

반도체 웨이퍼위의 Aerosol Nanoparticle 증착 장비 개발

안강호* , 안진홍** , 이관수* , 임광옥* , 강윤호***

*한양대학교 기계공학과, **한양대학교 대학원, ***삼성전자(주)종합기술원

초록

4 ~ 20 nm 범위의 입자들이 갖는 전기적 특성을 이용하기 위하여 이들 입자를 300mm 웨이퍼 위에 균일하게 증착시키는 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 나노 입자의 증착 장비 개발에 필요한 증착 장비내 유동장 해석 및 온도 구배장 해석을 수행하였다. 증착 장비 입구의 유량이 3 lpm, 4 nm인 경우, 입자의 확산력만을 고려하였을 때, 대부분의 입자들은 웨이퍼 표면이 아닌 벽면으로의 부착이 98% 정도 일어났다. 그러나 입자의 열영동 및 전기영동을 고려한 경우, 100% 웨이퍼 표면에 증착되는 것을 알 수 있었다. 따라서 입자의 확산력 이외의 외력(열영동, 전기영동)을 이용하면 웨이퍼 표면에서의 증착 효율을 상승시킬 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서론

나노 입자를 이용한 응용은 매우 다양한 분야에서 시도되고 있다. 이는 물질이 나노 크기가 되면서 기존의 벌크한 재료에서는 볼 수 없는 다양한 새로운 성질이 발견되고 있기 때문이다. 특히 나노 입자의 경우 표면적 대 체적의 비가 매우 커짐에 따라 전기적, 광학적, 기계적, 화학적 특성들이 많이 변하여 이를 응용하려는 연구가 진행되고 있다. 나노 입자의 특성 중 특이할 만한 것은, 양자 가둠 효과(Quantum confinement)와 높은 유전율 등을 가지고 있어 반도체 및 optoelectronics, 촉매로서의 높은 활용 가치를 가지고 있다. 또한, 재료의 grain size 가 작아짐에 따라 항복 강도 및 경도 등의 향상을 가져 올 수 있는 특이한 기계적 성질을 보유하고 있다. 본 연구에서는 4 ~ 20 nm 범위의 입자들이 갖는 전기적 특성을 이용하기 위하여 이들 입자를 300mm 웨이퍼 위에 균일하게 증착시키는 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 나노 입자의 증착 장비 개발에 필요한 증착 장비내 유동장 해석 및 온도 구배장 해석을 수행하였다. 이는 상용 FLUENT 코드를 이용하여 수행하였으며, 유동장의 해석은 입자 증착면을 회전시켰을 경우, 유입 기체의 유동 특성을 해석하여 최적의 운전 조건 및 구조를 결정할 수 있도록 해석을 하였다. 그리고 온도장 구배의 해석은 입자의 열영동 특성을 이용하여 나노 입자의 증착율을 증가시키기 위한 목적으로 수행하였다.

2. 수치 해석

유동장 및 온도장의 해석을 위하여 3차원 swirl flow의 계산 영역을 선정하였으며, 이를 Fig. 1에 도시하였다. 본 연구에서 사용한 소프트웨어는 Gambit & FLUENT를 사용하였다. 본

연구에서는 300 mm 웨이퍼의 입자 증착면 위로 유동의 균일한 흐름을 위해 입자 증착면 덮개와 5 mm 또는 10 mm 의 간격을 두었다. 또한 입자의 열영동 효과를 주기 위하여, 입자 증착면 덮개와 입자 증착면 사이에 온도 차이를 각각 주어 계산을 수행하였다. 또한 계산 격자는 웨이퍼 주위에서의 보다 정확한 해석을 위해 웨이퍼 주위에 격자를 집중시킨 비균일 격자계를 적용하였으며, 총 노드의 수를 363,571 로 설정하였다. 계산의 수렴 조건으로 연속 방정식 및 운동량 방정식은 10^{-4} 으로 설정하였으며, 온도 해석에 대해서는 10^{-7} 으로 설정하여 수치 해석을 수행하였다.

