

LPCVD 공정중 웨이퍼의 온도장 해석

김일경* · 정민철* · 김우승** · 유승일*** · 남기흠*** · 채승기***

(1997년 10월 16일 접수)

Thermal Analysis of the Wafers in LPCVD Process

Il Kyoung Kim, Min Cheol Jung, Woo Seung Kim,
Seung Il Yu, Ki Huem Nam and Seung Ki Chae

Key Words : LPCVD Reactor (LPCVD 반응기), View Factor (형태계수), Radiation (복사), Wafer, Transient State (과도상태)

Abstract

In the LPCVD reactor the temperature variations within the wafer load are the most important factor to maintain the thickness of the materials deposited on the surface of the wafer constant and to affect the deformation of each wafer. In this study the temporal variations of radial and axial temperature nonuniformities of each wafer in the LPCVD reactor are numerically estimated by assuming diffuse reflection. To verify the validity of the present numerical results, the present results obtained from the transient analysis are compared with those of Badgwell's work in which a steady-state condition was assumed. The main objective of this work is to determine the temporal variations of the temperature of each wafer in the LPCVD process since the wafers experience severe change in temperature in the early stage of the process.

1. 서 론

웨이퍼 생산공정중 Polycrystalline-Si, Oxide film, Nitride 등을 웨이퍼 표면에 증착시키기 위해 CVD (Chemical Vapor Deposition) 공정이 주로 사용되고 있으며, 여러 공정중 400°C~900°C 정도의 온도와 0.2torr~2torr의 낮은 압력하에서 가스를 일정한 두께로 많은 웨이퍼 표면에 동시에 증착시키기 위해 LPCVD (Low Pressure CVD) 공정이 널리 쓰이고 있다.

실제 공정에서 LPCVD 반응기 내부에서의 물리적 현상에 대한 예측이 용이하지 않으므로 현장에

서는 많은 시행착오를 거쳐 웨이퍼를 생산해 내고 있다. 현재 사용중인 8인치 직경의 웨이퍼보다 큰 직경의 웨이퍼에 대한 요구가 증대되면서 기존의 multi-wafer LPCVD 반응기를 사용할 경우 일어날 수 있는 여러가지 문제점 파악이 선행되어야 하며, 이를 위해 반응기 내부에서의 열유동현상에 대한 정확한 이해가 요구된다.

Schravendijk과 De Koning 등⁽¹⁾은 diffusion 반응기에서 웨이퍼 온도 예측과 제어에 대한 방법을 제안하였다. 이들은 입구, 열선, 튜브(quartz tube), 웨이퍼 등과 같은 반응기 내부의 요소에 열평형을 적용하였으며, 반경방향의 온도구배를 무시하고 웨이퍼들을 축방향으로 적절한 온도계수를 갖는 원통으로 근사화하여 확산방사와 확산반사를 적용해 가열하는 동안 과도상태(transient state)의 온도분포를 예측하였다. 또한 이들은 웨이퍼내부에

*회원, 한양대학교 대학원
**회원, 한양대학교 기계공학과
***삼성전자(주)

서 전도현상과 대기압에서의 대류효과를 무시한 $Hu^{(2)}$ 의 오류를 지적하고 있다.

Badgwell⁽³⁾은 정반사(specular reflection)기법을 사용하여 정상상태에서 웨이퍼 반경방향으로의 온도구배 및 축방향으로의 온도변화를 구하였는데, 웨이퍼 사이의 간격이 웨이퍼 직경에 비해 매우 좁은 관계로 웨이퍼를 무한평판으로 가정하여, 평판 사이에서의 에너지 교환은 반사기법에 관계없이 같다는 가정하에 해석하였다.

본 연구에서는 과도상태에서의 온도분포를 예측하여 온도구배가 큰 초기상태에서의 온도분포에 관해 해석하고, 반응기 중앙의 웨이퍼와 입구쪽에 위치한 웨이퍼사이의 온도불균일에 대해 살펴보고자 한다. 과도상태를 거쳐 정상상태에 도달했을 때의 해석 결과들을 정상상태의 가정하에 해석을 수행한 Badgwell⁽³⁾의 결과와 비교하여, 본 연구에서 개발한 프로그램의 타당성을 확인하고, 과도상태의 결과에 대한 검증을 수행하며, 검증된 프로그램을 확장하여 현재의 반도체 공정에서 사용되는 실제 반응기의 과도상태 결과를 얻고자 한다. 이러한 일련의 해석을 통하여 열전달 측면에서 볼 때, 매우 복잡한 기구를 갖는 LPCVD 공정에서 웨이퍼들의 에너지 평형모델을 제시하고, 이것을 바탕으로 변수들 변화에 따른 영향을 조사하여 보다 좋은 공정조건을 찾는 것이 본 연구의 주된 목표이다.

2. 이 론

2.1 온도장 해석

원통형의 LPVCD내에 축대칭으로 배치되어 있는 각 웨이퍼의 온도 분포를 예측하기 위해서 웨이퍼에 대한 축대칭 비정상 전도방정식을 고려해 보면 다음과 같다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

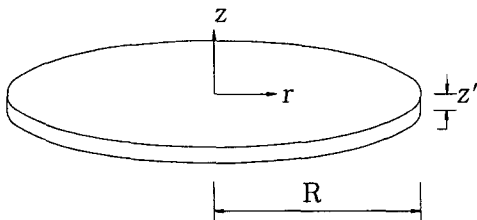


Fig. 1 Coordinate system of wafer.

