

실리콘 웨이퍼 공정용 알루미나 정전척의 제작과 특성에 관한 연구

정광진 · 최성호 · Serguei Spoutai* · 박용균 · 이영섭 · 조동율 · 천희곤
울산대학교 재료금속공학부 · *러시아 노보시비리스크 공과대학 응용 물리학과

<요 약>

정전척의 유전체 물질로 열전도도와 유전특성 그리고 기계적 특성이 우수한 알루미나에 TiO_2 를 첨가하여 유전체의 비저항을 변화시켜서 정전척(electrostatic chuck)에서 발생하는 정전력인 쿨롱힘(coulomb force)과 존슨-라벡힘(Johnson-Rahbeck force)의 영향을 규명하려 하였다. 그리고 비저항, 인가전압, 온도, 습도가 정전력에 어떠한 영향을 주는지 고찰하였으며, 인가전압에 따른 응답 특성에 관하여 고찰하였다.

A study on the Fabrication and Characterization of Alumina Electrostatic Chuck for Silicon Wafer processing

Kwang-Jin Jeong · Song-Ho Choi · Serguei Spoutai* · Yong-Gyun Park
Young-seop Lee · Tong-Yul Cho · Hui-Gon Chun

School of Materials and Metallurgical Engineering · *Dept. of Applied and
Theoretical Physics, Novosibirsk State Technical University, Russia

<Abstract>

Alumina electrostatic chucks for silicon wafer process with wide range of electrical resistivity were fabricated by controlling the amount of TiO_2 addition(0 wt%, 1.3 wt%, 2 wt%, 2.8 wt%). The dependence of electrostatic force on applied voltage, temperature

and humidity was investigated. In addition, response characteristics on applied voltage and relationship between electrical resistivity and electrostatic force characteristics such as Coulomb force and Johnsen-Rahbeck force were discussed.

1. 서 론

반도체 디바이스의 대용량화에 따라 반도체 프로세스 기술의 조류는 실리콘 기판의 대구경화, 반도체공정 장비의 날장화, 드라이 프로세스화로 크게 3가지의 흐름으로 대변된다.

이러한 가운데 반도체 프로세스의 조류는 실리콘 웨이퍼의 처킹 방법에도 큰 변화를 요구하고 있다. 지금까지의 기계적 클램프나 진공척에 의한 실리콘 웨이퍼의 단순한 유지 고정이나 웨이퍼를 균일하게 밀착해서 균열을 갖춘 처킹의 요구가 한층 더 강해지고 있다. 그 중에서도 드라이 에칭(dry etching) 공정에서는 종래의 상압 하에서의 습식 처리와는 달리 진공 하에서 정확한 균일 가열과 냉각이 필수적이며 압력 차가 없는 진공 하에서 균열성을 확보 하기 위해서는 새로운 방식의 웨이퍼 처킹 방법이 필요하게 되었다. 이러한 필요성 때문에 정전력을 이용하여 웨이퍼를 전면 흡착 할 수 있는 정전척이 연구되기 시작했다.

정전척은 기계가공 공정을 위하여 Waring 에 의해서 처음 개발되었다. Waring 의 정전척은 반도체 물질인 SiC 로 만들어 졌기 때문에 누설전류(leakage current) 너무 크고 표면이 평활한 곳에서만 쓰일 수 있었기 때문에 크게 각광을 받지 못했다. 그래서 정전척 대신에 진공척이 여러 가지 공정에 넓게 쓰였다. 반도체 공정 에서 진공척은 습식에칭(wet etching) 등의 종래의 반도체공정에 적용되었는데 반도체 공정이 건식화 됨에 따라 많은 공정이 진공 중에서 이루어지기 때문에 진공척은 쓰일 수가 없게 되었다. 그래서 정전력을 이용한 처킹방법이 대두되게 되었다. 정전척을 처음 반도체공정에 적용시킨 사람은 Meginty 와 Wardly 였는데 이후 다양한 반도체 제조공정에 정전척을 적용시키기 위한 연구가 행하여졌다 [5].

본 연구에서는 정전척의 유전체 물질로 열전도도와 유전특성 그리고 기계적 특성이 우수한 알루미늄에 TiO_2 를 첨가하여 유전체의 비저항을 변화시켜서 정전척에서 발생하는 정전력인 쿨롱힘(coulomb force) 과 존슨-라벡 힘의 영향을 규명하려 하였다. 그리고 비저항, 인가전압, 온도, 습도가 정전력에 어떠한 영향을 주는지 고찰하였으며, 인가전압에 따른 응답 특성에 관하여 고찰하였다.

그리고 알루미늄보다 열전도성이 우수한 AlN 를 정전척의 유전체 물질로 사용하여 인가전압, 온도, 습도에 따른 정전력의 변화와 응답특성에 관하여 고찰하였다.

균일하고 큰 정전력을 얻기 위해서는 유전체 표면거칠기의 제어가 중요한 데 이런 유전체 표면의 거칠기 변화가 정전력, 응답특성 그리고 dissipated power 에 어떠한 영향을 주는지 모델링을 통하여 고찰하였다.

2. 실험방법

1. 시편제작 및 특성분석

1-1. 시편제작

알루미나 정전척을 제작하기 위하여 99.9%의 순도를 가지는 Al_2O_3 , TiO_2 분말을 사용하였으며 비저항이 다른 정전척을 제조하기 위하여 TiO_2 가 첨가되지 않은 것과 TiO_2 가 1.3 wt%, 2 wt%, 2.8 wt%로 첨가된 시편을 제작하였다. 그리고 소결성을 향상 시키기 위하여 MgO 를 0.1 wt% 첨가하였다. 시편의 제작은 닥터 블레이드 법을 이용하여 제작하였으며 소결은 1600°C 에서 수소분위기에서 2시간 소결하였다. 그리고 소결한 시편을 스퍼터로 Al 전극을 형성하였다. 알루미나 정전척의 제조공정에 관한 순서도를 fig. 1.에 나타내었다.

1-2. 유전체의 특성분석

TiO_2 첨가량에 따른 알루미나 정전척의 비저항 변화를 측정하기 위하여 고비저항 측정 장치를 이용하여 비저항을 측정하였다. 유전체의 비유전상수(ϵ_r) 측정하기 위하여 시편의 양면에 Al 스퍼터링으로 전극을 형성한 후 impedance analyser (HP 1942)를 이용하여 비유전 상수를 측정하였다.

1-3. 유전체의 거칠기 측정

정전척에서 균일하고 큰 정전력을 얻기 위해서는 유전체의 표면 거칠기가 균일해야 한다. 그래서 본 실험에서는 유전체의 표면 거칠기를 측정하기 위하여 광 간섭원리를 이용한 비접촉식 표면 조도 측정기(optical dimensional metrology measurement)를 이용하여 표면 거칠기를 측정하였다.

