반도체 표면처리공정용 대면적 히터 플레이트의 열전달 특성에 관한 연구

이윤용^{a*}, 강환국^b, 문석환^c

^a대림대학 기계과, ^b동은에이티에스, ^c한국전자통신연구원

A Study on the Heat Transfer Characteristics of the Large Dimension Heater Plate for a Semiconductor Process

Yun-Yong Lee^{a*}, Hwan-Kook Kang^b, Seok-Hwan Moon^c

^aMechanical Engineering, Daelim College University, Anyang 431-715, Korea

^bDongun A.T.S., Bucheon 421-808, Korea

^cETRI, Daejeon Metropolitan City, Daejeon 305-700, Korea

(Received November 15, 2010 ; revised December 6, 2010 ; accepted December 30, 2010)

Abstract

The numerical study for the effect of various factors that affect the temperature distribution of the process glass installed above the large rectangular heater plate was carried out. For the calculation, heat flux, distance between heat source and process glass plate, effect of vacuum condition and convection in a chamber were considered as important factors. The results showed that the temperature gradient on the glass was increased at the natural convection because of the buoyancy force increases due to the heated air. Also, the more heat flux and distance between the heater plate and glass increases, the more increasing the temperature gradient was. In the case of isothermal heating wall, the temperature variation was smaller than the uniform heat flux condition.

Keywords: Heater plate, Process glass, Heat flux, Isothermal heating wall

1. 서 론

반도체 공정(process)을 통해 각종 소재(material)를 웨이퍼(wafer) 상에 증착(deposition)하기 위해 많이 이용되고 있는 CVD(Chemical Vapor Deposition), PVD(Physical Vapor Deposition) 공정 및 스퍼터(sputter) 공정 장비에서는 솔라셀(solar cell)을 포함해 각종 전자소자 제작용 웨이퍼의 온도를 일정한 상태로 유지시킬 필요성이 자주 발생한다. 이는 증발되는 소재와 웨이퍼 또는 이미 증착된 소재와의 완전 결합을 위한 최적의 증착조건을 달성하는 데 필요하기 때문이다. 예를 들어 CuInGaSe₂ 및 CdTe

등 다원소 화합물 흡수체를 이용한 솔라셀(solar cell)의 경우, 셀의 변환효율을 향상시키기 위해 흡수층이 증착되는 웨이퍼(기판)의 공정온도 조절이 필요하게 된다¹⁾. 특히 솔라셀 제조 공정에서는 웨이퍼의 공정온도를 일정 상태로 유지시켜야 할 뿐만 아니라, 웨이퍼 상의 온도구배를 최소화시킴으로써 화합물 반도체 상변이를 웨이퍼(기판)의 전면에서 균일하게 만들어 줌으로써 솔라셀의 변환효율의 증대를 얻고자 하고 있다. 태양전지 흡수층 제조 공정에서 생산수율의 증대를 위해서는 대면적화가 필수적이며 이를 위해 웨이퍼나 유리의 중심과 가장자리 간의 온도편차를 최소화하는 것은 해결하여야 할 매우 중요한 과제가 된다. 그동안 박막 제조 공정에서 열 및 유동을 고려한 연구들이 수행되어 필

*Corresponding author. E-mail : yyrhee@nate.com

를 증착율이나 성장해석의 수학적 모델^{2,3)}, 반응기의 온도와 대류 열전달 계수 및 열복사의 영향에 관한 연구^{4,6)}, 반도체용 히터 플레이트의 열전달 해석, 챔버 내부 자연대류의 온도균일도에 미치는 영향 및 서셉터(susceptor) 설계와 관련한 연구⁷⁻⁹⁾ 등 많은 관련 연구가 수행되었다. 한편 실리콘 웨이퍼의 대구경화, 반도체의 고집적화가 진행되고 있으며 반도체 시장의 저가 경쟁이 치열해짐에 따라 솔라셀의 경우 생산수율의 증대를 위하여 유리에 박막공정을 적용한 공정이 대면적화에 보다 유리한 것으로 파악되고 있다. 이 경우 열원인 히터 플레이트와 피가열물인 웨이퍼나 유리 및 그 주변 챔버와의 열전달 과정에서 대면적화에 따라 온도 구배의 증가를 동반하고 있으며 관련 인자의 영향을 파악함으로써 온도 구배를 예측하고 최소화하기 위한 방안을 제시하는 것은 매우 중요한 것으로 판단된다. 이러한 온도 구배에 미치는 인자들로는 각 구성물질의 열물성, 내부 진공도, 가열면의 열적 상태, 열전달 요소간 온도 등이며 상호간 매우 복잡하게 관련되어 있다.