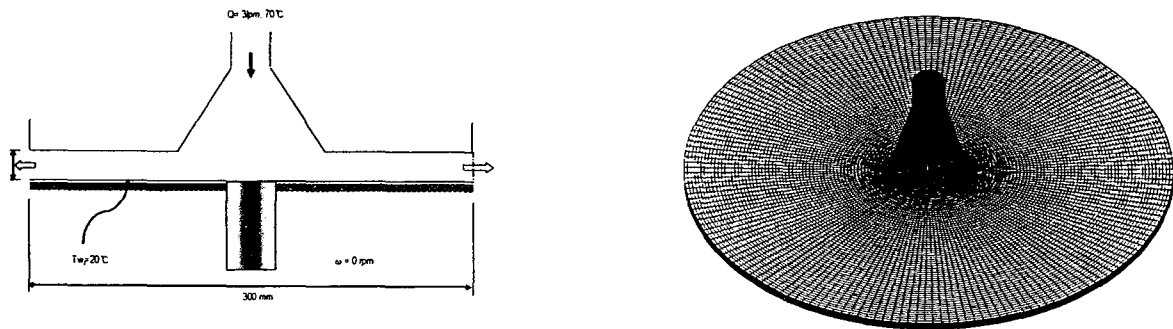


Fig. 1 Schematic diagram of nanoparticle chamber and calculation mesh.

3. 수치해석 결과 및 고찰

Fig. 2 는 나노 입자 증착 장비내의 pathline 과 온도 분포를 나타내 것이다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 웨이퍼 중심에서의 속도가 가장 빠르게 분포하는 것을 볼 수 있으며, 웨이퍼 중심으로부터 가장자리까지 균일하게 분포되는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig.2(b)를 보면, 중심으로부터 50mm 떨어진 부근에서 온도 구배가 균일해지고 있음을 볼 수 있다.

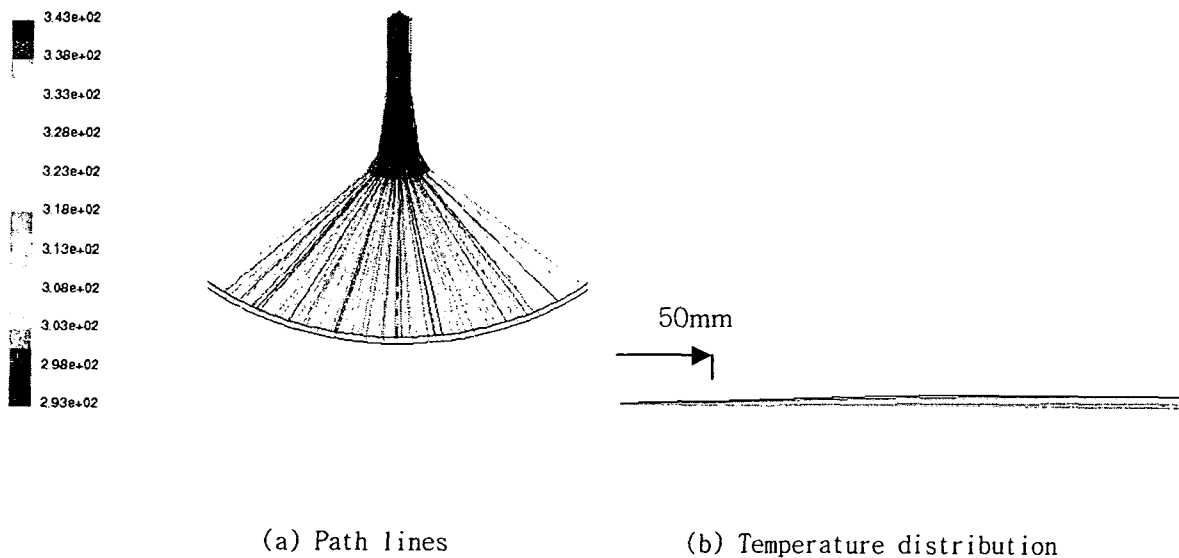


Fig. 2 Fluid path lines and temperature distribution in the chamber.

