

정전효과를 고려한 반도체 웨이퍼의 입자침착 특성

이 건 형, 채 승 기, 문 영 준*

삼성전자(주), *고려대학교 기계공학과

Particle Deposition Characteristics with Electrostatic Effect on Semiconductor Wafers

Kun Hyung Lee, Seung Ki Chae, Young June Moon**

ABSTRACT: Particle transport and deposition characteristics on semiconductor wafers inside the chamber were experimentally investigated via a particle generation & deposition system and a wafer surface scanner. Especially the relation between particle size(0.083~0.495 μ m) and particle deposition velocity with ESA(Electrostatic Attraction) effect was studied. Spot deposition technique with the deposition system using nozzle type outlets of the chamber was newly conducted to derive particle deposition velocity and all experiment results were compared with the previous study and were in a good agreement as well.

Key words: Particle(입자), ESA(정전효과에 의한 부착), Deposition Velocity(침착 속도), Semiconductor Chamber(반도체 챔버), Slip Correction Factor(미끄럼 보정계수)

기 호 설 명

그리스 문자

- C_c : Slip Correction Factor(Cunningham)
- D_L : Deposition range(직경) [cm]
- D_w : 웨이퍼 직경 [mm]
- E : 전기장 강도 [V/m]
- d_p : 입자 직경 [μ m]
- g : 중력가속도 [m/s^2]
- L : 웨이퍼와 노즐과의 간격 [cm]
- k : Boltzmann's constant
- Re : Reynolds 수, uD_w/ν
- Sc : Schmidt 수, ν/D
- q : 입자 전하 [C]
- T : 절대 온도, [Kelvin]
- u, v : 유체 속도, 입자 침착 속도 [cm/s]

- μ : Gas viscosity [Pa/S]
- ν : 동점성 계수
- ρ_{pc} : 입자 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

반도체 디바이스의 집적도가 증가하고 회로 선 폭이 감소할수록 미세 오염에 의한 디바이스의 전기적 특성 저하 문제가 심각해진다. 현재 DRAM의 최소 선폭 크기를 90nm로 볼 때, 킬링(killing) 입자 크기가 최소 선폭 크기의 1/3임을 감안하면 제어해야 할 최소 입자 크기는 30nm 이상이 되어야 한다.⁽¹⁾ 또한 2000년을 전후하여 전 세계적으로 생산 웨이퍼 직경이 200mm에서 300mm로 점차 전환되고 있으며 2005년 ITRS 컨퍼런스 결과에 의하면 2012년 32nm 450mm 웨이퍼 공정이 등장할 것을 예상하고 있어 이는 조만간 10~15nm 미세 오염물질까지 제어하는 시대

†Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3358; fax: +82-2-926-9290

E-mail address: yjmoon@korea.ac.kr

가 곧 도래하고 있음을 알려준다.⁽²⁾

그동안 입자 침착에 의한 문제를 최소화하기 위해 웨이퍼 표면상의 입자 전달 및 침착 메커니즘 해석에 관한 많은 연구들이 진행되어져 왔다. 웨이퍼상의 입자 침착은 중력침강(Sedimentation), 대류(Convection), 확산(Diffusion), 열영동(Thermophoresis), 정전기(Electrostatic) 등의 메커니즘이 복합적으로 작용하여 이루어진다.⁽³⁾

지금까지의 연구는 주로 200mm(웨이퍼 직경) 이하의 클린룸 컨셉 즉, 웨이퍼가 클린룸에서 노출되는 조건에서의 입자 침착이 연구되었다. 그러나 300mm 웨이퍼 공정에서는 클린룸이 아닌 국부 청정장치(mini-environment), EFEM(Equipment Front End Module), FOUP(Front Opening Unified Pod) 그리고 프로세스 챔버 내에서의 입자 거동 해석 및 제어가 더욱 중요해진다. 또한 제어 대상 입자 크기가 nm 영역대로 접어들어 따라 정전효과에 의한 거동 연구가 더욱 필요하게 된다. 특히 플라즈마, 진공을 사용하는 반도체 공정 설비에 ESC(Electro Static Chuck)를 사용하고 있어 프로세스 챔버내 하전된 웨이퍼 주변의 전기장과 서브 마이크론 입자의 침착량 증가 현상이 세밀히 고찰되어야 한다. 이에 본 논문에서는 정전 효과를 고려한 챔버내에서의 미세입자 크기와 침착 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 입자침착 근사모델

