

고온용 정전기척의 유전층 개발에 관한 연구

방재철

순천향대학교, 신소재화학공학부

A Study on Development of Dielectric Layers for High-Temperature Electrostatic Chucks

Jaecheol Bang

Division of Materials & Chemical Engineering, Soonchunhyang University

초 록: 고온용 정전기척(high-temperature electrostatic chuck, HTESC)에 적합한 특성의 유전재료를 개발하였다. 유전층의 전기비저항과 유전상수 값은 HTESC가 적합하게 작동하기에 필요한 요구조건을 만족하였으며, 하부절연층재료와 열팽창계수가 유사하여 구조적인 안정성이 확보되었다. 유전층과 절연층간의 접합층 재료로는 입자오염 문제의 최소화를 위해 붕규산염 유리재료를 선택하였고, 전극재료로는 은을 사용하였다. 상부유전층과 하부절연층 사이에서 붕규산염 유리는 안정되게 접합되었으며, 우려되었던 은전극의 유전층이나 유리층과의 확산 및 반응이 관찰되지 않았다. 제조된 HTESC의 척킹(chucking)특성은 상용 HTESC에 비하여 우수하게 나타났다.

Abstract: Dielectric material which is suitably designed for the application of the high-temperature electrostatic chucks(HTESCs) has been developed. Electrical resistivities and dielectric constants of the dielectric layer satisfy the demands for the proper operation of HTESC, and coefficient of thermal expansion(CTE) of the dielectric material matches well that of the bottom insulator so that it secures stable structure. In order to minimize particle contaminations, borosilicate glass(BSG) is selected as a bonding layer between dielectric layer and bottom insulator, and silver is used as a electrode. BSG is solidly bonded between upper dielectric and bottom insulator, and no diffusions or reactions are observed among silver electrode, dielectric, and glass layers. The chucking characteristics of the fabricated HTESC are found to be superior to those of the commercialized one.

1. 서 론

척(chuck)은 집적회로 칩의 제조에 사용되는 에칭이나 박막증착과 같은 공정에서 반도체 웨이퍼의 고착(clamping)장치로 사용되는 것으로써, 현재 널리 상용화되어있는 척은 크게 기계적척(mechanical chuck)과 진공척(vacuum chuck)으로 분류된다. 그러나, 이들 척들의 몇 가지 문제점들 때문에 칩 생산자들은 대체품을 찾게 되었고, 그 중의 대표적인 것이 정전기척(electrostatic chuck, ESC)이다. 특히, 플라즈마 증착이나 에칭과 같은 고온 웨이퍼 공정을 수용하기 위해서 500°C까지도 제 기능을 유지하는 고온용 정전기척 (high-temperature electrostatic chuck, HTESC)에 대한 관심이

높아지고 있다.¹⁻⁵⁾

기계적척은 반도체 웨이퍼를 위에서 클램프(clamp)로 눌러서 고착시키고, 진공척은 웨이퍼 뒷면에서의 진공압에 의하여 웨이퍼를 고착시킨다. 반면에 HTESC는 정전기 힘에 의하여 웨이퍼를 고착시키는 장치로써, 기계적척에서의 웨이퍼와 클램프의 접촉에 의한 입자 오염 문제점이 없고, 진공척이 진공 분위기에서는 사용될 수 없는 반면에 HTESC는 분위기에 상관없이 사용이 가능하다. 또한, 위의 두 척들은 웨이퍼를 고착시키는 힘이 국부적으로 작용하여서 웨이퍼에 힘이 발생할 수 있는 반면에, HTESC는 웨이퍼와의 접촉면 전체에 걸친 고른 정전기 힘의 작용에 의해 웨이퍼를 고착시키므로 웨이퍼 표면의 평활도가 보장되며, 웨이퍼가 HTESC 표면

Table 1. Chemical compositions of dielectric layers

	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
Content (wt%)	87.9	1.1	1.2	5.0	1.5~5.5	0.65~3.9

전체에 긴밀하게 접촉하여 효과적으로 웨이퍼의 열을 방출시키기 때문에 온도 조절이 용이하다.

