

정전척 표면의 세라믹물질 적층 순서에 따른 온도 특성에 관한 연구

장경민^{*†} · 김광선^{**}

^{*†} 한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과

^{**} 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

A Study on Temperature Characteristics according to Ceramic Material Stacking Sequence of Electrostatic Chuck Surface

Kyungmin Jang^{*†} and Kwangsun kim^{**}

^{*†} Graduate School of Mechatronics Engineering, Koreatech

^{**} School of Mechatronics Engineering, Koreatech

ABSTRACT

Temperature uniformity of a wafer in a semiconductor process is a very important factor that determines the overall yield. Therefore, it is very important to confirm the temperature characteristics of the chuck surface on which the wafer is lifted. The temperature characteristics of the chuck depend on the external heat source, the shape of the cooling channel inside the chuck, the material on the chuck surface, and so on. In this study, CFD confirms the change of temperature characteristics according to the stacking order of ceramic materials on the chuck surface, and suggests the best lamination method.

Key Words : Electrostatic chuck, Temperature uniformity, Semiconductor process, CFD

1. Introduction

반도체 제품 생산 분야에서 수율의 향상은 웨이퍼 대구경화 및 소자의 고집적화로 달성되며, 이를 위한 반도체 공정 기술 또한 빠르게 발전하고 있다. 반도체 공정 중 웨이퍼 이송 및 고정에 척(chuck)이라는 장비가 사용된다. 척을 사용하여 웨이퍼를 밀착시킴으로써, 균일한 공정처리가 가능하게 하며, 파티클의 발생을 최소화 할 수 있다[1]. 척은 웨이퍼를 고정하는 방법에 따라 몇 가지로 분류되는데, 진공 흡착 방식을 사용하는 진공척, 정전력을 사용하는 정전척, 베르누이 원리에 의한 비접촉 웨이퍼 척 등이 있다. 과거에는 폴리이미드를 사용하는 저가

의 폴리머 정전척과 알루미늄 등의 재료가 사용되는 고가의 세라믹 정전척을 병행하여 사용했지만 최근에는 고가의 세라믹 정전척을 주로 사용한다 [2,3].

반도체 공정 중 플라즈마 식각 공정(plasma etching process)은 플라즈마가 갖는 에너지로 인해 고온의 열이 발생한다. 반도체 공정에서 균일한 온도 특성은 공정의 수율과 직결되며, 따라서 이 열을 효과적으로 냉각하여 척과 웨이퍼의 온도를 균일하게 맞추는 것이 중요하다. 일반적으로는 웨이퍼 배면에 냉각 가스를 흘리는 동시에, 척의 내부에 냉매를 순환시키는 방식이 병행된다[4].

본 연구에서는 척 표면에 적용되는 세라믹 물질의 적층 순서에 따른 척의 온도 균일도에 미치는 영향을 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 확인하고, 가장 좋은 적층 방식을 제안한다.

[†]E-mail: gstyners@koreatech.ac.kr

2. Simulation Model

2.1 Physical Model and Boundary conditions

건식 식각은 진공 챔버에 가스를 주입한 후, 플라즈마를 발생시켜 PR(Photo Resist) 보호막으로 가려져 있지 않은 막질을 제거하는 방법이다. 웨이퍼 상의 식각 속도가 달라지면 특정 부위의 칩이 동작하지 않거나 불량이 발생할 수 있기 때문이다. 플라즈마 식각 역시 반응성을 이용하기 때문에 온도의 균일한 제어가 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 플라즈마를 실제로 발생시키지는 않고 상부에 램프를 배치하여 플라즈마 발생시의 에너지를 대체하였으며, 시뮬레이션에서도 마찬가지로 모사하였다.

칩의 온도 제어는 칩의 배면에 흐르는 냉각 gas와 내부에 형성된 유로를 따라 흐르는 냉매에 의한 직접 냉각으로 이루어진다. Fig. 1은 전체적인 해석 모델을 나타낸다. 시뮬레이션은 상용 패키지 프로그램인 Star-CCM+ 11.06 버전을 사용하였으며, 격자는 약 1000만개의 비정렬 다면체 격자를 적용하였다.