Particle flux(J)는 단위시간에 단위면적을 통과하는 particle 수로 정의된다. 미세입자의 거동 및 침착 현상은 분자들의 불규칙 충돌로 인해 발생하는 확산 외에 입자에 작용하는 여러 외력(External force)에 의해 좌우된다. Friedlander(1977)는 확산, 유체의 유동, 외력을 모두 포함한 particle flux(J)를 Fick's 1st Law를 수정하여 (1)과 같이 나타내었다.⁽⁴⁾

$$\vec{J} = -D\nabla c + \vec{u}c + \vec{v}_{external}c \quad (1)$$

여기서 D 는 확산계수($= \frac{kTC_c}{3\pi\mu d_p}$)를 말하며, c 는 입자 농도, \vec{u} 는 유체의 속도, $\vec{v}_{external}$ 는 외력에 의한 입자의 속도를 의미한다.

Particle flux(J)를 입자의 농도로 나누면 속도의 차원을 갖게 된다. 일반적으로 particle flux를 입자의 농도로 나눌 경우 공간상 입자가 이동하는 속도를 의미하나, 웨이퍼의 입자 침착에 적용할 경우는 입자 침착 속도(v_d)로 해석된다.

$$v_d = \vec{J}/c \quad (2)$$

금번 연구에서는 대류, 확산, 중력, 정전기력만을 고려하였다. 기존의 연구로부터 잘 알려져 있는 각각의 속도항을 나열하면 다음과 같다.

$$v_{conv, diff} = 1.05 Sc^{1/3} Re^{1/2} D/D_w \quad (3)$$

$$v_s = \rho_p c d_p^2 g C_c / 18\mu \quad (4)$$

$$v_e = qEC_c / 3\pi\mu d_p \quad (5)$$

여기서 $v_{conv, diff}$ 는 Sparrow & Geiger(1985)의 나프탈렌 승화 실험에 근거하여 질량 전달계수(mass transfer coefficient)의 상관 관계식으로부터 예측한 대류, 확산에 의한 평균 입자 침착속도⁽⁶⁾이며, v_s , v_e 는 각각 중력 침강, 정전기력에 의한 입자 침착속도로 스톡스의 항력법칙과 힘의 평형으로부터 구한 값이다.⁽⁵⁾

Liu & Ahn(1987)은 평균 입자 침착속도를 각각의 속도항의 산술 합으로 계산하였다.⁽⁶⁾ 이후 여러 연구자들이 농도 경계층내 확산 방정식의 해를 이용하여 산술 합이 아닌 정확한 입자 침착속도를 구하였으나⁽⁷⁾ 실제 근사해와 크게 차이가 나지 않으므로 금번 연구에서는 속도항의 산술합($v_d = v_{conv, diff} + v_s + v_e$)을 사용하였다.

3. 실험장치

웨이퍼가 클린룸 ambient air에 노출되는 것이 아닌 밀폐된 챔버내에서의 조건으로 실험장치를 구성하였다. 원래 증착 프로세스 챔버는 웨이퍼에 원하는 막질을 증착시키는 기능이나, 입자 거동 해석상에서 볼 때 챔버는 입자를 웨이퍼에 부착시키는 particle deposition system이라 할 수 있다.

