

진공환경에서 수평 웨이퍼 표면으로의 입자침착 해석

유 경 훈[†]

(2002년 4월 23일 접수, 2002년 10월 14일 심사완료)

Analysis on Particle Deposition onto a Horizontal Semiconductor Wafer at Vacuum Environment

Kyung-Hoon Yoo

Key Words: Horizontal Wafer(수평 웨이퍼), Vacuum Environment(진공환경), Ideal Gas Law(이상 기체 법칙), Flow Field(유동장), Particle Deposition Velocity(입자 침착속도)

Abstract

Numerical analysis was conducted to characterize the gas flow field and particle deposition on a horizontal freestanding semiconductor wafer under the laminar flow field at vacuum environment. In order to calculate the properties of gas, the gas was assumed to obey the ideal gas law. The particle transport mechanisms considered were convection, Brownian diffusion and gravitational settling. The averaged particle deposition velocities and their radial distributions for the upper surface of the wafer were calculated from the particle concentration equation in an Eulerian frame of reference for system pressures of 1 mbar~1 atm and particle sizes of 2 nm~10⁴ nm(10 μm). It was observed that as the system pressure decreases, the boundary layer of gas flow becomes thicker and the deposition velocities are increased over the whole range of particle size. One thing to be noted here is that the deposition velocities are increased in the diffusion dominant particle size range with decreasing system pressure, whereas the thickness of the boundary layer is larger. This contradiction is attributed to the increase of particle mechanical mobility and the consequent increase of Brownian diffusion with decreasing the system pressure. The present numerical results showed good agreement with the results of the approximate model and the available experimental data.

기호설명

c : 입자농도 [particles/m³]
 d : 가스분자의 직경 [m]
 D_B : 브라운 확산계수 [m²/s]
 g : 중력가속도(=9.8) [m/s²]
 k_B : 볼츠만상수(=1.38×10⁻²³) [J/K]
 Kn : 유동 Knudsen 수, λ/R
 m : 가스분자의 질량 [kg]
 M : 가스의 분자량 [kg/mol]
 p : 압력 [Pa]

P_0 : 시스템 압력 [Pa]
 r : 반경방향 좌표 [m]
 R : 원판의 반경 [m] 또는 기체상수
 Re : 자유유동 Reynolds 수, $2\rho U_0 R/\mu$
 Sc : 입자의 Schmidt 수, ν/D_B
 Stk : Stokes 수, $\tau_p U_0/R$
 u : 가스속도 [m/s]
 u^p : 입자속도 [m/s]
 V_{dep} : 입자침착속도 [m/s]
 z : 축방향 좌표 [m]

그리스문자

λ : 가스분자의 평균자유행로 [m]
 μ : 가스의 분자점성계수 [kg/m·s]
 ρ : 가스의 밀도 [kg/m³]

[†] 회원, 한국생산기술연구원 에어로졸·필터연구실
 E-mail : khyoo @ kitech.re.kr
 TEL : (041) 5898-354 FAX : (041) 5898-330

τ_p : 입자이완시간 [s]

하침자

r : 반경방향

z : 축방향

1. 서론

반도체 웨이퍼 표면에 침착된 입자들은 집적 회로의 패턴 결함(pattern defect)을 유발시켜 제품 수율 및 품질 저하의 주요 원인이 되므로 입자오염 문제는 마이크로 전자산업에 있어 매우 중요하다.⁽¹⁾ 반도체 제조공정이 비록 초청정 클린룸(super cleanroom)내에서 이루어지고 있지만 입자오염 원인은 클린룸 환경보다는 공정 자체 및 장비 내부에 존재한다고 최근 보고되고 있다. 이러한 입자오염 원인으로서는 오염된 공정가스 라인, 진공장비의 누설, 웨이퍼 로딩과정의 불량, 동질 가스상 핵생성(homogeneous gas phase nucleation), 반응기(reactor) 벽면의 박편(flake) 발생 등을 들 수 있다.⁽²⁾ 이러한 오염입자들은 대류, 확산, 중력 침강, 열영동, 정전기 등의 다양한 입자전달 기작을 통하여 공정중인 웨이퍼 영역으로 이동하게 되는데 이러한 오염입자들을 웨이퍼 표면이 아닌 다른 영역으로 이동하도록 제어하는 것이 반도체 웨이퍼 표면에 증착된 박막이 고순도와 균일도를 유지하는 데 있어 매우 중요하다.

