여 동심원으로 나뉜 각 링의 형상계수를 구하였다. 또한 늘어난 노드 수만큼 행렬식에 첨가하면 분할된 면에 대한 복사 열전달을 구할 수 있다.

### 2.2 유한차분법 및 수치해석

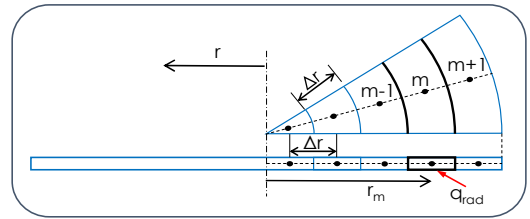


Fig. 3. Finite element in cylindrical coordinate

웨이퍼의 열전달을 계산할 때 웨이퍼 내의 열전도를 고려해야 한다. 하지만 웨이퍼는 매우 얇고, 원통형의 반응로 내에 축 대칭으로 위치하기 때문에 높이 방향 및 각도 방향의 열전도는 무시하고 반경 방향만 고려할 수 있다. 디스크를 동심원으로 분할하고 각 면에 노드를 두는 경우 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 각 분할된 면이 받는 복사 열을 그 노드의 열원(Heat generation)이라고 가정하면 디스크에서 반경방향만을 고려한 과도상태의 1차원 열전달 유한차분법식은 다음과 같다.

$$T_m^{p+1} = Fo \left[ \left(1 + \frac{\Delta r}{2r_m}\right) T_{m+1}^p + \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_m}\right) \times T_{m-1}^p + \frac{\dot{q}(\Delta r)^2}{k} \right] + (1 - 2Fo) T_m^p \quad (3)$$

여기서,

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2}, \alpha = \frac{k}{\rho C_p}, \dot{q} = \frac{q_{rad}}{2\pi r_m \Delta r \Delta z}$$

Table 1 Dimensions of model

Parameter	Value
Furnace length, [mm]	560
Wafer radius, [mm]	75
Wafer thickness, [mm]	0.7
Wafer spacing, [mm]	4.79
Emissivity of wafer	0.65
Emissivity of furnace	0.80
Emissivity of cap	0.37
Temperature of furnace [°C]	615
Temperature of top and bottom [°C]	25
Number of wafers	50

### 2.3 해석 모델 가정 및 조건

반응로 안은 진공에 가까운 저압으로 유지되며, 웨이퍼와의 접촉이 없기 때문에, 본 모델은 전도 및 대류를 무시하고 복사만을 고려한 열전달로 해석할 수 있다.

본 계산에서 사용한 해석 모델은 Badgwell<sup>(5)</sup> 및 Kim<sup>(6)</sup>의 연구에서 사용된 모델의 형상을 차용하였고, 계산 결과를 비교하였다. 특히 본 계산에서는 열원의 벽면이 웨이퍼 끝과 근접하여 각 웨이퍼 사이의 열전달은 원통 내부에서의 복사열전달식을 통해 계산될 수 있음을 가정하였다. 또 웨이퍼 배치는 전체 반응로의 가운데 위치한다고 가정하였다. 가정된 모델의 형상과 치수는 Fig. 4 및 Table 1에 나타내었다.

특히 웨이퍼의 재질인 실리콘의 열전도계수 k와 정압비열 Cp 값<sup>(2)</sup>은 온도에 따라 변하는 함수 값으로 적용하여 실제의 온도 변화와 가깝게 모사하도록 하였다.

각 공간에서의 복사 열전달을 1에서 N+1까지 구한 후 계산된 복사 열전달률을 각 분할 면에서의 열원으로 사용하여 다음 스텝에서의 웨이퍼 온도를 구한다. 초기 상태 30°C에서 총 1000초 동안 시간에 따른 온도 변화를 계산하였다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 해석 결과 검증

웨이퍼 배치의 중앙에 위치한 25번째 웨이퍼의 가장자리와 중심의 온도차가 0.1°C 이하가 되는 시간부터 정상상태라 가정하고, 각 웨이퍼 위치 별 온도와 온도 불균일도 (Nonuniformity)를 Fig. 5에 나타내었다. 불균일도 U는 각 웨이퍼 온도의 표준편차를 평균온도로 나눈 값으로 다음과 같다.

$$U = \left( \frac{\sum [T_m - T_{avg}]^2 \times A_m}{A} \right)^{0.5} / T_{avg} \quad (4)$$

