<학술논문> DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.2.149

접촉전도와 반투명 복사가 반도체 웨이퍼의 CVD 공정 중 열전달에 미치는 영향

윤용석* · 홍혜정* · 송명호†

(2007년 10월 25일 접수, 2007년 12월 19일 심사완료)

Effect of Contact Conductance and Semitransparent Radiation on Heat Transfer During CVD Process of Semiconductor Wafer

Yong Seok Yoon, Hye Jung Hong and Myungho Song

Key Words: Heat Transfer(열전달), Hot Plate(가열판), Wafer Processing(웨이퍼공정), Discrete Ordinate Method(구분종좌법), Semitransparent Radiation(반투명복사)

Abstract

During CVD process of semiconductor wafer fabrication, maintaining the uniformity of temperature distribution at wafer top surface is one of the key factors affecting the quality of final products. Effect of contact conductance between wafer and hot plate on predicted temperature of wafer was investigated. The validity of opaque wafer assumption was also examined by comparing the predicted results with Discrete Ordinate solutions accounting for semitransparent radiative characteristics of silicon. As the contact conductance increases predicted wafer temperature increases and the differences between maximum and minimum temperatures within wafer and between wafer and hot plate top surface temperatures decrease. The opaque assumption always overpredicted the wafer temperature compared to semitransparent calculation. The influences of surrounding reactor inner wall temperature and hot plate configuration are then discussed.

기호설명

A : 단면적 $[m^2]$
Bi : 무차원수
c_p : 정압비열 $[J/(kgK)]$
D : 직경 $[m]$
H : 높이 $[m]$
I : 복사강도 $[W/(m^2sr)]$
k : 열전도도 $[W/(mK)]$
L : 가열판과 웨이퍼 경계면 높이 $[m]$
n : 굴절률
q_R : 복사 열유속 $[W/m^2]$
R : 가열판과 웨이퍼 반경 $[m]$
T : 온도 [K]
U_g : 유효열전달 계수 $[W/K]$
V : 체적 $[m^3]$

그리스문자

ϵ : 방사도
θ : 입사각, 투사각 또는 반사각
K : 복사 흡수계수 $[m^{-1}]$
μ : 점도 $[Pa\,S]$
ρ : 밀도 $[kg/m^3]$ 또는 반사도
Ω : 방향각 $[sr]$

하첨자

b : 흑체
c : 중심
g : 간격
i : 초기
sr : 주위

† 책임저자, 회원, 동국대학교 기계공학과
E-mail : songm@dongguk.edu
TEL : (02)22643827 FAX : (02)2263-9379
* 학생회원, 동국대학교 대학원 기계공학과

ν : 파장별 물리량
P : 가열판
W : 웨이퍼

1. 서 론

반도체는 지난 11년간 우리나라의 수출 1위 품목이었으며 현재도 지속적인 수출 증가세를 보이고 있다. 반도체 산업이 한국 경제를 대표하는 기간산업으로 성장을 유지하기 위해 관련 반도체 제조장비 산업의 발전과 중소기업의 부품 국산화율 증가가 뒷받침되어야 한다.

반도체 제조공정은 해당 직경의 실리콘 단결정 기둥으로부터 두께 1 mm 이하의 웨이퍼를 기계적으로 가공한 후, 웨이퍼 표면에 여러 종류의 막을 형성시키고 식각 및 증착 작업을 되풀이하여 집적회로를 구성하는 웨이퍼가공(wafer fab)을 통해 반도체 칩을 생산하는 공정이다.[1] 집적회로의 구성공정 도중 웨이퍼 표면의 온도를 원하는 값으로 균일하고 일정하게 유지하는 일은 매우 중요하며, 이를 위해 가열판(hot plate)을 사용하는 것이 보편화 되었다. 가열판의 구체적인 용도는 감광액의 접착력 강화, 도포된 감광액의 열처리 혹은 베이킹, 노광시간 단축, 건식에칭 내성확보 등이며[1] 가열판의 온도 제어는 반도체 불량 칩 발생률 감소에 필수적인 기술이다. 가열판이 사용되는 대표 공정인 화학기상증착(CVD: Chemical Vapor Deposition)은 진공 반응기 내에서 가스의 화학 반응으로 형성된 성분을 웨이퍼 표면에 증착하여 절연막이나 유전체 막으로 형성시키는 공정으로 이때 웨이퍼 표면의 온도를 초기온도로부터 500 ~ 1000℃ 범위 내의 공정 최적온도까지 변화시키는데 통상 15분 정도가 소요된다.

웨이퍼 표면 온도의 균일 분포를 보장하기 위한 기존의 CVD공정 중 열전달 연구는 분석의 편의를 위해 웨이퍼의 존재를 무시하거나[2] 웨이퍼를 불투명 매질로 가정하고 복사와 전도의 복합 열전달 해석을 수행하였다.[3] 그러나 순수 실리콘의 복사 열전달 특성을 고려하면 공정 최적온도 범위에 해당하는 최대 복사에너지 파장의 범위 약 2.4 ~ 3.9 μm에 대하여 웨이퍼의 광학두께는 약 0.02 ~ 0.6에 불과하다. 따라서 화학기상증착공정 도중 웨이퍼와 가열판의 온도 분포는 적합한 반투명 복사모델을 사용하여 예측되어야 한다.