본 연구에서는 대형 사각 히터 플레이트 상부에 설치되는 사각 유리를 피가열물로 하는 구조를 대상으로 피가열물의 온도 분포에 미치는 여러 관련 인자의 영향을 수치해석적으로 파악하고자 하였다. 이를 위하여 히터 플레이트의 열적 조건으로써 균일 열유속 조건에서의 열유속 변화 및 등온 조건과 히터 및 피가열물을 포함하는 챔버의 내부 조건으로써 진공 및 대기압 조건, 그리고 가열원과 피가열원과의 설치 거리의 변화 등을 관련 변수로 정상상태 열전달 과정에서의 열전달 및 피가열물의 온도분포의 특성을 파악하였다. 이러한 결과를 기초로 여러 관련 변수에 의한 열전달 및 온도분포 특성과 피가열물의 등온성 확보를 위한 방안에 대하여 고찰하였다.

2. 해석대상과 해석방법

2.1 해석대상

해석 대상인 반응기는 직사각 히터 플레이트 상부에 설치되는 사각유리(640 mm × 1300 mm)를 피가열물로 하는 수평형 반응기로서 그림 1과 같다. 반응기 내부는 발열체인 실리콘 히터를 중심으로 상부에 공정용 유리가 설치되며 하부는 열손실을 방지하고자 단열처리 되어 있다. 실리콘 히터 표면과 유리는 일정한 거리를 유지하고 있으며 본 연구에서는 5, 25 mm 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 히터 플레이트 주변으로는 스테인리스

Fig. 1. Bird view of horizontal CVD reactor.

(SUS304) 재질의 높이 220 mm인 직육면체 챔버가 외부를 감싸고 있으며 표면 온도는 100°C로 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 챔버 내부는 대기압상태 및 10^{-4} Pa의 진공압 상태로 가정하고 챔버 내부의 대류 유동에 따른 유리표면의 온도분포의 영향을 파악하고자 하였다. 히터 플레이트의 열적 조건으로써 3, 5, 8 kW로 균일하게 발열하는 경우 및 500°C의 등온인 경우에 대하여 각각 계산을 수행하였다.

2.2 해석방법

사각 히터플레이트 내부의 유동과 온도분포를 구하기 위해 3차원 정상상태, 압축성, 층류유동 및 희박기체에 대한 다음 식 (1)-(3)과 같은 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식을 사용하였다¹⁰⁾. 반응기 내의 기체는 이상기체와 진공의 희박기체 거동으로 가정하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D(\rho \mathbf{v})}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla P + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] \quad (2)$$

$$\rho \frac{D(u)}{Dt} + u \left(\frac{DP}{Dt} + \rho \nabla \cdot \hat{\mathbf{v}} \right) = -\nabla \cdot \mathbf{q}'' + q''' - P \nabla \cdot \hat{\mathbf{v}} + \mu \Phi \quad (3)$$

여기서 t , ρ , μ 는 시간, 밀도, 점성계수이며 P 와 T 는 각각 압력과 온도를 나타낸다. 또 q'' , q''' , Φ 는 열유속(heat flux), 열발생율(heat generation), 점성소산항(viscous dissipation function)을 나타내며 점성소산항은 다음과 같다.

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial \hat{v}_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{v}_y}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial \hat{v}_x}{\partial y} + \frac{\partial \hat{v}_y}{\partial x} \right)^2$$

본 연구에 사용된 경계조건은 표 1과 같다.