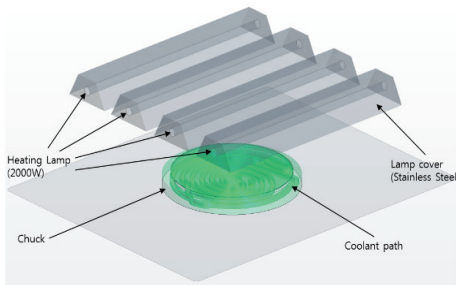


Fig. 1. Configuration of a dry etching chamber.

2.1.1 Simulation Cases

칩의 상부 표면은 웨이퍼와 직접 접촉하기 때문에, 이 부분의 온도 프로파일은 웨이퍼의 온도 프로파일과 밀접한 연관이 있다. 본 연구는 정전 칩 상부에 PI Heater, AlN, Al₂O₃를 올렸을 때, 그 순서 및 두께에 따른 온도 특성을 시뮬레이션을 통하여 파악하는 것이 목적이다.

Table 1. Material stack information of each case

INDEX		1st	2nd	3rd
Case 1	Material	Al ₂ O ₃	PI Heater	Al ₂ O ₃
	Thickness	0.35T	0.12T	1.03T
Case 2	Material	AlN	PI Heater	Al ₂ O ₃
	Thickness	0.35T	0.12T	1.03T
Case 3	Material	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	PI Heater
	Thickness	0.35T	1.03T	0.12T
Case 4	Material	AlN	AlN	PI Heater
	Thickness	0.35T	1.03T	0.12T

Table 1에 각각의 시뮬레이션 케이스 별로 물질의 적층 순서와 두께를 나타내었으며, Fig. 2는 각각의 케이스 별 적층 모식도이다.

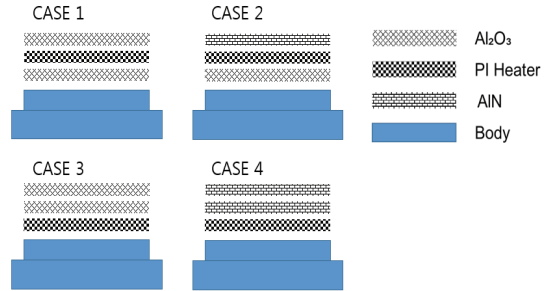


Fig. 2. Stack model of each simulation case.

2.1.2 Material Properties and Boundary Conditions

본 연구에서는 챔버를 포함한 전체 모델의 열전달을 시뮬레이션 한다. 열원은 Heating lamp로 2000W의 에너지를 발생하며 챔버 내벽은 단열로 가정하였다. 냉매(R501a)의 입구 유량과 온도는 각각 0.1kg/s과 10°C이다.

Table 2. Material properties

Properties	Al ₂ O ₃	AlN	PI Heater	Chuck
Emissivity	0.3	0.3	0.3	0.8
Reflectivity	0.7	0.7	0.7	0.2
Transmissivity	0	0	0	0
Thermal Conductivity (W/m · K)	32	140	1.1	204
Specific Heat (J/kg · K)	800	740	1092.76	897
Density (kg/m ³)	3750	3260	1500	2702

Table 3. Properties of R501a

Density (kg/m ³)	1067.63
Dynamic Viscosity (Pa · s)	0.15
Specific Heat (J/kg · K)	1504.32
Thermal Conductivity (W/m · K)	0.72

사용되는 물질의 열전달과 관련된 물성치를 Table 2에 나타내었고 냉매의 물성치는 Table 3에 나타내었다.

2.2 Numerical Model

2.2.1 Governing Equations

일반적인 지배방정식의 표현은 다음과 같다[5].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right] + S_{\Phi} \quad (1)$$

여기서 t는 시간 ρ 은 밀도, Φ 는 공정 가스의 상태량에 대한 종속 함수, Γ_Φ 는 상태량 종속 함수에 대한 확산 계수 S_Φ 는 Φ에 대한 생성항이다.

