

(Sr_{1-x} · Ca_x)TiO₃ 입계층 세라믹의 유전 및 전기전도특성에 관한 연구

논문
8-5-11

A Study on the Dielectric and Electrical Conduction Properties of (Sr_{1-x} · Ca_x)TiO₃ Grain Boundary Layer Ceramics

최 운 식*, 김 충 혁*, 이 준 웅*

(Woon-Shik Choi, Chung-Hyeok Kim, Joon-Ung Lee)

Abstract

The (Sr_{1-x}·Ca_x)TiO₃ + 0.6[mol%]Nb₂O₅ (0.05 ≤ x ≤ 0.2) ceramics were fabricated to form semiconducting ceramics by sintering at about 1350[°C] in a reducing atmosphere(N₂ gas). Metal oxides, CuO, was painted on the both surface of the specimens to diffuse to the grain boundary. They were annealed at 1100 [°C] for 2 hours.

The 2nd phase formed by thermal diffusing from the surface lead to a very high apparent dielectric constant. According to increase of the frequency as a functional of temperature, all specimens used in this study showed the dielectric relaxation, and the relaxation frequency was above 10⁶ [Hz], it move to low frequency with increasing resistivity of grain.

The specimens showed three kinds of conduction mechanisms in the temperature range 25~125 [°C] as the current increased: the region I below 200 [V/cm] shows the ohmic conduction. The region II between 200 [V/cm] and 2000 [V/cm] can be explained by the Poole-Frenkel emission theory, and the region III above 2000 [V/cm] is dominated by the tunneling effect.

Key Words(중요용어) : Reducing atmosphere(환원 분위기), Metal oxides(금속 산화물), Thermal diffusing (열확산), Dielectric relaxation (유전완화), Poole-Frenkel emission theory (폴-프렌켈 방출이론)

1. 서 론

오늘날 전기·전자·통신산업의 눈부신 발전으로 각종 전자회로에 들어가는 캐패시터(capacitor)의 수요가 급증하고 있으며, 이들의 수요 증대에 따라서 각 캐패시터 제조회사들은 시장 요구의 대응책으로서 캐패시터의 소형화, 박막화, 고성능화 및 고신뢰성화의 방향으로 생산체제의 강화를 꾀하고 있다.

또한, 전자회로의 집적화로 인하여 소형·대용량

을 갖는 캐패시터에 대한 요구가 증대되고 있으며, 이에 부응하여 적층캐패시터(multi layer capacitor, MLC), 입계층(grain boundary layer, GBL)캐패시터 등이 개발·실용화되고 있다. 이들 중 입계층 캐패시터는 반도체성 세라믹의 입계에 표면으로부터 금속산화물을 열확산시킴으로써 유전층을 형성시키는 것으로 초기에는 유전상수가 큰 BaTiO₃를 기본으로 한 GBL 캐패시터가 주류를 이루었으나 강유전성이 갖는 단점을 개선하기 위한 지속적인 연구결과 최근에는 대용량·저손실이며, 정전용량의 온도특성이 양호한 상유전 특성을 갖는 SrTiO₃계 GBL 캐패시터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{1~2)}.

아울러 BL 세라믹의 입계 특성을 제어하여 용

* : 광운대학교 공대 전기공학과
접수일자 : 1995년 5월 12일
심사완료 : 1995년 6월 29일

량성 바리스터 기능을 갖는 캐패시터 (복합기능소자 : multi functional ceramics, MFC)에 대한 연구가 진행중에 있으며, 일부 실용화되고 있다. 이 MFC는 보통의 상태에서는 입계절연형 반도체 세라믹 캐패시터로서 기능을 가지며, 회로에 노이즈 (noise)가 입력되면 순간적으로 바리스터 특성을 나타냄으로써 회로를 보호한다. MFC는 입계절연형의 구조를 적극적으로 이용하여 복수의 기능을 조합한 좋은 예라 할 수 있으며, 이와같은 소자는 각종 전자회로의 소형화 및 고신뢰성화에 기여할 것이라 사료된다.

따라서, 본 연구는 고전압 직·교류에서 신뢰성이 특히 양호한 것으로 알려진 SrTiO₃계 세라믹의 Sr의 일부를 Ca로 치환시킴으로써 유전율의 온도 특성을 개선한 (Sr,Ca)TiO₃계 GBL 세라믹을 제작한 후 유전율의 온도 및 주파수 특성등을 고찰하였으며, 전자세라믹 재료의 다기능화에 부응하는 일환으로 전도특성의 고찰을 통하여 용량성바리스터로서의 응용가능성을 검토하였다.