실험에 사용된 챔버는 입자 발생 파트와 입자 부착파트로 구성되며 하나의 모듈로 이루어진다. (Backbone: MSP 2300, Fig. 1)

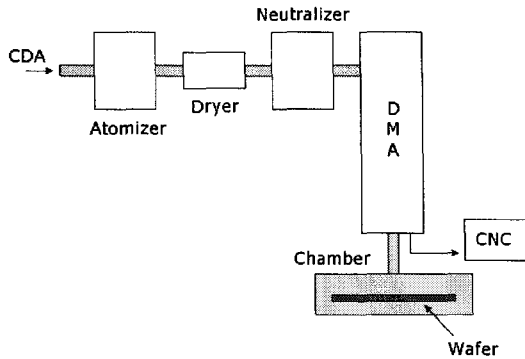


Fig. 1 Schematic diagram of particle generation & deposition system.

3.1 입자 발생 파트

실험에 사용된 입자는 PSL(Polystyrene Latex)이다. PSL은 단분산(mono-disperse)으로 알려져 있다. PSL을 초순수(비저항 $>18.0M\Omega.cm$)와 혼합시켜 atomizer에 넣고 CDA(Clean Dry Air)를 공급시키면 atomizer내에서 bubbling이 발생되면서 입자는 관을 따라 dryer, neutralizer를 거쳐 DMA(Differential Mobility Analyzer)로 전달된다. Dryer는 입자 표면의 수분을 제거시키며 neutralizer는 입자를 중성화시킨다. DMA에서는 원하는 동일한 크기의 입자를 다시 정확히 분리시키며 DMA를 통과한 입자는 -1가의 전자(electron)를 지니게 된다. DMA에서 나온 입자는 두 갈래의 관을 통해 이동경로가 나뉘며 하나의 경로는 입자 계수(CNC(Condensation Nucleus Counter)에 사용되며 다른 경로는 입자 부착 파트로 이동된다.(Fig. 1)

3.2 입자 부착 파트

입자 발생 장치로부터 이동된 입자는 shower head/nozzle을 통해 웨이퍼 상부에 부착된다. 금번 실험에 사용된 웨이퍼 직경은 200mm이다. 웨이퍼는 웨이퍼 스테이지 상단에 놓이며, 스테이지는 전압을 인가할 수 있도록 구성된다. 금번 실험에는 0V~5000V 전압을 스테이지(웨이퍼)에 인가하였을 경우 입자 침착에 대한 연구를 수행하였다.(Fig. 2)

3.3 Wafer Surface Scanner

입자 침착속도를 구하는 실험적 연구에서 웨이퍼상의 입자 측정 기술은 매우 중요하다. Ye et al.(1991), Bae et al.(1993)⁽³⁾은 wafer surface scanner를 이용하여 기존 연구들에서 발생하였던 문제점(긴 노출시간에 따른 입자 발생장치로부터의 농도변화)을 해결하였다. 금번 연구에서는 KLA-Tencor SP1을 사용하였으며 ISO Class 2(1 입방미터 체적내 0.1 μm 입자가 10개 미만인 청정 공간)의 클린룸에서 계측을 수행하였다.