한편, 핵물리 분야에서 방사선의 조사 강도 분포 해석을 위해 개발된 구분종좌법(Discrete Ordinate Method)은 이미 오래전부터 연소과정의 복사 열전달 해석에 적용되어 왔으며,[4] 비교적 최근에는 산란이 무시되는 유리 및 광섬유의 생산 공정 중 고온 유리를 통한 반투명 매질의 복사 강도장(radiative intensity field) 해석에 적용되어 다양한 복사 경계조건[5] 및 대류와 복합 경계조건[6,7] 하에서 사용하도록 개발되었다.

본 연구는 CVD 공정 중 웨이퍼 표면 온도 예측을 위한 가열판과 웨이퍼의 열전달 수치해석을 웨이퍼의 복사특성과 웨이퍼와 가열판 사이의 접촉전도를 고려하여 해석하였다. 금속 소재 가열판은 불투명으로 가정하였고 웨이퍼에 대하여는 접촉전도의 크기를 변화시키며 구한 불투명 매질 가정의 예측치를 반투명 가정 구분종좌해와 비교하였다.

2. 수치해석

물리적 상황의 개략도와 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다. 해석의 대상은 직경 200 mm 높이 30 mm의 원통형 가열판과 그 위에 얹힌 동일 직경 두께 0.6 mm의 실리콘 웨이퍼이다. 가열공정 초기에 진공 상태의 반응기 내로 도입되는 웨이퍼와 가열판의 온도는 공히 50℃이다. 도입과 동시에

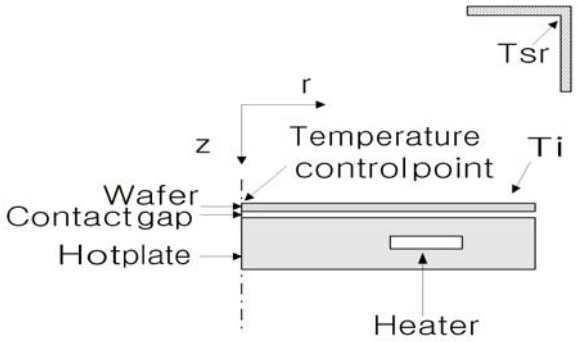

Fig. 1 Schematic of wafer, contact gap, hot plate and surrounding wall in vaccum chamber

Table 1 Dimensions of wafer and hot plate

Symbol: description	Dimension [m]
R : wafer radius	0.1
H_W : wafer thickness	0.0006
H_g : contact gap thickness	0.0001
H_P : hot plate height	0.03

웨이퍼 상부표면 및 측면과 가열판의 하부표면 및 측면이 150℃ 이상의 일정 온도로 유지되는 반응기 내벽에 노출되고 가열판 발열부의 발열이 개시되면서 비정상 전도 및 복사 열전달이 시작된다. 비록 웨이퍼 하부표면이 상당히 평탄하더라도 별도로 접촉 압력을 부여하는 수단이 없으므로 가열판 상부표면에 따라 마주보는 두 평면 사이의 접촉 열저항은 그 값이 크게 다를 수 있다.

실제 공정에 사용되는 가열판에는 1000 W~3000 W의 발열량을 갖는 다양한 형태의 발열체가 포함되고 가열판 상부표면 중심온도를 설정온도로 유지하도록 제어한다. 본 연구에서는 분석의 편의를 위해 가장 일반적 형태인 1개의 환형 발열체가 설치된 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 일정 발열 공정의 경우 발열량은 400 W로 고정하였고 온도가 제어되는 공정의 경우는 웨이퍼 상부 표면 중심의 온도가 750℃로 유지되도록 하였다.

2.1 에너지 방정식

가열과정 중 전도 및 복사의 복합 열전달을 모사하는 지배방정식을 수립하기 위해 다음의 가정을 하였다: (1) 열전달은 비정상, 축대칭 2차원이다, (2) 웨이퍼는 복사를 방사 및 흡수하되 산란하지 않는다, (3) 매질의 온도 변화에 비하여 복사에너지의 방사와 흡수가 충분히 빠르게 이루어지므로 Plank - Kirchhoff의 법칙이 유효하다, (4) 매질이 경험하는 온도 범위에서 웨이퍼의 굴절률 변화는 무시할 정도로 작으며 복사의 회절은 없다, (5) 반응기 내벽의 온도는 일정하게 유지되며 진공상태인 반응기 내부의 대류열전달은 무시할 수 있다. (6) 마지막으로 웨이퍼와 대면하는 가열판 상부표면은 흑체표면으로 가정하였다.