한편, 화학증착 (CVD) 공정($10^2 \sim 500$ mbar), 스퍼터링 (sputtering) 공정($10^3 \sim 10^2$ mbar), 식각 (etching) 공정($5 \times 10^3 \sim 5$ mbar), 이온주입 (ion implantation) 공정(10^5 mbar) 등의 반도체 디바이스 공정들은 대부분 $10^5 \sim 500$ mbar의 운전압력을 가진 진공장비 내에서 이루어지고 있어 이러한 저압 환경(low-pressure environment)에서의 입자 거동 및 침착을 해석하는 것은 입자오염 제어 측면에서 필수적으로 요구된다. 그동안 진공환경에서의 반도체 웨이퍼로의 입자침착문제에 대한 연구가 일부 수행되었으나,^(2,3) 아직까지 진공환경이 웨이퍼 표면상의 가스속도분포와 입자크기별 평균 또는 국소 입자침착속도와 같은 입자침착 특성에 미치는 효과를 자세히 기술한 체계적인 이론적 연구를 거의 찾아볼 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 진공환경하에서 수평으로 놓여져 있는 비가열 무정전 반도체 웨이퍼 표면으로의 대류,

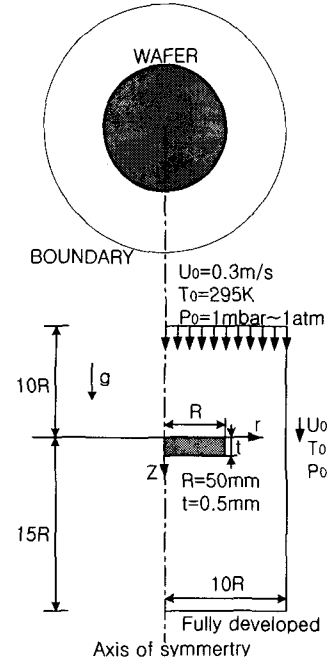


Fig. 1 Schematic diagram of the present calculation domain

브라운확산과 중력침강이 고려되는 입자침착특성에 대한 수치해석적 모사를 수행하였다. 참고로 본문중의 변수 및 상수, 물성치들은 모두 SI 시스템의 MKS 단위계로 계산되고 표시되었다.

2. 수치해석방법

2.1 계산 영역 및 조건

본 연구에서 고려한 계산영역은 전형적인 웨이퍼 배치형상인 자유롭게 떠있는 수평 웨이퍼의 경우로서 Fig. 1에 도시하였다. 수평 웨이퍼의 상부표면으로부터 웨이퍼 반경 R의 10배만큼 떨어진 계산영역의 상부유입구에서 온도 T_0 , 속도 U_0 로 유입되고 있는 가스 유동에는 입자들이 부유되어 있고 수평 웨이퍼는 주위공기와 동일한 T_0 의 온도로 유지되고 있다. 계산영역의 측면경계면은 그곳에서의 유체 속도성분이 상부유입유동의 조건, 즉 $u_z=U_0$, $u_r=0$ 을 회복할 수 있을 정도로 웨이퍼 반경의 10배만큼 충분히 멀리 위치되어 있고 하부경계면은 완전확립조건이 달성되도록 웨이퍼반경의 15배만큼 떨어져 있다.

해석에 고려된 가스 및 입자는 각각 공기와

PSL 입자이다. 수평 웨이퍼의 직경 $2R$ 은 100 mm, 두께 t 는 0.5 mm이다. 자유유동속도 U_0 는 0.3 m/s, 자유유동온도 T_0 와 웨이퍼의 온도는 모두 295 K이다. 시스템 압력(배경 압력)은 1 mbar (100 Pa)에서 1 atm (1.013×10^5 Pa)의 범위가 고려되었다.