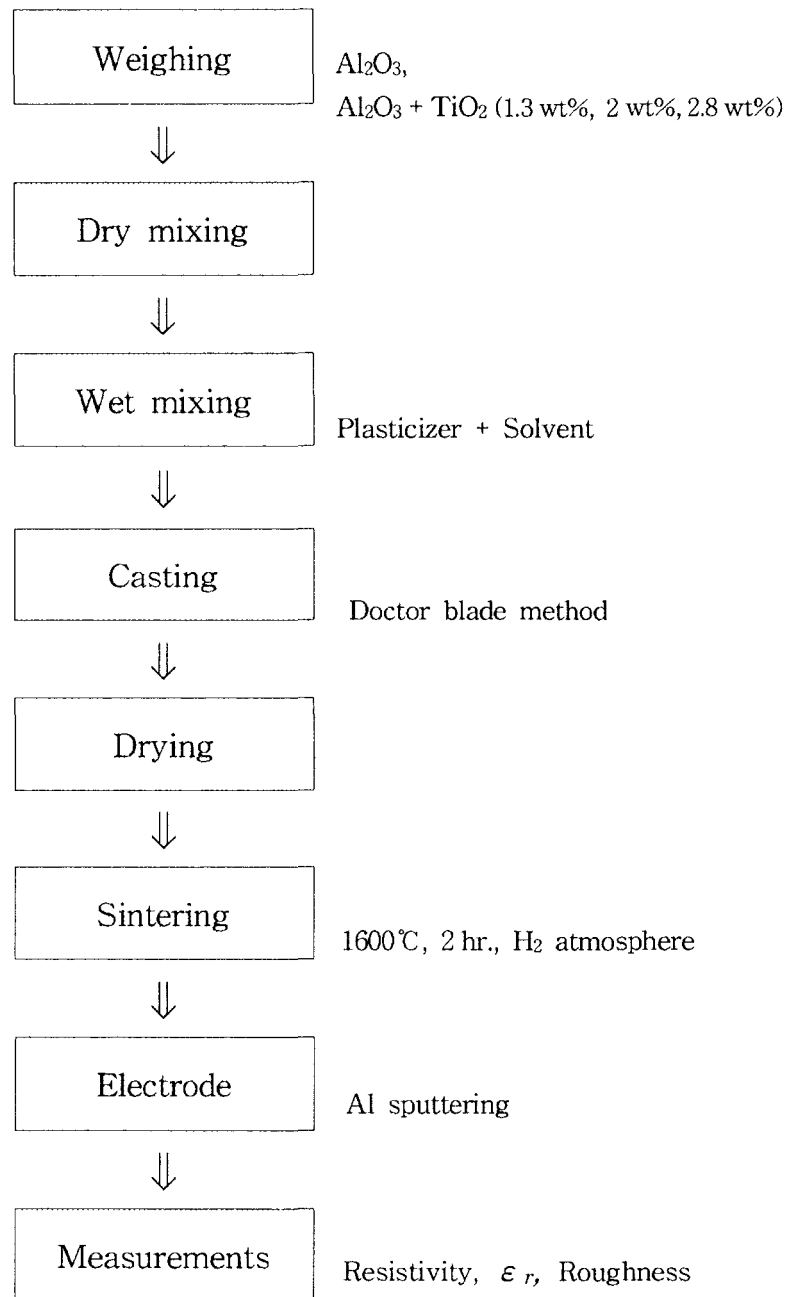


Fig. 1. Fabrication process of alumina electrostatic chuck

2. 정전력 측정

정전력의 측정은 실제 공정에서와 같이 정전척에 실리콘 웨이퍼 뒷면이 처킹되도록 정전력 측정 시스템을 구성하여 정전력을 측정하였으며 정전력 측정 시스템 개략도를 fig. 2.에 나타내었다. Fig. 3.는 전체 실험 순서도를 나타낸 것이다.

2-1. 비저항에 따른 정전력 측정

비저항의 변화에 따른 정전력의 변화를 관찰하였다. 비저항의 변화가 정전력에 어떠한 영향을 미치며, 각각의 비저항에 따라 존슨-라벡의 힘과 쿨롱힘의 영향에 관하여 고찰 하였다.

2-2. 인가전압에 따른 정전력 측정

정전척에서 인가전압에 따라서 정전력이 어떠한 변화를 나타내는지 고찰하였다. 이때 인가된 전압은 200V, 400V, 600V, 800V, 1000V, 1200V, 1500V 였다.

2-3. 습도에 따른 정전력의 측정

습도 변화에 따른 정전력의 변화를 관찰하였다. 습도가 35% 와 65% 일 때의 정전력의 변화와 습도가 정전력에 미치는 영향과 그리고 유전체 표면에서 습도가 어떤 역할을 하는지에 대하여 고찰하였다.

2-4. 온도에 따른 정전력의 측정

온도 변화에 따른 정전력의 변화를 관찰하였다. 온도가 25℃, 50℃, 100℃ 일 때 온도변화에 따른 정전력의 변화와, 온도변화가 정전력에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 고찰 하였다.

2-5. 응답시간 측정

정전척에 인가된 전압을 끊어주었을 때 얼마나 빨리 정전력이 소멸되는지 실험하였다. 인가된 전압에 따른 반응시간의 변화와 인가전압이 반응시간에 미치는 영향에 관하여 고찰하였다.