4. 입자 침착 속도의 평가 및 증착 효율

본 연구에서는 웨이퍼상의 입자 침착에 관여하는 가장 기본적인 침착 메커니즘인 대류 확산, 중력 침강, 열영동 및 정전기력이 작용했을 때 입자 침착 속도의 예측 방법을 고찰하였다.

Liu 와 Ahn(1987)⁽¹⁾은 수직 기류하에 웨이퍼가 수평으로 놓여 있을 때 대류, 확산, 및 중력 침강에 의한 입자의 평균 침착 속도를 아래와 같이 정량적으로 예측하여 대류, 확산 및 중력 침강에 의한 입자의 평균 침착 속도를 구하였으며 아래 식과 같다.

$$V_{diffu.} = 1.08 \cdot Sc^{1/3} \cdot Re^{1/2} \frac{D}{D_w} \quad (1)$$

$$V_g = \tau g = \frac{\rho_p \cdot D_p^2 \cdot C_c}{18 \cdot \mu} \cdot g \quad (2)$$

$$V_{Depo.Vel.} = V_{Diffu.} + V_g \quad (3)$$

여기서, Sc는 Schmidt 수, Re는 Reynolds 수, D_w 는 웨이퍼의 직경을 의미한다.

또한 공기 중에 온도 구배가 있을 때 입자는 온도가 낮은 쪽으로 힘을 받는데, 이 힘으로 인해 생기는 입자의 운동을 열영동이라고 한다. 이와 같이 열영동에 의해 생기는 입자의 이동 속도, 즉 열영동 속도는 일반적으로 온도 구배 및 열영동 계수에 의해 지배를 받으며, 아래의 식 (4)와 같이 표현된다.

$$V_t = -\kappa \frac{V}{T} \nabla T \quad (4)$$

Namili et al(1991)⁽²⁾은 전단류에서 벽면 부근의 국소 온도 구배에 관해 알려진 관계식을 이용하여, 웨이퍼상의 평균 온도 구배를 상정하였으며 아래와 같은 식을 제안하였다.

$$\nabla T = 0.733 Pr^{1/3} \left(\frac{u}{\nu D_w} \right)^{1/2} (T_w - T_a) \quad (5)$$

여기서, Pr은 Prandtl 수, u 는 수직 방향의 기류 속도, T_w 는 웨이퍼 표면의 온도, T_a 는 주위 공기의 온도이다. 식(6)과 식(7)을 이용하면 온도 구배에 의한 웨이퍼 상의 평균 열영동 속도를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_T = -0.733 \cdot \kappa \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{u \cdot \nu}{D_w} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{T_w - T_a}{T_w} \right) \quad (6)$$

$$\text{where, } \kappa = 2.294 \cdot \frac{(\alpha + 2.2 \cdot Kn) \cdot C_c}{(1 + 3.438 \cdot Kn) \cdot (1 + 2\alpha + 4.4 \cdot Kn)} B0.42$$

여기서, α 는 입자와 공기의 열전달률의 비율이며, $0.3\mu\text{m}$ 이하의 입자에 대해 κ 는 일정한 값을 갖는다. 따라서, 입자의 열영동 현상을 고려할 경우, 입자의 침착 속도는 다음과 같다.

$$V_{Depo.Vel.} = V_{Diffu.} + V_g + V_T \quad (7)$$

마지막으로 대전된 웨이퍼에 의해 표면에 균일한 전기장도 (E)가 형성되어 있으면 대전 입자에 쿨롱힘(Coulomb force)이 작용한다. n개의 전기량을 가진 입자는 아래와 같은 전기 영동 속도로 이동하게 된다.