식 (1)은 종속 함수 Φ에 따라 다양한 형태로 표현할 수 있다. Φ=1 인 경우에는 이 지배 방정식은 연속방정식으로 표현할 수 있다. Φ가 속도의 성분인 경우에는 모멘텀 방정식을 표현할 수 있고 Φ가 엔탈피의 형태로 표현되면 에너지 방정식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = s_m \quad (2)$$

식 (2)는 유동에 대한 질량 보존 방정식이다. 본 연구에서 S_m은 0으로 가정하였다.

직교 좌표계를 사용하는 관성 기준계에서 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

점성 소산을 무시한 정상상태 유동에서의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\text{div}(\rho u h) = \text{div}(k \nabla T) + S_h \quad (5)$$

식 (5)는 정상 저속 유동에 관한 에너지 방정식이다. h는 엔탈피, k는 열 전도율, T는 온도, S_h는 생성항으로 단위체적당 열 발생률을 나타낸다.

2.2.2 Verification of Numerical Model

수치해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여, 정전척을 제작하여 실제 냉각시스템에 연결하여 온도 균일도를 확인하였다. Fig 3은 정전척을 실제 냉각시스템에 연결하고 실험한 결과이다. 실험은 정전척 상부에 할로겐 램프를 이용하여 5kw의 열 부하를 가하고 냉각 시스템을 통해 냉매를 -20℃의 R501a 냉매를 순환시켰을 때 정전척 상부에 위치한 Thermocouple을 통해 온도 데이터를 획득하였

다. Fig 4와 Fig 5는 실험과 동일한 조건으로 수치해석을 진행한 결과이다. 실험결과와 해석결과를 비교해보면 약 3% 내외의 오차가 발생하며 이 오차는 실험 조건과 해석 조건의 차이를 감안하면 신뢰할 수 있는 결과라고 판단할 수 있다. 이를 통해 이번 연구에서 수행한 전체적인 수치 해석의 신뢰도를 확인할 수 있다.

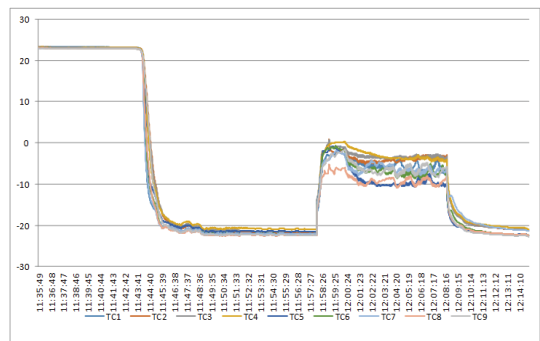


Fig. 3. Experimental data for validation.

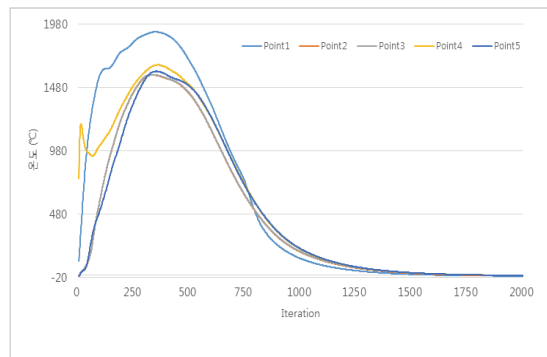


Fig. 4. Results of simulation for validation.

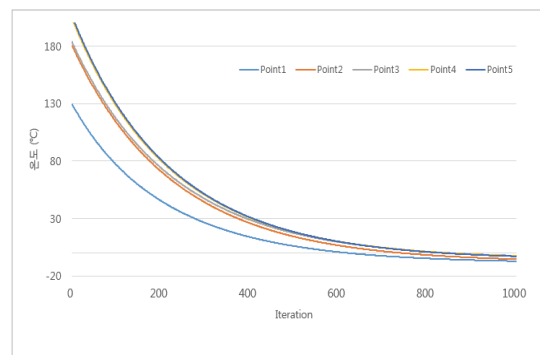


Fig. 5. Results of simulation for validation(enlarge).

