

세라믹 유전체 물질과 냉매 유로 형상에 따른 정전척 냉각에 관한 연구

김대현[†] · 김광선^{*}

[†]한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과, ^{*}한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

A Study on Electrostatic Chuck Cooling by Ceramic Dielectric Material and Coolant path

Kim Daehyeon[†] and Kwangsun Kim^{*}

[†]Department of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

^{*}Department of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

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 and inner coolant path on the chuck surface. Finally this study suggests the best cooling condition of electrostatic chuck.

Key Words : Electrostatic chuck, Temperature uniformity, Etching, CFD

1. 서 론

반도체 제조 공정에는 다양한 공정이 있으며 공정 간 이동 시에 웨이퍼는 척(Chuck)에 의해 고정되어 이동한다. 척을 이용한 웨이퍼의 이동은 균일한 공정관리가 가능하며 파티클의 생성을 억제할 수 있는 효과가 있다.[1] 웨이퍼가 척에 고정되는 방식에는 진공 흡착을 이용하는 진공 척, 베르누이의 원리를 사용하는 비접촉식 웨이퍼 척, 유전체를 사용하는 정전척 등이 있다. 최근에는 폴리이미드 소재를 사용하는 폴리머 정전 척과 알루미늄과 같은 세라믹 소재를 사용하는 정전 척을 사용한다.[2][3]

반도체 제조 공정 중 식각 공정에는 고온의 플라즈마를 사용한다. 식각 공정 중에 웨이퍼에 전달된 고온의 열은

공정 후 빠르게 냉각되어 다음의 공정으로 이동하게 된다. 플라즈마에 의해 가열된 고온의 웨이퍼를 신속하고 효과적으로 냉각하는 것은 반도체 제조 공정에 있어서 중요한 사항 중에 하나이다. 이 때 냉각을 위해 식각 장비 내에서 웨이퍼의 표면에 저온의 냉각 가스를 분사시켜 주거나 척의 내부에 저온의 냉매를 순환시키는 방법을 사용한다.[4]

본 연구에서는 CFD를 이용하여 알루미늄을 사용하는 세라믹 정전 척에 있어서 세라믹 물질의 특성에 따른 열 특성을 확인하고 효과적인 냉각을 위해 냉매 유로 형상에 대해 연구하였다.

2. Simulation

2.1 Physical Model and Boundary Conditions

전식 식각 공정은 일반적으로 전용 플라즈마 식각 장

[†]E-mail: fly2you@koreatech.ac.kr

비를 사용하여 진행된다. 하지만 본 연구는 플라즈마가 식각 공정 후에 사용된 상태에서 고온의 웨이퍼에 대한 냉각이 대상이므로 전용장비가 아닌 별도의 장비를 통해 진행되었다. 본 연구에서 실험을 위해 사용한 장비는 Fig. 1과 같다.

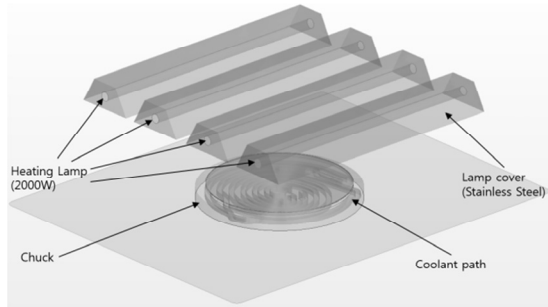


Fig. 1. Configuration of dry etching chamber

실험장비에서는 플라즈마를 직접 이용하지 않고 플라즈마에서 발생하는 열을 모사하기 위하여 챔버 상부에 위치한 램프를 이용하였다. 정전 척은 챔버 하부에 장착되어 챔버 외부의 냉각 칠러와 연결된 상태에서 저온의 냉매를 공급받는다. 정전 척 내부로 들어온 저온의 냉매는 척 내부의 유로를 따라 흐르며 척 표면의 열을 냉각한다.

본 연구에서 사용된 CFD 상용코드는 STAR-CCM+ 11.06 version을 사용하였다. 또한 수치 해석에 사용된 격자는 약 1200만개의 다면체 격자이다.

2.1.1 Simulation cases

척의 상부에는 웨이퍼가 위치하고 챔버 내에서 생성되는 플라즈마에 의해 웨이퍼는 가열된다. 척 상부에 웨이퍼가 위치하기 때문에 척 상부에서의 온도 분포는 곧 웨이퍼의 온도 분포와도 연관이 있다. 따라서 이번 연구에서는 척 상부 표면에서의 온도 분포를 확인하고 유전체 접합에 있어서 유전체 물질에 따른 분포 특성에 대해서 연구한다.