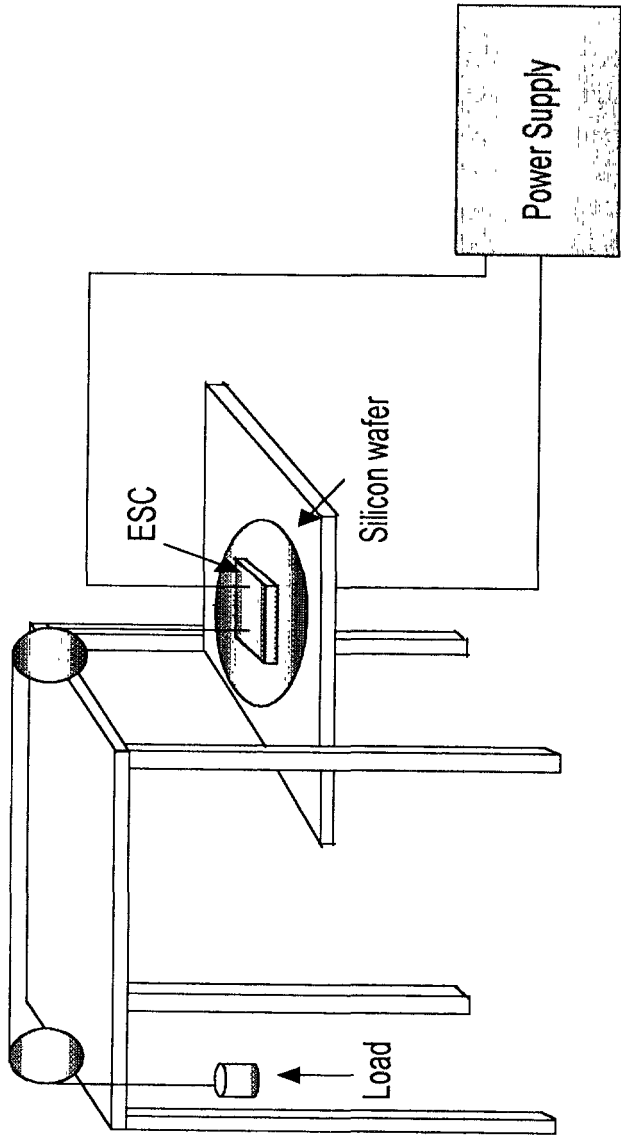


Fig. 2. Schematic diagram of electrostatic force measurement system

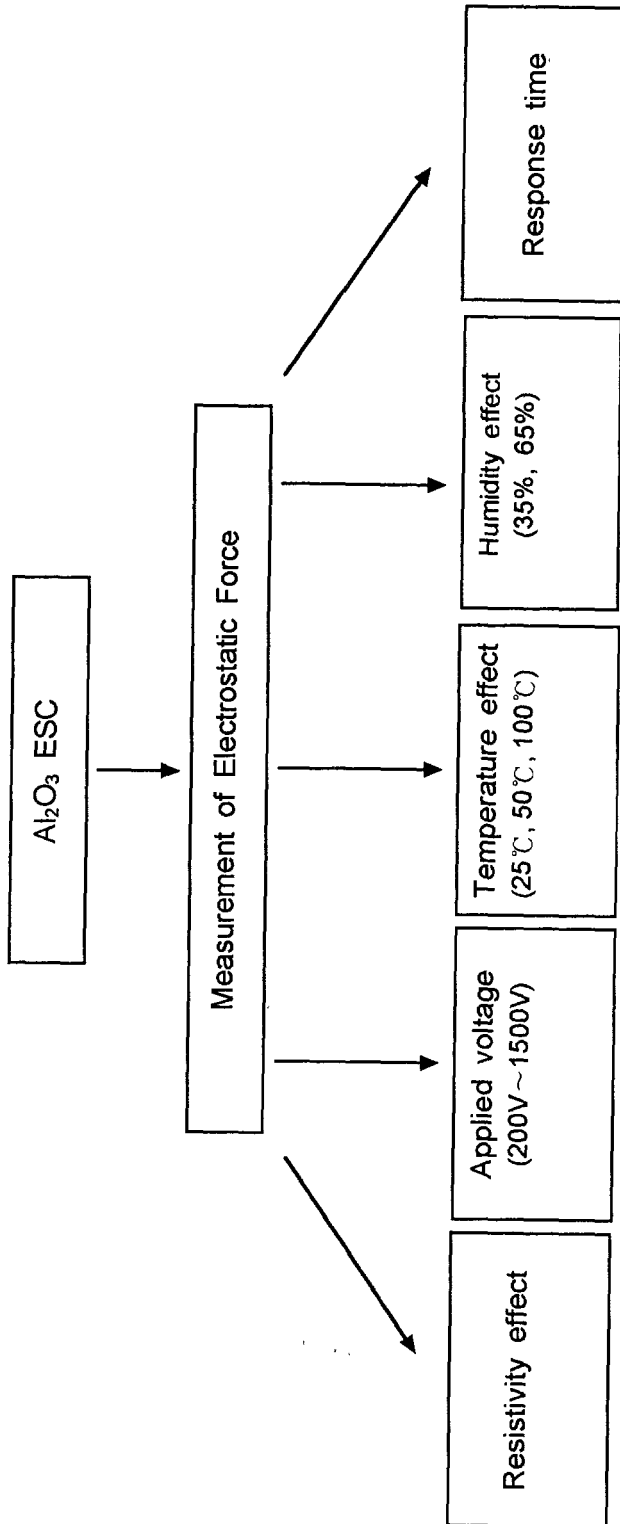


Fig. 3. Flow chart of experiment (Al₂O₃ ESC)

3. 실험결과 및 고찰

1. TiO₂ 첨가에 따른 알루미나 정전척의 비저항 변화

Fig. 4. 는 TiO₂ 첨가량에 따른 알루미나 정전척의 비저항 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4. 에서 알 수 있듯이 TiO₂ 첨가량이 1.3 wt%에서 2 wt%, 2.8 wt%로 증가할수록 비저항 값이 감소하였다. TiO₂ 첨가량이 증가할수록 비저항 값이 감소하는 것은 아래의 결합방정식에 나타낸바와 같이 Al³⁺자리에 Ti⁴⁺가 치환되어 들어가고 산소자리에 산소가 치환되어 들어가는 데 여기서 남는 하나의 산소는 기체의 형태로 날아가고 과잉전자(excess electron)가 생기게 된다. 그래서 TiO₂를 첨가하면 전기전도도가 증가하게 되며, 따라서 TiO₂ 첨가량이 증가하면 알루미나의 비저항은 낮아지는 것으로 사료된다.

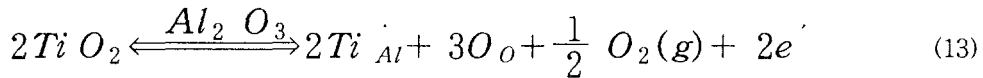


Table 1.은 시편의 전기적 특성을 나타낸 것이다.

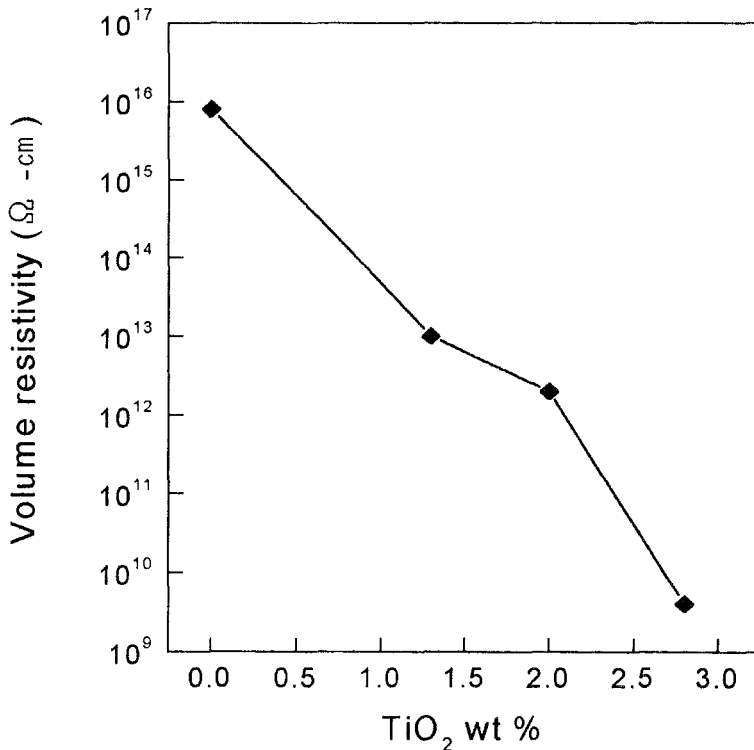


Fig. 4. Volume resistivity of alumina ESC with amount of TiO₂ (0 wt%, 1.3 wt%, 2 wt%, 2.8 wt% TiO₂)