2.2 진공에서의 가스의 성질

본 연구에서 가스는 이상기체법칙을 따른다고 가정한다. 진공환경에서의 가스의 밀도 ρ 와 평균 자유행로 λ , 분자점성계수 μ 는 각각 다음의 공식으로 산출하였다.⁽⁴⁾

$$\rho = \frac{MP_0}{RT_0}, \quad \lambda = \frac{k_B T_0}{\sqrt{2} \pi d^2 P_0}, \quad \mu = \frac{0.998 \sqrt{mk_B T_0}}{\pi^{3/2} d^2} \quad (1)$$

여기서, M 은 가스의 분자량(kg/mol), P_0 는 시스템 압력(Pa), R 은 기체상수(8.314 J/K-mol), T_0 는 자유유동온도(K), k_B 는 볼츠만상수(1.38×10^{-23} J/K), d 는 가스분자의 직경(m), m 은 가스분자의 질량(kg)이다. 공기의 경우 $M=28.97 \times 10^{-3}$ kg/mol, $d=3.72 \times 10^{-10}$ m, $m=4.81 \times 10^{-26}$ kg이다.

본 연구의 진공환경에 대한 가스 유동장이 연속체 특성영역인지를 검토하기 위하여 가장 낮은 시스템 압력인 $P_0=1$ mbar에 대한 유동 Knudsen 수 $Kn=\lambda/R$ 를 구해본 결과 $Kn=0.00132$ ($\ll 1$)가 얻어졌다. 따라서 본 연구의 진공환경에 대한 가스 유동장은 연속체 특성영역으로 간주되었다. 한편, 유동 Reynolds 수 $Re=2\rho U_0 R/\mu$ 는 자유유동속도가 $U_0=0.3$ m/s일 때 시스템압력 1 mbar에 대해 1.9, 1 atm에 대해 1900이 얻어졌다. 따라서, 가스 유동장은 층류로 간주되었다.

2.3 지배방정식 및 수치계산방법

본 연구의 계산영역 및 주어진 진공조건에 대해 정상상태 비압축성 축대칭 층류유동장에 대한 다음의 지배방정식을 고려하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu \frac{\partial u_r}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}\right) - \frac{\mu u_r}{r^2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu \frac{\partial u_z}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}\right) \quad (4)$$

여기서, u_r , u_z 는 각각 r , z 방향으로의 가스속도, p 는 압력, ρ 는 가스의 밀도, μ 는 가스의 분자점성계수이다. 수평웨이퍼 벽면에서의 유체속도는 점착조건(no slip condition)으로 지정하였다.

한편, 본 연구의 진공환경에서의 가스유동장에 대한 입자의 Stokes 수 $Stk = \tau_p U_0/R$ 가 가장 클 것으로 판단되는 10^4 nm(10 μ m) 입자의 시스템 압력 1 mbar에 대해 $Stk=0.042$ ($\ll 1$)가 얻어졌고 본 연구의 고려 입자크기영역 2 nm~ 10^4 nm(10 μ m) 전체에 걸쳐 유동장에 대한 입자의 관성력이 무시되었다. 따라서, 관성력을 무시한 회박입자상에 대한 오일러 관점에서의 축대칭 입자농도장의 지배방정식을 다음과 같이 고려하였다.⁽⁵⁾

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r^l c) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z^l c) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(rD_B \frac{\partial c}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_B \frac{\partial c}{\partial z}\right) \quad (5)$$

$$u_r^l = u_r, \quad u_z^l = u_z + \tau_p g \quad (6)$$

여기서, u_r^l , u_z^l 는 각각 r , z 방향으로의 입자속도, c 는 입자농도, D_B 는 입자의 브라운 확산계수, τ_p 는 입자이완시간, g 는 중력가속도이다. 수평웨이퍼 벽면에서의 입자농도는 차단(interception) 효과를 고려하여 입자의 반경위치에서 $c=0$ 을 지정하였다.

전술한 지배방정식 (2)~(6)의 유한체적법(FVM)에 의한 차분화에 대해 유체의 압력구배항은 Patankar⁽⁶⁾의 SIMPLE 알고리즘으로 해결하고 유체와 입자의 대류항들은 Power law scheme을 사용하여 처리하였으나, 입자농도장을 계산하는데 있어 입자의 속도장이 연속법칙을 만족하지 않으므로 Stratmann and Whitby⁽⁷⁾가 지적한대로 Patankar의 알고리즘을 보정하였다. 계산격자계는 180(axial) \times 110(radial)으로 구성된 엇물림 격자계(staggered grid system)이며, 이때 수평 웨이퍼 표면과 바로 이웃격자와의 간격을 5 μ m으로 설정하였고 이로부터 약 1.2의 공비를 유지시키면서 등비수열적으로 증가되도록 격자들을 배치하였다.

