

반도체 웨이퍼용 핫 플레이트 오븐에서 온도 균일도 향상을 위한 연구

이세영* · 조형희** · 이영원***

A Study to Improve Temperature Uniformity in Hot Plate Oven for Silicon Wafer Manufacturing

Sei Young Lee, Hyung Hee Cho and Young Won Lee

Key Words: Silicon Wafer(실리콘 웨이퍼), Hot Plate Oven(핫플레이트), Temperature Uniformity
(온도 균일도), Natural Convection(자연대류)

Abstract

Temperature variation during silicon wafer baking is mainly due to natural convection caused by temperature difference between silicon wafer and upper plate. Several cases are tested and calculated numerically to improve temperature uniformity. The temperature difference and velocity magnitude in the flow cell is reduced for a small gap between the wafer and upper plate because the natural convection force is suppressed in the small space. The uniform temperature distribution can be obtained with controlling the incoming flow distribution from the upper plate. An alternative method is the adiabatic wall condition on the upper plate to maintain the temperature uniformity within 0.3°C on the wafer plate.

기호설명

- D : 상판 홀의 지름
- L : 웨이퍼와 상판사이의 거리
- T_{N_2} : 질소의 온도
- T_{up} : 상판온도
- T_w : 웨이퍼의 온도
- Q_{N_2} : 질소의 유량

1. 서론

반도체 웨이퍼는 이온주입공정, 막 증착 공정, 확산공정, 사진공정, 식각공정 등과 같은 다수의 공정들을 거쳐 제조된다. 이러한 공정들 가운데 사진공정은 다시 크게 도포공정, 노광공정, 현상공정, HMDS(hexamethyl disilane) 처리공정 그리고 베이킹 공정 등으로 구성된다. 베이킹 공정에서는 챔버내의 핫플레이트(hot plate) 상에 포토레지스트가 도포된 웨이퍼를 장착하여 일정 온도로 포토레지스트를 베이킹하는 챔버식 베이킹 장치를 사용하게 된다. 이와 같은 베이킹 장치에 있어서 안에 위치되는 웨이퍼의 온도균일성은 가공하고자 하는 웨이퍼의 여러 가지 특성에 많은 영향을 미치게 된다. 즉, 웨이퍼를 챔버 내에 위치

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

*** 좋은기술(주)

시키고 난 후 웨이퍼를 얼마나 빠른 시간 내에, 요구되는 온도로 얼마나 균일하게 유지하는가는 반도체 소자의 수율에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 그러나 이와 같은 공정에 있어서 온도의 불균일성은 웨이퍼의 기계적 특성에 나쁜 영향을 줄 수 있고, 반도체 가공의 정밀도가 높아짐에 따라 챔버내 온도의 균일도의 중요성이 더욱 높아지게 되었다. 지금까지는 균일한 온도분포를 얻기 위해서 히터를 적절하게 설치하는 방법이 고안되고 사용되어져 왔다. 그러나 실제 웨이퍼 가공 온도는 고온이기 때문에 챔버 상부의 온도차가 매우 크게 나타난다. 이와 같은 큰 온도차는 웨이퍼와 이를 감싸고 있는 베이크 장치의 외벽사이에 자연대류에 의한 유동장을 형성하게 되고 이러한 유동장에 의해서 적절한 히터설치에도 불구하고 웨이퍼 표면의 온도는 불균일하게 된다.

본 연구에서는 이와 같은 자연대류에 의한 베이킹 장치 챔버 내부 유동장의 변화와 이로 인해서 발생하는 내부 온도분포 및 웨이퍼 표면온도를 상용 수치해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 수치해석을 수행하고, 각 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 이를 통하여 효과적인 온도조절 방법을 제시하고자 한다.

2 장치구성 및 해석방법

Fig. 1은 베이크 장치의 개념도를 나타낸다. 그림에서 W는 웨이퍼 A는 웨이퍼와 상판사이 유체가 존재하는 공간이 된다. 이 사이에 존재하는 유체는 가열판으로부터 가열된 웨이퍼의 온도와 상판 덮개 사이의 온도차이에 의한 자연대류에 의해서 유동을 발생하게 되고 이러한 유동은 내부적으로 여러 개의 유동 셀(cell)형성하여

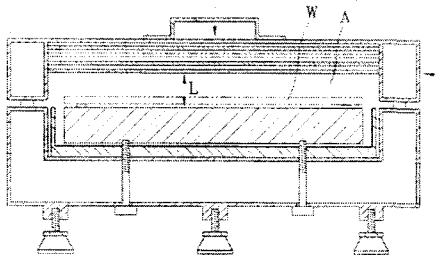
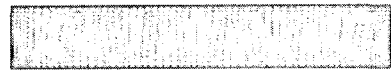
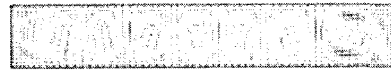


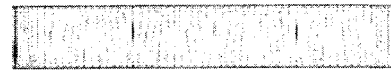
Fig. 1 Schematic diagram of bake apparatus.