Table 1. Sample fabrication conditions and measured electrical properties

TiO ₂ content (wt %)	Volume resistivity (ρ , Ω -cm)	Relative dielectric constant (ϵ_r)	Sintering temperature ($^{\circ}$ C)
0	8.0×10^{15}	9.7	1600
1.3	1.0×10^{13}	9.5	1600
2.0	2.0×10^{12}	9.8	1600
2.8	4.0×10^9	10.7	1600

2. 비저항 변화에 따른 정전력의 변화

Fig. 5.은 비저항 변화에 따른 정전력의 변화를 나타낸 것이다. 비저항이 $8 \times 10^{15} \Omega$ -cm 에서는 정전력이 10 g/cm², 18 g/cm²로 매우 낮은 값을 보이는데 이것은 비저항이 너무 높기 때문에 전류가 거의 흐르지 않는다. 그래서 유전체와 실리콘 웨이퍼 표면의 전하축척에 의한 존슨-라빅 힘의 영향이 거의 없고 단지 유전체의 분극에 의한 쿨롱 힘만 작용하기 때문인 것으로 사료된다[5]. 그러나 비저항 값이 낮아질수록 정전력이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상은 비저항 값이 낮아지면 유전체 분극에 의한 쿨롱 힘 과 함께 유전체와 실리콘 웨이퍼 표면사이의 전하 축척에 의한 존슨-라빅 힘이 동시에 작용하기 때문에 정전력이 증가하는 것으로 사료된다[6]. 이때 인가된 전압은 1200 V, 1500 V 였으며 전압인가 시간은 300 sec 였다. 사용된 시편의 두께는 500 μ m 였으며 평균 표면 거칠기(R_a)와 최대 표면 거칠기(R_{max})는 각각 1.45 μ m, 6.7 μ m 였으며 처킹될 물질로 사용된 실리콘 웨이퍼의 평균 표면 거칠기와 최대 표면 거칠기는 각각 50 μ m, 60 μ m 였다(fig. 6, fig. 7). 정전척에서 유전체의 비저항은 매우 중요한 의미를 가진다. 비저항이 너무 낮을 경우 정전력은 크나 누설전류가 너무 크기 때문에 소자에 손실(damage)를 줄 수 있기 때문에 좋지 않고 비저항이 너무 높으면 전류가 흐르지 않기 때문에 표면의 전하축척에 의한 존슨-라빅힘이 거의 작용하지 않고 쿨롱힘만 작용하기 때문에 정전력이 너무 작기 때문에 정전척에서 유전체의 비저항을 적정화(optimization) 시키는 것은 매우 중요하다.

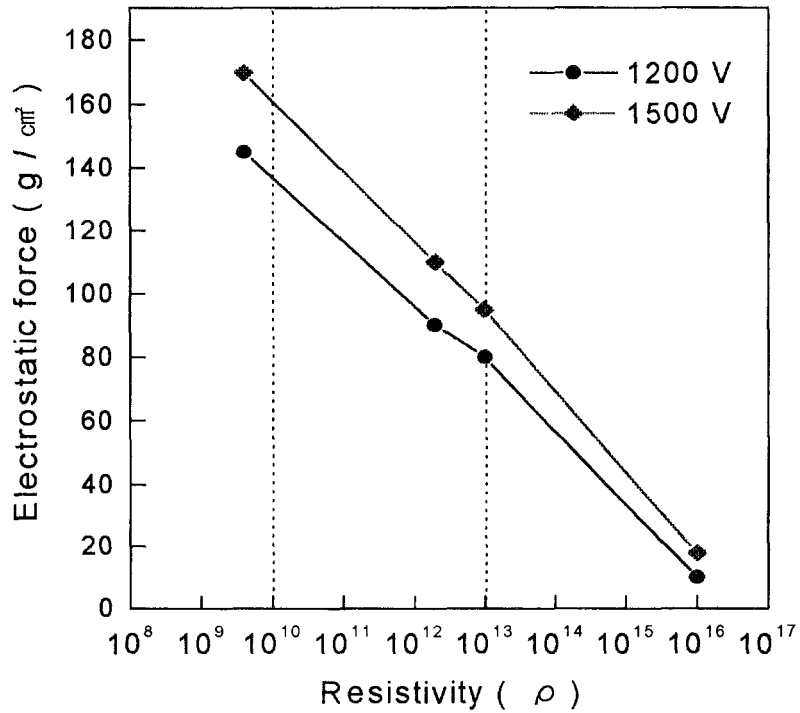


Fig. 5. Electrostatic force of alumina ESC with change of volume resistivity

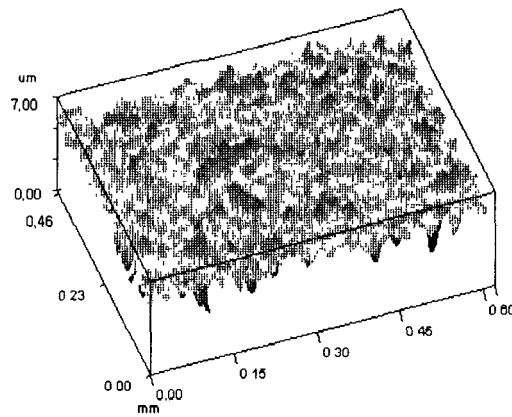


Fig. 6. Roughness image of Si wafer back side
($R_a : 50\mu m$, $R_{max} : 60\mu m$)

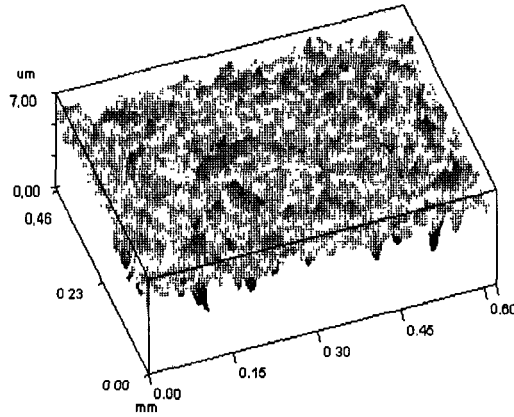


Fig. 7. Roughness image of Alumina ESC
(Ra : 1.45 μm , Rmax : 6.7 μm)

3. 인가전압에 따른 정전력 변화

Fig. 8.는 인가전압에 따른 정전력의 변화를 나타낸 것이다. 인가된 전압은 200V, 400V, 600V, 800V, 1000V, 1200V, 1500V 였으며 전압이 인가된 시간은 300 sec 이었다. 인가된 전압이 높아 질수록 정전력이 커짐을 알 수가 있는데 이러한 현상은 유전체의 비저항이 일정할 경우 인가전압이 커짐에 따라서 축적 되는 전하에 가해지는 힘인 포텐셜 에너지 (potential energy)가 커지기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 비저항이 낮아지면서 정전력이 현저하게 커지는 것을 관찰 할 수 있었다. 인가전압이 1500V일 때 TiO_2 가 2.8 wt% 첨가된 알루미나 시편인 경우 최대 170 g/cm²의 정전력을 나타내었다.