2.3 Uniformity Calculation

특정 표면에서 스칼라량의 균일도는 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Uniformity index of } \phi = 1 - \frac{\sum_f |\phi_f - \bar{\phi}| A_f}{2|\bar{\phi}| \sum_f A_f}$$

ϕ 는 균일도를 계산할 항목(여기서는 온도)이며, A_f 는 면적, $\bar{\phi}$ 는 항목의 평균값을 뜻한다. 이 계산의 결과는 어떤 영역(면)에서 특정 스칼라 양의 분포를 나타낸다. 균등한 분포를 나타낼 때 결과 값은 1에 근접한다.

3. Numerical Results and Discussion

3.1 Surface Average Temperature Change over Time

시간에 따라 세라믹 상부 면에서의 평균 온도의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 전체적으로 온도가 감소하다가 점점 증가하는 양상을 보이는데, 이는 냉매의 냉각 능력에 비해 램프에서 복사열로 전달되는 열량이 많기 때문으로 보인다. 초반 180초까지 가장 빠르게 온도가 상승하는 경우는 CASE 1이며, 가장 느리게 상승하는 경우는 CASE 3이다. 이후 CASE 3의 온도 상승 속도가 CASE 1, 2 보다 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 단일 효과를 내는 PI Heater의 위치에 따른 열전달 속도의 차이에서 기인한다.

추가적인 논의를 위하여, 500초 이후부터 수렴 상태에 이르는 과정을 Fig. 7에 나타내었다. 수렴 상태에 이르면 CASE 3의 평균 온도가 가장 높으며 그 후 CASE 1, 2, 4의 순서로 온도가 높은 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 Fig. 8에 그래프로 나타내었다. Fig. 9는 표면 온도가 수렴한 상태의 척 표면의 온도 분포를 나타낸 그림이다.

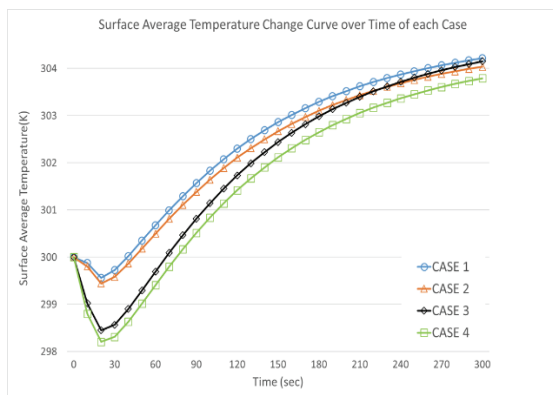


Fig. 6. Surface average temperature change curve over time of each case.

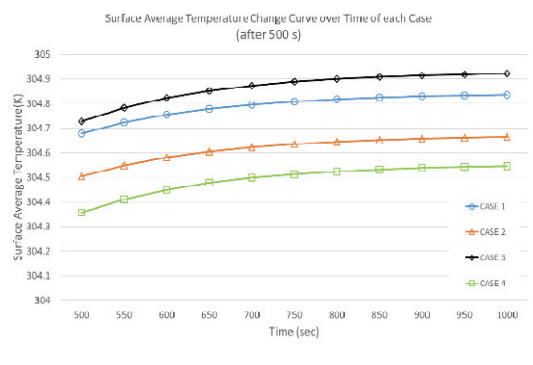


Fig. 7. Surface average temperature change curve over time of each case after 500s.

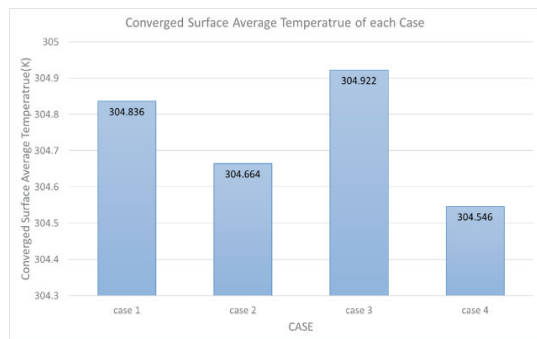


Fig. 8. Surface average temperature of each case when the surface temperature converged.