Table 1. Physical properties of the elements and boundary conditions for present study

Items		Value
Chamber (SUS 304)	Temperature (°C)	100
	Emissivity	0.17
Heater Plate (SiC)	Heat flow rate (kW)	3 / 5 / 8
	Wall temperature (°C)	500
	Emissivity	0.87
Air (Vacuum/Atomosphere)	Pressure (Pa)	1.33E-04 / 101325
	Density (kg/m ³)	0.01 / 1.2
	Conductivity (W/m-K)	0.02563
	Viscosity (Pa-s)	1.817
	Gas constant (J/kg-K)	287.05
Glass	Emissivity	0.9
	Conductivity (W/m-K)	0.81
Adiabatic wall conductivity (W/m-K)		0.027
Gap (Heater plate - glass) (mm)		5 / 25

3. 결과 및 고찰

3.1 열유속 및 거리의 영향

그림 2는 챔버 내부가 약 10^{-4} Pa의 진공압 상태이고 히터 플레이트 5 mm 상부에 유리가 설치되어 있는 구조에서 히터 플레이트 표면에 3 kW의 균일한 열이 발생하여 정상상태에 이르렀을 때의 유리 표면온도를 나타낸 그림이다. 그림 2(a)에서 피가열물인 유리의 중앙부를 중심으로 약 400°C인 중앙부에서 외곽으로 진행됨에 따라 약 370°C로 낮아지며 타원형태의 등온선을 보이는 온도 분포 특성을 확인할 수 있다. 그림 2(b)는 이 때 챔버의 중심선을 통과하는 단면에서의 온도 분포를 보여준다.

Fig. 2. Temperature distribution at 3 kW, 5 mm gap and vacuum condition; (a) top-, (b) longitudinal side-view.

그림에서 히터 플레이트는 약 460°C에 이르러 히터플레이트와 피가열물 간에는 약 60°C 이상의 온도차를 보이며 히터플레이트의 양 끝단에서 강한 온도구배가 나타나고 있다. 또한 피가열물 상부로 부터 챔버 벽면 간에는 약 300°C의 높은 온도차를 보이나 상대적으로 양 끝단에 비하여 온도 구배는 완화된 형태를 보인다. 이러한 이유는 히터 플레이트로부터 피가열물인 유리를 거쳐 챔버 외벽에 주요 열전달 메카니즘인 복사 열전달 과정에서 챔버의 양 끝단에서는 측면벽을 바라보는 면적이 중앙부에 비하여 매우 크게 증가하며 이에 따른 형상계수(view factor)의 변화에 의하여 상대적으로 대량의 복사 열전달이 발생함에 따라 피가열물의 온도가 낮아지는 결과로 파악된다. 그림 3은 이러한 영향을 파악하고자 열전달을 및 피가열물과의 거리를 변화하며 해석한 결과를 피가열물의 중심선을 따라 길이방향으로의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 먼저 3 kW의 경우는 앞의 설명과 같이 양 측면 약 5%구간에서 온도 강하가 매우 크게 나타나며 그 외 구간에서는 길이방향으로 중앙부가 높은 포물선 형태의 온도 분포를 보인다. 그림에서 열전달율의 증가에 따라 피가열물의 온도가 상승하고 있으며 이 때 약 끝단의 냉각효과 또한 증가하여 8 kW의 경우에는 측면에서 약 15°C 온도차가 증가하고 있으며 측면을 제외한 구간에서도 약 5°C 이상의 온도차가 발생하고 있다. 한편 피가열물과의 거리를 25 mm로 증가한 경우에는 피가열물간의 표면 평균 온도차가 약 15°C 낮게 나타남을 볼 수 있다. 동일한 열부하에서 열원과 거리 증가에 따라 피가열물의 온도가 낮아지는 것은 피가열물의 끝단 온도차가 약 18°C인 결과로부터 열원인 히터 플레이트와 피가열물간의 거리 증가에 따른 측면의 형상계수의 변화에 의한 복사 열전달율의 증가와 함

Fig. 3. Longitudinal surface temperature at various heating conditions.

Fig. 4. Temperature distribution at 3 kW, 5 mm gap and atmospheric condition; (a) top-, (b) longitudinal side view.

게 진공압에서의 대류 열전달이 복합된 것으로 판단된다. 내부의 대류 유동의 영향은 다음절에서 고찰하였다.