$$V_e = Z_p E = \frac{neC_c}{3\pi\mu D_p} E \tag{8}$$

한편 웨이퍼 부근의 전기량이 일정하지 않는 경우, 정전기력은 위치에 따라 달라지며 고립되어 있는 웨이퍼를 도체 또는 일정하게 대전되어 있는 유전체의 원판으로 가정하고 벽면상의 법선 성분의 분포를 계산한 연구에 의하면 원판상의 평균 전기장도는 다음의 식 (9)와 같다.

$$E = 2.36 \left(\frac{V}{D_w} \right) \tag{9}$$

여기서, V는 웨이퍼의 평균 표면 전위이다.

따라서, 입자의 정전기력 현상을 고려할 경우, 입자의 침착 속도는 다음과 같다.

$$V_{\text{Depo.Vel.}} = V_{\text{Diffu.}} + V_g + V_T + V_e \tag{14}$$

Fig. 3은 위의 모델을 이용하여 해석한 입자 침착 속도를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 입자 침착 메커니즘으로 대류 확산과 중력 침강만을 고려한 것이고, Fig. 3(b)는 열영동 효과가 더해진 경우, Fig. 3(c)는 열영동 효과에 정전기력에 의한 침착 속도를 더한 경우이다. Fig. 3(a)만을 보았을 때, 웨이퍼 표면 전체적으로 입자 침착 속도가 균일해 졌음을 확인 할 수 있다. 또한 열영동 효과를 고려한 경우, 입자 침착 속도가 상당히 증가함을 확인할 수 있는데, 이는 입자 침착 메커니즘으로 열영동이 크게 영향을 미칠 것이라고 판단할 수 있다. Fig. 3(c)는 300 V의 웨이퍼 표면 전위를 갖는 경우, 대류 확산, 중력 침강, 열영동에 대해 정전기력에 의한 입자의 침착 속도를 예측한 결과이다. 그림에서 볼 때, 대류 확산이나 중력 침강, 열영동에 비해 정전기력에 의한 입자 침착 속도가 가장 큰 영향을 가지고 있음을 확인할 수 있으며 웨이퍼 전체적으로도 매우 균일한 분포를 가질 수 있음을 확인할 수 있다.

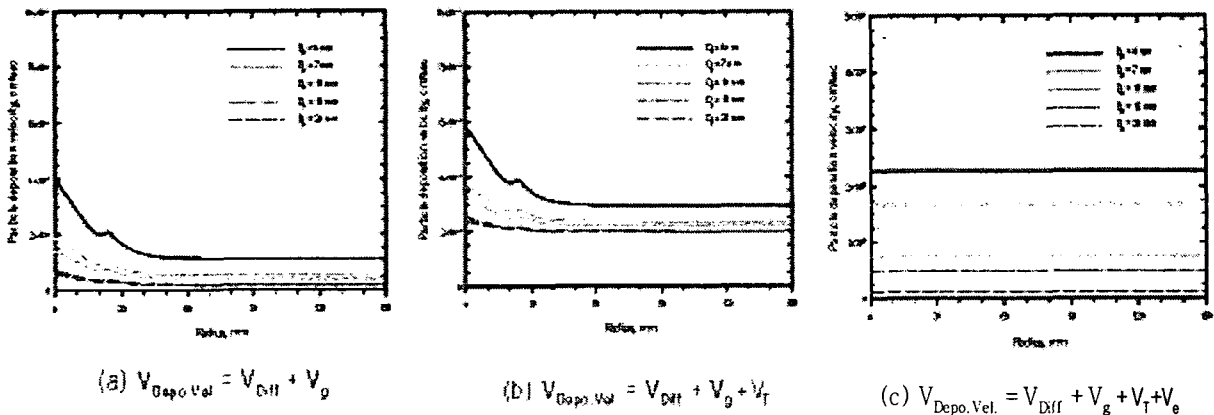


Fig. 3 Particle deposition velocity with respect to radius of wafer according to particle deposition mechanism ($Q_{in} = 3 \text{ lpm}$).