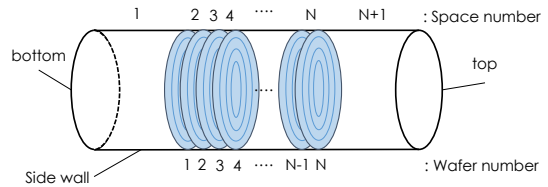


Fig. 4. Wafer batch radiation model

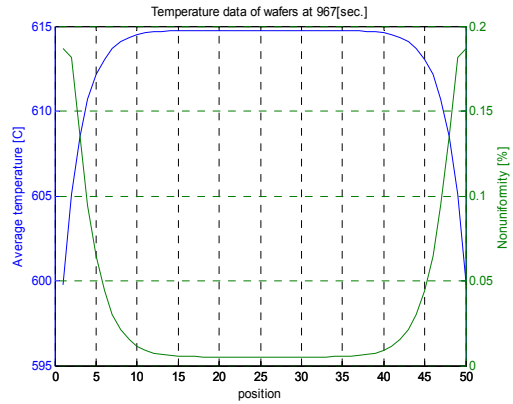


Fig. 5. Steady state wafer batch temperature according to position

50개의 웨이퍼 중 10번째에서 40번째까지 약 서른 개의 웨이퍼 온도는 배치 방향으로 일치하고 불균일도가 0.01% 정도로 매우 작아서, 웨이퍼 배치의 60%가 반경방향과 높이 방향으로 균일온도를 형성함을 확인할 수 있다. 이 결과는 기존 연구 결과<sup>(5,6)</sup>의 경향과 일치함을 확인할 수 있다.

또한 웨이퍼 위치에 따른 온도 변화를 시간에 따라 Fig. 6에 표시하였다. Kim<sup>(6)</sup>의 연구 결과와 흡사하게 웨이퍼 배치의 온도는 끝단에서 먼저 상승하다가 일정한 온도에 다다른 이후에는 배치의 중심부의 온도가 더 상승하는 온도 역전현상이 일어난다. 이는 가열 초기, 끝단이 더 넓은 면적의 열원에서 많은 열을 받기 때문에 먼저 온도가 상승하다가, 어느 시점 이후에선 낮은 온도의 천정 및 바닥 조건으로 인해 열이 계속 손실되어 끝단에서는 온도가 오르지 못하기 때문이다.

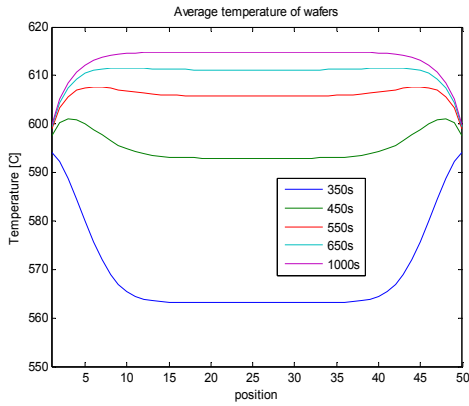


Fig. 6. Wafer temperature distribution according to position

### 3.2 열확산 가시화 분석

본 연구에서는 계산된 데이터를 갖고 시간과 위치에 따른 웨이퍼 배치 단면의 온도를 가시화하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림의 가로축은 웨이퍼의 반경을 나타내며 세로축은 웨이퍼 배치의 높이를 나타내어 아래에서 위로 첫 번째부터 50번째 웨이퍼의 단면의 온도를 보여준다.

그림과 같이 가열 초반부의 웨이퍼 배치에서의 열 확산은 측면과 위아래에서 안쪽으로 이뤄진다. 결과에 따르면 측면에서의 온도 차는 완만하여 열확산이 잘 이뤄지는 반면 상하면에서의 온도 구배는 커서 열 확산은 잘 일어나지 않는 것처럼 보인다. 이는 웨이퍼 배치 내에서 웨이퍼 사이의 복사보다 웨이퍼 내의 전도가 열확산에 더 주요한 요인으로 작용함을 나타낸다.

가열 후반부에선 열유속의 방향이 변하는 것을 보여준다. 450초에선 배치의 양 끝단에서 열유속 등고선에 끌리 생기며, 그 이후 최종상태에 이르러서는 열유속의 방향이 웨이퍼 배치의 안쪽에서 상·하면으로 확산되어 나가는 모습으로 바뀌는 것이 관찰되었다. 이는 Fig. 6에서 분석한 내용과 일치하며, 가시화 분석을 통해 열확산을 쉽게 파악할 수 있음을 확인하였다.