HTESC는 세라믹이 상부유전층으로 사용되는 형태로써 정전기적 쿨롱력은 유전층내의 전하가 표면에 축적됨에 의해 발생하는데, 웨이퍼를 고착하기에 충분한 양의 전하가 표면에 축적되는데 걸리는 시간은 공정상의 측면에서 매우 중요하게 고려할 사항이다. 즉, 공정시간을 단축하기 위해서는 전하의 축적시간을 최소화하여야 하며, 이를 위해서는 유전층의 전기비저항이 낮아야 한다. 그러나, 높은 고착압력(clamping pressure)을 얻기 위해서는 고전압이 필요한데 이러한 고전압에 의한 유전층의 유전항복을 방지하려는 측면에서는 가급적 고전기비저항이 요구된다. 따라서, 이상의 두 가지를 사할을 절충하여, HTESC가 주로 사용되는 온도 범위인 200~500°C에서 전기비저항이 10^{10} ~ 10^{13} Ω-cm의 범위에 있는 것이 적절하다고 보고되고 있다.⁶⁾ HTESC의 유전층으로 사용되기 위해 요구되는 또 다른 전기적 특성은 사용온도에서 5~15 범위의 유전상수를 가져야 한다는 것인데, 이는 탈착 시간을 줄여서 전 공정시간의 지연을 방지하기 위해서이다. 이러한 전기적특성은 천이금속 산화물의 첨가에 의해 효과적으로 조절할 수 있는데, 이는 소결시 천이금속 산화물이 환원되며 비화학양론적으로 되어 전기비저항이 감소하고 유전상수에 변화를 보이기 때문이다. 한편, 상부유전층이 하부절연층과 잘 접합하여 안정한 구조를 이루기 위해서는 중간접합층이 상부유전층 및 하부절연층과의 접합성이 양호하여야 함은 물론, 유전층과 절연층간 열팽창계수차가 최소화되어야 한다.

본 연구에서는 알루미늄에 TiO₂나 Cr₂O₃와 같은 천이금속 산화물의 첨가에 의한 전기비저항 및 유전상수 조절을 통하여, HTESC의 작동에 적합한 전기적특성을 만족시키는 동시에 하부절연층과 열팽창거동이 유사하고 접합성이 우수한 유전층 세라믹 조성을 개발하였으며, 이를 사용한 HTESC를 자체 제작하여 특성평가를 행하였다.

2. 실험방법

2.1. 재료

HTESC의 하부절연층으로는 구입이 용이하고 값이

저렴한 점을 고려하여 96% 순도의 알루미늄을 사용하였으며, 이에 따라 상부유전층도 알루미늄계를 선택하였다. 알루미늄의 소결온도를 낮추기 위해 MgO 등의 소결조제를 첨가하였으며, 전기비저항과 유전상수의 조절을 위하여 TiO₂와 Cr₂O₃를 첨가하였다. 본 실험에 사용한 유전층의 조성은 Table 1과 같다.

중간접합층으로는 기존에 사용되는 고분자수지 접합재료⁷⁾에 비해 입자오염 우려가 적은 붕규산염 유리(borosilicate glass, BSG)를 전극층 재료로는 은(Ag)을 선택하였다.

2.2. 제조공정

상부유전층은 테이프캐스팅에 의해 준비되었다. 소결은 온도 1580°C까지 분당 5°C로 승온한 후, 2시간 유지한 다음 분당 5°C로 노냉하였다. 상부유전층에 은전극을 5 μm의 두께로 스크린프린팅(KDS-300S, (주)다산기공)한 후, 건조기에서 30분간 150°C로 건조시킨 다음 800°C에서 1시간 예비소결을 한다.

은전극의 예비소결 후, 전극층위에 붕규산염 유리를 0.2 mm의 두께로 테이프캐스팅 한 후, 건조기에서 30분간 150°C로 건조시킨 다음 하부절연층을 올려놓고, 탈바인더를 위하여 500°C까지 분당 2°C로 승온하여 500°C에 1시간 동안 유지시킨다. 소결은 탈바인더 단계에 이어서 연속적으로 행하였다. 소결온도 800°C까지 분당 3°C로 승온한 후, 소결온도에서 40분간 유지한 다음 분당 3°C로 노냉하였다.