3.2 대류의 영향

그림 4는 3 kW의 열원이 가해지고 내부가 대기압 상태에서 열원과 5 mm 간격으로 상부에 설치된 피가열물의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 그림 4(a)의 표면 온도분포는 앞 절의 결과와는 다르게 타원 형태의 온도 구배는 나타나지 않고 판 일부 구간에서 국부적으로 높은 온도를 나타내는 영역이 다수 보이고 있다. 그런데 그림 4(b)의 유동 단면에서의 온도분포에서는 중앙부 및 중앙부와 끝단의 중간지점에서 표면 온도 뿐 아니라 그 상부의 공기 온도가 높게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한 챔버 내부의 온도 분포도 진공상태인 앞 절의 결과와 다르게 대칭성이나 일정 온도구배는 확인하기 어렵다. 이러한 결과는 대기압 조건에 의한 챔버 내부공기의 강한 대류 유동에 의한 것으로 파악된다. 이 결과 앞 절의 진공상태와는 다르게 대류 열전달에 의한 냉각효과의 증대로 피가열물의 온도는 약 350°C 정도로써 상대적으로 낮은 온도를 보이고 있으며 관련 연구^{8,9)}에서 유사한 결과를 확인할 수 있다.

그림 5는 챔버 내부의 유동을 유동 벡터와 속도 분포로 나타낸 그림이다. 그림 5(a)는 내부의 공기가 피가열물로부터 가열되어 부력에 의하여 상향 유동한 후 챔버 벽에서 냉각된 후 다시 하향유동하고 있음을 볼 수 있으며, 그림에서는 중심선을 따라 길이방향의 단면상에 약 5개의 국부적인 유동 셀을 확인할 수 있고 또한, 매우 불규칙하여 대칭

Fig. 5. Velocity vector and distribution at 3 kW, 5 mm gap and atm. condition; longitudinal side view both (a) and (b).

성 등은 확인하기 어렵다. 이러한 유동형태는 국부적인 상향유동과 하향유동이 활발히 일어나는 버나드셀(Vernard cell) 유동¹⁰⁾과 유사한 것으로 예측된다. 관련 실험연구 결과⁸⁾에 의하면 히터 플레이트의 온도가 상승할수록 그리고 챔버 높이가 증가할수록 유동 셀이 크고 강하게 발생하였으며 본 해석의 경우에도 매우 강한 유동 결과를 확인할 수 있다. 이러한 유동에 의하여 내부의 속도 분포도 우측 그림 5(b)와 같이 매우 복잡하게 나타나고 있다. 이러한 대류 유동의 결과에 의하여 그림 2의 결과에서 보는 것과 같은 피가열물 표면의 온도 대칭성은 찾기 어렵고 상대적으로 균일한 온도 분포를 나타내는 것과 같이 보인다. 그러나 표면 온도는 위치에 따라 불균일하였으며 관련 연구⁸⁾에 의하면 챔버 내부의 자연대류 유동에서 유동 셀에 의하여 국소적인 냉각이 발생하여 히터 표면온도의 불균일성이 증가하나 오히려 작은 셀 유동이 있는 경우가 없는 경우보다 전체 등온성은 향상하는 결과를 보여주었다.

3.3 등온벽면과 가열조건에 따른 온도 균일성

그림 6은 챔버 내부는 진공상태, 열원과 5 mm의 거리에서 가열원의 표면이 500°C의 등온을 유지하며 가열할 때 피가열물의 표면(a) 및 챔버 내부(b)의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 균일열유속 조건의 결과와 유사하게 중앙부를 중심으로 원형의 등온선을 나타내며 끝단으로 진행됨에 따라 온도가 낮아지는 형태를 보이고 있다. 다만 그림에서는 균일 열유속 조건에 비하여 상대적으로 등온면이 원형에 가까우며 경계면이 보다 불규칙적임을

Fig. 6. Temperature distribution at 500°C, 5 mm gap and vacuum condition; (a) top-, (b) longitudinal side view.

Fig. 7. Temperature difference along the longitudinal length at various heating conditions.