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rk\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)-\nabla\cdot q_R \quad (1)$$

여기서, 우변의 마지막 항은 복사 열유속(q_R)의 발산에 해당하는 체적 열생성항이며 불투명 매질의 경우 값은 0이고 반투명 매질의 경우는 다음 식으로 결정된다.

$$\nabla\cdot q_R=\int_{\nu}K_{\nu}\left(4\pi n^2 I_{b\nu}-\int_{4\pi}I_{\nu}d\Omega\right)d\nu \quad (2)$$

위 식에서 $I_{b\nu}$는 매질의 국부 온도에 따라 결정되는 파장별 입체각(solid angle)당 흑체 방사 강도이고 국부 복사강도 I_{ν}는 복사 전달방정식(Radiative Transfer Equation)의 해로 주어진다.

에너지 방정식[식 (1)]의 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

초기조건($t=0$) ; $T=T_i$ (3)

중심축($r=0$) ; $\frac{\partial T}{\partial r}=0$ (4)

웨이퍼 상부표면($z=0$)과 측면($r=R,\ 0<z<H_w$) ;

$$-k\nabla T\cdot\vec{n}=\epsilon_w\sigma(T^4-T_{sr}^4)\frac{\int_{op}E_{b\nu}d\nu}{\int E_{b\nu}d\nu} \quad (5)$$

웨이퍼 하부표면($z=H_w$) ;

$$-k\nabla T\cdot\vec{n}=U_g(T-T_p)+\epsilon_w\sigma(T^4-T_p^4)\frac{\int_{op}E_{b\nu}d\nu}{\int E_{b\nu}d\nu} \quad (6)$$

가열판 상부표면($z=H_w+H_g$)

$$-k\nabla T\cdot\vec{n}=U_g(T-T_w)+\int_{st}\int I_{\nu}\vec{n}\cdot d\vec{\Omega}d\nu+\epsilon_w\sigma(T^4-T_w^4)\frac{\int_{op}E_{b\nu}d\nu}{\int E_{b\nu}d\nu} \quad (7)$$

가열판 하부표면($z=H_{w+}H_g+H_p$)과 측면 ($r=R,\ H_w+H_g<z<H_w+H_g+H_p$) ;

$$-k\nabla T\cdot\vec{n}=\epsilon_p\sigma(T^4-T_{sr}^4) \quad (8)$$

웨이퍼를 둘러싼 반응기 내벽과 가열판 상면은 흑체표면이므로 웨이퍼 표면에서 불투명 파장범위의 복사 열유속은 식 (5)와 식 (6)의 마지막 항으로 표현된다. 반투명 파장범위에서 일어나는 복사는 식 (2)로 주어지는 체적냉각 효과로 고려되며 웨이퍼 표면의 온도구배와 경계조건을 통하여 직접 결부되지 않는다. 한편, 가열판은 불투명 매질로 하부표면과 측면에서의 복사 열유속은 식 (8)과 같다. 가열판 상면에서 불투명 파장범위의 복사 열유속은 식 (6)의 마지막 항과 같고, 반투명 파장 범위에 해당하는 열유속은 복사강도의 표면 법선 방향 성분을 적분하여 식 (7) 우변의 두 번째 항과 같이 결정할 수 있다.

식 (6) 및 (7)의 우변 첫째 항은 서로 마주보는 가열판과 웨이퍼 표면 사이의 접촉전도에 의한 열 유속을 나타낸다. 여기서, 유효 열전달계수 U_g의 크기를 결정하기 위해 다음과 같이 가정하였다: 웨이퍼 하부표면은 일부 면적(A_c)에 대하여만 가열판과 접촉하고 있으며 나머지 부분은 일정한 간격(ΔZ)을 두고 떨어져 있다. 따라서, 유효 열전달계수는

$$U_g = \frac{A_{contact}}{A}\frac{k_w}{\Delta Z} \tag{9}$$

이다. 이 때, 무차원 Bi수를 다음과 같이 정의한다.

$$Bi = \frac{U_g \Delta Z}{k_w} \tag{10}$$

수치계산에 사용된 ΔZ의 값 0.1 mm와 접촉면적비 1, 0.1, 0.01, 0.001 등에 대하여 U_g의 크기는 각각 k_w의 1000, 100, 10, 1 배이고 Bi수는 접촉면적비와 같다.

2.2 복사 전달방정식

산란이 없는 반투명 매질 내의 복사강도 분포를 지배하는 복사 전달방정식을 특정 방향 $\vec{\Omega}$ 및 임의의 파장 ν에 대하여 적으면 다음과 같다:

$$(\vec{\Omega} \cdot \nabla) I_\nu(r,z,\vec{\Omega}) = K_\nu [I_{b\nu}(T,n) - I_\nu(r,z,\vec{\Omega})] \tag{11}$$

반투명 매질의 경계에서 복사 전달방정식에 대한 경계조건은 Snell의 법칙과 Fresnel의 법칙으로 규정된다. 본 연구와 같이 흑체로 둘러싸인 경우의 경계조건은 Song과 Viskanta[8,9]에 자세히 기술되어 있다. 본 계산에서는 동일한 경계조건을 사용하였고 다만 가열판과 웨이퍼의 간격이 충분히 작아서 웨이퍼 하부 표면에 조사되는 복사 강도는 마주보는 가열판의 국부 온도로 결정된다고 가정하였다.