(a) $T_{up} = 298$ K



(b) $T_{up} = 323$ K



(c) $T_{up} = 373$ K

Fig. 2 Velocity vectors in hot plate oven.

국소적으로 충돌효과를 발생시켜며 이는 웨이퍼 표면온도를 불균일하게 한다. 이는 가열판의 온도를 제어하여 균일하게 만들어도 웨이퍼 표면에서의 온도가 불균일하여질 수 있음을 보여준다.

웨이퍼와 상판사이의 두께, 상판의 온도, 그리고 상판으로부터 유입되는 유량과 온도 등이 내부 유동에 많은 영향을 미치게 되므로 이러한 요소들을 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였고, 그 결과를 확인하기 위하여 실험을 수행하였다.

앞서 설명한 장치를 기초로 한 모델에 대하여 내부의 유동현상 및 온도분포를 알아보기 위하여 수치해석을 수행하였다. 계산을 위하여 원판의 중심을 축으로 가정하고 Axis-symmetric조건을 사용하여 2차원으로 해석하여 히터에서 균일하게 가열된다고 가정하고, 웨이퍼 표면온도(T_w)는 423 K(150°C)으로 고정하고 상판 덮개 부분의 온도와, 덮개로부터 나오는 유체의 온도 및 속도를 변화시켜가면서 이때 발생하는 내부 유동 및 온도분포를 고찰하였다.

실험은 여러 조건에 대하여 웨이퍼에 설치된 14-16개의 열전대로부터 시간변화에 따른 온도를 측정하여 온도상승 및 온도 균일도를 측정하였다.

3. 결 과

3.1 온도차에 의한 효과

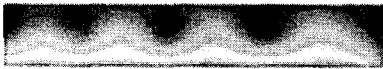
Fig. 2는 상판과 웨이퍼의 온도차이에 의해 발



(a) $T_{up} = 298$ K



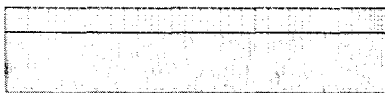
(b) $T_{up} = 323$ K



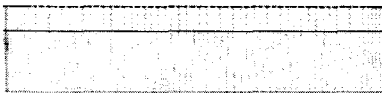
(c) $T_{up} = 373$ K

Fig. 3 Temperature contour in hot plate oven.

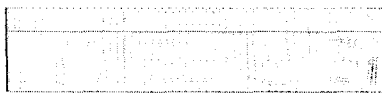
생되는 유동 형태를 나낸다. 웨이퍼로부터 상판까지의 거리는 16 mm이고 해석의 편이를 위해서 웨이퍼의 온도와 상판의 온도는 등온조건으로 가정하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 온도차가 커질수록 자연대류에 의해 발생하는 유동장내 셀의 개수는 늘어남을 볼 수 있다. 이와 같은 유동 셀(cell)이 형성되게 되면 유체가 상승하는 곳에서는 바닥면의 온도가 상승하게 되고 하강하는 곳에서는 충돌의 효과에 의해서 바닥면의 온도가 낮아진다. 이러한 효과는 Fig. 3에 잘 나타난다. 여기서 명암차이는 각 그림에서의 온도 균일도를 상대적으로 나타내고 있다.



(a) $T_{up} = 298$ K



(a) $T_{up} = 323$ K



(c) $T_{up} = 373$ K

Fig. 4 Velocity vectors in hot plate oven for $L = 16$ mm and $Q_{N_2} = 6$ cc.



(a) $T_{up} = 298$ K



(b) $T_{up} = 323$ K



(c) $T_{up} = 373$ K

Fig. 5 Temperature contour in hot plate oven for $L = 16$ mm and $Q_{N_2} = 6$ cc.