여기서 ρ , c_p , k 는 각각 밀도, 비열, 열전도계수를 나타내고, t 는 시간을 T 는 온도를 나타낸다.

웨이퍼는 Fig. 1에서 보인 것과 같은 얇은 원판의 형태를 가지며, 이때 원통의 높이 z' 이 반경 R 에 비해 무시할 수 있을 만큼 작으므로 식 (1)을 z 방향에 대해 공간 평균을 취해 정리하면 다음과 같다.

$$\rho c_p \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right) + \dot{q}_z \quad (2a)$$

여기서

$$\bar{T} = \frac{1}{z'} \int_{-z'/2}^{z'/2} T dz \quad (2b)$$

$$\dot{q}_z = \frac{1}{z'} \left[\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z'/2} - \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{-z'/2} \right] \quad (2c)$$

여기서 \bar{T} 는 z 방향으로 공간적분된 온도이며, \dot{q}_z 는 z 방향의 경계조건을 나타낸다. 즉, 식 (2c)의 우변은 웨이퍼의 윗면과 아랫면으로 들어오는 열유속을 나타낸다.

식 (2)의 경계조건으로는 웨이퍼 중앙에서의 대칭조건과 웨이퍼의 끝단에서의 일정 열유속조건을 적용하면 다음과 같다.

$r=0$ 에서

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$r=R$ 에서

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = q_{edg} \quad (4)$$

여기서 q_{edg} 는 웨이퍼의 끝단에서 주어진 열유속이다.

식 (2), (3), (4)로 주어진 지배방정식과 경계조건을 유한차분법을 사용하여 이산화하였으며, 완전암시도식을 적용하여 안정성 문제에 구애 받지 않고 임의의 시간 간격을 사용할 수 있어서, 정상상태까지의 수치해석 시간을 줄일 수 있었다.

2.2 단순영역해석

식 (2)의 생성항 \dot{q}_z 와 식 (4)의 경계치 q_{edg} 는 웨이퍼의 표면을 통해 이동하는 열유속을 나타내는데, LPCVD 공정중 반응기의 벽면과 웨이퍼는 상당한 온도차가 있고 복사 열교환이 지배적이다. LPCVD 반응기의 경우와 같이 많은 웨이퍼가 존재하고, 웨이퍼의 간격이 웨이퍼의 크기에 비해 매

우 작은 경우, 인접한 두 웨이퍼간의 열전달은 무한 평판사이의 복사 열교환으로 고려할 수 있으므로 확산반사는 정반사와 유사한 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 반응기내의 반사를 고려함에 있어 계산이 보다 간편한 확산반사로 가정하고, 단순영역해석(simplified zone analysis)을 사용하여 각 표면에서의 열유속을 구하였다.

밀폐된 LPCVD 반응기 내부에서의 복사 열교환 문제 해석에서 밀폐공간내의 전체 표면을 유한한 갯수의 영역(zone)으로 나누고 각 영역당 다음의 가정을 적용하여 열 해석을 수행하였다.

- ① 각 영역에서 복사물성치는 일정하고 방향에 무관한 값을 갖는다.
- ② 각 영역의 표면 전체에 걸쳐 일정온도나 일정 열유속이 주어진다.
- ③ 표면은 모두 확산 방사체(diffuse emitter), 확산 반사체(diffuse reflector)이다.
- ④ 각 영역의 표면에서는 방사량(radiosity)은 일정하다.
- ⑤ 표면은 불투과성으로 가정한다.

확산 반사를 하는 회체(graybody) 표면으로 이루어진 밀폐공간에서의 단순영역해석에 관한 식은 다음과 같다.

$$R_i = \varepsilon_i \bar{\sigma} T_i^4 + \rho_i \sum_{j=1}^N R_j F_{i-j} \quad (5)$$

$$q_i = R_i - \sum_{j=1}^N R_j F_{i-j} \quad (6)$$

$$q_i = \frac{\varepsilon_i \bar{\sigma} T_i^4 - (1 - \rho_i) R_i}{\rho_i}, \quad \rho_i \neq 0 \quad (7)$$

여기서 R 은 방사량, T 는 온도, q 는 열유속을 나타내고, ε , ρ , $\bar{\sigma}$, F 는 각각 방사율(emissivity), 반사율(reflectivity), Boltzmann 상수, 그리고 형태계수를 나타낸다. 또한 하첨자 i , j 는 각 영역의 번호를 나타내고, N 은 전체 영역의 갯수를 나타낸다.

식 (7)과 식 (5)를 이용하고, Kirchhoff의 법칙($\varepsilon = 1 - \rho$)을 적용하여 정리하면, 각 영역의 온도와 열유속에 관해 다음 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{q_i}{\varepsilon_i} - \sum_{j=1}^N \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} q_j F_{i-j} = \bar{\sigma} T_i^4 - \sum_{j=1}^N \bar{\sigma} T_j^4 F_{i-j} \quad (8)$$

여기서 F_{i-j} 는 i 번째 표면에서 j 번째 표면으로의 형태계수를 나타낸다.

