

안 강 호

생산기술연구원 생산기반기술센터

급속 열처리 시스템내에서의 비정상상태 온도분포, 가스유동형태, 웨이퍼내 열응력등을 여러 가지 작동조건하에서 2 차원 유한 차분법으로 계산하였다. 계산결과는 실험에서 얻은 에피성장률 데이터와 비교 검증하였다. RTP내 가스 유동이나 온도분포는 압력및 주위 구성요소에 크게 의존하는 반면, 웨이퍼의 온도분포는 wafer edge loss 가 큰 고온에서 온도 불균일도가 가장 크다. 저온에서는 대류에 의한 열 손실이 웨이퍼내의 온도 불균일도에 큰 영향을 미치고있다. 웨이퍼상의 열응력을 가장 크게 받는 시점은 transient condition 에서 나타났다.

I. 서 론

지난 몇 년동안 반도체 웨이퍼를 급속 열처리(RTP, Rapid Thermal Processing)하는 제조기술이 널리 확산되고 있다. 짧고 잘 제어된 시간동안에 substrate 온도를 높게 유지하는 기술은 dopant activation, defect annealing, silicide formation, oxidation, glass reflow, 그리고 가장 최근에 epitaxial growth 등에 사용하고 있다. 이 기술의 장점은 짧은 시간에 원하는 공정을 마침으로써 dopant의 재 분포를 최소화할 수 있는 것이다. 고집적 device 제작시 이 공정의 사용 전망은 밝으며 장치 실제 제작 공정에 채택되리라 본다. 본 공정의 가장 큰 제약은 웨이퍼의 가열과 냉각시 웨이퍼 내 온도 구배가 커 wafer warpage나 slip dislocation 같은 손상을 입게 된다. 이와 같은 문제는 큰 wafer의 가장자리를 따라 현저히 나타나며, 이런 현상을 줄이기 위해 큰 lamp의 사용, 양면 가열, 특별히 제작된 반사기 사용등의 방법을 채택하고 있다.

본 논문에서는 급속 열처리 과정시 발생하는 가스 유동과 온도구배 및 이에 의한 웨이퍼 내 열 응력에 대한 일련의 unsteady 상태 2차원 simulation을 하였으며, 이 모델의 타당성을 검증하기 위해 실험에서 얻은 자료와 비교하였다.

II. 실험

본 실험에 사용된 장치는 Fig. 1에 도시하였다. 3" wafer는 3개의 quartz pin 위에 뒤집어져 놓여 있으며, 열원으로 텅스텐 필라멘트 램프 대신 순간 복사력을 조절하기 쉬운 3"x3"의 krypton 램프를 사용하였다. 온도는 2.0 ~ 2.5μm IR pyrometer를 사용하여 wafer 앞면에서 측정하도록 설치하였다. 열전대를 이용하여 wafer 온도가 1000°C 일 때의 emissivity값을 사용하였다. 또한 epi 성장을 사용하여 간접적으로 wafer 온도를 측정하였다. gas의 유량은 calibrated된 MFC를 통하여 조절되었으며 중앙에 위치한 3/4" 유로를 통해 공급되었다. 이 gas는 chamber를 통한 후 밀판에 위치한 배기 구로 나가며, chamber 내 압력은 capacitance manometer로 측정하였다. chamber 내 압력을 일정하게 유지하기 위하여 variable conductance valve 를 사용하였다. 옆면과 밑면은 냉각수에 의해 일정한 벽면 온도를 유지하도록 하였다.

III. 수치 해석

2차원 유동장과 열전달을 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 수치적으로 풀었다. 이 문제는 질량 보존, 운동량 보존, 그리고 에너지 보존을 가정하여 unsteady 상태를 풀었다. 질량보존 방정식은 :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

운동량 보존 방정식은 :

$$\vec{v} \cdot \nabla \rho \vec{v} = \nabla \cdot \nabla \mu \vec{v} - \rho g$$

에너지 보존 방정식은 :

$$\vec{v} \cdot \nabla \rho C_p T = \nabla \cdot k \nabla T + S$$

로 표시되며,  $\rho$ 는 밀도,  $\vec{v}$ : 유체의 속도벡터,  $\mu$ 는 점성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $C_p$ 는 비열,  $T$ 는 절대 온도,  $k$ 는 열전도계수를 나타낸다. 생성항  $S$ 는 두 물체간 열복사에 의한 열교환을 나타내며 다음과 같이 표시된다.

$$S = q_{2-1} - q_{1-2} = \sigma (\epsilon_1 T_1^4 - \epsilon_2 T_2^4) A_1 F_{A_1-A_2}$$

여기서  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수이며,  $\epsilon$ 은 방사율,  $A$ 는 표면면적,  $F$ 는 면 1과 면 2 사이의 형상계수(view factor)이다.