2.3 차분화 및 반복 계산

먼저 유한체적법(control volume approach)[10]을 사용하여 에너지방정식을 차분화하였다. 즉, 계산영역을 유한 크기의 미소체적들로 분할하고 지배방정식을 Fig. 2에 보인 체적 $2\pi rdrdz$의 고리모양 검사체적에 대하여 적분하여 일련의 산술방정식을 얻었다. 다수의 연립 산술방정식의 해를 구하기 위해 소위 PPCG(Polynomial Preconditioning for Conjugate Gradient) 방법을 이용하였다.

에너지방정식[식 (2)]에서 열 생성항이 복사강도로부터 결정되고, 복사 전달방정식의 방사항이 매질의 온도로부터 결정되어 두 지배방정식이 서로 연계되므로 온도와 복사강도의 분포를 반복 계산하는 수렴과정이 필요하다. 또, 비정상 에너지방정식은 포물선형 미분방정식이므로 임의의 시간에 축대칭 r-Z 단면에서 온도와 복사강도의 수렴 해를 구한 뒤 이로부터 일정 시간 후의 해를 결정하는 시간적 점진방법(time marching)을 사용하였다.

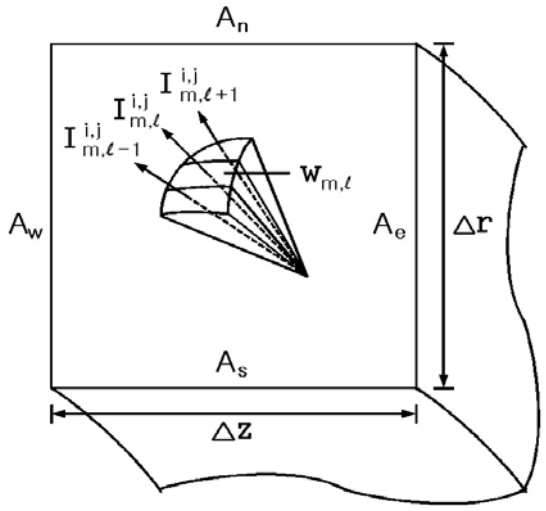

Fig. 2 Control volume for finite volume and discrete ordinate discretization[7]

Table 2 Optical properties of wafer

Band	$\lambda[\mu m]$	n	$\kappa[cm^{-1}]$
1	0~0.125	2.205	1200.0
2	0.125~0.325	1.873	410.0
3	0.325~0.575	1.830	7.9
4	0.575~0.875	1.819	6.2
5	0.875~1.125	1.816	3.8
6	1.125~1.375	1.815	1.3
7	1.375~1.625	1.814	2.2
8	1.625~1.875	1.813	7.0
9	1.875~2.125	1.813	23.0
10	2.125~2.375	1.813	41.0
11	2.375~2.635	1.812	420.0
12	2.635~2.875	1.812	920.0
13	2.875~3.250	1.812	830.0
14	3.250~3.750	1.812	990.0
15	3.750~4.5	1.812	1550.0

본 논문에 보고하는 계산결과는 r 방향으로 52개, z 방향으로 35개로 등분하여 총 1820개의 계산점을 사용하여 결과 값을 얻었으며, 계산점의분포는 균일하지 않고 표면에 가까울수록 더 촘촘하였다. 시간 간격의 크기는 다음의 식을 사용하여 초기에 5 s 로부터 시작하여 점점 증가하였다.

$$\Delta t = \sqrt{(t+25.)} \tag{12}$$

복사 전달방정식은 연소 및 광섬유 분야에서 널리 사용되고 문헌[4]에 상세히 소개된 구분종좌법(Discrete Ordinate Method)으로 차분화하였다. 구분종좌법을 축대칭 문제에 적용하는 과정에서 Carlson과 Lathrop[11]에 의하여 개발된 S_4 종좌계와 구분종좌의 여현 및 가중 값을[6,11] 사용하였다. 구분종좌 가정 하에서 복사 전달방정식[식 (11)]을 해당 입체각에 대하여 적분하면 유한개의 이산방향에 대한 편미분방정식이 얻어지고, 다시 유한체적법을 적용하여 미소 검사체적에 대하여 적분하여 도출된 일련의 산술 연립방정식을 풀어 해를 구하는 것이다. 복사 강도의 공간 차분법[11]은 저자가 제안한 지수형 방법을 사용하였다.[6]

복사강도의 계산은 각 계산점에서 산출치의 소수점 다섯 유효자리 값이 변하지 않을 때까지 반복하였다. 수렴에 필요한 반복 계산의 회수는 웨이퍼의 광학 두께에 좌우되며 본 연구에서는 주어진 온도장에 대하여 60 내지 300 회 정도이다.