4. 온도에 따른 정전력의 변화

Fig. 9. ~ Fig. 12.은 온도 변화에 따른 정전력의 변화를 나타낸 것이다. 이때 인가된 전압은 200V, 400V, 600V, 800V, 1000V, 1200V, 1500V 였으며 전압이 인가된 시간은 300 sec 였다. 변화 온도는 25 $^{\circ}\text{C}$, 50 $^{\circ}\text{C}$, 100 $^{\circ}\text{C}$ 였다. 온도가 높아질수록 정전력의 증가를 관찰할 수 있는데 이러한 현상은 온도가 높아지면 정전척의 유전체의 비저항이 감소하게 되고 따라서 표면에 축적 되는 전하의 양이 많아 유전체와 실리콘 웨이퍼의 표면에 작용하는 존슨-라벨 힘의 증가하기 때문인 것으로 사료된다 [6].

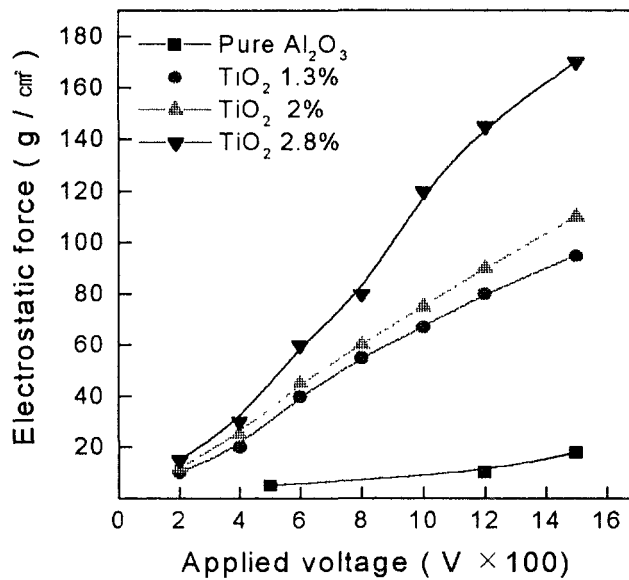


Fig. 8. Dependence of electrostatic force on applied voltage (alumina ESC)

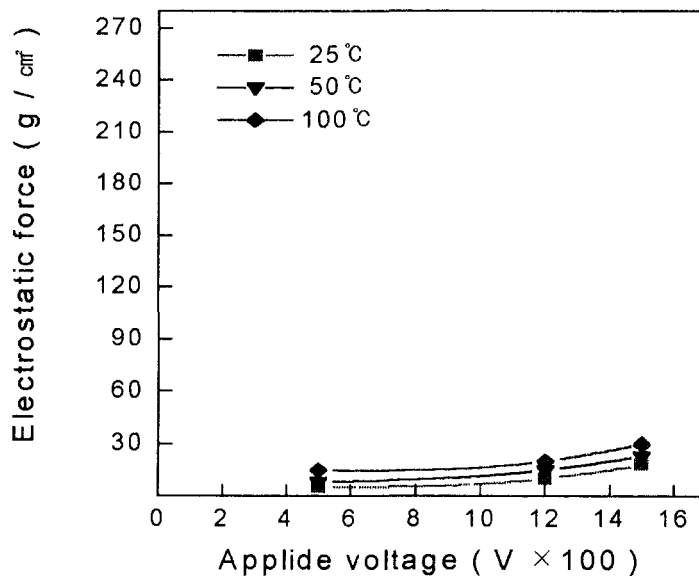


Fig. 9. Dependence of temperature on electrostatic force (alumina ESC : Pure Al₂O₃)

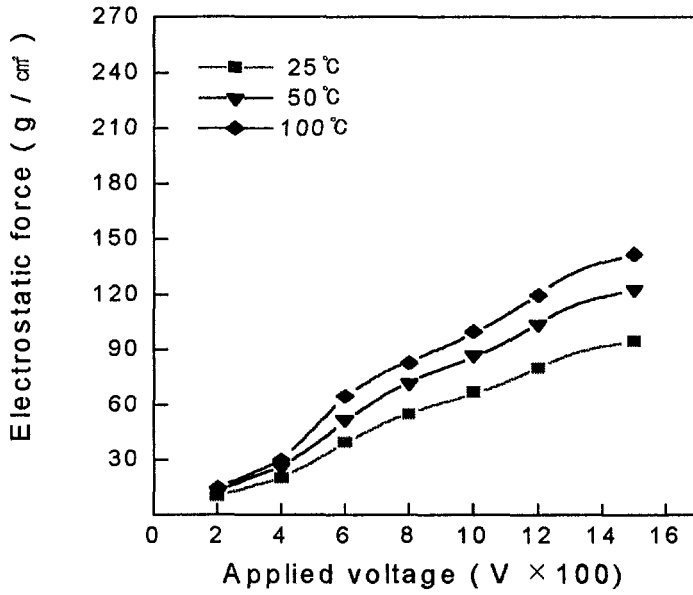


Fig. 10. Dependence of temperature on electrostatic force (alumina ESC : TiO₂ 1.3 wt % addition)

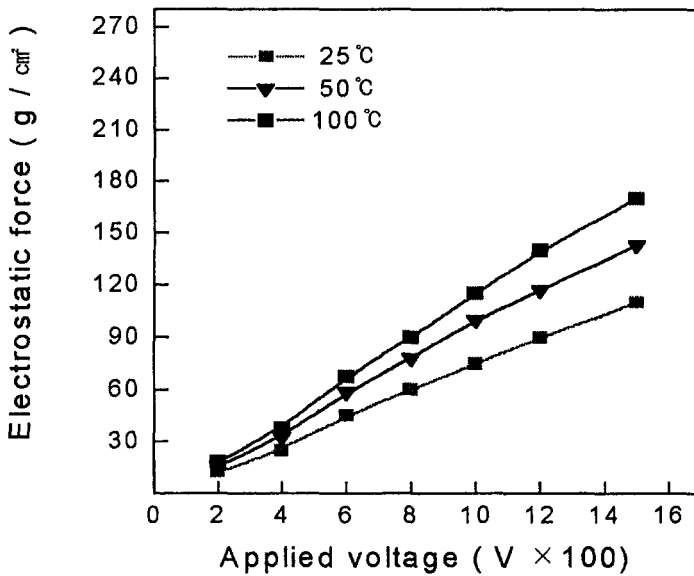


Fig. 11. Dependence of temperature on electrostatic force (alumina ESC : TiO₂ 2 % addition)