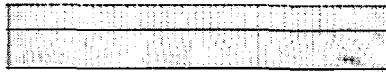
3.2 상판으로부터 유체(N_2)를 유입시킬 경우

균일한 유속을 갖는 유입 유체(N_2)

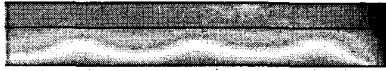
Fig. 4와 Fig. 5는 상판에서 질소(N_2)를 균일하게 분사시켜주는 경우의 해석결과이다. 이때 질소가스의 유량은 6 cc로 고정하였으며 질소가스의 온도가 내부 유동장에 미치는 영향을 알아보기 위하여 질소가스의 온도를 각각 298 K, 323 K, 373 K으로 변화시켜 가면서 속도 및 온도 분포를 구하였다. 유입 유량이 매우 미소하지만 Fig. 2와 Fig. 3의 경우와 비교하여 보면 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 유입유동이 있는 경우 자연대류에 의한 셀의 개수가 줄어들어 온도의 극대값 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

간격 변화에 의한 효과

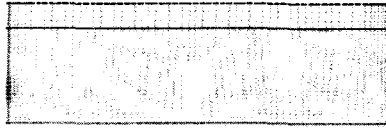
Fig. 6은 웨이퍼와 상판사이의 간격이 내부 온도분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상판의 온도를 373 K로 고정시키고, 이 사이의 간격을 10 mm와 25 mm로 변화시키면서 하여 계산한 결과이다. 이 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 비교하여 볼 때 같은 온도에서 간격이 클 수록 유동 셀의 개수가 줄어들지만 유동 셀의 강도(유속)가



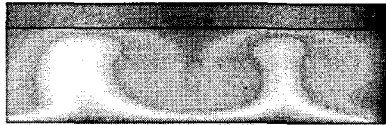
(a) $L = 10 \text{ mm}$



(b) $L = 10 \text{ mm}$



(c) $L = 25 \text{ mm}$



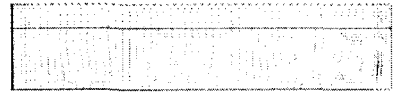
(d) $L = 25 \text{ mm}$

Fig. 6 Velocity vectors and temperature distribution in hot plate oven at $T_{up} = 373 \text{ K}$.

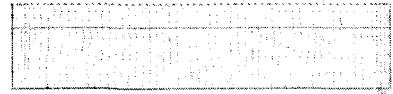
증가하여 더욱 불균일한 온도분포를 나타내었다. 이 결과로부터 웨이퍼와 상판사이의 간격이 낮을수록 균일한 온도분포를 얻을 수 있지만, 이는 웨이퍼 이송을 위한 작업공간에 의하여 제한된다.

유입유량 조절 효과

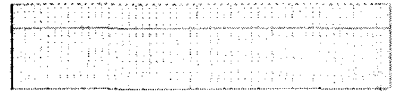
Fig. 7과 Fig. 8은 유입되는 질소가스의 온도를 373 K으로 고정시키고, 유량을 6 cc, 200 cc, 400 cc로 변화시켜가면서 유량의 변화가 온도분포에 어떤 영향을 미치는 가를 살펴본 그림이다. 전 영역에서 6개였던 셀수가 유입 유량증가에 따라 셀의 개수가 3개로 줄어들음을 볼 수 있다. 유입 유량 증가에 따라 전체적으로 자연대류에 의한 유동장은 매우 약해지고 있다. 이는 유입속도 증가에 따라 강제대류가 자연대류보다 중요해지기 때문이다. 강제대류와 자연대류는 Gr 와 Re 의 비교에 의해서 판정할 수 있다. $Gr/Re^2 \ll 1$ 인 경우 강제대류영역이라 할 수 있고



(a) $Q_{N_2} = 6 \text{ cc}$



(b) $Q_{N_2} = 200 \text{ cc}$



(c) $Q_{N_2} = 400 \text{ cc}$

Fig. 7 Velocity vectors in hot plate oven at $T_{up} = 373 \text{ K}$.

반대로 $Gr/Re^2 \gg 1$ 인 경우 자연대류영역이다. 강제대류와 자연대류를 비교하기 위하여 본 연구에서 수행되어진 경우에 대한 Gr 와 Re 에 대한 비교가 Table 1에 잘 나타나있다. Table 1에서 보이는 바와 같이 유량이 6 cc인 경우 자연대류에 가깝고 유량이 200 cc, 400 cc인 경우 강제대류에 가까움을 볼 수 있다. 또한 위 그림에서 (b)와 (c)를 비교해 보면 어느 정도 이상의 유량을 흘려주게 되면 그 이상의 유량이 들어와도 내



(a) $Q_{N_2} = 6 \text{ cc}$



(b) $Q_{N_2} = 200 \text{ cc}$



(c) $Q_{N_2} = 400 \text{ cc}$

Fig. 8 Temperature contour in hot plate oven at $T_{up} = 373 \text{ K}$.