계산에 사용된 물성치는 실제로 웨이퍼 처리공정을 수행하는 기업이 사용하는 값들을[3] 우선적으로 선택하였다. 웨이퍼의 반투명 광학 성질과 가열판 및 웨이퍼의 열물성치를 각각 Table 2와 3에 나타내었다. 파장이 $4.5\mu m$ 이하인 복사에 대하여 15개의 파장범위를 설정하고 대역별 흡수계수를 고려하였고, 이 보다 긴 파장에 대하여는 웨이퍼가 불투명하다고 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가열판과 웨이퍼의 온도분포

초기온도와 내벽의 온도가 각가 323.1 K와 423.1 K이고 가열판의 발열량이 400 W인 대표적인 경우, 불투명 및 반투명 웨이퍼 매질 가정 하에서 예측한 웨이퍼와 가열판의 정상상태 온도분포를 각각 Fig. 3의 (a)와 (b)에 나타내었다. Bi수는 0.001으로 웨이퍼와 가열판의 접촉면적이 0.1%에 불과한 경우를 선택하여 접촉 열전도의 영향을 최소화하였다. 이 때, 정상상태에 이르기 위해 1500초가 걸리는 것으로 계산되었다.

Fig. 3은 웨이퍼의 온도분포를 명확히 표현하기 위해 반경에 대한 웨이퍼의 두께의 크기를 25배 과장하여 나타내었다. 두 경우의 등온선 형상은 매우 유사하나, 발열부 중심의 최고온도와 웨이퍼 측면의 최저온도는 불투명 가정 하에서 반투명 가정에 비하여 각각 40 K와 36 K 정도 높게 예측되었다.

불투명 웨이퍼는 반투명의 경우에 비해 복사차폐 효과로 인한 등가 열저항이 커서 발열부에서 발생한 열이 비효율적으로 방출되어 가열판 및

Table 3 Properties of component materials

Properties \ (Material)	Wafer[3] (silicon)	Hot plate (Al-alloy)
Thermal conductivity (k) [W/m · K]	35.7	250
Density(ρ) [kg/m^3]	2230	2500
Heat Capacity(c)[J/kg · K]	932	1000
Emissivity(ϵ)	0.65	0.35

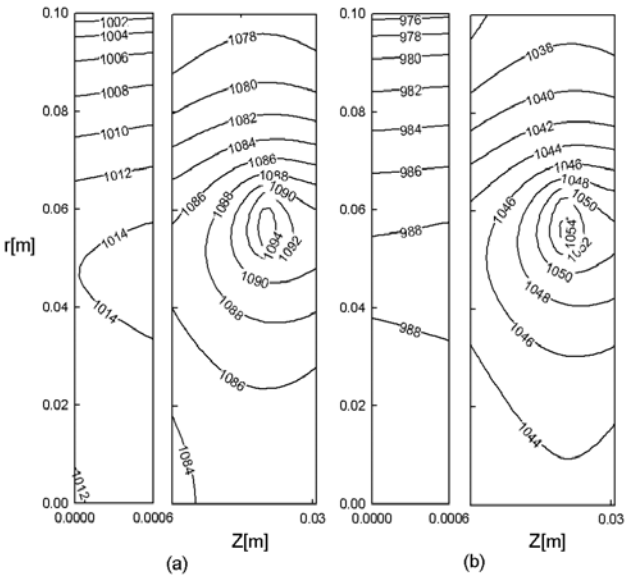

Fig. 3 Isotherms of wafer and hot plate for Bi=0.001 and $Q = 400\,W$ under (a) opaque and (b) semitransparent assumptions

웨이퍼의 온도가 전체적으로 높다. 이는 반투명 웨이퍼의 경우 가열판 상면으로부터 조사된 복사 중 약 0.5 ~ 2.0 μm 파장 범위의 에너지는 대부분 웨이퍼를 투과하여 방출되기 때문이다. 불투명 가정으로 인하여 예측된 온도의 반투명 계산의 값에 비하여 확연히 크므로, 엄격한 온도 제어가 요구되는 화학기상증착 공정의 온도분포를 예측하기 위해 불투명 가정을 사용하는 타당성은 적어도 발열량이 일정하고 접촉전도가 작은 경우에는 보장되지 않는다.