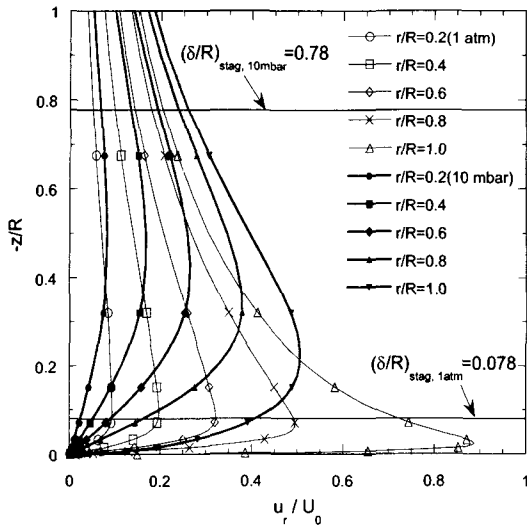


Fig. 2 Comparison of the near-wall distributions of the radial flow velocities on the upper surface of the wafer at low pressure with those at atmospheric pressure ($U_0=0.3$ m/s, $T_0=295$ K)

수렴조건은 유동장의 경우 질량 및 속도의 정규화된 잔류소스들의 합이 1×10^{-3} 이하일 때, 농도장의 경우 각 격자점에서의 이전값 및 신규값의 차이를 이전값으로 나눈 값이 모두 1×10^{-4} 이하일 때로 하였다. 격자시험 결과, 상기의 180(axial) \times 110(radial)의 경우와 양방향으로 각각 10개씩 충분한 경우가 서로 동일한 계산결과가 얻어졌다. 또한, 각 경계면들의 위치를 2R씩 증분한 경우도 Fig. 1의 계산영역에 대한 경우와 동일한 계산결과가 얻어짐을 확인하였다. 회박입자상에 기인한 일방향성(one way coupling)에 근거하여 가스의 유동장의 수렴된 결과를 입자 농도장에 대입하여 각각의 입자크기에 대한 입자침착속도를 구하였다.

수치해석방법은 근본적으로 대기압(ambient pressure) 환경에 놓인 수평 웨이퍼의 경우인 Yoo et al.⁽⁵⁾의 수치해석방법과 동일하므로 관련 내용들을 참조할 수 있다.

3. 계산 결과 및 검토

3.1 유동장

Fig. 2는 대기압(1 atm) 및 저압(10 mbar) 환경에서의 수평 웨이퍼 상부표면상의 가스 유동장의

반경방향 속도분포를 여러가지 반경위치에 대해 보여주고 있다. 그림으로부터 시스템 압력이 감소하면 가스 유동장의 속도경계층이 더 두꺼워짐을 알 수 있다. 이는 시스템 압력의 감소로 인해 가스의 밀도가 감소하여 가스의 관성력에 비해 점성력의 상대적인 증가에 기인한 것이다. 또한 대기압인 1 atm과 저압인 10 mbar의 경우에 대한 속도경계층들이 모두 웨이퍼의 유한성에 기인한 가속효과로 인해 원판의 중심부에서 모서리영역으로 갈수록 속도경계층이 벽면에 더욱더 밀착되고 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 2에는 Von Karman⁽⁸⁾이 무한원판상의 정체점 유동에 대해 해석적으로 유도한 균일 경계층의 두께 $(\delta/R)_{stag} =$

$$\frac{2.759}{R} \sqrt{\frac{\mu}{2\rho a}}$$

도 함께 도시되어 있다. 여기서, a 는 유동장도로서 $a = \frac{2U_0}{\pi R}$ ⁽⁹⁾이다. 정체점 유동의 속도 경계층의 두께 $(\delta/R)_{stag}$ 는 대기압의 경우 0.078, 10 mbar의 경우 0.78이 얻어진다. 본 연구의 수치 해석으로부터 구한 속도경계층의 두께인 벽면으로부터 최대 반경방향 속도지점까지의 거리와 비교해 보면 대기압의 경우 모서리 지점인 $r/R=1.0$ 의 경우를 제외하고는 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나, 시스템압력이 저압인 10 mbar가 되면 정체점 유동의 속도경계층의 두께가 본 수치해석의 것보다 훨씬 더 두꺼워져서 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 10 mbar 이하의 저압이 되면 무한원판에 근거한 정체점 유동의 기본가정인 $(\delta/R)_{stag} \ll 1$ 에 위배되기 때문이다.