Fig. 2는 유전체 접합 조건에 대해서 나타내었다. 척의 유전체 영역은 서로 다른 두께 값을 갖는 4개의 영역으로 나누어져 있다. 시뮬레이션은 1.5t영역에서 AlN과 Al₂O₃의 서로 다른 성질을 갖는 물질로 설정하고 진행한다.

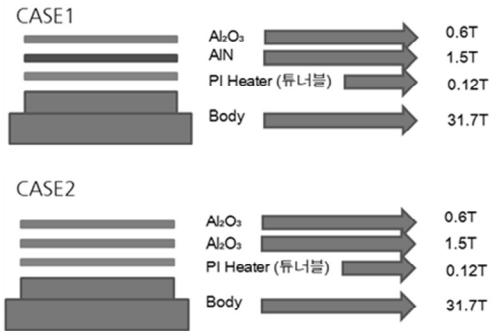


Fig. 2. Stack model of each simulation cases

2.1.2 Boundary conditions and Material Properties

이번 연구에서는 일반적인 전도와 대류에 대한 열 전달 시뮬레이션 외에 복사 열 전달도 고려하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이번 해석에 사용한 복사 열 전달 모델은 S2S Radiation 모델을 사용하였다. 플라즈마의 열원을 모사하기 위한 4개의 2000W 램프를 사용한다. 챔버 내부의 매질은 공기로 설정하였고 벽면은 단열 조건으로 가정하였다. 냉각에 필요한 냉매는 R501a를 사용하였다. 냉각을 위해 척 내부로 투입되는 냉매의 유량과 온도는 각각 0.01 kg/s와 -20°C이며 시뮬레이션은 Unsteady 해석으로 1000s동안 진행하였다. Table. 1과 Table. 2는 이번 연구를 위해 사용된 Material properties와 Boundary conditions이다.

Table 1. Material 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

Table 2. Material properties and boundary conditions

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

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, Φ는 공정가스의 상태량에 대한 종속 함수, Γ_Φ 는 상태량 종속 함수에 대한 확산계수 S_Φ 는 Φ에 대한 생성형이다.

식 (1)은 종속함수 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.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (2)$$

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

직교 좌표계를 사용하는 관성 기준계에서 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

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

S2S Radiation 모델은 복사 표면과 흡수 표면에만 중점을 두고 매질은 계산 영역에 포함하지 않는다. 이러한 상황에서 각 표면에 부과된 복사 특성과 열 경계 조건은 표면에 수신 및 방출하는 복사량을 고유하게 정의한다. 표면 특성은 방사율, 반사율, 투과율 및 방사 온도로 정량화 된다. 이러한 속성은 방향성과는 무관하다. 일반적으로 사

용하는 S2S Radiation 방정식은 다음과 같다.

$$q_{out,k} = \epsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{in,k} \quad (6)$$

위 식에서 q_{out,k} 는 표면에서 방출되는 에너지 플럭스이며 ε_k는 방사율이다. σ는 볼츠만 상수이며 q_{in,k}는 주변으로부터 표면으로 흡수되는 에너지 플럭스이다.

2.2.2 Uniformity Calculation

특정 표면에서 스칼라량의 균일도는 다음과 같이 계산된다.[7]

$$Uniformity\ index\ of\ \phi = 1 - \frac{\sum_f |\phi_f - \bar{\phi}| A_f}{2|\bar{\phi}| \sum_f A_f} \quad (7)$$

φ는 균일도를 계산할 항목(여기서는 온도)이며, A_f는 면적, φ̄는 항목의 평균값을 뜻한다. 이 계산의 결과는 어떤 영역(면)에서 특정 스칼라 양의 분포를 나타낸다. 균등한 분포를 나타낼 때 결과 값은 1에 근접한다.

2.2.3 Verification of Numerical Model

시뮬레이션 모델의 신뢰성을 확인하기 위해 플라즈마 장비와 냉각 장비에 연결하여 온도 균일도를 확인하였다. Fig. 3은 정전 척을 실제 냉각 칀러에 연결하고 확인한 온도 분포 결과이다. 실험은 정전 척 상부에 할로젠 램프를 이용하여 5kw의 열 부하를 가하고 냉각 시스템을 통해 냉매를 -20℃의 R501a 냉매를 순환시켰을 때 정전 척 상부에 위치한 Thermal Couple을 부착한 웨이퍼를 통해 2000s동안 온도 데이터를 획득하였다.[7] Fig. 4은 실험과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 진행한 결과를 나타내었다. Fig 5의 결과는 Fig 4의 결과에서 1000s부터 2000s까지의 구간을 확대한 결과이다. 실험결과와 해석결과를 비교해보면 약 -10℃로 수렴하며 상호 3% 내외의 오차가 발생한다. 이 오차는 실험조건과 해석조건의 차이를 감안하면 신뢰할 수 있는 결과라고 판단할 수 있다.