식 (8)에서의 q_i 는 각 표면영역에서 방출되는 열

유속을 나타낸다. 총 N 개의 표면영역에서 방출되는 열유속 중 웨이퍼의 윗면에서 방출되는 열유속을 $q_{i,us}$, 웨이퍼의 아랫면에서 방출되는 열유속을 $q_{i,ls}$ 라 하면, 식 (2)의 생성항 \dot{q}_z 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{q}_z = -\frac{1}{z'} \left[q_{i,us} + q_{i,ls} \right] \quad (9)$$

한편 식 (4)의 경계치 q_{edg} 는 다음과 같다.

$$q_{edg} = q_{i,edg} \quad (10)$$

여기서 $q_{i,edg}$ 는 웨이퍼의 테두리에서 방출되는 열유속을 나타낸다.

2.3 형태계수

두 표면 사이의 복사형태계수를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F_{A_i-A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi S^2} dA_j dA_i \quad (11)$$

여기서 $F_{A_i-A_j}$ 는 표면 A_i 에서 표면 A_j 로의 형태계수를 나타내고, S 는 각 표면위의 임의의 두 점 사이의 거리를 나타내며, θ_i , θ_j 는 두 점을 잇는 선분과 법선벡터가 이루는 각을 의미한다.

기존의 많은 논문이나 자료^(4,5,6)에서 형태계수에 관하여 특정한 형상에 대한 엄밀해는 많이 보고되고 있으나, 일반적인 형상에 대한 엄밀해를 구하는 일은 상당한 어려움이 따른다. 특히 본 연구에서와 같이 두 표면 사이에 장애물이 존재하는 경우에 형태계수의 엄밀해를 구하는 일은 거의 불가능하다. 따라서 일반적인 형상에 대한 형태계수를 구하기 위해 각 표면을 유한한 갯수의 점으로 구성된 후 형태계수에 대한 식 (11)을 사용해 수치적으로 형태계수를 구하고, 특히 두 표면사이에 장애물이 존재하는 경우의 형태계수를 구하기 위해 장애물 판단법을 사용하였다. 표면 A_i 위의 임의의 점 1과 표면 A_j 위의 임의의 점 2사이의 장애물을 판단하는 기본적인 절차는 다음과 같다.

- ① 두 점 사이의 방향벡터를 계산한다.
- ② 방향벡터를 사용하여 점 1을 지나는 직선을 구성한다.
- ③ 장애물을 구성하는 각 표면을 무한한 표면이라 생각하고, 과정 ②에서 구한 직선과 이 무한 표면이 교차하는가를 판단한다.
- ④ 직선과 무한 표면이 접하지 않는다면 장애물

이 없는 것이고, 직선과 무한 표면이 만난다면 접점을 계산한다.

⑤ 계산된 접점이 실제의 유한한 표면위에 있다면 점 1과 점 2사이에 장애물이 있으며, 식 (11)의 피적분함수는 0으로 고정시킨다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 결과의 검증

본 연구에서는 LPCVD 공정중 웨이퍼에서의 온도분포를 수치적으로 해석하고 그 타당성을 검증하기 위하여, 먼저 기존의 논문에서 사용한 연구 대상을 수치해석하였다. Badgwell⁽³⁾은 근래에 많이 쓰이고 있는 수직형 SEMATECH LPCVD 반응기를 사용하여 수치해석 및 실험을 수행하였고, 그 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2를 보면 이 반응기는 수직의 축대칭인 원통으로 구성되어 있고, 내부의 중앙에 축대칭으로 직경 6인치의 웨이퍼 50매가 위치되어있다. 또한 반응기의 윗부분에는 웨이퍼 보트(boat)가 이동할 수 있도록 입구가 설치되어 있고, 측면에는 가스분사기(gas injector)가 위치해 있으며, 아랫부분에는 가스 배출구가 있다. 그리고 반응기 벽면에는 온도를 조절할 수 있는 열원이 있어 반응기 벽면을 고온으로 일정하게 유지하도록 되어있다. 반응기의

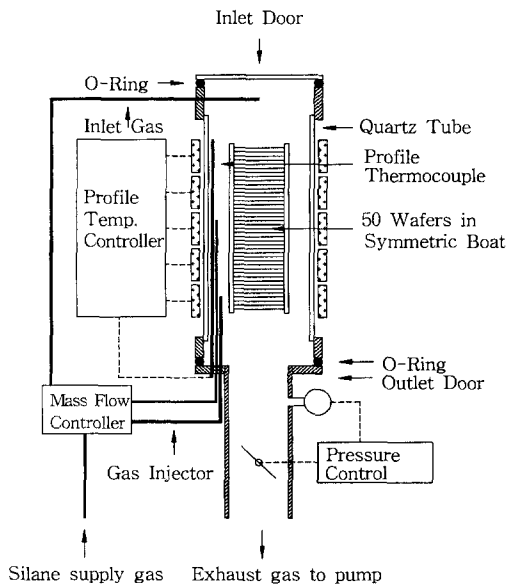


Fig. 2 Vertical multiwafer LPCVD reactor configuration.

보다 상세한 내용과 열원의 온도 분포 등은 Badgwell⁽³⁾의 논문에 나타나있다.

LPCVD 반응기의 내부는 0.2torr~2torr의 낮은 압력으로 유지되므로, 대류의 효과를 무시하였고, 또한 증착물질간의 혼합 및 화학반응은 고려하지 않았다. 각 웨이퍼가 균일한 온도분포를 갖도록 하는 것이 균일한 가스증착을 얻기 위한 선결조건이므로, 본 연구에서는 복사 및 전도에 의한 각 웨이퍼의 온도장을 해석하였다.