2.3. 물성측정

상부유전층 재료의 온도변화에 따른 전기비저항은 500°C에서부터 상온까지 노냉하면서 pA Meter(HP 4140B)로 전류를 측정하여 전극의 면적과 유전층의 두께, 인가전압으로부터 계산하였다. 유전상수는 Network Analyzer (HP 8753D, USA)를 이용하여 상온에서 1 MHz의 주파수에서 측정하였다. 열팽창계수는 Dilatometer (Orton 1200D, USA)로 측정하였다. 상온에서 1000°C까지 온도를 상승시키며, 선형팽창율(percent linear expansion, PLE)을 측정하고 이로부터 열팽창계수(coefficient of thermal expansion, CTE)를 계산하였다.

제조된 HTESC의 상부유전층/전극층/중간접합층/하부절연층의 계면구조, 각 층의 두께, 성분분석 등을 관

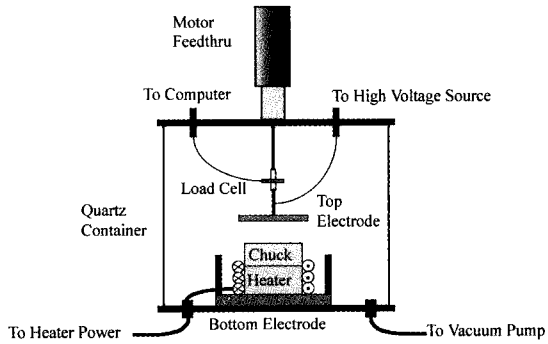


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus for clamping pressure measurement.

찰하기 위하여 주사전자 현미경(JSM-5800LV, Japan)과 EDX(Oxford Link ISIS Series 300, England)를 사용하였다.

웨이퍼의 고착압력은 자체 제작한 실험장치에 의해 측정되었으며, 이 장치의 모형도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 분위기 조절이 가능한 석영관 안에 온도제어기와 연결된 가열판을 장착하여 그 위에 HTESC를 고정시키고, 경면의 실리콘웨이퍼를 알루미늄 전극에 은페이스트로 부착하여 올려놓는다. 전압을 일정시간 인가한 후, 전극 뒷면을 모터 제어기로 당기면 연결된 load cell에 인장 하중이 걸리고, 이때 형성되는 전위차를 PC에서 읽어 들인다. 각 전위차에 해당하는 압력을 환산하여 압력-인가전압의 데이터를 얻는다. 이때, 고착압력은 HTESC 표면에서 실리콘 웨이퍼가 떨어지기 직전의 최대압력으로 정의된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 상부유전층의 특성

Fig. 2는 Cr_2O_3 가 3.5 wt%로 일정하고, TiO_2 성분이 각각 다른 상부유전층의 전기비저항을 상온(25°C)에서부터 500°C 의 온도범위에서 측정 한 결과이다. 0.65 wt% $\text{TiO}_2+3.5$ wt% Cr_2O_3 조성을 제외하고, HTESC가 주로 사용되는 온도범위인 $200\sim 500^\circ\text{C}$ 에서 적합한 범위의 전기비저항 값을 나타냈다. 0.65 wt% $\text{TiO}_2+3.5$ wt% Cr_2O_3 조성의 시편은 350°C 이상에서부터 전기비저항이 급격히 감소되며, 400°C 에서는 $10^{10} \Omega\text{-cm}$ 이하로 되었다. Fig. 3은 TiO_2 가 1.3 wt%로 일정하고 Cr_2O_3 성분이 각각 다른 상부유전층의 전기비저항을 위와 동일한 온도범위에서 측정 한 결과이다. 3.5 wt% $\text{Cr}_2\text{O}_3+1.3$ wt% TiO_2 조성은 500°C 까지 $10^{11} \Omega\text{-cm}$ 이상의 저항을 유지하나, 1.5 wt% $\text{Cr}_2\text{O}_3+1.3$ wt% TiO_2 와 5.5 wt% $\text{Cr}_2\text{O}_3+1.3$ wt%

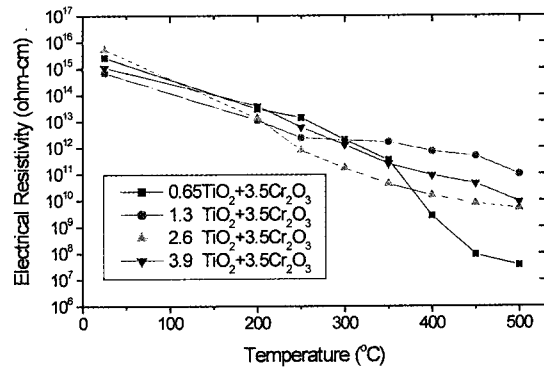


Fig. 2. Electrical resistivities of the dielectric layers with different compositions of TiO_2 at various temperatures (Cr_2O_3 fixed at 3.5 wt%).