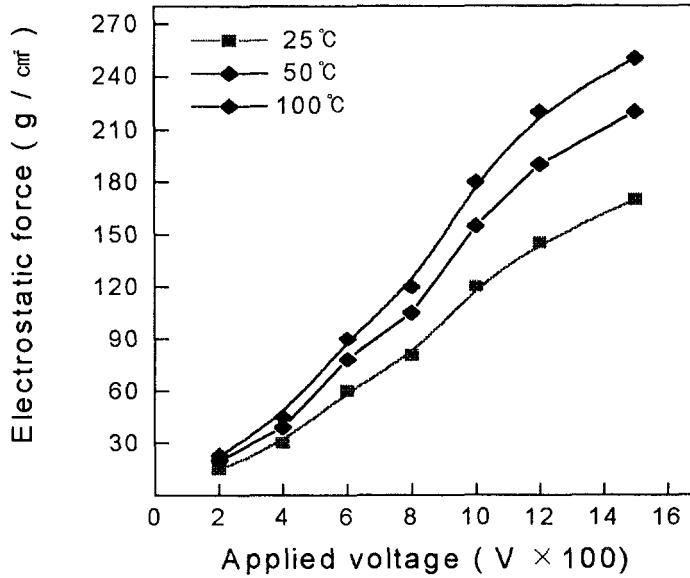


Fig. 12. Dependence of temperature on electrostatic force
(alumina ESC : TiO₂ 2.8 wt % addition)

5. 습도에 따른 정전력 변화

Fig. 13. ~ fig. 16.는 알루미늄 정전척의 습도변화에 따른 정전력의 변화를 나타낸 것이다. 이때 인가한 전압의 범위는 200V~1500V 였으며 각 전압에서 습도가 35%일 때와 65%일 때의 정전력의 변화를 관찰하였다. 각각의 인가전압에서 습도가 35%일때의 정전력이 65%일때보다 현저하게 크다는 것을 알 수 있는데 이러한 정전력의 차이는 습도가 높을 경우 유전체에 전압을 인가하였을 때 전하가 축적 되어서 존슨-라벡힘이 작용하는 것이 아니라 습도가 유전체와 실리콘 웨이퍼 표면을 연결시켜주는 매개체로 작용하여 전하가 흘러버리기 때문에 존슨-라벡힘이 작용할 공간이 없어서 버린다. 그래서 정전력은 현저하게 작아지는 것으로 사료된다 [5].

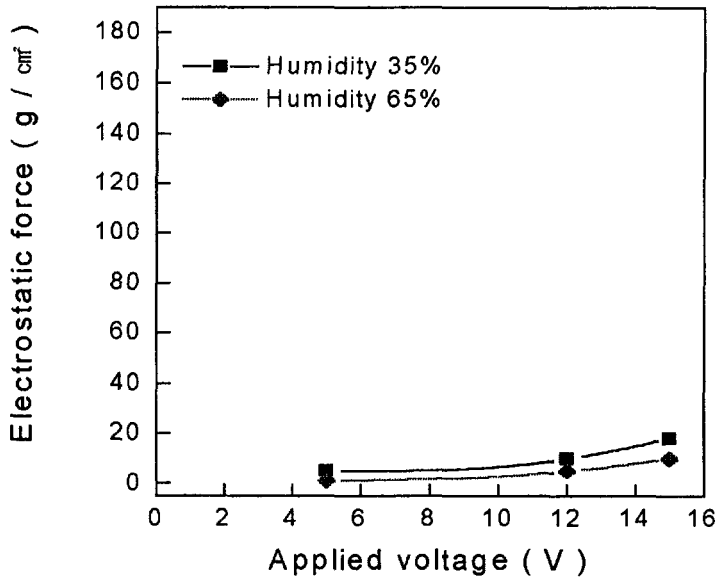


Fig. 13. Dependence of humidity on electrostatic force
(alumina ESC : pure Al₂O₃)

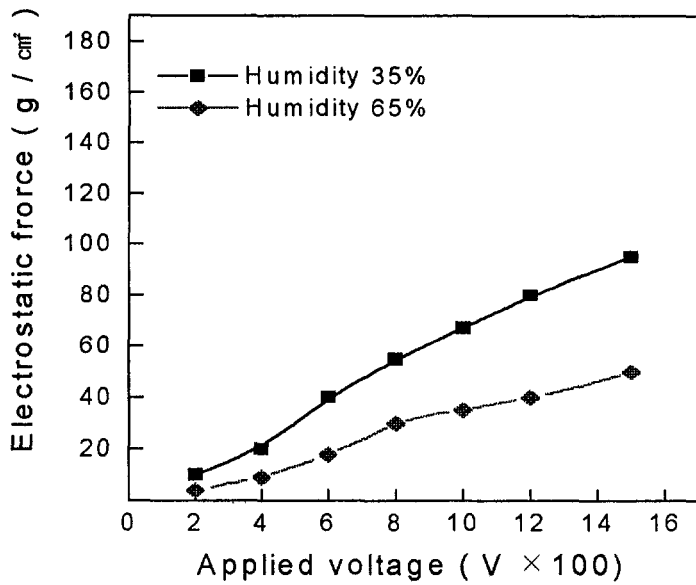


Fig. 14. Dependence of humidity on electrostatic force
(alumina ESC : TiO₂ 1.3 wt % addition)

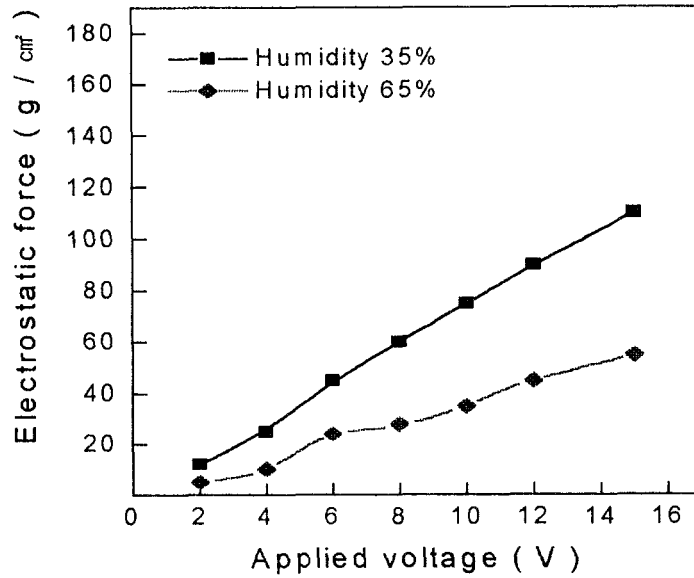


Fig. 15. Dependence of humidity on electrostatic force
(alumina ESC : TiO₂ 2 wt % addition)