해석에 사용한 웨이퍼의 물성치는 Table 1과 같고 polysilicon막이 웨이퍼와 LPCVD 반응기 벽면을 뒤덮는다는 가정하에 방사율(ϵ)에 대해서는 0.65의 값을 사용하였다. 또한, 윗쪽과 아랫쪽의 입구의 재질은 스테인레스 강철로 가정하였고, 방사율은 0.37의 값을 사용하였다.⁽³⁾ 웨이퍼의 초기 온도는 30°C, 입구 및 열원의 온도는 각각 25°C, 615°C이며, 반응기 벽면중 열원(heater)이 없는 구간은 입구부분의 온도와 열원의 온도 사이에서 온도가 선형적으로 분포하도록 하여 해석에 적용하였다.

각 웨이퍼의 평균온도를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 각 웨이퍼의 평균온도는 다음과 같이 정의 된다.

$$T_{ave} = \frac{\int_0^R T(r) r dr}{\int_0^R r dr} \quad (12)$$

Table 1 Properties of wafer.

Density (ρ)	2.230 g/m ³
Heat Capacity (c_p)	932 J/kgK
Thermal Conductivity (k)	35.7 W/mK

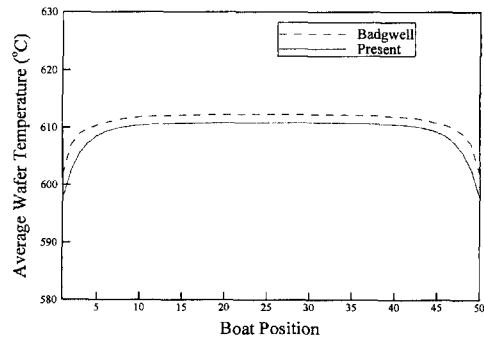


Fig. 3 Average wafer temperature at steady state.

여기서 $T(r)$ 은 반경방향의 온도이고 R 은 웨이퍼의 반경이다.

Fig. 3을 살펴보면 보트의 끝쪽에 위치한 웨이퍼의 평균온도가 중앙에 위치한 웨이퍼의 평균온도보다 약 12°C 정도 낮음을 알 수 있다. 정상상태 해석을 통해 얻은 Badgwell⁽³⁾의 평균온도분포(점선)와 비정상상태 해석을 통해 얻은 본 연구의 정상상태에서의 평균온도분포(실선)는 상온으로 유지되고 있는 입구부분에 인접한 웨이퍼(맨 윗면과 아랫면의 웨이퍼)의 온도는 낮고, 중앙에 위치한 웨이퍼들의 평균온도가 높음을 볼 수 있는데, 이러한 경향은 두 결과 모두 서로 비슷하지만, 최고 온도가 각각 612°C , 610°C 로써 2°C 정도의 차이가 남을 볼 수 있고, 최저 온도도 각각 602°C , 598°C 로써 4°C 정도의 차이가 남을 볼 수 있다. 이러한 차이는 해석에 주된 영향을 미치는 형태계수를 계산함에 있어서 Badgwell⁽³⁾은 장애물 판단을 적절히 수행하지 않고 형태계수 계산을 단순화시킨 것에 기인한 것으로 판단된다.

정상상태일때 웨이퍼의 위치에 따른 반경 방향으로의 온도의 불균일성(nonuniformity)을 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 온도의 불균일성은 반경 방향의 온도에 대한 표준편차를 평균온도로 나눈것으로 다음과 같이 정의된다.

$$U = \frac{\sigma_r}{T_{ave}} \quad (13a)$$

여기서

$$\sigma_r^2 = \frac{\int_0^R [T(r) - T_{ave}]^2 r dr}{\int_0^R r dr} \quad (13b)$$

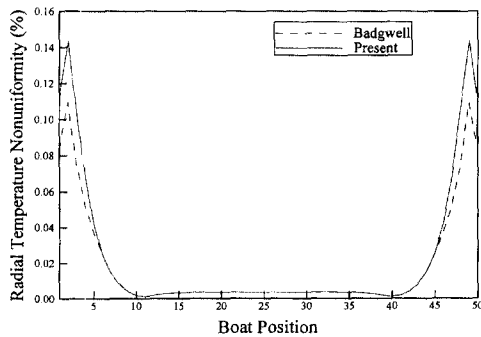


Fig. 4 Radial temperature nonuniformity at steady state.

Fig. 4를 살펴보면 보트의 끝 부분에 위치한 웨이퍼가 불균일성이 큼을 보이고 있고 11번째와 40번째 웨이퍼가 불균일성이 가장 작으며 보트의 중앙에 위치한 웨이퍼는 약간의 불균일성을 보임을 알 수 있다. 정상상태일때의 반경 방향의 온도의 불균일성을 Badgwell⁽³⁾의 결과와 비교해 보면, 그 분포형태는 유사하나 보트의 끝부분에 위치한 웨이퍼의 온도 불균일성이 Badgwell⁽³⁾의 결과보다 약 0.03% 큼을 알 수 있고, 그 이유는 앞에서 언급된 바와 같이 형태계수 계산의 차이로 보인다.

