

두께 균일도 향상을 위한 LPCVD 챔버 내 웨이퍼 온도 분포 분석

강승환* · 김병훈** · 공병환** · 이재원* · 고한서†

Analysis of temperature distribution of wafers inside LPCVD chamber for improvement of thickness uniformity

Seung-Hwan Kang, Byeong Hoon Kim, Byung Hwan Kong, Jae Won Lee, and Han Seo Ko

Abstract The wafer temperature and its uniformity inside the LPCVD chamber were analyzed. The temperature uniformity at the end of the wafer load depends on the heat-insulating cap. The finite difference method was used to investigate the radiation and conduction heat transfer mechanisms, and the temperature field and heat diffusion in the LPCVD chamber was visualized. It was found that the temperature uniformity of the wafers could be controlled by the size and distance of the heat-insulating cap.

Key Words : Wafer temperature(웨이퍼 온도), Radiation heat transfer(복사 열전달), Finite difference method(유한차분법), Heat-insulating cap(열차단 캡)

1. 서론

저압 화학 기상 증착법(Low Pressure Chemical Vapor Deposition; LPCVD)은 반도체 생산 공정에서 웨이퍼(Wafer) 위에 박막을 증착하는 방법 중 하나로서, 반도체 대량 생산 공정에서 사용되고 있다. 이 방법은 챔버(chamber) 내부에 웨이퍼를 쌓고, 고온과 진공에 가까운 저압의 환경에서 반응가스를 주입하여 실리콘 웨이퍼 위에 박막을 증착시키는 방법이다. 이 때 웨이퍼 로드(Load)는 측면에

서부터 가열되기 때문에 웨이퍼 내의 온도는 바깥이 높고 안쪽이 낮은, 움푹 파인 형태의 온도 프로파일(Profile)을 가지고 상승하며, 정상상태에 이르러서도 주변 경계 조건에 의해 상단과 하단의 웨이퍼의 온도는 고르지 않은 상태로 유지된다. 웨이퍼의 온도는 박막 성장 및 두께에 영향을 끼치는 요소이므로 웨이퍼 로드의 일정한 온도장을 만드는 것이 반도체 산업에서 중요한 이슈이며 이에 따른 많은 연구가 이어지고 있다.

균일한 온도장을 만드는 방법의 하나로 열차단 캡을 사용한다. LPCVD 챔버에선 측면에서 열이 공급되고 위와 아랫면으로 열이 빠져 나간다. 챔버에서 열이 전달되는 메커니즘은 복사열전달로서 복사열은 전자기파의 형태로 이루어져 있다. 전자기파는 표면의 온도에 따라 방출할 수 있는 에너지에 차이가 생기기 때문에 표면의 온도가 중요하다. 챔버 천장에 열차단 캡을 설치하면 손실되는

† School of Mechanical Engineering,
Sungkyunkwan University
E-mail: hanseoko@skku.edu

* Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

** Samsung Electronics, Memory Business

온도를 보상할 수 있게 되며, 웨이퍼의 온도 보준이 이뤄진다.

본 연구에서는 LPCVD 챔버를 모사한 모델을 가정하여 웨이퍼 로드의 온도장을 분석하였고, 열 차단 캡의 거리와 두께에 따른 효과를 분석하였다. 또한 온도장을 가시화하여 챔버 내의 열유속을 분석하였다.

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). 해석할 대상이 원통 형상일 경우, 원통의 아랫면을 1, 윗면을 2라고 할 때 원통 형상 내의 형상계수는 다음과 같이 계산할 수 있다^(3,4).

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

여기서,

$$S = 1 + (1 + R_2^2)/R_1^2, \\ \text{and } R_1 = r_1/L, R_2 = r_2/L$$

열 회로도를 이용하여 원통 내 면과 면 사이의 복사 열전달을 해석할 수 있으며, 한 표면에서의 열 평형식은 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

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

각 면의 방사율 및 형상계수가 주어졌을 때, 식 (2)를 각 면의 출사율(Radiosity) J에 대해 정리

한 후 행렬로 전환하여 행렬식을 풀면 각 면의 온도에 대한 출사율을 구할 수 있다. 또한 계산된 값을 통해 각 면의 순 열전달율을 구한다.