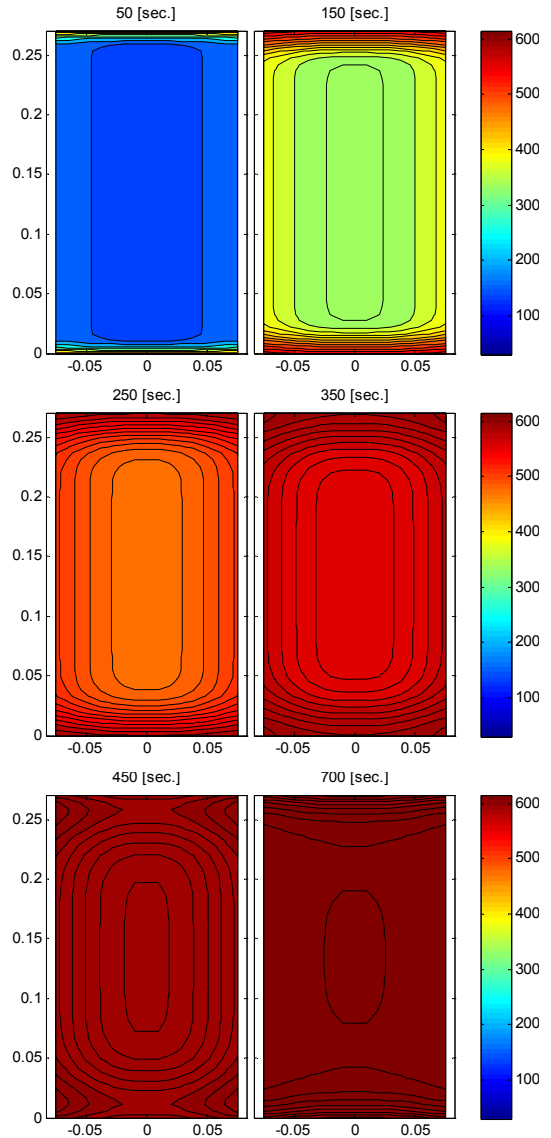


Fig. 7 Temperature field of wafer batch

## 4. 결론

본 연구를 통해 LPCVD 공정에서 웨이퍼 배치의 온도를 관찰하였다. 복사 및 전도를 고려한 복합 열전달을 분석하였으며, 유한차분법을 이용해 웨이퍼 배치 내의 시간 및 위치에 따른 온도 변화를 계산할 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 계산 방법으로 본 모델 뿐 아니라 여러 모델의 웨이퍼 배치 온도를 예측할 수 있게 되었다. 본 연구에 사용된 모델에서는 전체 웨이퍼 배치의 중앙 60%의 웨이

퍼가 균일한 온도장을 유지함을 확인할 수 있었다. 또한 웨이퍼 배치의 온도 가시화를 통해 열확산을 분석하였다. 웨이퍼 배치에서의 열 확산은 상하 방향의 복사보다 반경 방향 전도의 영향이 크다고 분석되었다. 또 가열 공정이 진행되면서 웨이퍼 배치 내에 열유속의 방향이 변하는 시점을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 미래가전연구센터와 삼성전자(주)의 지원으로 수행되었습니다. (S-2015-0856-000)

## 참 고 문 헌

- 1) Oppenheim, A. (1956). "Radiation analysis by the network method." Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 78: 725-735.
- 2) Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of heat and mass transfer. Hoboken, NJ, John Wiley.
- 3) Siegel, R. and Howell, J. R. (2002). Thermal radiation heat transfer. New York, Taylor & Francis.
- 4) Rea, S. N. (1975). "Rapid method for determining concentric cylinder radiation view factors." AIAA Journal 13(8): 1122-1123.
- 5) Badgwell, T. A., Trachtenberg, I. and Edgar, T. F. (1994). "Modeling the wafer temperature profile in a multiwafer LPCVD furnace." Journal of the Electrochemical Society 141(1): 161-172.
- 6) Kim, I. K. and Kim, W. S. (1999). "Theoretical analysis of wafer temperature dynamics in a low pressure chemical vapor deposition reactor." International Journal of Heat and Mass Transfer 42(22): 4131-4142.