3.2 평균 입자침착속도

Fig. 3은 시스템 압력이 대기압인 1 atm과 저압인 100 mbar, 10 mbar, 1 mbar일 때 입자크기에 따른 수평 웨이퍼 상부표면상의 평균 입자침착속도의 변화를 보여주고 있다. 그림으로부터 시스템 압력이 감소함에 따라 2 nm에서 10^4 nm의 입자크기영역 전체에 걸쳐 'V'형 입자침착속도 특성곡선을 유지하면서 침착속도곡선의 최소점의 입자크기는 점점 작아지고 침착속도는 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 침착속도의 증가는 시스템 압력이 감소함에 따라 입자에 대한 가스의 저항력인 스톡스 항력의 감소에 따른 입자의 기계적 유동율(mechanical mobility)의 증가에 기인한 것이다. 한가지 주목할 것은 입자침착속도 곡

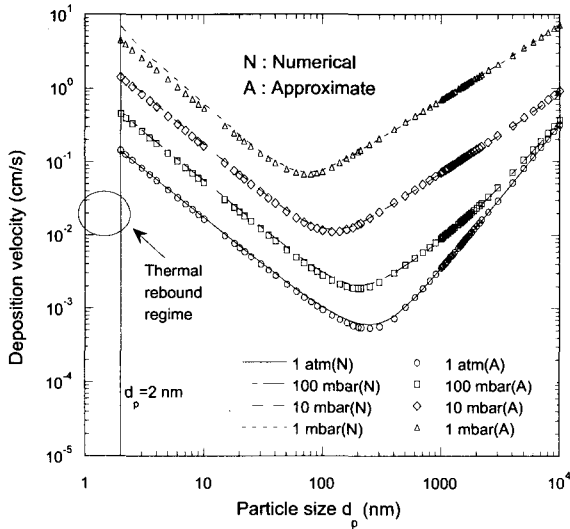


Fig. 3 Variations of the averaged upper deposition velocities with respect to system pressure ($U_0=0.3\text{m/s}$, $T_0=295\text{ K}$)

선상의 최소정점보다 작은 입자크기영역인 확산이 지배적인 입자크기영역에서 시스템 압력이 감소함에 따라 입자침착속도가 오히려 증가했다는 점이다. 이는 확산이 지배적일 경우 유체의 속도 경계층의 영향을 받게 되는데 Fig. 2에서 가스 유동장의 관찰로부터 시스템 압력의 감소에 따른 경계층 두께의 증가로 인한 입자침착량의 감소라는 예상과는 상반되는 것이다. 이러한 결과는 이 입자크기영역에서 시스템 압력이 감소함에 따라 기체의 항력의 감소, 이로 인한 입자의 기계적 유동율의 증가에 따른 브라운 확산계수의 증가율이 경계층 두께의 증가로 인한 농도구배의 감소율을 압도했기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 그림에 도시된 2 nm 이하의 열적 리바운드 특성영역(thermal rebound regime)을 고려하지 않은 것은 이 특성영역에서는 입자의 부착확률(sticking probability)이 1보다 작기 때문에⁽¹⁰⁾ 본 연구의 웨이퍼 표면의 경계조건인 $c=0$ 의 가정이 성립되지 않기 때문이다. 그림에는 Yoo et al.⁽⁵⁾이 제안한 다음의 입자침착속도 근사모델의 계산결과도 함께 도시되어 있다.

$$V_{dep} = \frac{V_{se}}{1 - \exp(-V_{se}/V_{df})} \quad (7)$$

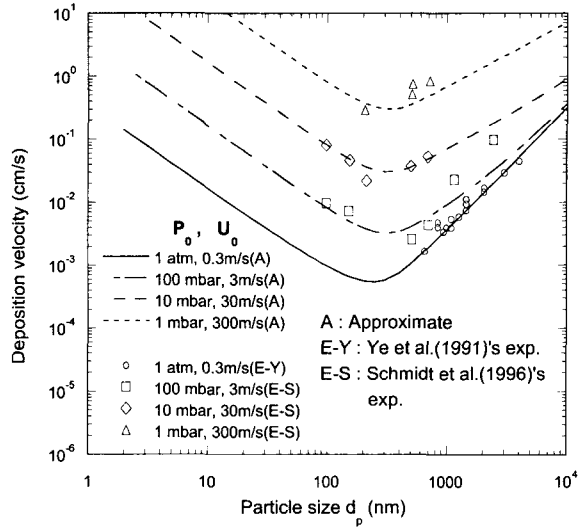


Fig. 4 Comparison of the approximate results with the experimental data ($T_0=295\text{ K}$)