2.2 유한차분법 및 수치해석

LPCVD 챔버의 열전달을 계산할 때 열차단 캡 및 웨이퍼 내의 열전도를 고려해야 한다. 원통형의 챔버 내에서 균일하게 열이 공급되는 경우에 열차단 캡과 웨이퍼로의 열전달은 축 대칭으로 가정할 수 있다. 각도 방향의 열전도는 무시하고 표면의 각 분할된 표면에서 받는 복사열을 그 노드(Node)의 열원이라고 가정하면 원통에서 반경방향(r-direction)과 높이방향(z-direction)을 고려한 과도 상태의 2차원 전도열전달 유한차분법식은 다음과 같다.

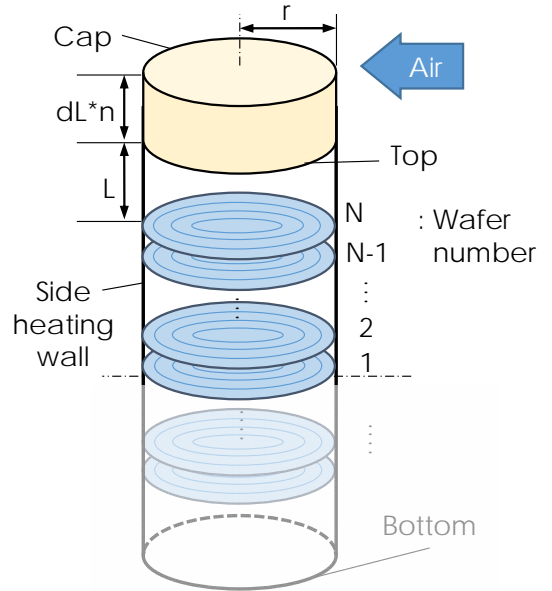


Figure 1. Schematic of LPCVD chamber system

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo_r \left(\left(1 + \frac{\Delta r}{2r_m} \right) T_{m+1}^p + \left(1 - \frac{\Delta r}{2r_m} \right) \times T_{m-1}^p \right) + Fo_z (T_{n+1}^p + T_{n-1}^p) + (1 - 2(Fo_r + Fo_z)) T_{m,n}^p + \frac{\dot{q}}{\rho C_p} \Delta t \quad (3)$$