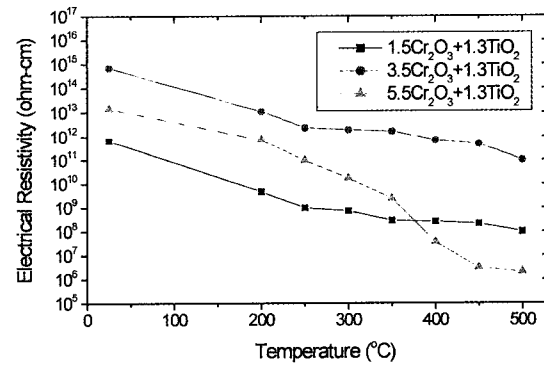


Fig. 3. Electrical resistivities of the dielectric layers with different compositions of Cr_2O_3 at various temperatures (TiO_2 fixed at 1.3 wt%).

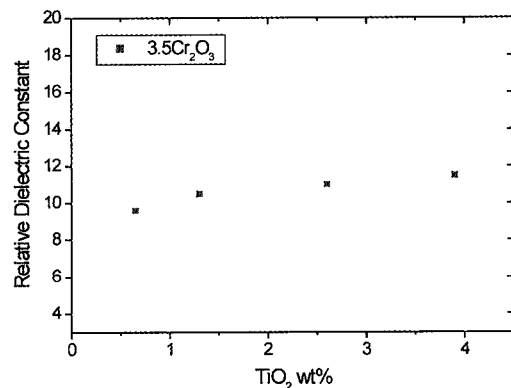


Fig. 4. Relative dielectric constants of the dielectric layers with TiO_2 compositions (Cr_2O_3 fixed at 3.5 wt%).

TiO₂ 조성의 시편들은 각각 200°C와 350°C 이상에서부터 전기비저항이 10¹⁰ Ω-cm이하로 감소하였다. 조성에 따른 전기비저항 변화의 이유는 명확하지 않으나, TiO₂가 1.3 wt%이상 첨가 될 때 온도변화에 대해 안정성을 보이며, Cr₂O₃는 3.5 wt%에서 가장 안정되는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 TiO₂ 성분이 각각 다른 상부유전층의 TiO₂ 조성에 따른 상대유전상수의 변화이고, Fig. 5는 Cr₂O₃ 성분이 각각 다른 상부유전층의 Cr₂O₃ 조성에 따른 상대유전상수의 변화이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 상대유전상수는 TiO₂의 첨가량에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 증가 경향은 TiO₂의 높은 상대유전상수를 고려할 때 예상된 결과였으나, 본 연구에서 시험한 전 조성에서 HTEESC 작동에 적합한 범위의 상대유

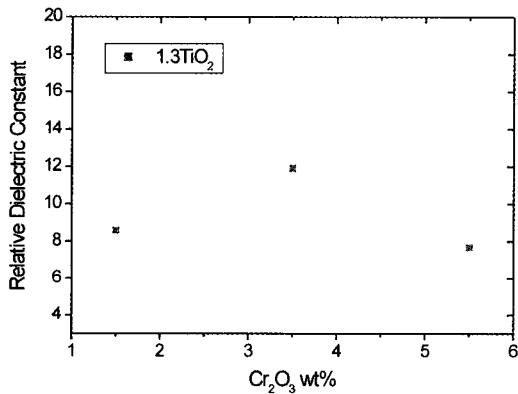


Fig. 5. Relative dielectric constants of the dielectric layers with Cr₂O₃ compositions (TiO₂ fixed at 1.3 wt%).