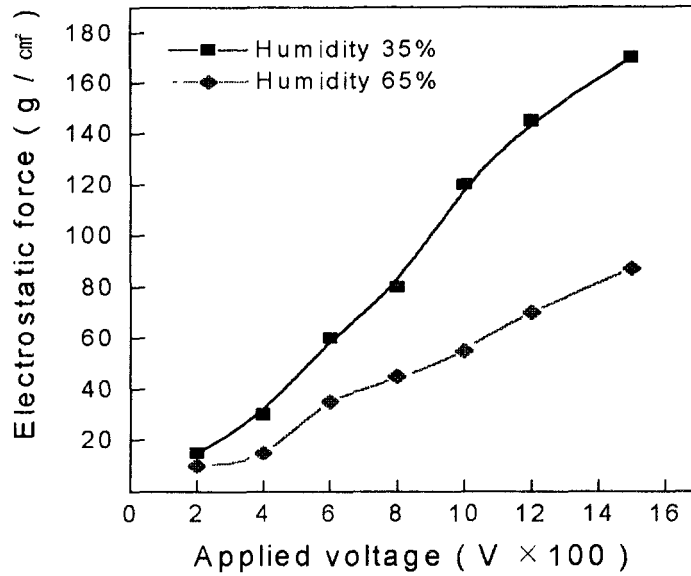


Fig. 16. Dependence of humidity on electrostatic force
(alumina ESC : TiO₂ 2.8 wt % addition)

6. 인가전압에 따른 응답특성

Fig. 17. ~ fig. 20.은 알루미나 정전척의 응답특성을 나타낸 것이다. 전압을 인가하였다가 인가전압을 끊어주었을 경우 정전력은 순간적으로 없어지는 것이 아니라 정전력은 점차적으로 없어지게 된다는 것을 보여준다. 이러한 현상은 인가된 전압에 의한 유전체의 분극이 순간적으로 없어지지 않고 표면에 축적된 전하가 갑자기 없어지지 않고 남아있기 때문인 것으로 사료된다.

인가전압이 낮을 때 보다 인가전압이 높을 때 응답시간이 길어지는 것을 알 수가 있다. 이러한 현상은 인가전압이 높은 경우에는 비저항이 일정할 경우 표면에 축적 되는 전하량은 일정할지라도 표면에 축적된 전하에 가해지는 힘이 더 크고 분극의 쌍극자에 가해지는 힘이 인가전압이 낮을 때 보다 더 크기 때문에 인가전압을 끊었을 경우 응답시간이 더 길어지게 된다.

인가전압이 같고 비저항이 다른 시편의 응답특성은 비저항이 낮은 시편은 높은 시편보다 반응시간이 길어지는 것을 알 수 있는데 이는 비저항이 낮은 경우는 표면에 축적 되는 전하량이 많기 때문에 인가전압을 끊어주었을 경우 축적된 전하가 사라지는 시간이 길어지기 때문에 반응시간이 길어지게 된다.

정전척에서 인가전압을 끊어주었을 경우 전압은 순간적으로 없어지지만 표면에 축적된 전하는 순간적으로 없어지지 않는다. 그러므로 잔류 전하를 함유한 웨이퍼를 dechucking 시킬 때 누설 전류에 의한 소자의 손실을 입을 수 있다. 그래서 정전척의 chucking/dechucking 시간 즉 응답시간은 빨라야 한다.

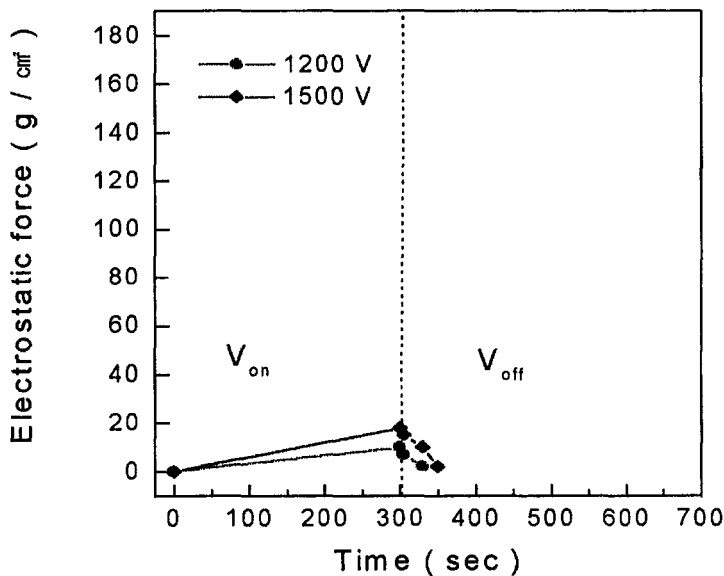


Fig. 17. Response characteristics of alumina ESC with applied voltage (pure Al_2O_3)

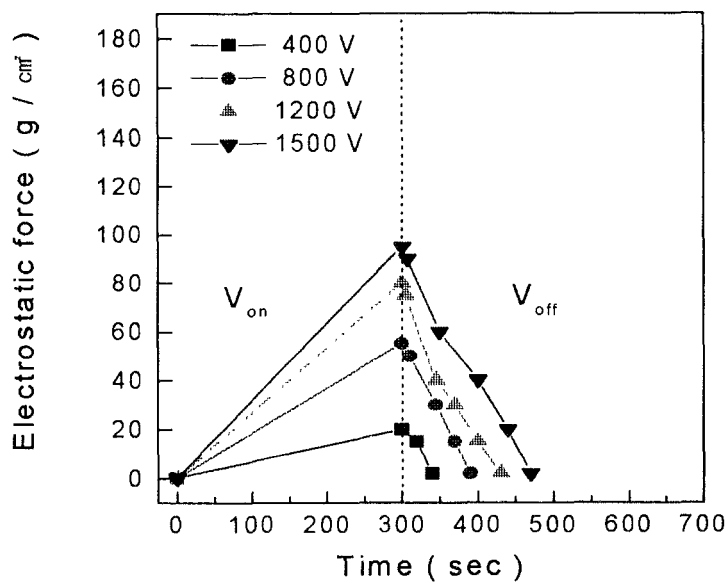


Fig. 18. Response characteristics of alumina ESC with applied voltage (TiO₂ 1.3 wt % addition)