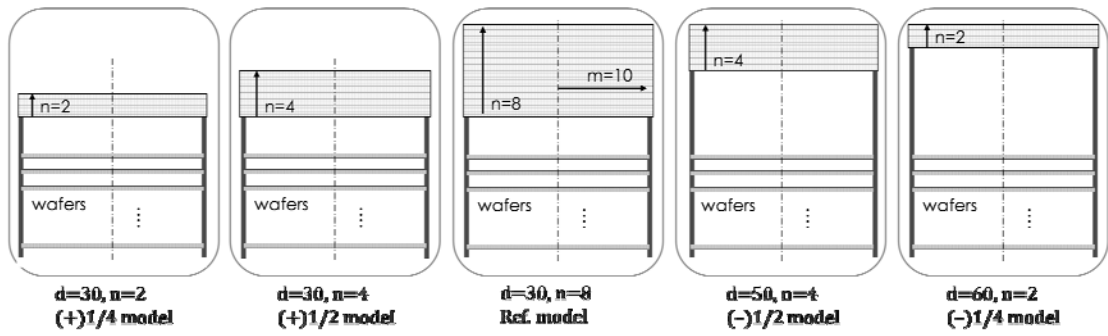


Figure 2. LPCVD chamber model

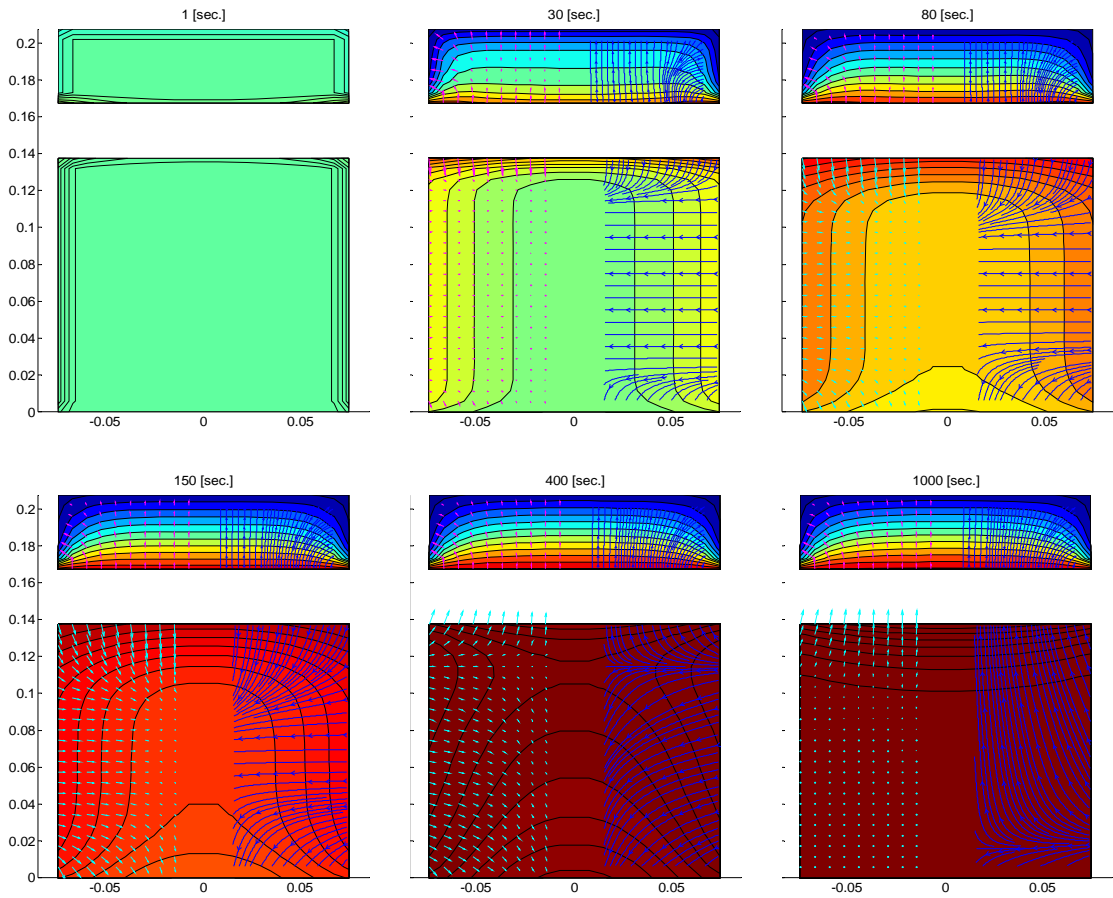


Figure 3. Temperature field and heat flux line of wafer load and cap

여기서,

$$Fo_r = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2}, Fo_z = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta z)^2},$$

$$\dot{q} = \frac{q_{rad}}{2\pi r_m \Delta r \Delta z} \text{ and } \alpha = \frac{k}{\rho C_p},$$

특히 웨이퍼의 경우 그 두께가 매우 얇기 때문에 높이방향의 열전도도 무시한 1차원 열전달로 고려할 수 있다.

2.3 해석 모델 가정 및 조건

본 계산에서 사용한 해석 모델은 Fig. 1과 같이 LPCVD 챔버의 윗부분만 고려하였다. 벽면에서 같은 온도로 열이 공급되는 경우 웨이퍼 로드 내의 온도장은 상하 대칭이 나타날 것이다. 따라서 해석 모델의 웨이퍼의 수를 전체의 반 정도로 설정한 경우, 제일 아래의 웨이퍼의 경계조건은 대칭 또는 단열로 설정할 수 있다. N 개의 웨이퍼가 있는 경우 챔버 내에 N 개의 복사열전달 공간이 생긴다. 각 공간에서의 복사열전달의 열량을 1에서 N 까지 구한 후 계산된 복사 열전달률을 각 웨이퍼의 m 개의 분할 면의 열원으로 사용하여 다음 스텝에서의 웨이퍼 온도를 구한다. 또한 캡 부분은 m 개의 분할 면과 n 개의 층으로 나누었고, 바깥면은 대기와 만나는 부분으로서 대류 열전달계수 h 를 $20\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 로 가정하여 히트싱크가 되도록 계산하였다. 초기 상태에서 총 1000초 동안의 온도 변화를 계산하였고, 온도 변화가 없는 상태가 되었을 때는 정상상태로 가정하였다. 본 계산에서는 온도에 따라 변하는 물성치들을 도입하여⁽⁷⁻⁹⁾ 좀 더 정확한 값을 도출하고자 하였다.