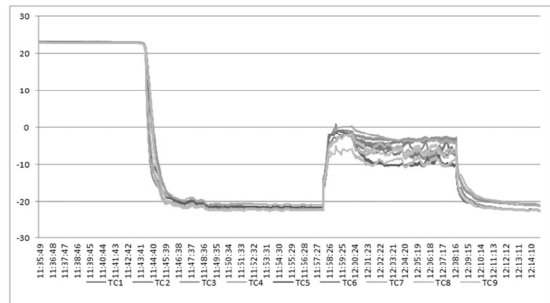


Fig. 3. Experimental data for validation

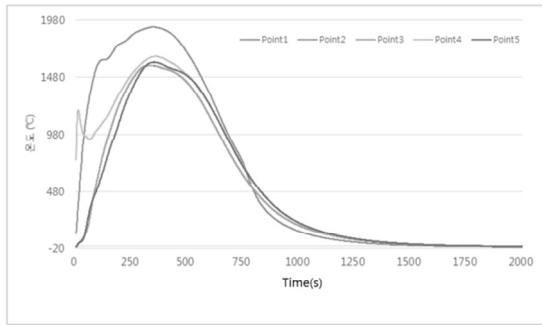


Fig. 4. Results of simulation for validation

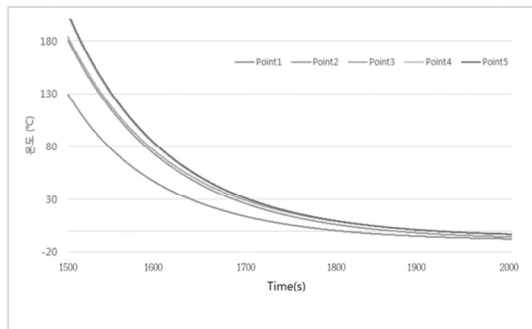


Fig. 5. Result simulation of validation(after 1000s)

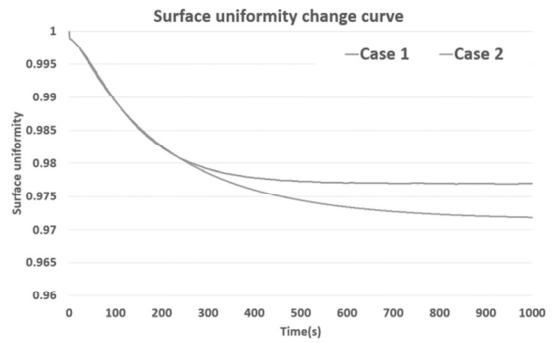


Fig. 6. Comparison data on surface average of each case

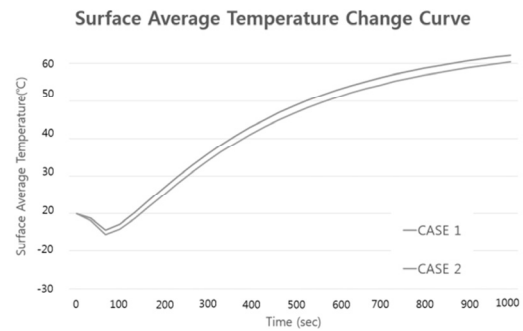


Fig. 7. Comparison data on surface uniformity of each case

3. Simulation results and discussion

3.1 Simulation for Dielectric material stack

장비가 가동이 시작되고 냉매가 순환된 1000s 후에 Case 1(Al_2O_3+AlN)와 Case 2($Al_2O_3+Al_2O_3$)의 칩 상부 면의 최종 표면 온도와 온도 균일도 수치를 Fig 6, Fig 7에 각각 비교하여 나타내었다. Fig 6의 결과를 살펴보면 최종 표면 온도 관점에서 Case 1의 표면 온도가 Case 2의 표면 온도보다 2.4°C 낮았다. Fig 7의 결과는 Case 1과 Case 2에서의 칩 상부표면의 온도 균일도를 나타낸 곡선이다. 결과를 바탕으로 Case 1의 온도 균일도가 Case 2의 온도 균일도보다 0.004가량 더 높은 수치를 기록하였다. 칩 상부 면에서의 최종 온도 분포와 온도 균일도 측면에서 Case 1의 열 특성이 Case 2의 열 특성보다 우수함을 확인하였다.