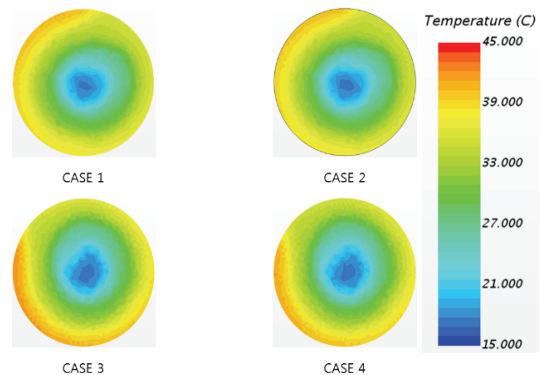


Fig. 9. Surface temperature distribution of each case when the surface temperature converged.

3.2 Surface Temperature Uniformity

반도체 장비에서 온도의 균일성은 제품의 수율 및 신뢰도에 큰 영향을 미친다. Fig. 10에 CASE 별로 시간에 따

른 표면 온도 균일도 변화를 나타내었다. CASE 1과 CASE 2는 거의 같은 곡선을 따라가는 것을 알 수 있으며, CASE 3, 4는 다른 차이를 보인다. 균일도는 CASE 1과 2가 가장 높으며, CASE 3이 가장 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 PI Heater가 중간에 있는 경우와 그렇지 않은 경우의 차이로 볼 수 있다. PI Heater는 비열이 크고 열전도도가 낮기 때문에 상, 하부의 물질 사이에서 열적 완충 효과를 내며, 이로 인해 온도 균일도의 향상에 영향을 미친다.

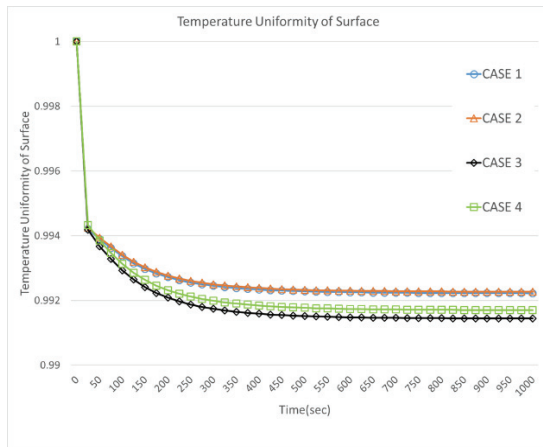


Fig. 10. Temperature uniformity change curve of surface over time.

4. Conclusion

본 연구에서는 정전척의 표면 세라믹 물질의 적층 순서 및 두께에 따른 표면 온도 특성의 변화를 확인하였다. 온도의 변화가 가장 빠른 경우는 CASE 1이며, 가장 느린 경우는 CASE 3이다. 반도체 웨이퍼 공정은 표면 온도의 균

일성이 중요한데, 온도가 수렴했을 때 표면 온도 분포의 균일도는 CASE 1, 2는 거의 비슷하였으며 CASE 3과 4는 그에 비해 불균일한 분포를 보였다.

따라서 빠르게 온도 변화를 보이면서 균일성이 좋은 CASE 1의 적층 순서가 가장 효율적임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업기술혁신사업의 재원으로 한국산업기술평가원의 지원을 받아 수행된 신 성장동력 장비경쟁력 강화사업(10059126)입니다.

참고문헌

1. K. Asano, F. Hatakeyama, and K. Yatsuzuka, "Fundamental Study of an electrostatic chuck for silicon wafer handling", *IEEE Transaction On Industry Application*, Vol. 38, No. 3, 2002.
2. L.D. Hartsough, "Electrostatic Wafer Holding", *Solid State Tech.* 35, No. 1, pp. 87-90, 1993.
3. S. A. Khomyakov, "Attraction and Accuracy Characteristic of Electrostatic Chucks", *Machines and Tooling* 50, No. 3, pp.24-24, 1979.
4. Tretheway, D. and Aydil, E.S., "Modeling of Heat Transport and Wafer Heating Effects during Plasma Etching", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, pp.3674-3680, 1996.
5. Suhas V. Patankar (1980), *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company.

접수일: 2017년 9월 15일, 심사일: 2017년 9월 22일,
게재확정일: 2017년 9월 25일