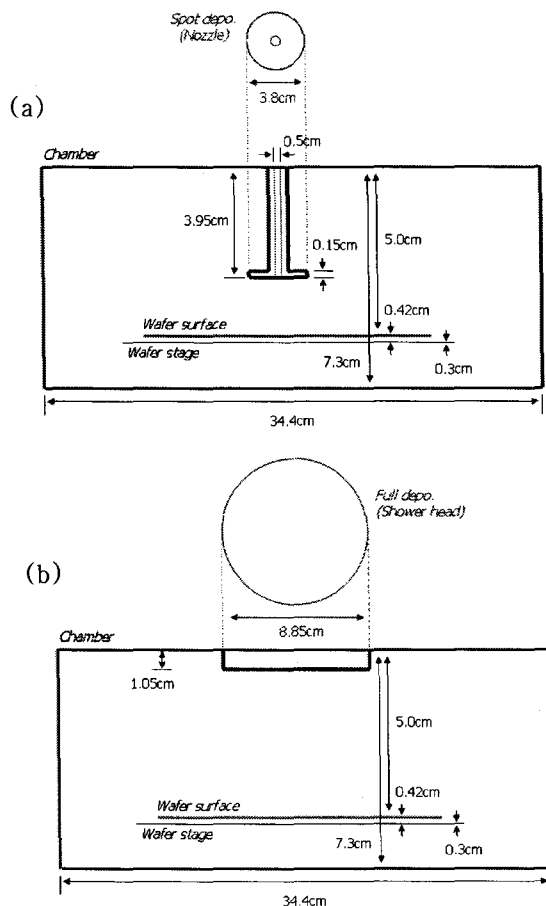


Fig. 2 Configuration of (a) nozzle type (b) shower-head type chamber

4. 실험결과 및 고찰

실험의 정확도를 높이기 위해 기존의 연구에서 지적한 입자 발생장치의 농도 변화를 확인하였다.

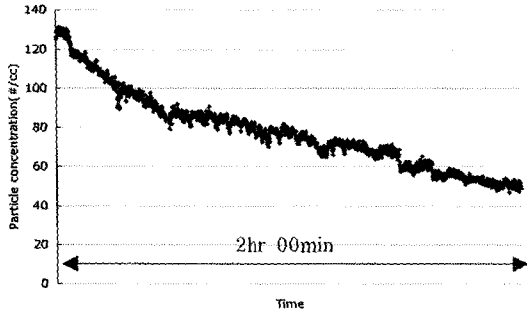


Fig. 3 Particle concentration through DMA (0.36 μ m)

Fig. 3는 DMA를 통과한 입자(0.36 μ m)의 수를 입자계수기(CNC)를 이용하여 실시간 측정된 결과를 보여준다. 장시간 경과에 따른 농도 변화가 실제 존재함을 확인할 수 있다.(다른 크기의 입자(0.1 μ m, 0.15 μ m, 0.2 μ m)로 실험한 결과, 입자 크기 별로 기울기의 차이는 있었지만 농도가 떨어지는 현상은 동일하게 나타남) 농도 변화에 따른 해석의 오류를 방지하기 위해 DMA를 통과한 입자의 계수는 실시간(5sec 간격)으로 측정하여 최종적인 DMA 통과 입자 농도를 총 측정값의 산술 평균값으로 취하였다.

4.1 Shower head type 챔버내 입자 침착 (대류, 확산 및 정전효과에 의한 입자 침착)

대류, 확산 효과만을 고려한 입자 침착은 웨이퍼에 charge를 가하지 않는 조건(0V)에서, 정전 효과까지 고려한 입자 침착은 웨이퍼에 5000V의 charge를 가하여 실험을 수행하였다. 입자 침착 시간은 charge 조건과 상관없이 동일하게 주었다. 또한 입자 크기에 따른 입자 침착 특성을 확인하기 위해 대상 입자를 0.083 μ m, 0.1 μ m, 0.15 μ m, 0.2 μ m, 0.3 μ m, 0.495 μ m으로 선정하여 웨이퍼에 침착된 형태를 확인하였다.(Fig. 4, Fig. 5) 실험 결과 0V charge 웨이퍼(대류, 확산)는 입자 침착이 매우 적으며(50개 미만) 반면 5000V charge 웨이퍼(대류, 확산, 정전)는 입자가 상대적으로 많이 침착됨을 알 수 있다.(2500~12000개)

특이한 점으로 정전 효과(5000V)가 고려된 입자 침착의 경우 웨이퍼 전면에 입자가 침착 되었지만 작은 입자의 침착에서 웨이퍼 중앙에 입자가 몰려 있음을 확인할 수 있다.

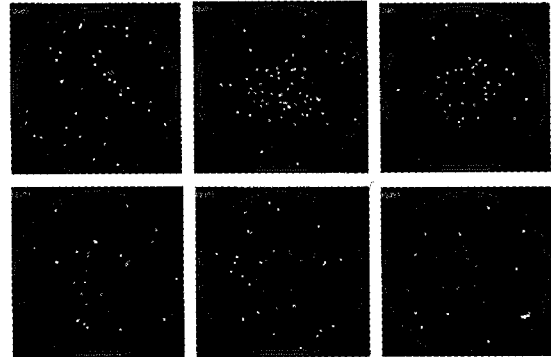


Fig. 4 Particle deposition on wafers (shower head, 0V) 0.083 μ m, 0.1 μ m, 0.15 μ m, 0.2 μ m, 0.3 μ m, 0.495 μ m(from top left)