유동형태는 Reynolds 수가 계산영역 모든 곳에서 매우 작음으로 층류로 가정하였고, 물체 표면에서의 가스 속도는 0으로 하였다. 외부벽은 실온으로 가정하고 벽면을 통한 열전도를 고려하였다. 복사램프의 온도는 실험에 의한 웨이퍼 중심부의 온도에 이르도록 설정하였다. Simulation 과정중 이 값만이 유일하게 조절된 변수이다. Chamber 내 multiple reflection은 무시하였고, wafer의 absorptivity와 emissivity 값은 온도와 파장에 무관하게 일정한 값을 취하였다. Gas, silicon wafer 및 chamber 벽의 specific heat와 thermal conductivity값은 온도의 함수로 simulation시 포함시켰다. 또한 기체의 viscosity 값도 온도의 함수로 표시하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

Simulation 모델 계산 결과의 정확도를 검증하기 위하여 7.6 torr, 수소분위기에서 dichlorosilane epi 성장 결과와 비교하였다. 여기서 dichlorosilane 및 어떤 화학반응도 gas의 온도 변화에 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. Fig. 2는 wafer 상의 실험 측정값과 계산에 의한 온도 분포를 비교한 것으로 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 3은 0.01 기압하 200 sccm 수소가스 유입시의 유선도로 재순환 영역을 볼 수 없으나, 1 기압하 200 sccm 수소가스 유입시는 매우 강한 재순환 영역을 wafer 끝단과 chamber 벽 사이에 형성해 불순물이나 particle이 유입되었을 경우 wafer에 오염 가능성이 높았다. 이와 같은 재순환 영역은 기체의 부력에 의해 형성되며, 이는 wafer 주위에서 가열된 가벼운 기체가 상승한 후 chamber 벽에서 냉각되어 하강하며 재 순환하게 된다.

Fig. 4는 wafer 가열 및 냉각시 wafer center의 온도 변화를 측정된 값과 계산값을 비교 도시한 것으로 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 wafer 가열시 wafer 상의 온도 분포를 나타낸 것으로, 가열 1~2 초 후 wafer 중심부분과 가장자리 부분의 온도차가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 이 때 온도차는 약 150°C에 이르며, Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있듯이 Radial Stress 및 Tangential stress를 가장 많이 받아 wafer에 damage를 가장 잘 줄 수 있는 상태가 된다.

#### IV. 결론

Rapid Thermal Process시 비정상상태(unsteady state)의 수치 해석적 모델 및 실험 데이터를 비교 분석하였다. 기체 유동과 온도 분포는 공정 조건에 따라 많이 변하며, 고온 상태에서는 웨이퍼내 온도 분포가 웨이퍼 가장자리에서 발생하는 복사 열손실에 의해 많이 좌우되며, 저온에서는 대류에 의한 열손실이 온도 분포의 불균일성에 많은 영향을 미친다.

본 연구를 통하여 수치 해석적 모델을 RTP, CVD 및 LPCVD Process Simulation에 사용함으로써 신공정 개발시 최적운전 조건을 만족하는 parameter의 설정이 매우 쉽게 될 수 있는 tool을 개발하였다.

#### 참고 문헌

S. A. Campbell, K. H. Ahn, K. L. Knutson, B. Liu, and J. D. Leighton, (1991), "Steady State Thermal Uniformity and Gas Flow Patterns in a Rapid Thermal Processing Chamber," IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, V. 4, No. 1, p14 ~ 20.

S. A. Campbell, K. L. Knutson, K. H. Ahn, J. D. Leighton, and B. Liu, (1990) "Gas Flow Patterns and Thermal Uniformity in Rapid Thermal Processing Equipment," International Electron Devices Meeting, IEEE cat. n. 90CH2865-4, p921 ~ p 924.