여기서, $V_{se} = \tau_p g$, $V_{df} = \frac{D_B}{2R} \overline{\text{Sh}}$ 이고 $\overline{\text{Sh}} = 1.08\text{Re}^{1/2}\text{Sc}^{1/3}$ 이다. 그림으로부터 수치해석 계산결과들과 침착속도 근사모델의 계산결과들은 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 침착속도 근사모델의 계산결과들과 이와 동일한 조건에 수행된 기존의 실험결과들과의 비교를 보여주고 있다. Ye et al.⁽¹¹⁾의 실험결과는 대기압 1 atm에 대한 경우이고 Schmidt et al.⁽³⁾의 실험결과는 저압 환경 1 mbar에서 100mbar에 대한 경우이다. 근사모델의 계산결과들은 100 mbar, 3 m/s의 경우 2500 nm 근처의 입자크기에서의 약 200%의 차이를 제외하면 전체적으로 약 100% 이내에서 실험결과들과 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구의 수치해석 계산결과들과 실험결과들의 일치도 확인시켜주는 것이다.

3.3 국소 입자침착속도

Fig. 5와 6은 각각 대기압과 저압 1 mbar의 경우에 대한 입자크기별 웨이퍼 상부표면상의 국소 침착속도 분포를 보여주고 있다. Fig. 5와 Fig. 6로부터 시스템 압력이 감소하면 모든 입자크기에 대해 상부표면상에서 침착속도가 국소적으로 증가되었음을 알 수 있다. 또한, 두 경우 모두 100 nm 이하의 입자크기영역에서 웨이퍼의 중심부에

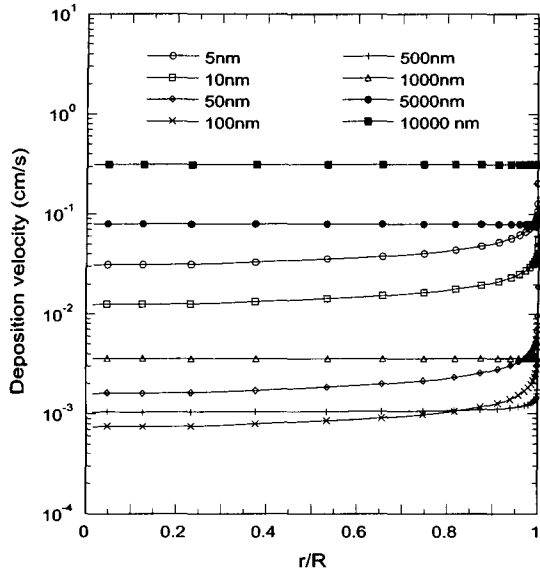


Fig. 5 Variations of the local upper deposition velocity profiles with respect to particle size ($P_0=1$ atm, $U_0=0.3$ m/s, $T_0=295$ K)

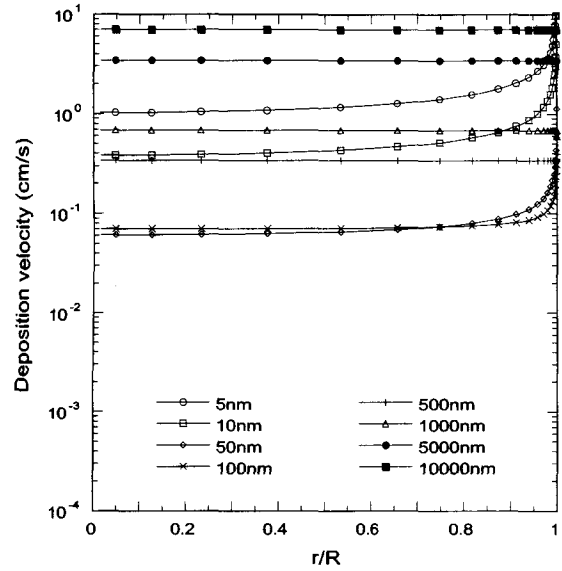


Fig. 6 Variations of the local upper deposition velocity profiles with respect to particle size ($P_0=1$ mbar, $U_0=0.3$ m/s, $T_0=295$ K)

서 가장자리로 갈수록 침착속도가 크게 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 가장자리 부근에서는 가스의 급격한 유로변경에 의한 가속효과에 의해 침착속도가 급격하게 증가하기 때문이다.