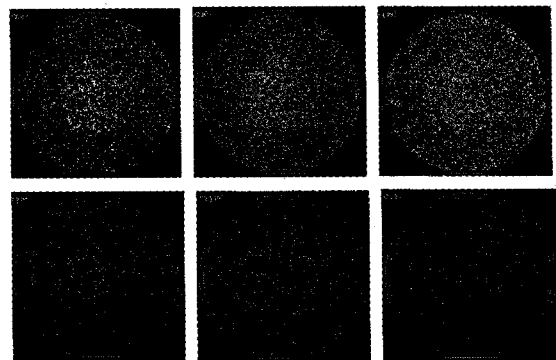


Fig. 5 Particle deposition on wafers (shower head, 5000V) 0.083 μ m, 0.1 μ m, 0.15 μ m, 0.2 μ m, 0.3 μ m, 0.495 μ m(from top left)

0.083 μ m 입자 침착 map에서 입자가 중앙에 몰려있는 정도에 비해 0.1 μ m 입자 침착의 경우 웨이퍼 중앙에 몰려 있는 정도가 커지며 0.2, 0.3 μ m 이상의 입자 침착의 경우에는 웨이퍼 중앙에 입자가 몰려있는 현상없이 전체적으로 침착되어 있음을 알 수 있다. 이는 정전 효과 고려시 입자의 크기와 웨이퍼의 입자 침착 범위에는 어떠한 상관성이 존재하고 있음을 보여주는 결과이다.

4.2 Nozzle type 챔버내 입자 침착

Nozzle type 챔버는 실험 장치 구성상 챔버 내에서 입자 토출구가 웨이퍼에 가까이 위치($L=3.3\text{cm}$)하며 nozzle의 위치 또한 웨이퍼 중심에서 edge 방향으로 shift(5.3cm) 되어 있어 웨이퍼

에 정전기가 charge되어 있을 경우 한 장의 웨이퍼에 여러 point 침착시킬 수 있는 장점이 있다. 이를 통해 입자의 크기와 웨이퍼의 입자 침착 범위의 상관성을 좀 더 자세히 관찰할 수 있다.

4.2.1 웨이퍼 침착 적정 입자수 결정

웨이퍼에 부착된 입자 수가 너무 적을 경우 입자 침착 범위와 모양을 정확히 판단할 수 없어 입자 침착 수와 침착 모양을 먼저 확인하였다. 그 결과 입자 침착 수가 4000개 이상이면 완전한 원의 모양을 보이며, nozzle 통과 공기의 유속이 변하지 않을 경우 침착 수가 증가에 따른 침착 범위와 모양에는 변화가 없음을 확인하였다.

4.2.2 입자 크기에 따른 웨이퍼 입자 침착 범위

국부적으로 입자 침착이 가능한 실험장치의 장점을 이용하여 웨이퍼당 4개 부분에 각각 입자 침착을 수행하였다.(Fig. 6) 실험은 동일한 조건에서 입자의 크기만 달리 주어 수행하였다.

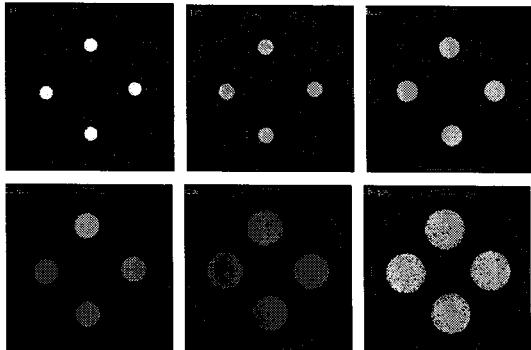


Fig. 6 Particle deposition range on wafers (nozzle, 5000V, L=1.4cm) 0.083 μ m, 0.1 μ m, 0.15 μ m, 0.2 μ m, 0.3 μ m, 0.36 μ m(from top left)