3.2 접촉전도의 영향

실제 CVD 공정에서는 가열판 상면 중심의 온도를 원하는 값으로 유지하기 위해 발열량의 PID 제어를 실행한다. 정작 원하는 값으로 제어되어야 하는 온도는 웨이퍼 상면의 온도이지만 기술의 제한으로 온도 측정이 용이한 가열판 상면 중심의 온도를 제어한다. 접촉전도와 불투명 가정이 웨이퍼 상면과 가열판 상면의 온도 차이에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 초기 온도와 반응기 내벽의 온도를 고정하고 계산을 수행하여 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 Bi수가 0.001인 경우는 이미 온도분포에 대하여 논의한 Fig. 3과 동일한 조건이다. Bi수가 증가할수록 접촉전도가 증가하여 가열판 상부와 웨이퍼의 온도 차이가 감소하는 동시에 웨이퍼를 통한 방열이 효과적으로 일어나서 가열판 상면의 온도는 감소한다. 따라서 웨이퍼 상면의 온도는 증가한다. 이때 웨이퍼의 두께방향 온도 변화는 심각하지 않다. Bi수가 0.001인 경우 웨이퍼와 가열판 상면의 중심부 온도차는 57 K정도이며 불투명 가정에서는 72 K로 예측되었다. 이 온도 차이는 Bi가 증가할수록 감소하여 Bi가 0.1 이상인 경우 1.2 K 미만이고 불투명 가정하에서도 1.9 K 미만으로 예측되었다. 즉, 가열판 상면의 온도를 측정하여 웨이퍼의 온도를 제어하는 경우 접촉면적비가 10 % 이하이면 1.2 K 이상의 오차를 유발한다는 의미이다. 결국 접촉면적비를 정확히 결정할 수 없다면 가열판의 표면온도를 측정하는 온도제어 보다는 웨이퍼의 표면온도를 측정하는 온도제어를 권장한다.

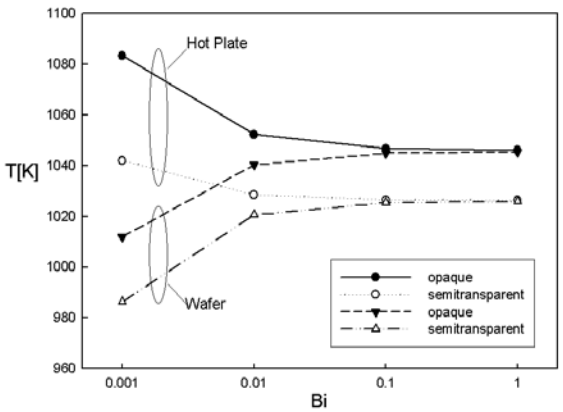

Fig. 4 Effect of Bi on temperature difference between wafer and hot plate top centers

Fig. 3의 온도분포에 대한 논의와 같이 불투명 가정 하에서 계산된 웨이퍼 온도는 반투명 계산에 비하여 언제나 높게 예측되었으며, 불투명 가정으로 인하여 유발되는 예측 온도의 오차는 Bi의 변화에 민감하지 않았다. 이는 접촉전도의 변화에 따른 웨이퍼의 온도 변화가 복사에너지의 파장별 분포에 영향을 줄 정도로 심각하지 않았기 때문이다.

한편 웨이퍼의 열전도도는 온도에 따라 심각하게 변하는 것으로 알려져 있으나,[12] CVD 공정에 해당하는 고온에서는 반투명 복사의 영향으로 웨이퍼의 열전도도 측정이 어렵다. 웨이퍼의 열전도도 크기를 상온에서 측정된 Table 3의 값에 비하여 0.2배로 감소시키고 Fig. 4에 나타낸 경우에 대하여 계산을 반복하였다. 웨이퍼 열전도도의 영향은 Bi가 작을수록 심각하여 Bi=0.001인 경우 불투명 및 반투명 가정 하에서 웨이퍼 중심의 온도는 각각 약 1.2 K 및 1.0 K 감소하고 가열판 상면의 온도는 각각 약 1.0 K 및 0.2 K 증가하였다. 웨이퍼 표면의 온도를 정확히 예측하기 위해 정확한 열전도도를 사용하는 것이 필요함을 알았다.

3.3 웨이퍼의 반경방향 온도분포

Bi수와 발열량의 변화가 웨이퍼 상면의 온도분포에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Bi수의 증가에 따라 웨이퍼의 온도가 증가하고 불투명 가정이 웨이퍼의 온도를 높게 예측하는 경향은 이미 Fig. 4에서 논의한 바와 같다. 발열량이 증가하면 웨이퍼의 온도가 증가하며 Bi수와 불투명 가정이 온도에 미치는 영향도 증가한다.

웨이퍼 중심의 온도를 원하는 값으로 제어하는 경우 CVD 공정의 성패를 좌우하는 지표는 오직 웨이퍼 상면의 최고 온도와 최저온도의 차이이다.

접촉전도와 불투명 가정이 웨이퍼 상면의 온도 편차에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다.

Bi수가 0.001에서 1로 증가하면 웨이퍼 상면에서 최고 온도와 최저온도의 차이는 약 13 K에서 10 K로 감소하여 온도 분포의 균일성은 다소 개선되었다. 불투명 가정은 대체로 1 K정도의 크기로 웨이퍼 상면 온도의 불균일도를 크게 예측하고 있다. 결국 웨이퍼 표면 온도의 균일도를 향상시키기 위해서 접촉전도의 향상이 도움은 되지만 접촉면적비가 100%인 경우도 CVD 공정에서 요구되는 웨이퍼 상면의 온도 균일도를 $\pm 1\ K$ 이하로 유지할 수는 없었다.