4. 결론

1 atm~1 mbar, 295 K의 진공환경에서 수평으로 놓여져 있는 반도체 웨이퍼상의 가스 유동장 및 2 nm~10⁴ nm의 입자크기범위에 대한 입자침착 문제를 수치해석을 통하여 고찰하고 계산된 결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구의 입자침착속도에 대한 수치해석 결과는 근사모델의 계산결과와 잘 일치하였고, 또한 근사모델의 계산결과는 기존의 실험결과와 전체적으로 약 100% 이내에서 일치함을 확인하였다.

(2) 시스템 압력이 감소하면 웨이퍼 상부표면상의 가스 유동장의 경계층은 두꺼워지나 입자침착속도는 전체 입자크기 영역에 걸쳐서 증가됨을 알 수 있었다.

(3) 특히, 확산이 지배적인 입자크기 영역에서 가스 유동장의 경계층 두께는 증가된 반면에 입

자침착속도가 증가한 것은 기계적 유동율의 증가로 인한 브라운 확산의 증가율이 경계층 두께의 증가로 인한 입자침착 감소율을 압도했기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 시스템 압력이 감소하면 모든 입자크기에 대해 웨이퍼 상부표면상의 국소 입자침착속도가 증가되고 100 nm 이하의 입자크기에 대해 가장자리로 갈수록 크게 증가됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원에서 시행한 생산기술연구사업의 주요목적과제 “나노시뮬레이션 기반기술 개발”의 일환으로 수행되었으며 관계자 들께 감사드린다.

참고문헌

- (1) Nakamae, K., Ohmori, H. and Fujioka, H., 2000, "A Simple VLSI Spherical Particle-Induced Fault Simulator: Application to DRAM Production Process," *Microelectronics Reliability*, Vol. 40, pp.

- 245~253.
- (2) Setyawan, H., Shimada, M., Ohtsuka, O. and Okuyama, K., 2002, "Visualization and Numerical Simulation of Fine Particle Transport in a Low-Pressure Parallel Plate Chemical Vapor Deposition Reactor," *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, pp. 497~506.
- (3) Schmidt, F., Fissan, H. and Schmidt, K.G., 1996, "Transport of Submicron Particles from a Leak to a Perpendicular Surface in a Chamber at Reduced Pressure," *J. Aerosol Science*, Vol. 27, pp. 739~750.
- (4) Roth, A., 1976, *Vacuum Technology*, North-Holland Publishing Co., New York.
- (5) Yoo, K.H., Oh, M.D. and Myong, H.K., 1995, "Analysis of Particle Deposition onto a Heated or Cooled, Horizontal Free-Standing Wafer Surface," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 19, No. 5, pp. 1319~1332.
- (6) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill, New York.
- (7) Stratmann, F. and Whitby, E.R., 1989, "Numerical Solution of Aerosol Dynamics for Simultaneous Convection, Diffusion and External Forces", *J. Aerosol Science*, Vol. 20, pp. 437-440.
- (8) Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, McGraw Hill, New York, pp. 102-107.
- (9) Tsai, R., Chang, Y.P. and Lin, T.Y., 1998, "Combined Effects of Thermophoresis and Electrophoresis on Particle Deposition onto a Wafer," *J. Aerosol Science*, Vol. 29, pp. 811~825.
- (10) Ichitsubo, H., Hashimoto, T., Alonso, M. and Kousaka, Y., 1996, "Penetration of Ultrafine Particles and Ion Clusters through Wire Screens," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 24, pp. 119~127.
- (11) Ye, Y., Pui, D.Y.H., Liu, B.Y.H., Opiolka, S., Blumhorst, S. and Fissan, H., 1991, "Thermophoretic Effect of Particle Deposition on a Free Standing Semiconductor Wafer in a Clean Room," *J. Aerosol Science*, Vol. 22, pp. 63~72.