실험 결과에서부터 입자의 크기가 작을수록 웨이퍼에 침착되는 범위가 작아짐을 알 수 있다. 이는 Shower head type 챔버의 실험에서 입자의 크기에 따라 입자의 침착 범위가 커지는 현상을 명확하게 보여주는 결과이다.(Fig. 6, Fig. 7)

4.2.3 Particle deposition velocity

입자 침착속도는 입자의 침착량 및 침착 특성을 구별 짓는 중요 물리량이다. 이러한 입자 침

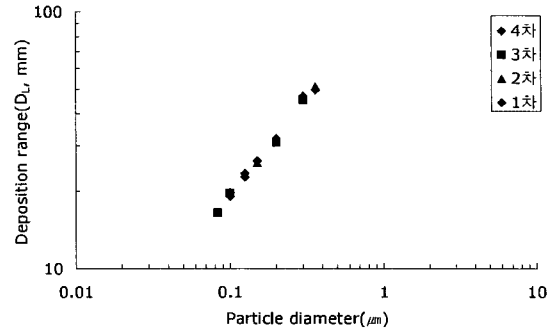


Fig. 7 Particle size versus deposition range (5000V, L=1.4cm)

착속도를 구하는 방법은 침착 실험 결과치(웨이퍼에 부착된 입자 수, 침착 시간, 입자 농도, 침착면적)로부터 구하는 방법과 실험 조건을 근사 모델식에 넣어 approximate deposition velocity를 구하는 방법이 있다.

침착 실험 결과로부터 구하는 방법은 식 (2)에 언급되었으며 이를 웨이퍼 침착해석에 적용하면 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$v_d = N_w / ctA_w \quad (6)$$

where $J = N_w / tA_w$

여기서 N_w 는 웨이퍼 침착 입자 수, t 는 입자 침착시간, A_w 는 입자 침착 면적을 의미한다. 웨이퍼 침착 입자 수는 wafer surface scanner를 이용하여 웨이퍼 침착 전, 후 입자 수의 차(difference)를 이용하여 구하였다. 기존의 실험연구 (free standing condition)에서는 입자 침착속도를 결정할 때 A_w 를 웨이퍼 면적으로 하였으나, 금번 연구에서는 A_w 가 변하므로 입자의 국부 침착 면적을 이용한 $\pi D_L^2 / 4$ 로 하였다. 한편 입자 침착 근사모델을 이용할 경우 실험 조건값을 모델식(3, 4, 5)에 넣어 침착 속도를 계산하며 금번 연구에 사용된 계산 parameters는 Table 1과 같다.

Table 1 Particle deposition velocity calculation parameters

Item	Value	Unit	Remarks
k	1.38E-23	J/K	

T	296	K	23°C
μ	0.0000183	Pa/S	
ν	0.0000157	m ² /s	
D_w	0.2	m	
Q	0.0000035	m ³ /s	0.21lpm
D_n	0.005	m	
u	0.178254	m/s	
L	0.014 or 0.033	m	
q	1.6E-19	C	
ρ_{pc}	1027	kg/m ³	PSL
g	9.8	m/s ²	

여기서 Q 는 nozzle를 통과하는 air의 풍량, D_n 은 nozzle 내경, u 는 nozzle 통과 풍속으로 $v = Q(\frac{\pi}{4} D_n^2)$ 으로부터 계산하였다.