이상과 같이 본 연구에서 수행한 비정상 상태 해석을 통해 얻은 정상상태의 결과는 정상상태 해석을 사용한 Badgwell⁽³⁾의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

한편 과도상태에서의 웨이퍼의 온도분포를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 5의 평균 온도분포를 보면, 보트 양끝단의 웨이퍼가 초기에 온도가 가장 높고, 인접한 웨이퍼의 온도가 차츰 높아짐을 알 수 있다. 고온의 반응기 벽면에 노출이 적은 중앙

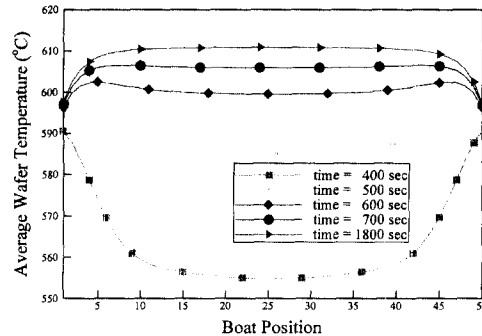


Fig. 5 Temporal variation of average wafer temperature.

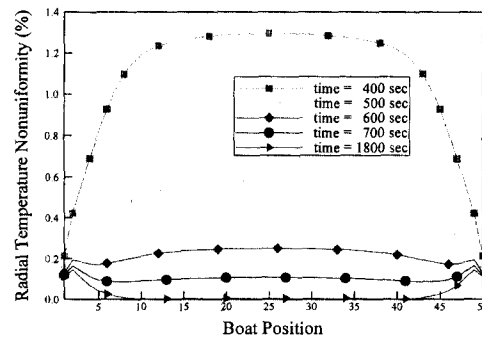


Fig. 6 Temporal variation of radial temperature nonuniformity.

부분의 웨이퍼는 초기에 온도가 낮고 점차적으로 온도가 상승함을 알 수 있다. 반면에 시간이 많이 경과된(600초 이후) 후에는 저온(상온)인 반응기 입구부분에 노출된 보트 양끝단의 웨이퍼가 중앙의 웨이퍼보다 온도가 낮음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 LPCVD 반응기에서의 공정 초기에 웨이퍼는 상당한 온도변화를 겪게 되므로 초기 과도상태에서의 온도분포해석이 필수적임을 알 수 있다.

각 웨이퍼에서의 반경 방향의 온도 불균일성의 시간에 따른 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 정상상태의 해석결과와는 달리 공정 초기에 보트의 중앙 부분에 위치한 웨이퍼의 온도 불균일성이 상당히 큼을 알 수 있다. 이는 반응초기에 초기온도 30°C 인 보트 중앙 부분의 웨이퍼들은 웨이퍼의 끝단 부분만이 고온의 반응기 벽면과 복사 열교환을 주로 수행하기 때문에 온도의 불균일성이 커진다. 반면에 보트의 양끝 부분에 위치한 웨이퍼는 많은 부분이 반응기의 벽면에 노출되어 있으므로 중앙의 웨이퍼보다 온도의 불균일성이 작고 그 크기가 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

몇장의 웨이퍼에 대해 시간에 따른 반경 방향으로의 온도차(끝단온도-중앙온도)의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 보트의 윗쪽 끝에 위치한 1번째 웨이퍼와 정상상태에서 가장 큰 반경 방향의 온도 불균일성을 보인 2번째 웨이퍼, 그리고 정상상태에서 가장 작은 반경 방향의 온도 불균일성을 나타낸 11번째 웨이퍼, 보트의 중앙에 위치한 25번째 웨이퍼에서의 온도차를 살펴보면, 모든 웨이퍼가 100초 이내에 웨이퍼의 끝단과 중앙사이의 심한 온도차가 발생함을 볼 수 있고, 100초에서 600초 동안 온도차가 급격히 감소하여 600초 이후에는 온도차의 변

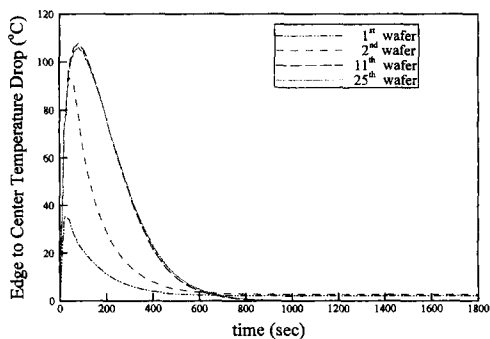


Fig. 7 Temporal variation of temperature drop across the wafers(edge minus center).

화가 없이 일정하게 유지되는 현상을 나타내었다. 여기서 주목할 점은 정상상태 해석에서 반경 방향의 온도 불균일성이 최소이었던 11번째 웨이퍼가 비정상상태 해석을 통한 공정초기에서의 온도차는 최대값을 나타냄을 알 수 있다.

Badgwell⁽³⁾이 정상상태에서 수행한 결과와 본 연구에서 비정상상태의 해석을 통해 얻은 결과의 비교 등을 통해, 본 연구에서 개발된 비정상 온도 분포 예측 프로그램의 결과는 타당함을 알 수 있다.

3.2 실제 LPCVD 반응기내 웨이퍼의 온도장 해석 앞에서 검증된 프로그램을 사용하여 현재 반도체 제조회사에서 쓰이고 있는 LPCVD 반응기 내의 웨이퍼들의 시간에 따른 온도장을 예측하고자 한다.

본 연구에서 고려된 LPCVD 반응기는 두 개의 quartz 튜브와 열원, 입구 및 가스 분사기로 구성되어 있고, 125매의 웨이퍼와 5매의 quartz를 탑재한 보트는 튜브의 중앙에 위치하도록 되어 있으며, 그 형상을 Fig. 8에 나타내었다.