또한 본 연구에서는 열차단 캡의 효과를 분석하기 위해 캡의 두께 및 웨이퍼 상단으로부터의 거리를 조정하였다. 캡의 두께는 기본모델에서 1/2과 1/4로 줄어든, 기본 모델의 캡에서 위쪽 면(+)이 줄어드는 것과, 아래쪽 면(-)이 줄어드는 형상을 고려하였다. 캡의 아래쪽 면 두께가 줄어드는 경우 상단 웨이퍼와의 거리 d 가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이와 같이 가정된 모델의 형상을 Fig. 2에

나타내었다. 그 외의 형상 및 치수는 기존에 진행되었던 연구에서 사용되었던 것을 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 본 계산을 위한 소프트웨어로는 Matlab을 사용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 기본 상태의 온도장 분석

열차단 캡의 영향을 고려할 경우, 웨이퍼 로드와 열차단 캡 단면의 시간에 따른 온도 변화를 가시화하여 Fig. 3에 나타내었다. 가로방향은 반경 방향을 나타내며 세로방향은 높이방향을 나타낸다. 각 그림의 윗부분은 캡의 온도를 나타내고 아랫부분은 웨이퍼 로드의 온도장을 나타낸다. 또한 온도장의 온도 차이를 이용하여 열유속의 방향을 Streamline과 벡터로 나타내었다.

같은 초기 온도에서 가열을 시작할 경우, 열유량이 상대적으로 작은 캡이 먼저 정상상태에 이르며 열유속 모양이 거의 변하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 또한 캡 부분은 바깥 대기과 만나기 때문에 챔버 안에서 열을 받고 바깥쪽으로는 지속적으로 열을 방출한다는 것을 확인할 수 있다.

웨이퍼 로드는 위쪽과 옆에서 열이 공급되어 온도가 상승한다는 것을 확인하였다. 특히 제일 윗면의 웨이퍼는 열을 받는 공간이 넓어 먼저 온도가 상승한다는 것을 알 수 있다. 하지만 시간이 지남에 따라 캡 부분으로 지속적인 열손실이 발생하여 윗면의 웨이퍼의 온도는 더 이상 상승하지 않으며, 따라서 위에서 아래로 향하던 열유속의 방향이 일정 시간이 지남에 따라 아래에서 위로 향하는 방향으로 바뀐다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 열차단 캡 효과 분석

열차단 캡의 거리와 두께에 따른 온도 및 온도균일도를 분석하였다. 불균일도 U 는 각 웨이퍼 온도의 표준편차를 평균온도로 나눈 값으로 다음과 같다^(5,6).

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

불균일도 값이 높아진다는 것은 웨이퍼 내의 온도 편차가 크다는 것을 나타내므로 이 값이 작을수록 좋은 온도 균일도를 나타낸다.

Fig. 4에 따르면 열차단 캡의 두께가 얇아질수록 웨이퍼의 균일도가 안 좋아진다는 것을 확인할 수 있다. 또한 같은 두께의 캡일 경우 (-)모델과 같이 아래쪽 두께가 줄어들어 윗공간의 열원이 확보될수록 균일도가 좋아진다는 것을 알 수 있다.