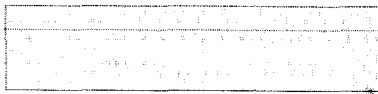
Table 1 Comparison of Gr and Re

Flow rate	Gr	Re	Gr/Re ²
6 cc	10739	7.77	177.88
200 cc	10739	258.79	0.16
400 cc	10739	518	0.04

부의 유동장을 변화시키는데는 그리 큰 영향을 주지 못한다는 것을 볼 수 있다.

개선된 유량 조절

Fig. 7과 Fig. 8에서도 볼 수 있었던 바와 같이 유입되는 질소가스의 유량이 증가되면 셀의 수가 많이 줄어들기는 했지만 여전히 표면에서는 중앙 부분과 바깥영역의 한 부분에서는 여전히 온도가 높은 영역이 나타나고 있어 이러한 영역을 없애 주어야 균일한 온도 분포를 얻을 수 있다. 이를 위하여 상판의 반경을 세 부분으로 하여 각각의 부분에 나오는 유량을 변화시켜 가면서 주입한다고 가정하면 Fig. 9과 같은 결과를 얻을 수 있다.



(a) velocity vector



(b) Temperature profile

Fig. 9 Modified effusion case.

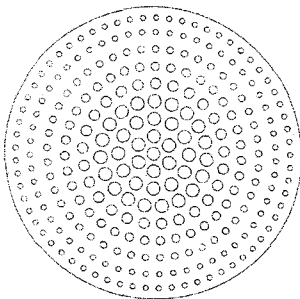
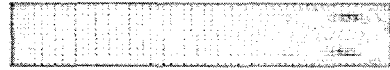
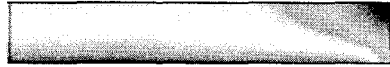


Fig. 10 Modified hole arrangement.



(a) velocity vector



(b) Temperature profile

Fig. 11 Adiabatic upper wall condition.

이는 유량을 일정하게 유지시키면서 온도의 극대값이 나타나는 지점 부근에서의 속도값을 상대적으로 높게 하여 그 부근에서 질소가스의 냉각에 효과를 높였다. 상판에서의 불균일한 속도는 챔버내부의 자연대류에 의한 유동장과 상쇄되어 전체적인 유동장이 안정되게 하는 역할을 한다. 이 결과로부터 앞선 경우에서보다 균일한 온도분포를 얻을 수 있었다.

이와 같이 유속을 제어함으로써 전체적인 온도 분포의 균일성을 더 좋게 할 수 있는데 실제 적용에 있어서는 Fig. 10에서 제시하는 바와 같이 유속을 조절하기 위한 상판을 사용하게 된다. 균일한 홀직경을 갖는 상판 덮개를 사용할 경우 발생할 수 있는 온도의 불균일성이 해소하고 중앙부근에 좀더 많은 유량을 공급해 주기 위하여 개선된 형태의 상판을 사용할 수 있다.

3.3 상판이 단열면이라고 가정한 경우

Fig. 11은 상판의 경계조건을 단열이라고 가정하여 살펴본 속도장 및 온도장의 그림이다. 그림에서 보이는 바와 같이 내부에서는 거의 유동이 발생하지 않고 양쪽 끝에 있는 오븐 외각 출구쪽에서 온도차이에 의한 유동 셀이 작게 발생하는 것을 볼 수 있으며 전체적으로 매우 고른 온도 분포를 나타낸다. 이 경우 최대 온도차이는 전체 유동장에서 1℃ 이내로 나타나고, 웨이퍼 표면의 온도차이는 0.3℃ 이내로 이는 우리가 요구하는 온도균일도를 만족하고 있다.

4. 실험 결과

Fig. 12 ~ 14는 핫플레이트 위에 16개의 열전대를 설치한 웨이퍼를 놓고 핫 플레이트내 오

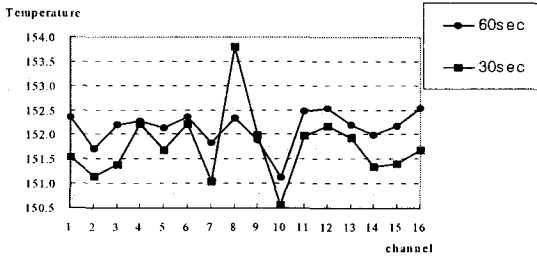


Fig. 12 Temperature distribution without blowing.