3.4 웨이퍼 온도 변화의 시간 특성

반응기 내벽의 온도가 웨이퍼 온도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Bi수를 0.01로 고정하고 웨이퍼 상면 중심 온도의 시간에 따른 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 반응기 내벽의 온도는 CVD 공정의 온도범위를 고려하여 423.1 K, 723.1 K 및 1023.1 K의 세 가지를 선택하였다. 이때 웨이퍼 상면 중심의 온도가 1000 K가 유지되도록 발열량을 비례제어하였으며 발열부의 최대 발열량은 400 W로 제한하였다.

내벽의 온도가 1023.1 K인 경우 웨이퍼 온도는 최대치를 통과한 후 진동 없이 제어온도로 수렴하였고, 723.1 K인 경우 1000 K를 중심으로 수회 진동하였으며 423.1 K인 경우 단조증가하며 수렴하였다. 내벽의 온도가 높을수록 초기 웨이퍼 온도의 상승률이 증가하여 시간에 따른 변화는 다른 경향을 보이지만 설정온도인 1000 K로 수렴하는 데 걸리는 시간은 비슷하였다.

3.5 발열부 위치의 영향

발열량이 비교적 작은 400 W인 경우 단일 발열부를 갖는 가열판으로는 접촉전도를 최대로 유지하고 발열부의 위치를 옮겨도 요구되는 웨이퍼 표면의 온도 균일도를 얻을 수 없었다. 웨이퍼의 온도는 측면에서 가장 낮고 발열부가 설치된 반경 근처에서 가장 높은 경향을 보이므로 복수(2개)의 발열부에 발열량을 분산하고 위치를 다양하게 변화하며 계산을 반복하여 표면 온도의 균일도를 향상시켜 보았다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 $0 \le r \le 0.95R$의 범위에서 온도 균일도를 $\pm 1\ K$ 이하로 유지할 수 있었으며 이때 웨이퍼 상면 중심의 온도는 거의 같았다. 가열판 설계에서 발열부의 위치 선택이 접촉전도의 영향보다 지배적임을 알았다.

4. 결 론

화학기상증착 공정온도에서 웨이퍼 표면의 온

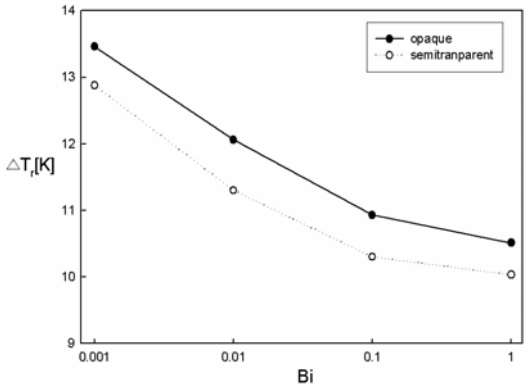

Fig. 6 Effect of Bi and opaque assumption on temperature variation at wafer top surface

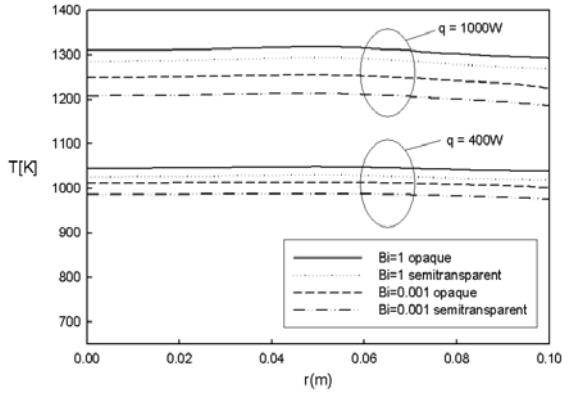

Fig. 5 Effect of Bi and heating rate on temperature profile at wafer top surface

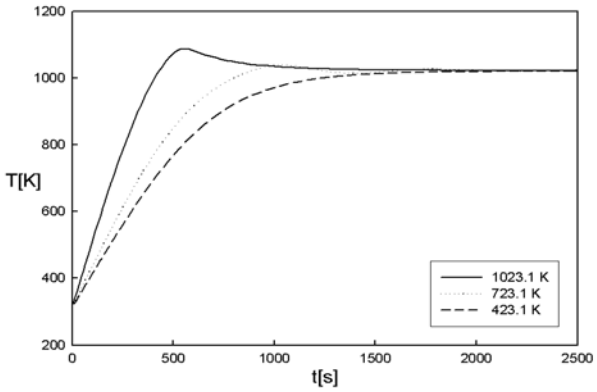

Fig. 7 Transient change of wafer top surface temperature for different wall temperatures