웨이퍼를 탑재한 보트는 공정이 시작되기 전, 반응기 밑면의 입구를 통해 수직으로 이동되어 반응기 내에 위치하게 된다. 이 때 열원의 온도는 440°C로 유지되어 있으며, 공정이 시작되면 점차 가열되어 560°C에 이르게 되고, 공정 후반부에 다시 440°C로 냉각되어, 이 온도로 유지되는 과정을 거친다고 가정한다. 또한 입구부분의 온도는 외부와 밀폐시키기 위한 O-ring의 파열을 막기 위해 약 100°C 정도로 유지되어 있다. 이 때 보트의 아랫

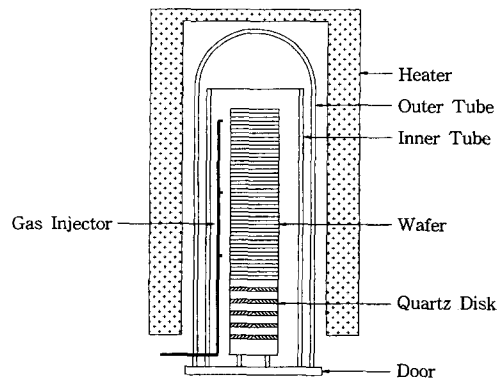


Fig. 8 Schematic diagram of LPCVD reactor considered in this work.

Table 2 Dimensions of the LPCVD reactor.

Parameters	8 inch wafer	12 inch wafer
Inner tube diameter (mm)	130	195
Profile temp. (°C)	440~560	440~540
Inner tube length (mm)	1157	1157
No. of wafers	125	60
Quartz disk thickness (mm)	2	2
Quartz disk spacing (mm)	6	6
Wafer thickness (mm)	0.725	0.775
Wafer spacing (mm)	5, 6, 7	10
No. of quartz disk	5	5
Door temp. (°C)	100	100

Table 3 Properties of the wafer.

Density (ρ)	2.230 g/cm ³
Heat Capacity (c_p)	932 J/kgK
Thermal Conductivity (k)	35.7 W/mK
Emissivity of the wafer (ϵ)	0.65
Emissivity of the door (ϵ)	0.37

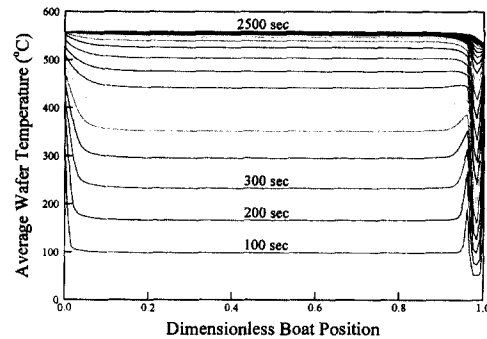
부분에 탑재된 웨이퍼가 입구부분의 온도로부터 받는 영향을 줄이기 위해 보트의 아랫 부분에는 quartz 원판이 설치되어 있다.

LPCVD 반응기내에 8인치 웨이퍼와 12인치 웨이퍼가 탑재된 각각의 두 경우에 대한 온도장 해석을 수행하기 위하여 사용된 길이차원을 Table 2에 나타내었다.

튜브의 온도는 4개의 열원의 온도와 같다고 설정하고 4개의 열원은 웨이퍼가 반응기 내부에 탑재된 후 440°C~560°C까지 8°C/min의 온도로 15분간 열원의 온도를 높인 후 560°C상태로 1~2시간을 유지한다.

본 연구에서 사용된 웨이퍼의 물성치와 입구의 방사율은 Table 3과 같다.

웨이퍼 간격이 7 mm인 경우 125매의 웨이퍼 각각에 대한 평균온도분포를 Fig. 9에 나타내었다. 이때 첫번째 웨이퍼 위치를 무차원 보트위치 0으로 하고, 130번째 quartz의 위치를 무차원 보트위치 1로 택했다. Fig. 9에서 초기에 높은 온도를 유지하

**Fig. 9** Average wafer temperature distribution for the case with the wafer spacing of 7 mm.

던 맨끝 웨이퍼는 입구쪽의 온도로 인해 558°C 이상 증가하지 못한다. 초기시간이 100~500초일때 보트 위치가 0.1이하, 0.9이상에 위치한 웨이퍼의 온도가 최대가 되며 시간이 지날 수록 중앙에 위치하고 있는 웨이퍼의 온도가 상승한다. 양쪽 끝에 위치하고 있는 웨이퍼는 비교적 많은 반사면에 노출되어 있기 때문에 많은 열유속이 도달하여 중앙에 위치하고 있는 웨이퍼들보다 초기상태에는 온도가 크게 상승한다. 그러나, 정상상태로 갈수록 O-ring의 파괴방지를 위해 낮은 온도(100°C)로 유지되고 있는 입구측에 뺏기는 열량이 커서 중앙에 위치한 웨이퍼의 온도가 가장 높게 된다.