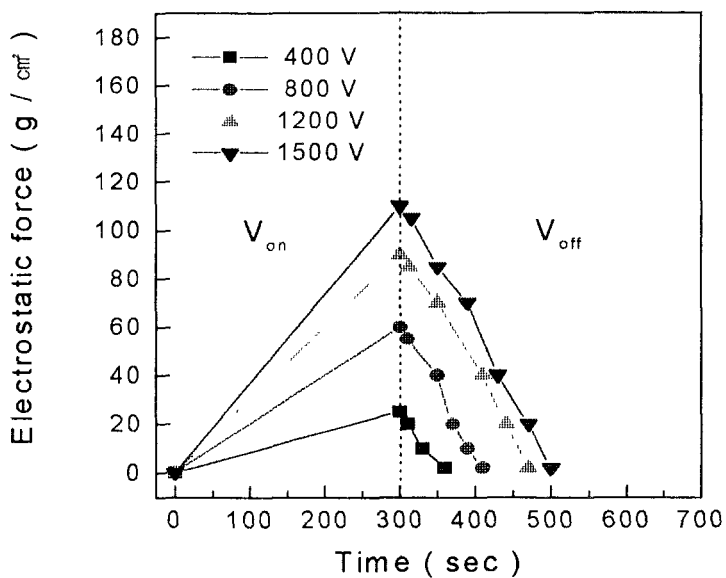


Fig. 19. Response characteristics of alumina ESC with applied voltage (TiO₂ 2 wt % addition)

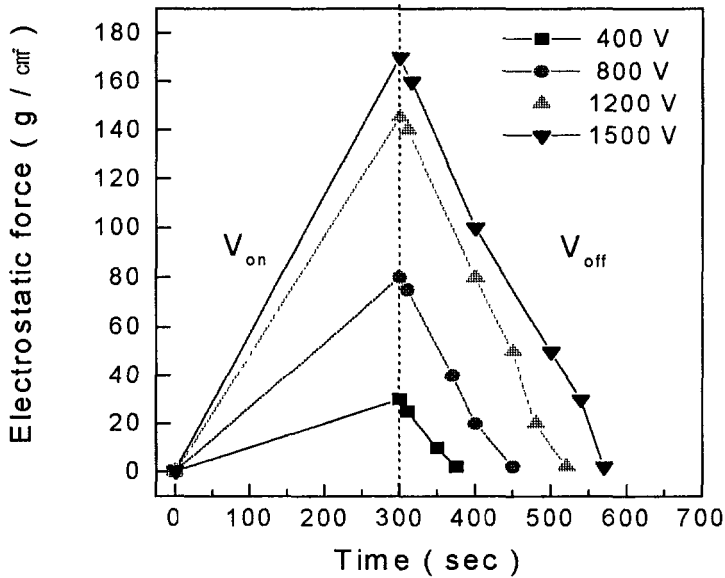


Fig. 20. Response characteristics of alumina ESC with applied voltage
(TiO_2 2.8 wt % addition)

5. 결론

정전척의 유전체 물질로 열전도도와 유전특성 그리고 기계적 특성이 우수한 알루미나에 TiO_2 를 첨가하여 비저항을 변화시켜서 인가전압, 온도, 습도, 응답시간의 특성에 관하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

알루미나에 첨가된 TiO_2 양이 0 wt %, 1.3 wt %, 2 wt %, 2.8 wt %로 증가할수록 비저항 값은 각각 $8.0 \times 10^{15} \Omega\text{-cm}$, $1.0 \times 10^{13} \Omega\text{-cm}$, $2.0 \times 10^{12} \Omega\text{-cm}$, $4.0 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$ 로 감소하였다.

알루미나의 비저항이 감소함에 따라서 정전척의 정전력은 증가 하였다.

인가전압이 증가할수록 정전력은 증가하였는데 비저항 값이 $4.0 \times 10^9 \Omega\text{-cm}$ 일 때 최대 170 g/cm^2 의 정전력을 나타내었다.

온도가 25°C , 50°C , 100°C 로 높아질수록 정전력의 증가를 관찰할 수 있는데 온도가 높아지면 정전척의 유전체의 저항이 감소 하게 되고 따라서 표면에 축적 되는 전하의 양이 많아지게 되고 정전척의 표면에 축적 되는 전하의 양이 많아지게 되므로 존슨-라벨 힘이 증가하게 때문인 것으로 판단된다.

습도가 35%일 때와 65% 일 때의 정전력의 변화를 관찰한 결과 각각의 인가전압에서 습도가 35%일 때의 정전력이 65% 일 때보다 현저하게 크다는 것을 알 수 있는데 이러한 정전력의 차이는 습도가 높을 경우 전압을 인가하였을 때 전하가 축적되어서 존슨-라백힘이 작용하는 것이 아니라 습기가 유전체와 실리콘 웨이퍼 표면을 연결시켜주는 매개체로 작용하기 때문에 전하가 흘러버리기 때문에 존슨-라백 힘이 작용할 공간이 없어져 버린다. 그래서 정전력은 현저하게 작아지게 되는 것으로 사료된다.

인가전압에 따른 응답특성은 인가전압이 높고 유전체의 비저항 값이 낮을수록 반응시간이 증가하는 경향을 나타내었다.

감 사

본 연구는 "과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구 센터"의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. L. D. Hartsough, Electrostatic Wafer Holding, Solid state Tech. 35, No. 1, pp. 87-90, 1993.
2. S. A. Khomyakov, Attraction and Accuracy Characteristics of Electrostatic Chucks, Machines and Tooling 50, No. 3, pp. 22-24, 1979.
3. T. Tojo, and K. Sugihara, Low Voltage Electrostatic Wafer Chuck for Microfabrication System, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering 19, No. 3, pp. 211-213, 1985.
4. C. Balaskrishnan, Johnsen-Rahbek Effect with an Electronic Semi-Conductor, British Journal of Applied Physics 1, No. 8, pp. 211-213, 1950.
5. T. Watanabe, T. Kitabayashi, and C. Nakayama, Electrostatic Force and Absorption Current of Alumina Electrostatic Chuck, Japanese Journal of Applied Physics, Pt. 1, Vol. 31, No 7, pp. 2145-2150, 1992.
6. T. Watanabe, T. Kitabayashi, Effect of Additives on the Electrostatic Force of Alumina Electrostatic Chuck, Journal of the Ceramic Society of Japan 100, No. 1, pp. 1-6, 1992.
7. M. Nasasuji, and H. Shimizu(Nikon), Low Voltage and High Speed Operating Electrostatic Wafer Chuck, Journal of Vacuum Science and Technology 10, No. 6, pp. 3573, 1992.
8. The Institute of Electrostatics Japan, Hand Book of Electrostatics, pp. 672-675, 1981.
9. J. Takahashi, I. Yami and H. Saito : J, Jpn. Ceram. Soc. Jpn. Vol. 83, pp. 589, 1975.