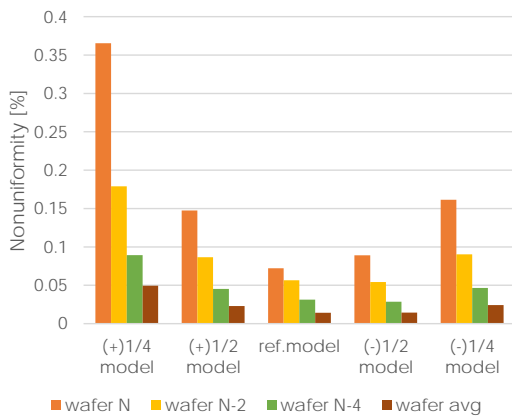


Figure 4. Non-uniformity by varying heat-insulating cap's condition

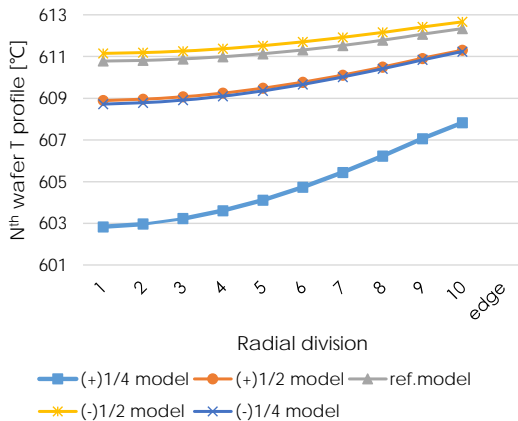


Figure 5. Temperature of the upper wafer varying heat-insulating cap's condition

또한 캡의 변화에 따른 챔버 상단의 주요 웨이

퍼 온도 프로파일을 Fig. 5에 나타내었다. 모든 모델에서 중심부의 온도가 낮고 테두리 부분의 온도가 높게 형성된다. 이 중 기준 모델과 -1/2 모델의 온도가 가장 높으며 균일도도 가장 고르게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 +1/4 모델의 경우 캡의 두께가 얇아 단열 성능이 현저히 떨어지고 열손실이 많아 웨이퍼 온도가 낮아지고 균일도도 나빠진다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 LPCVD 챔버에서 열보상과 온도균일도 향상을 위해서 열원의 공간을 확보해야하며 열차단 캡의 두께를 확보해야 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 LPCVD 챔버 내 웨이퍼 로드의 온도를 분석하였다. 복사 및 전도를 고려한 복합 열전달을 분석하였으며, 유한차분법을 이용해 웨이퍼 로드의 온도장을 가시화하여 나타내었다. 또한 온도장에 열유속을 함께 표시하여 열 확산을 쉽게 파악할 수 있었다.

열차단 캡의 거리 및 두께에 따라서 웨이퍼 상단의 열 보상 뿐 아니라 웨이퍼 로드 내에 온도 균형을 제어할 수 있다는 것이 확인되었다.

후 기

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

REFERENCES

- 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., Lavine, A. S., 2007, Fundamentals of heat and mass transfer, 6th ed., John Wiley, Hoboken, NJ.
- 3) Siegel, R., Howell, J. R., 2002, Thermal radiation heat transfer, Taylor & Francis, New York.

- 4) <http://www.thermalradiation.net/section/C-41.html>
- 5) Badgwell, T. A., Trachtenberg, I., 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., 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.
- 7) Munro, R. G., 1997, "Material properties of a sintered α -SiC," *J. Phys. Chem. Ref. Data* 26(5), 1195-1203.
- 8) Nilsson, O., Mehling, H., Horn, R., Fricke, J., Hofmann, R., Müller, S.G., Eckstein, R., Hofmann, D., 1997, "Determination of the thermal diffusivity and conductivity of monocrystalline silicon carbide (300-2300 K)," *High Temp. High Press.* 29(1), 73-79.
- 9) Glassbrenner, C. J. and Glen A. Slack., 1964. "Thermal Conductivity of Silicon and Germanium from 3°K to the Melting Point," *Physical Review*, 134(4A), A1058-A69.
- 10) Kang, S.-H., Lee, S. H., Kim, B. H. and Ko, H. S., 2015, "Analysis and Visualization of Temperature Field for Wafer Batch in Furnace," *Journal of The Korean Society of Visualization*, 13(3), 24-28.