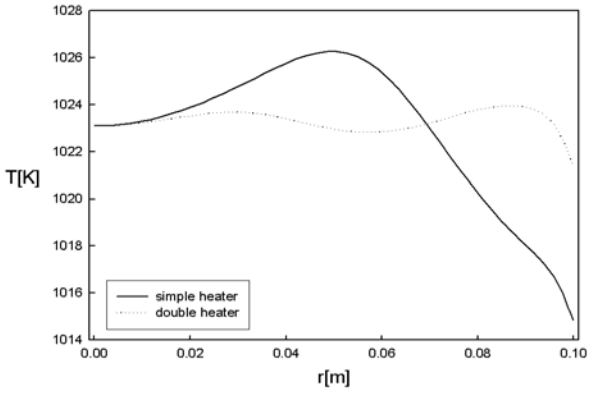

Fig. 8 Temperature profile at wafer top surface for single and double heater configuration

도는 가열판과 접촉전도의 크기, 웨이퍼의 복사 특성 물리적 성질 및 가열판의 발열부 설계에 따라 결정된다. 불투명과 반투명 매질 가정 하에서 복사 및 전도의 복합열전달을 해석하여 웨이퍼와 가열판의 온도 분포를 예측하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 불투명 가정 하에서 예측한 온도는 반투명 계산의 결과에 비하여 확연히 높으므로, 엄격한 온도 제어가 요구되는 화학기상증착 공정의 온도 분포를 예측하기 위해 불투명 가정을 사용하는 타당성은 적어도 발열량이 일정하고 접촉전도가 작은 경우에는 보장되지 않는다.

(2) 가열판과 웨이퍼의 접촉면적비가 10 % 이하이면 가열판 상면과 웨이퍼의 온도 차이는 1.2 K 이상이다. 접촉면적비를 정확히 결정할 수 없다면 가열판의 상면온도를 측정하여 특정한 불확실도 이내로 웨이퍼 표면의 온도를 제어할 수 없다.

(3) 접촉전도가 증가할수록 웨이퍼 표면의 온도는 증가하고, 최고온도와 최저온도의 차이는 감소하여 웨이퍼 표면온도의 균일도를 향상 시킨다.

(4) 가열판 설계에서 발열부의 수와 위치 선택이 접촉전도의 영향보다 지배적이다.

(5) 웨이퍼 상면 중심의 온도를 유지하기 위해 발열량을 비례제어하는 경우 내벽의 온도가 높을수록 초기 웨이퍼 온도의 상승률이 증가하여 시간에 따른 변화는 다른 경향을 보이지만 설정온도로 수렴하는 데 걸리는 시간은 비슷하였다.

후 기

본 연구는 동국대학교 논문게재장려금 지원으로 이루어졌고 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Lee, J. M., 2003, "Handbook Semiconductor Technology," Hanrimwon, Seoul.

(2) Park, Y. H., 2003, "New Design for Uniform Temperature of Precision Hot Plates," *Journal of the KSME(B)*, Vol. 27, No. 11, pp. 1525~1533.

(3) Kim, I. K., Jung, M. C,. Kim, W. S., Yu, S. I., Nam, K. H. and Chae, S. K., 1998, "Thermal Anlysis of the Wafers in LPCVD Process," *Journal of the KSME(B)*, Vol. 22, No. 5, pp. 651~660.

(4) Modest, M. F., 1993, "Radiative Heat Transfer," McGraw-Hill, Hightstown, New Jersey.

(5) Merkwitz, M., 2001, "A Quasi Diffusive Reflective Method for the Calculation of Radiative Heat Transfer in Semitransparent Media between Parallel Planes with Angle Dependent Reflection Behavior," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 2-3, pp. 283~291.

(6) David, L., Nacer, B., Pascal, B. and Gérard, J., 2006, "Transient Radiative and Conductive Heat Transfer in Non-gray Semitransparent Two -dimensional Media with Mixed Boundary Conditions," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, No. 4, pp. 322~337.

(7) Badgwell, T. A. and Edagar, T. F., 1994, "Modelling the Wafer Temperature Profile in a Multiwafer LPCVD Furnace," *J. Eletrochem. Soc.*, Vol. 14, No. 1, pp. 161~172.

(8) Song, M. H. and Viskanta, R., 1996, "Discrete Ordinates Solution of Axisymmetric Radiative Transfer within a Condensed Semitransparent Medium Having Specularly Reflecting Boundaries," *ASME Proceedings of 31st National Heat Transfer Conference at Huston*, HTD-Vol. 325, pp. 55~62, ASME, New York.

(9) Lee, K. H. and Viskanta, R., 2001, "Two -dimensional Combined Conduction and Radiation Heat Transfer : Comparison of the Discrete Ordinates Method and the Diffusion Approximation Methods," *Numerical Heat Transfer(A)*, Vol. 39, No. 3, pp. 205~225.

(10) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere, Washington, D.C.

(11) Carlson, B. G. and Lathrop, K. D., 1968, "Transport Theory The Method of Discrete Ordinates," in Computing Methods in Reaction Physics, Gordon and Breach, Science Publishers, New York.

(12) McConnell, A. D., Uma, S., Goodson, K.E., 2001, "Thermal Conductivity of Doped Polysilicon Layers," *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 360~369.