S. V. Patankar, (1980), "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw-Hill.

H. Y. Wong, (1977), Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers.

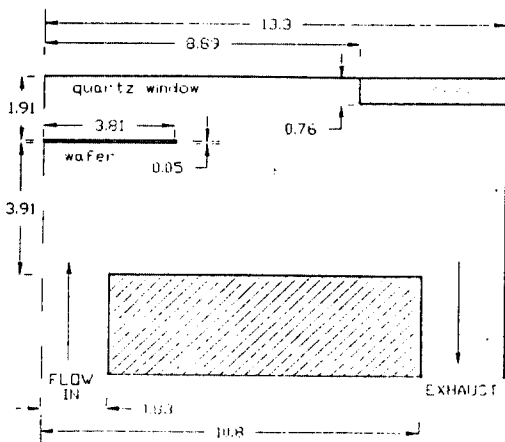


Fig. 1 Side View of Chamber to be Modeled

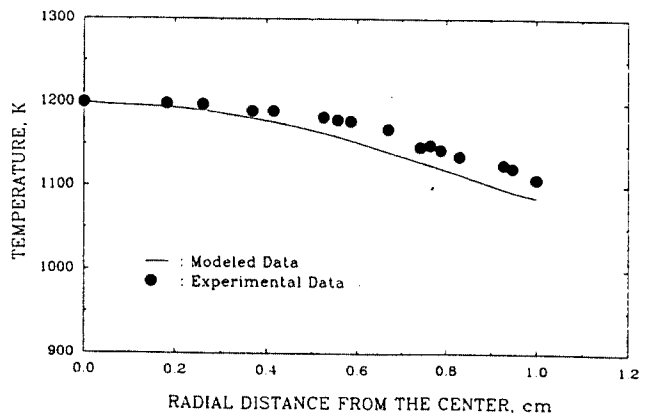


Fig. 2 Experimental and modeled steady state temperature across the wafer

H<sub>2</sub> : 0.01 atm. : S.S. - Stream Lines

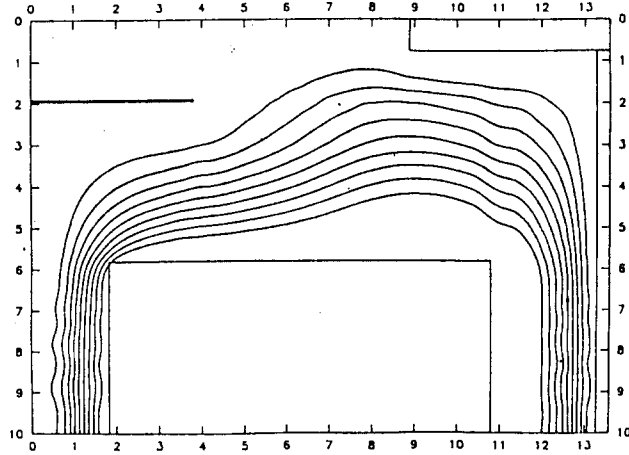


Fig. 3 H<sub>2</sub> gas flow stream lines

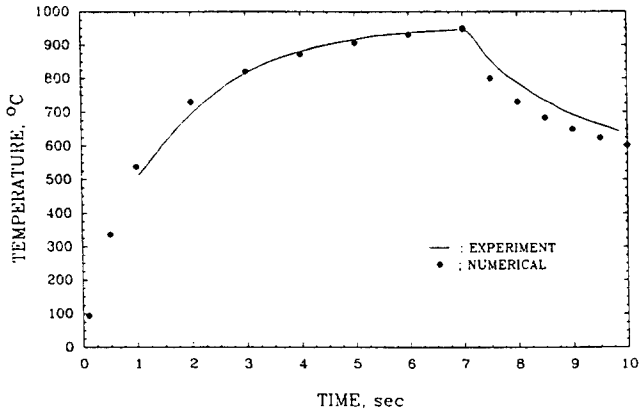


Fig. 4 Experimental and modeled temperature at the center of the wafer during heating and cooling

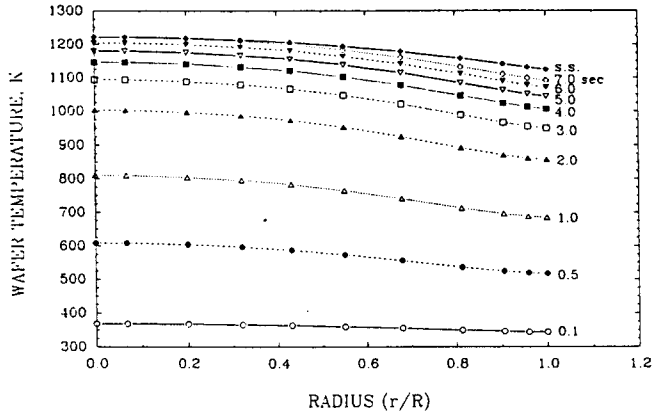


Fig. 5 Radial temperature distribution during heating

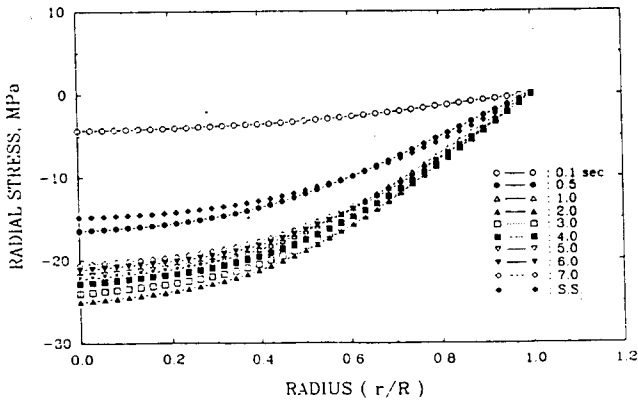


Fig. 6 Radial stress distribution during heating

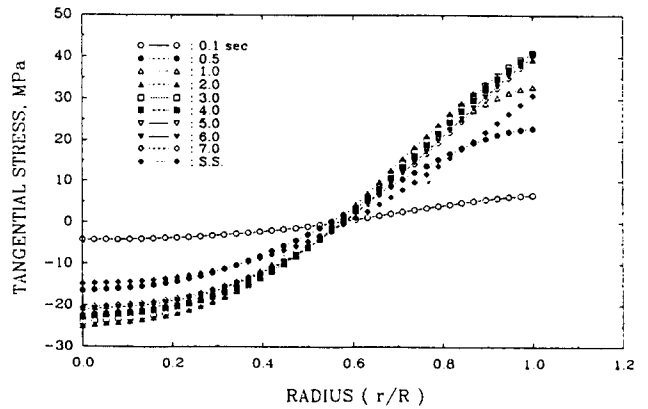


Fig. 7 Tangential stress distribution during heating