정상상태에서의 온도 불균일성 결과를 살펴보면 불균일성이 0.1%미만으로 매우 낮으나, 이것은 정상상태에서의 결과이므로 과도상태에서의 결과를

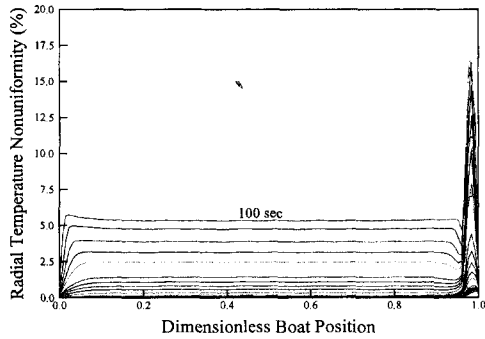


Fig. 10 Radial temperature nonuniformity for the case with the wafer spacing of 7 mm.

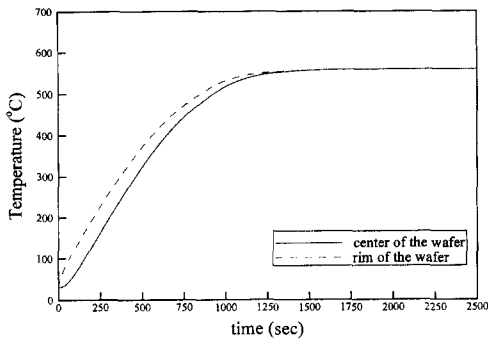


Fig. 11 Transient temperature distribution at the 63rd wafer.

고려해 볼 필요가 있다.

Fig. 10에서는 웨이퍼간의 간격이 7 mm인 경우 초기 100초에서부터 2500초까지 매 100초마다 웨이퍼의 온도불균일도를 보여 주고 있다. 기존의 연구 결과에 따르면 열응력이나 가스의 증착에 좋게 하기 위해서는 온도불균일도가 1%이내이어야 한다. 그러나 Fig. 10을 살펴보면 약 800초까지는 온도불균일도가 1%이내를 만족시키지 못하고 최고 5.5%까지 이르게 된다.

Fig. 11은 중앙에 위치한 63번째 웨이퍼에서 반경방향으로 맨끝인 가장자리의 측면온도와 중앙에서의 온도를 나타낸 것이다. 초기에는 중앙보다는 측면에 많은 열유속이 가해져 측면측의 온도가 높다. 이 결과는 공정초기에는 보트의 중앙에 위치한 웨이퍼들이 결코 온도의 불균일성에 있어서 안전하지 못하다는 것을 나타낸다. 이것은 정상상태에서의 온도의 불균일성만을 고려하는 것이 타당하지 못하다는 것을 보여주고 있다. 실제공정에서는 이 과도상태에서의 열응력을 줄이기 위해 증착과정전

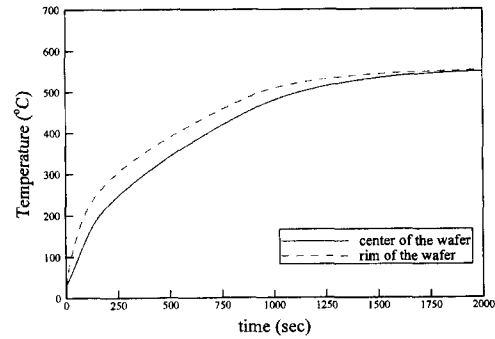


Fig. 12 Transient temperature distribution at the 125th wafer.

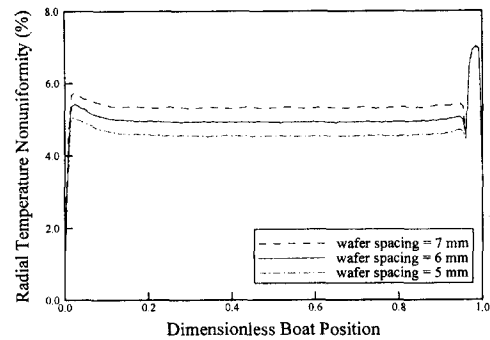


Fig. 13 Radial temperature nonuniformity for different values of wafer spacing at 100 sec.

에 1시간에서 2시간 동안 매우 느린 속도로 예열을 해주고 있다. 정상상태로 갈수록 주위에 있는 웨이퍼와 높은 온도로 유지되고 있는 튜브로 인해 불균일성이 거의 존재하지 않음을 볼 수 있다.

Fig. 12는 보트의 끝에 위치한 125번째 웨이퍼의 가장자리의 온도와 중앙에서의 온도를 나타낸 것으로서, 125번째 웨이퍼는 웨이퍼 전체가 노출되어 있어 중앙과 측면의 온도차이가 크지 않지만 정상상태에 도달했을 때에는 중앙에 위치한 웨이퍼보다 온도차이가 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 끝쪽에 있는 웨이퍼는 높은 온도의 열원이 위치한 영역과 낮은 온도의 입구에 노출되어 있기 때문이다. 또한 정상상태에 도달한 뒤 웨이퍼 측면의 온도가 더 큰 것을 알 수 있는데, 이는 웨이퍼 중앙이 측면에 비해 낮은 온도의 입구측에 노출된 면의 비율이 크기 때문이다.