3.2 Simulation for coolant path

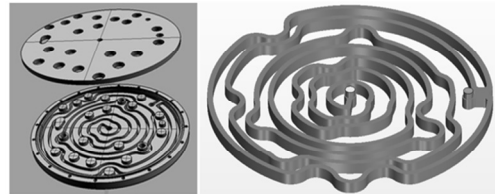


Fig. 8. Existing model of coolant path

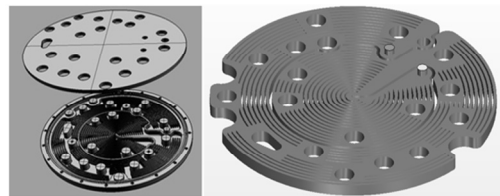


Fig. 9. Suggested model of coolant path

지난 연구에서 300mm 정전 칩에 대해서 냉매 유로 형상에 따른 냉각특성을 확인하였다.[8] 이번 연구에서는 정전 칩의 대구경화에 대응하기 위하여 450mm 정전 칩의

냉매 유로 형상에 따른 열 특성을 확인하였다. Fig 8은 기존에 사용하고 있는 냉매 유로 형상이다. Fig 9는 냉각 효율을 높이기 위해 냉매와 척의 상부 면 간의 전열 면적을 확대하기 위해 제안된 형상이다. Fig 8과 Fig 9의 형상에 따라 열 특성을 확인하였다.

냉매 유로 형상에 따른 시뮬레이션은 유전체 물질에 따른 시뮬레이션의 물성치와 경계조건을 동일하게 설정한 상태에서 진행하였다.

Fig 10은 냉매 유로 형상에 따른 척 상부 표면에서의 평균 표면 온도를 비교한 결과이다. Fig 11은 상부 표면에서의 온도 균일도 비교를 나타낸 결과이다. 척 상부 표면에서의 평균 온도 시뮬레이션 결과를 살펴보면 Fig 8 형상의 결과는 Fig 9의 형상 결과보다 33℃ 가량 개선된 결과를 확인할 수 있었다. 온도 균일도 측면에서는 Fig 8의 결과가 Fig 9의 결과보다 0.005 가량 개선된 특성을 보였다. 이를 바탕으로 Fig 10의 형상이 Fig 11의 형상이 열 특성 측면에서 좀 더 우수한 형상임을 확인할 수 있었다.

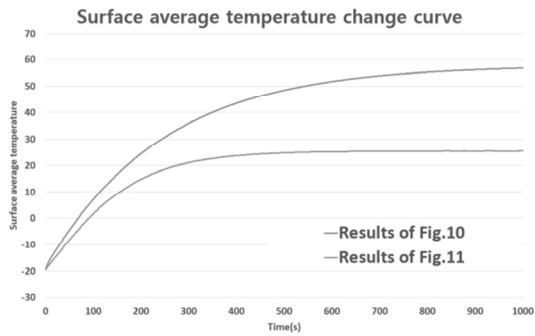


Fig. 10. Simulation results on surface average

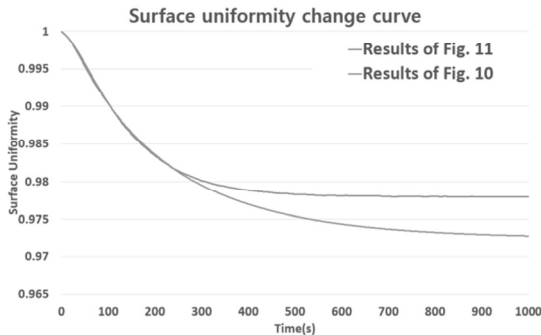


Fig. 11. Simulation results on surface uniformity

4. 결 론

본 연구에서는 식각 장비에서 사용되는 고온의 플라즈마에 의한 열을 냉각하기 위한 정전 척에서의 열 특성에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 척 상부에 적층하는 유전체 물질과 냉매 유로 형상에 대한 열 전달을 확인하였다. 세라믹 유전체 적층은 Al_2O_3+AlN 이 $Al_2O_3+Al_2O_3$ 보다 우수한 열 특성을 보이고 있음을 확인하였다. 냉매 유로 형상은 기존의 형상보다 전열 면적을 넓힌 형상이 좀더 우수한 성능을 기록함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가원의 지원을 받아 진행된 신 성장동력 장비경쟁력 강화사업(10059126)을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

1. K. Asano, F. Hatakeyama, 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, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Company, (1980)
6. Simense PLM(2016), STAR-CCM+ User guide v11.06
7. Kyungmin Jang, Kwangsun Kim, "A Study on Temperature Characteristics according to Ceramic Material Stacking Sequence of Electrostatic Chuck Surface", Journal of the semiconductor & display technology, pp.116-120, (2017)
8. Dae-Hyeon Kim, Kwang-sun Kim, "Study on Coolant Passage for Improving Temperature Uniformity of the Electrostatic Chuck Surface", Journal of the semiconductor & display technology, vol. 15 no.3, pp.72-77. (2016)

접수일: 2018년 9월 12일, 심사일: 2018년 9월 17일,
게재확정일: 2018년 9월 19일