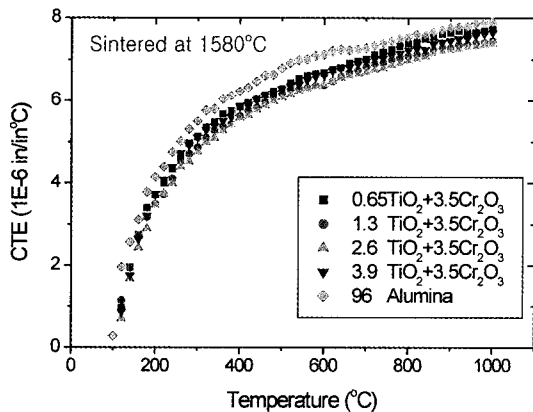


Fig. 6. Coefficients of thermal expansion(CTE) of the dielectric layers with different compositions of TiO₂ at various temperatures (Cr₂O₃ fixed at 3.5 wt%).

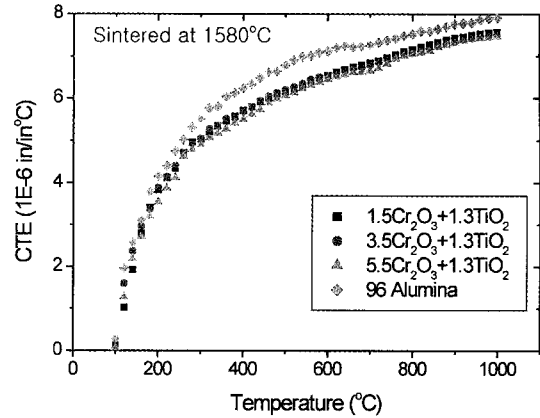


Fig. 7. Coefficients of thermal expansion(CTE) of the dielectric layers with different compositions of Cr₂O₃ at various temperatures (TiO₂ fixed at 1.3 wt%).

전상수 값을 나타냈다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 Cr₂O₃ 조성에 따른 상대유전상수의 변화는 Cr₂O₃ 3.5 wt%에서 최대값을 보이며, 시험한 전 조성에서 적합한 범위의 상대유전상수 값을 나타냈다.

TiO₂ 성분과 Cr₂O₃ 성분에 따른 상부유전층 시편들의 온도에 따른 열팽창계수 변화를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 조성에 따른 열팽창계수의 변화는 작아 조성간 최대 약 0.3 ppm/°C의 차이를 보였고, 하부절연층 재료인 순도 96% 알루미나와는 최대 약 1 ppm/°C의 비교적 작은 열팽창계수차를 보였다. 즉, 이 HTEESC가 온도변화에 대하여 구조적인 안정성을 유지할 수 있음을 나타내고 있다.

3.2. 접합층 및 전극층의 특성

Fig. 8은 제조한 HTEESC의 단면을 주사전자현미경으로 관찰한 조직사진이다. 구성 층간의 갈라짐이 관찰되지 않아, 상부유전층과 하부절연층에 대한 중간접합층 재료의 접합특성이 우수한 것으로 나타났다.

전극층으로 선택한 은의 확산여부를 알아보기 위하여 단면에서 은성분의 profile을 측정하였다. Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 중간접합층이나 유전층으로의 은의 확산이 거의 일어나지 않았다. 따라서, 은전극과 중간접합층의 동시소결 공정에서 은전극의 확산에 의한 유전층과 중간접합층 특성 변화의 가능성은 거의 없다고 할 수 있다.

3.3. 척킹 특성

HTEESC에 최적으로 판단된 3.5 wt% Cr₂O₃+1.3 wt%

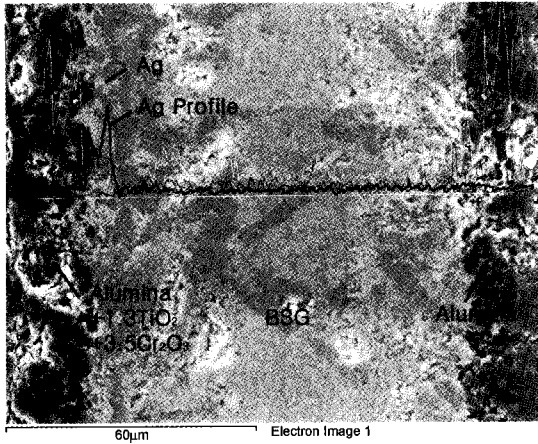


Fig. 8. SEM micrographs showing Ag profiles at upper dielectric layer (alumina+1.3TiO₂+3.5Cr₂O₃)/Ag/BSG/lower insulating layer(alumina) interfaces.