Fig. 13은 웨이퍼 사이의 간격이 7 mm일때와 같은 조건에서 웨이퍼 사이의 간격이 6 mm, 5 mm 일때의 계산을 수행하여 공정 시작후 100초에서 온

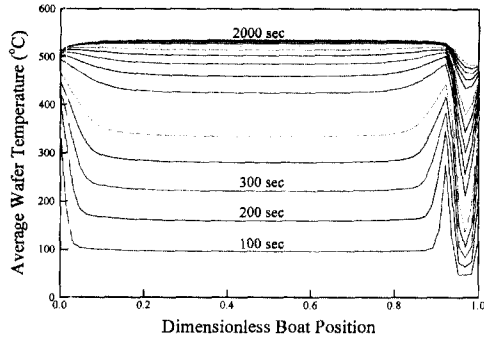


Fig. 14 Average wafer temperature distribution for the 12 inch wafers.

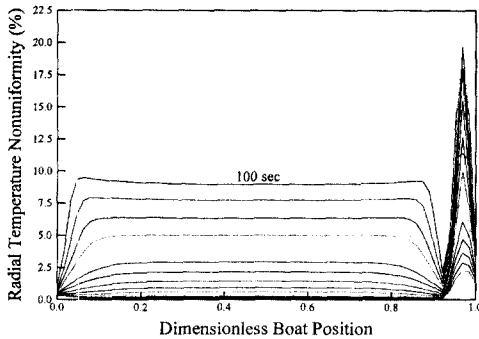


Fig. 15 Radial temperature nonuniformity for the 12 inch wafers.

도불균일을 비교한 결과이다. 웨이퍼 사이의 간격이 7 mm, 6 mm, 5 mm일때 결과들을 열적 해석 차원에서 비교해 볼 때 웨이퍼 사이의 간격이 5 mm일때 초기의 온도불균일이 다른 두 경우에 비해 더 적음을 알 수 있다. 이것은 웨이퍼 사이의 간격이 작으면 낮은 온도의 입구부분에 노출되는 면이 줄어들고 고온의 웨이퍼들 사이 간격이 줄어들게 되므로 간격이 넓은 경우보다 열적환경이 좋기 때문이다.

8인치 웨이퍼의 생산에 사용되고 있는 LPCVD 반응기에서의 온도장 해석을 통해 물리적으로 타당한 결과를 얻었으며, 최근 개발중인 12인치 웨이퍼를 생산할 수 있는 LPCVD 반응기에 대해 온도장 해석을 수행해 보면 다음과 같다. 지금까지 12인치 웨이퍼공정에 대해 구체적으로 알려진 자료가 전무한 상태이므로, 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 8인치 웨이퍼에 대해 LPCVD 공정에서 적용된 데이터들의 스케일 업(scale-up)을 통해 Table 2에 나타난 데이터들을 이용해 12인치 웨이

퍼가 탑재된 LPCVD 공정에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 14는 Table 2에 있는 제원에 대해 12인치 웨이퍼 60매와 5매의 quartz가 탑재된 LPCVD 공정에서의 각 웨이퍼에 대한 평균온도분포를 100초부터 2000초까지 매 100초 간격으로 나타낸 것이다. Fig. 9에 나타난 8인치 웨이퍼에 대한 결과와 비교해 볼 때, 초기 과도상태에서 보트 양끝 부분에 있는 웨이퍼들의 평균온도와 보트 중앙에 있는 웨이퍼들의 평균온도차가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 15는 100초부터 2000초까지 매 100초간격으로 온도 불균일을 나타낸 것으로써 Fig. 10에 나타난 8인치 웨이퍼에 대한 결과와 비교해 볼 때, 초기 과도상태에서 온도 불균일도가 최고 10%까지 이르러 최고로 약 5%의 온도 불균일도를 보이는 8인치 웨이퍼에 비해 많은 차이를 보여준다.

그러므로 8인치 웨이퍼에 대한 LPCVD 공정에서의 공정 변수들과 함께 단순한 스케일 업을 통해 12인치 웨이퍼에 대해 열해석을 수행할 경우 초기에 상당히 높은 온도 불균일을 나타냄을 알 수 있다.

4. 결 론

LPCVD 공정중 웨이퍼의 온도장 해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 적용한 비정상상태 온도장 해석을 통해 얻은 정상상태에서의 결과는 정상상태의 온도장 해석을 수행한 Badgwell⁽³⁾의 결과와 잘 일치함을 보였다.

(2) LPCVD 공정 초기에 열원과 웨이퍼간의 온도차가 상당히 크므로 비정상상태 온도장 해석이 필수적이고, 공정 초기에 웨이퍼의 온도 불균일성은 시간 경과후의 온도 불균일성에 비해 상당히 큼을 알 수 있다.

(3) 웨이퍼간의 간격이 작을 수록 웨이퍼들에 대한 공정 초기 상태에서의 온도 불균일성이 작다.

후 기

이 연구는 삼성전자(주)의 지원으로 수행된 연구의 일부분이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Van Schravendijk, B. J., De Koning, W. L., 1987, "Modeling and Control of the Wafer Temperatures in a Diffusion Furnace," *J. Appl. Phys.*, 61:1620~1627, February.
- (2) Hu, S. M., 1969, "Temperature Distribution and Stresses in Circular Wafers in a Row During Radiative Cooling," *J. Appl. Phys.*, 40:4413~4423, December.
- (3) Badgwell, T. A., Edgar, T. F., 1994, "Modeling the Wafer Temperature Profile in a Multiwafer LPCVD Furnace," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 141, No. 1., pp. 161~172.
- (4) Modest, M. F., 1993, *Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (5) Siegel, R., Howell, J. R., 1982, *Thermal Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (6) Howell, J. R., 1982, *Radiation Configuration Factor*, McGraw-Hill, New York.