Table 1은 입자의 침착플럭스를 이용하여 입자의 증착효율을 계산한 결과이다. Table 1에서 볼 수 있듯이, 확산력만을 이용하였을 경우 입자의 크기가 4 nm일 때 88.4 %의 효율을 보여주고 있다. 또한 확산력에 열영동력을 부가한 때, 확산력만을 이용한 경우에 비해 입자의 침착효율이 상승하는 것으로 나타난다. 따라서 열영동력만을 이용하여도 20 nm 이하의 입자에 대해 모두 100 %의 증착 효율을 보일 수 있음을 알 수 있다. 또한 전기 영동력을 이용하여도 100 %의 증착 효율을 보일 수 있다.

Table 3. Particle deposition efficiency change by adding other forces.

Flow rate (lpm)	Particle Size (nm)	Diffusion (%)	Diffusion+ Thermophoresis (%)	Diffusion+ Thermophoresis+ Electrophoresis (%)
1.0	4.0	88.40	100	100
	10.0	62.50	100	100
	20.0	39.20	100	100
3.0	4.0	62.70	100	100
	10.0	38.10	100	100
	20.0	18.40	100	100

5. 결론

본 연구에서는 웨이퍼 위에 효과적인 나노 입자 증착을 위한 나노 입자 증착 장비를 개발하기 위해 유동장 및 온도장 구배를 수치적으로 해석하였다. 다음으로 입자 침착 메커니즘이 웨이퍼 상의 입자 침착에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여, 수치해석으로부터 나온 속도 및 온도분포로부터 대류, 확산, 중력 침강, 열영동 등이 작용한다고 가정하여 4, 7, 10, 15, 20 nm의 입자에 대해 이론적으로 입자의 침착 속도를 구하고, 아울러 입자의 침착효율을 구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 입자 침착 속도의 균일도를 향상시키기 위해 새로운 모델을 개발했으며, 이 때 해석된 입자 침착 속도는 웨이퍼 표면 전체에 대해 균일함을 볼 수 있었다. 또한 열영동 효과를 고려한 경우 입자 침착 속도는 크게 향상됨을 볼 수 있었다.
- (2) 입자 침착 메커니즘으로 대류, 확산, 중력 침강, 열영동, 정전기력을 고려한 경우, 입자 침착은 정전기력에 의해서만 크게 좌우됨을 볼 수 있었다.
- (3) 웨이퍼 표면으로의 입자 침착 효율은 확산력만을 고려한 경우 유량이 3lpm일 때 4nm의 경우 98% 이상이 표면에 부착되나 20nm의 경우 약 40 % 이하로 다소 낮게 나타났다.
- (4) 열영동 또는 전기 영동 중 하나의 힘만을 이용하면, 입자의 증착 효율은 100 %가 되는 것으로 나타났다. 그러나 전기장을 이용할 경우, 웨이퍼 표면 위에 입자의 국부적인 침착량 상승을 야기시킬 수 있다.

본 연구를 요약해보면, 나노 입자 증착의 균일도 및 증착 효율을 높이기 위해서 입자의 확산력 뿐만 아니라 열영동력과 전기영동력을 부가해 주어야하는 것으로 판단되며, 본 연구에서 설계한 증착기는 100%의 증착 효율을 보일 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 삼성전자㈜ 종합기술원의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Liu, B.Y.H. and Ahn, K.H., "Particle Deposition on Semiconductor Wafers", Aerosol Science and Technology, Vol.6, pp.215-224, 1987.
- [2] Namiki, N., Shibuya, Y., Sakiya, F., "Suppression of Particle Deposition on Wafers by Thermophoretic Force : Application to a Wafer Carrier Robot", In Proceedings of 10th annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, Japan Air Cleaning Association, April 9-10, Tokyo, JAPAN, pp.155-160, 1991.