볼 수 있다. 등온벽면의 가열 조건에서의 온도 분포 특성을 균일열유속 조건의 경우와 비교하고자 그림 7에 중심선을 따라 각 위치의 온도와 최저 온도를 나타내는 끝단의 온도와의 차를 길이 방향에 대하여 나타내었다. 그림에서는 표면 온도 분포의 특성을 보다 명확하게 파악하고자 온도 강하가 큰 끝단온도를 제외하였고 구간위치를 전 길이로 나눈 무차원 길이로 나타내었으며 또한 각 조건에서 나타나는 가장 높은 온도를 표기하였다. 그림에서 등온표면 가열 조건의 경우 전 구간에서 대하여 약 8°C로써 약 15°C인 균일 열유속 조건에 비하여 온도분포가 균일해져 있음을 확인할 수 있다. 그림에는 3.2절의 경우와 같이 챔버 내부가 대기 상태일 때의 온도 분포도 함께 나타내었으며 이 때 온도

편차는 균일 열유속 조건과 유사하게 최대 온도차는 약 15°C 정도이나 표면 온도가 불규칙하게 나타나고 있다. 또한 대류 냉각에 의하여 양 끝단의 온도는 표면 평균온도와 비교하여 약 60°C 이상 차이가 나타나 약 30°C인 균일 열유속과 등온 조건에 비하여 상대적으로 매우 큰 온도차를 보이고 있다. 이상의 결과로부터 피가열원의 등온성을 확보하기 위해서는 열원의 등온성 확보가 매우 중요하며 상대적으로 대류의 영향을 제거하더라도 특히 끝단에서는 매우 큰 온도차가 발생하므로 열손실을 차단하기 위한 구조에 대한 방안이 요구될 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대면적 히터 플레이트 상부에 설치되는 피가열물을 대상으로 피가열물의 등온성에 미치는 관련 인자의 영향을 파악하고자 열유속, 가열원과 피가열물과의 거리, 대류의 영향 및 열원의 열적 조건의 영향을 수치해석적으로 검토하였다. 연구 결과 챔버 내부 피가열면의 끝단에서는 형상계수의 변화에 의하여 온도 강하가 크게 나타났으며 피가열물과의 거리 증가와 압력증가에 따라 대류열 전달의 증가로 인하여 냉각 효과가 증대되었다. 이에 따라 대류가 발생하는 경우에는 피가열물의 표면 온도가 매우 불규칙하고 온도 편차도 증가하였으며, 특히 플레이트 끝단에서의 온도 편차가 진공 상태에 비하여 매우 증가하였다. 또한 열유속이 증가하면 가열원 온도상승에 의한 손실 열부하가 증가하여 끝단의 냉각효과 및 표면 온도 편차가 증가하였다. 한편, 등온 가열 벽면조건은 균일 열유속 조건과 비교해 피가열물의 온도 편차를 감소시키는데 매우 효과적이었다.

참고문헌

1. Y. D. Chung, D. H. Cho, N. M. Park, W. S. Han, S. B. Bae, K. S. Lee, J. Kim, S. Y. Oh, 6th ICAMD, (2009).
2. T. J. Mountziaris, K. F. Jenson, J. Electrochemical Soc., 138 (1991) 2426.
3. R. Mucciato, N. J. Lovergine, J. of Crystal Growth, 221 (2000) 758.
4. T. Bergunde, M. Dauelsberg, L. Kadinski, Yu. N. Makarov, V. S. Yuferev, D. Schmitz, G. Strauch, J. of Crystal Growth, 180 (1997) 660.
5. F. Durst, L. Kadinski, Yu. N. Makarov, M. Schfer, M. G. Vasieliev, V. S. Yuferev, J. Crystal Growth,

- 172 (1997) 389.
6. L. Kadinski, Yu. N. Makarov, M. Schfer, M. G. Vasieliev, V. S. Yuferev, J. Crystal Growth, 146 (1995) 209.
7. J. H. Lee, J. B. Yoo, S. I. Bae, J. Kor. Crystal Growth and Crystal Tech., 15 (2005) 135.
8. J. S. Park, H. G. Kwon, H. H. Cho, Proc. KSME, (2007) 3165.
9. S. Y. Lee, H. H. Cho, Y. W. Lee, Proc. KSME, (2000) 261.
10. F. P. Incorpera, D. P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th Ed. (2001) John Wiley & Sons Inc.