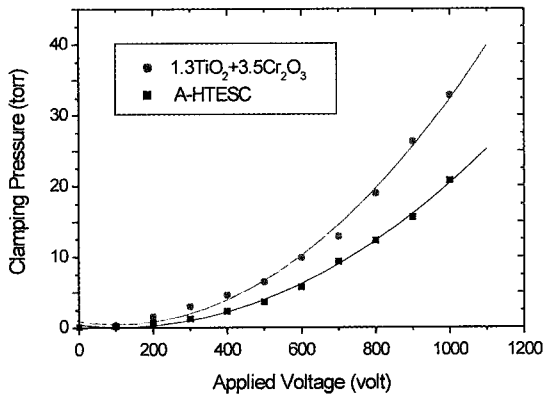


Fig. 9. Clamping pressures of the fabricated HTESC compared to commercialized one (A-HTESC) measured at various applied voltages.

TiO₂조성을 상부유전층으로 하는 HTESC를 자체 제작 하였으며, 제작한 HTESC와 상용 HTESC(A-HTESC)에 0~1000 volt의 전압을 상온에서 5분간 인가하여, 고착압력을 측정하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 인가된 모든 전압에서 제작된 HTESC의 고착압력이 상용 HTESC 보다 컸다. 한편, 측정된 값들을 이론모델식(실선)⁸⁾과 비교하였으며, 적용한 이론식은 식(1)과 같다.

$$P = \frac{\epsilon_o V^2}{2 \left(\frac{h_d}{\epsilon_r} + h_{gap} \right)^2} \quad (1)$$

여기서, P는 고착압력, V는 인가전압, ε_o와 ε_r은 각각

진공의 유전상수와 유전층의 상대유전상수, h_d와 h_{gap}는 각각 유전층의 두께(180 µm)와 웨이퍼-유전층 간의 틈이다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 측정된 값들은 P∝V²인 이론식과 잘 일치함을 알 수 있다. 한편, 유전층의 위면과 반도체 웨이퍼의 바닥면이 완전 평면일 수 없으므로 두 면간에는 진공의 틈(h_{gap})이 존재하게 되는데, 이 틈은 측정값을 이론식에 fitting할 때 h_{gap}을 미지변수로 하여 계산할 수 있으며, ~1.5 µm로 나타났다.

Fig. 9에서 유의할 사항은 이 고착압력은 모노폴라형 HTESC인 경우라는 것이다. 즉, 이들 측정은 HTESC의 6개의 세라믹 팬(fan)중에서 한 개를 모노폴라 형태로 전압을 가하여 측정한 것으로서, 실제 사용형태인 바이폴라형의 고착압력은 모노폴라형의 1/4에 해당한다. 그러나, 1/4항을 고려하더라도 여러 문헌상^{3,6,8)}에 나타난 HTESC들의 고착압력보다 큰 값을 보이고 있어 제작된 HTESC는 웨이퍼 고착에 충분한 압력을 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 본 HTESC의 유전층 두께가 180 µm로써 기존 HTESC의 대부분이 200 µm이상인 것에 비하여 얇게 제작된 점과 위 h_{gap}~1.5 µm에서 나타난 바와 같이 유전층의 평탄도가 높다는 점을 이유로 들 수 있다.

인가전압의 하전시간과 고착압력간의 관계를 알아보기 위하여 실제 공정에서 통상적으로 사용되는 1000 volt의 전압하에서 15, 60, 300, 600 초간 하전을 한 후, 고착압력을 측정하였다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 15초간의 하전은 60초 이상 하전한 것에 비하여 다소 작은 고착압력 값을 나타냈으나, 60초 이상의 하전에서는 거의 고착압력의 변화가 관찰되지 않았으며, 15초 하전시의