A. 동일 웨이퍼에 다른 크기의 입자 침착

국부 입자 침착이 가능한 실험장치의 장점을 이용하여 동일 웨이퍼에 다른 크기의 입자를 침착시켰다.(0.1 μ m, 0.125 μ m, 0.15 μ m, 0.2 μ m, 0.36 μ m)

Table 2 Experiment data

항목	단위	0.1 μ m	0.125 μ m	0.15 μ m	0.2 μ m	0.36 μ m
c	ea/cm ³	49.5	78.9	33.6	44.9	104.2
t	sec	45	28	70	51	25
N_w	ea	5498	4919	6638	6005	5574
D_L	cm	1.96	2.16	2.58	3.04	4.95
v_d	cm/sec	0.8191	0.6049	0.5410	0.3610	0.1113

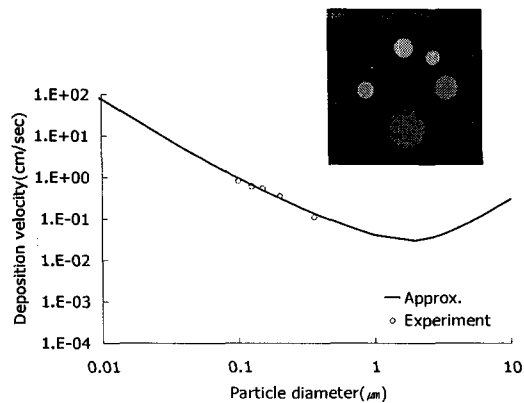


Fig. 8 Deposition velocity of various particle size on a wafer(Experi. vs approx.)
- 5000V, L=1.4cm

Table 2는 실험으로부터 구한 결과치와 입자 침착속도를 나타내며, Fig. 8은 실험 결과치로부터 구한 입자 침착속도와 근사 모델식으로부터 구한 입자 침착속도를 보여주고 있다. Fig. 8의 우측 상부 웨이퍼 map은 동일 웨이퍼에 여러 입자 크기를 침착시킨 map이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

B. 웨이퍼 & nozzle 간격(높이)에 따른 입자 침착

입자의 침착 속도는 전기장 세기와 밀접한 관계를 가진다. 그리고 전기장의 세기는 웨이퍼(스테이지)와 nozzle의 간격에 반비례한다. 이에 웨이퍼와 nozzle 간격에 따른 정전 효과를 고려한 입자 크기별 침착 속도를 확인하였다.

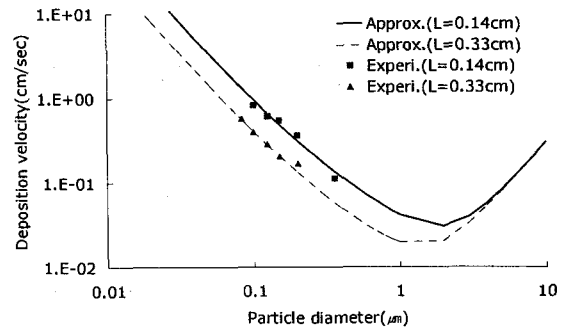
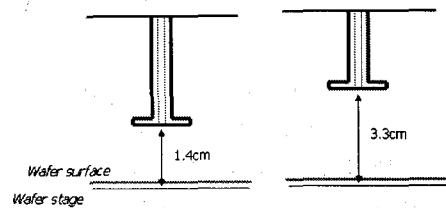


Fig. 9 Different particle size deposition velocity due to the distance(L) between wafer and nozzle(Experi. vs approx.)
- 5000V

웨이퍼와 nozzle의 간격이 멀어지면 전기장의 세기가 작아지며 입자의 웨이퍼 침착범위(D_L)가 커지게 된다. (6)에서부터 침착범위가 커지면 그에 따라 입자 침착속도가 작아짐을 알 수 있다. Fig. 9는 실험 결과치와 근사 모델식의 결과가 매우 잘 일치함을 보여준다.

C. 웨이퍼 정전기 charge량에 따른 입자 침착

전기장의 세기는 웨이퍼(스테이지)와 nozzle의 간격뿐 아니라 웨이퍼에 charge되는 electrical potential에 의해 좌우된다. 이에 웨이퍼에 charge량을 달리 주어(2000V, 3000V, 4000V, 5000V) 입자 침착 속도를 확인하였다.

실험 결과 웨이퍼에 charge된 voltage가 클수록 그리고 입자의 크기가 작을수록 입자의 침착 범위가 작아짐을 확인 할 수 있었다.