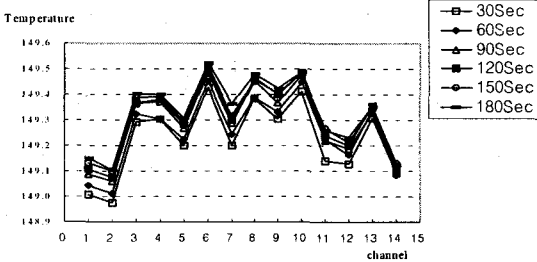


Fig. 13 Temperature distribution with blowing.

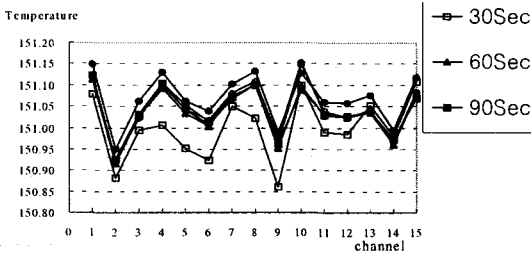


Fig. 14 Temperature distribution with adiabatic upper wall condition.

본내의 조건에 따라 온도 분포를 얻기 위해 실험한 결과이다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 상판으로부터 유입유체가 없는 경우에는 웨이퍼를 가열한 후 60초에서 약 1.5°C 정도까지 온도차이가 나는 것을 알 수 있다. 그러나, Fig. 13에서 보는 바와 같이 상판으로부터 질소 가스를 일정량 유입해준 경우에는 Fig. 12에서 보다는 훨씬 온도분포가 균일해서 약 0.5°C 이내에서 차이가 나는 것을 알 수 있다. 또한 수치해석 결과를 고려해보면 단열일 경우가 가장 균일한 온도 분포를 나타낼 수 있을 것이라고 추측할 수 있는데, Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이 실제로 외부를 단열시키고 온도 분포를 조사해보면 온도 차이가 약 0.3°C 이내로 균일한 온도 분포가 나타남을 볼 수 있다.

5. 결 론

실리콘 웨이퍼는 가공시 온도변화에 매우 민감하다. 특히 베이킹 작업 시에는 표면온도의 변화가 0.3°C 내의 매우 정밀한 온도범위 내에서 온도가 조절되어야 한다. 그러나 고온의 히터와 외부와의 온도 차이로 인해서 웨이퍼와 상판사이에는 자연대류에 의한 유동장이 발생하여 국소적으로 상승과 하강하는 유동에 의해서 온도가 불균일해 질 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 상판에서 질소가스를 주입시켜주는 방법을 사용하게 된다. 그러나 질소가스를 전체에 고르게 분사시켜줄 경우 중심부분의 유량이 상대적으로 적어서 냉각이나 유동장에 미치는 영향은 여전히 불균일 하다. 이를 개선하기 위하여 분사유량을 제어하는 경우와, 또한 상판에 단열제를 설치하는 경우 더욱 균일한 온도 분포를 얻을 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Jeffery P. Hebb and Klavs F. Jensen, 1998, "The Effect of Patterns on Thermal Stress During Rapid Thermal Processing of Silicon Wafers", Semiconductor manufacturing, Vol. 11, No. 1, pp. 99-107.
- (2) Richard H. Perkins, Terrence J. Riley, Ronald S. Gyurcsik, 1995, "Thermal Uniformity and Stress Minimization During Rapid Thermal Processes", Semiconductor manufacturing, Vol. 8, No. 3, pp. 272-297.
- (3) Kazuki Denpoh, 1998, "Modeling of Rarefied Gas Heat Conduction Between Wafer and Susceptor", Semiconductor manufacturing, Vol. 11, No. 1, pp. 25-29.
- (4) Yong-Hui Fan and Taiqing Qiu, 1998, "Transient heat transfer in batch thermal reactor for silicon wafer processing", J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, No. 11, pp. 1549-1557.
- (5) Zhongze Wang, Siu L. Kwan, and T. P. Pearsall, 1997, "Real-time, non-invasive temperature control of wafer processing based on diffusive reflectance spectroscopy", J. Vac. Sci. Technol., B 14(1), pp. 116-121.