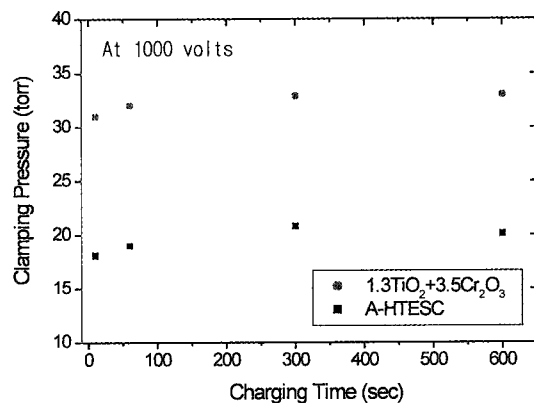


Fig. 10. Clamping pressures of the fabricated HTESC compared to commercialized one (A-HTESC) measured at 1000 volts with various charging times.

고착압력과 1 torr 미만의 차이를 나타냈다. 이러한 결과는 상용 HTESC에서도 유사하게 나타났다. 따라서, 15초의 하전으로 상부유전층내 전하의 축적이 거의 포화되었음을 의미하며, 15초 이상의 하전은 공정지연을 초래할 뿐만 아니라 전반적 기능의 효율을 저하시키는 것으로 판단된다.

4. 결 론

HTESC를 제조하기 위하여, 웨이퍼와 접촉하는 면인 상부유전층으로 87.9 wt%Al₂O₃에 소결조제로써 1.1 wt%MgO, 1.2 wt%CaO, 5.0 wt%SiO₂를 전기비저항 및 유전상수를 조절하기 위하여 여러 조성의 TiO₂와 Cr₂O₃를 첨가하여 제조하였다. 상대유전상수는 제조한 전 조성이 HTESC의 작동에 적합한 범위의 값을 나타냈으나, 전기비저항은 일부 조성이 고온에서 급격히 감소하며 적합한 범위를 벗어났다. 열팽창계수는 조성에 따라 변화가 작았으며, 하부절연층으로 사용된 순도 96% 알루미늄과 최대 1 ppm/°C의 작은 차이를 나타냈다. 상부유전층과 하부절연층간의 접합을 위하여 기존에 주로 사용되는 고분자 접착제 대신에 입자오염 발생의 가능성이 적은 유리재료를 사용하였다. 사용한 유리는 붕규산염 유리로써 상부유전층과 하부절연층에 우수한 접합력을 나타냈다. 전극층으로는 은을 선정하였다. 은전극은 유전층이나 유리접합층과의 반응 및 확산이 우려되었으나, 중간층의 접합소결온도 800°C에서 이러한 점이 발견되지 않았다. HTESC를 자체 제작하여 척킹특성을 시험하였다. 상용 HTESC에 비하여 척킹특성이 우수하게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2000학년도 순천향대학교 대학자체 학술연구비 지원을 받아 수행한 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. G. A. Wardley, "Electrostatic Wafer Chuck for Electro Beam Microfabrication," *Review of Scientific Instruments*, 44(10), 1506 (1973).
2. L. D. Hartsough, "Electrostatic Wafer Holding," *Solid State Technol.*, 34(4), 87 (1993).
3. J. Field, "Electrostatic Wafer Clamping for Next-Generation Manufacturing," *Solid State Technol.*, 34(6), 91 (1994).
4. K. A. Olson, D. E. Kotecki, and A. J. Ricci, "Characterization, Modeling, and Design of an Electrostatic Chuck with Improved Wafer Temperature Uniformity," *Rev. Sci. Instrum.*, 66(2), 1108 (1995).
5. J. F. Daviet and L. Peccoud, "Electrostatic Clamping Applied to Semiconductor Plasma Processing," *J. Electrochem. Soc.*, 140(11), 3245 (1993).
6. T. Watanabe, T. Kitabayashi, and C. Nakayama, "Electrostatic Force and Absorption Current of Alumina Electrostatic Chuck," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Pt. 1, 31(7), 2145 (1992).
7. Larsen, Electrostatic wafer clamp having low particulate contamination of wafers, *U. S. Patent No.* 5,969,934 (1999).
8. M. Nakasuji and H. Shimizu, "Low-Voltage and High-Speed Operating Electrostatic Wafer Chuck," *J. Vac. Sci. Technol.*, 10(6), 3573 (1992).