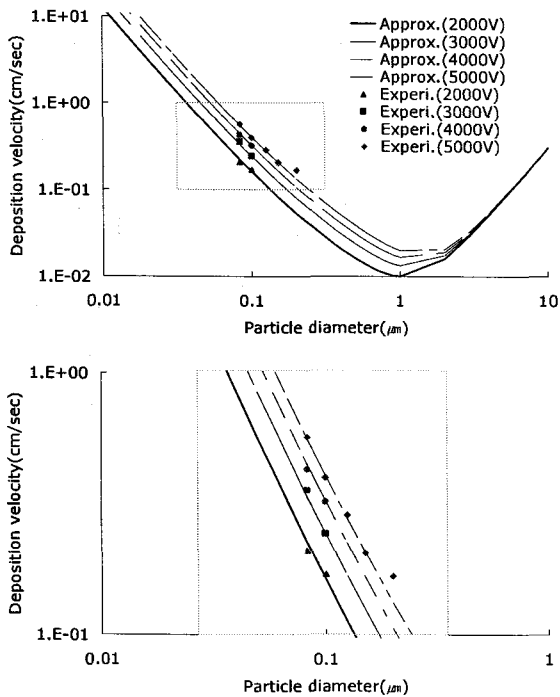


Fig. 10 Different particle size deposition velocity due to the electrical potential(Experi. vs approx.)
- L=3.3cm

Fig. 10에서도 실험 결과치와 근사 모델식의 결과가 매우 잘 일치함을 보여준다.

5. 결론

(1) 국부 침착 방법을 시도하여 1매의 웨이퍼에 정전 효과를 고려한 여러 크기의 입자 침착 속도를 한꺼번에 구할 수 있었다.

(2) 챔버내 웨이퍼 입자 침착은 대류, 확산 효과만 고려된 경우에 비해 정전효과가 존재할 경

우 입자 침착량이 증가하며, 전기장의 세기에 따라 입자 침착 속도 및 침착 범위가 달라진다.(전기장 세기 ↑, 입자 침착 속도 ↑, 침착 범위 ↓)

(3) 동일한 전기장 세기내에서는 입자 크기가 작을수록 입자 침착 범위가 작아진다. 이는 동일한 전기장 세기내에서 입자의 크기가 작아지면 입자 침착 속도가 커지게 되며($v_e = qEC_e/3\pi\mu d_p$) particle flux($v_d = J/c = N_w/ctA_w$)의 정의와 실험결과(4.2.1)에서부터 - nozzle 토출 풍속이 일정할 경우 입자농도, 침착시간, 침착 입자수가 입자 침착범위(D_L or A_w)에 영향을 주지 않음 - 입자 침착속도 ↑ = 입자 침착 범위 ↓을 알 수 있다.

참고문헌

1. Chae, S. K., Sun, J. J., Liu, B. Y. H. and Yoo, S. H., 1999, Particulate Contamination in the Next Generation Fab, Future Fab International, Vol. 6, pp. 229-237.
2. International Technology Roadmap for Semiconductors, 2005, Overall Road map Technology Characteristics, pp. 77.
3. Bae, G. N., Lee, C. S., and Park, S. O., 1994, Measurement of Particle Deposition Velocity toward a Horizontal Semiconductor Wafer using a Wafer Surface Scanner, Aerosol Science and Technology, Vol. 21, No. 1, pp. 72-82.
4. Opiolka, S., Schmidt, F. and Fissan, H., 1991, Combined effects electrophoresis and thermophoresis on particle deposition onto flat surfaces, J. Aerosol Science, Vol. 25, No. 4, pp. 656-671.
5. Hinds, W. C., 1998, Aerosol Technology, John Wiley & Sons, 2nd Edition, pp. 46-64, 316-323.
6. Liu, B. Y. H. and Ahn, K. H., 1987, Particle Deposition on Semiconductor Wafers, Aerosol Science and Technology, Vol. 6, pp. 215-224.
7. Yoo, K. H. and Oh, M. D., 2005, Numerical analysis on flow field and particle deposition on a heated spinning disk, J. Aerosol Science, Vol. 36, pp. 235-246.