II. 실험

II-1. 시편제작

시편제작에 사용된 주 시료는 CERAC社 SrCO₃, CaCO₃, TiO₂와 반도체화제로서 미량의 Nb₂O₅를 사용하였으며, 열처리시 열확산 금속 산화물로서 CuO를 사용하였다. 각 시료는 기본 조성식 (Sr_{1-x}Ca_x)TiO₃ + 0.6[mol%]Nb₂O₅ (0.05 ≤ x ≤ 0.2)에 따라 전자천칭을 사용하여 칭량하였으며, 아세톤을 분산매로 하여 알루미늄 유발에서 혼합한 후 1100℃에서 2시간 동안 하소 (calcining)하였다. 하소된 혼합물을 알루미늄 유발에서 분쇄한 후 결합제로서 P.V.A. (polyvinyl alcohol)를 2 [wt%] 혼합하여 원통형 금형(Φ:20 [mm])에 약 3 [g]씩 넣고 1500 [kg/cm²]의 압력으로 성형하였다. 성형된 시편은 그림 1과 같이 전기로에 배치하고 1350℃에서 3시간 동안 N₂ 분위기에서 소결하여 반도체 세라믹을 제작하였다.

소결하여 얻은 반도체 세라믹을 약 1 [mm]의 두께로 연마 (polishing)하여 표면에 CuO를 도포한 후 1100℃에서 2시간 동안 열처리함으로써 입계를 절연화시켰다. 열처리된 시편의 양면에 은 (silver)전극을 증착한 후 전기적 특성의 측정을 위한 전극으로 사용하였다. 그림 2에 시편의 제작공정을 나타내었으며, 제작된 각 시편의 번호를 표 1에 나타내었다.

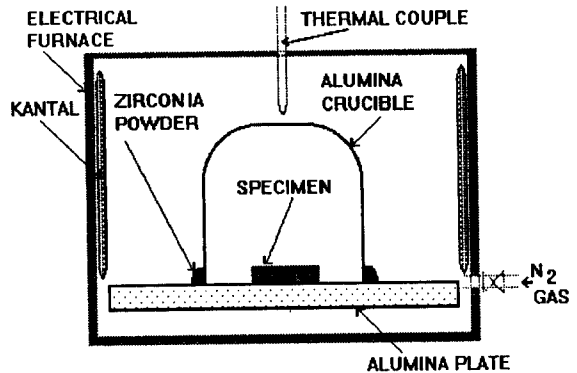


그림 1. 소결시 전기로와 도가니의 구조
Fig. 1. Electrical furnace and crucible structure for the sintering.

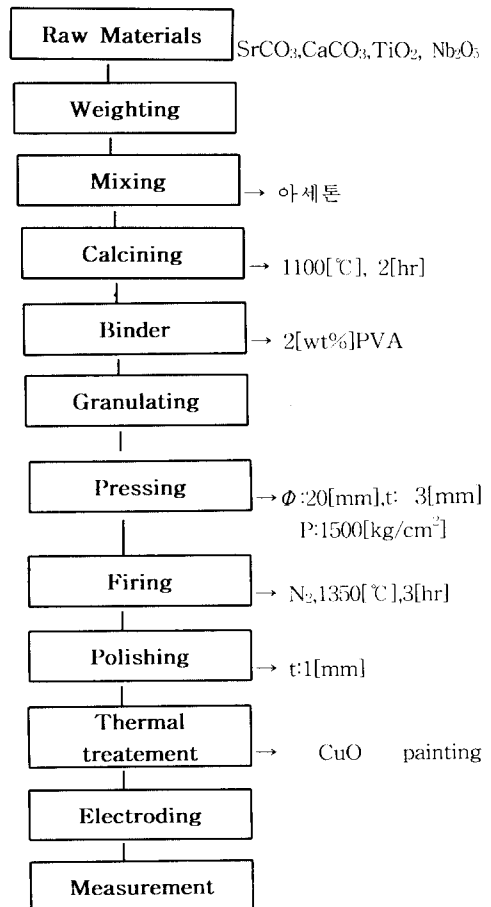


그림 2. 시편의 제작공정
Fig. 2. Processing diagram of the specimen.

표 1. 시편의 번호

Table 1. Number of specimen.

Sr : Ca	Sample No.
0.95:0.05	SCTN056
0.90:0.10	SCTN106
0.85:0.15	SCTN156
0.80:0.20	SCTN206

II-2. 측정

소결된 반도체 세라믹의 비저항은 시편의 양면에 인납(In) 전극을 증착한 후 Electrometer를 사용하여 DC 2단자법으로 측정하였다. 열처리 시편의 비저항은 은전극을 부착하여 High Resistance Meter (HP 4329A)로 50 [V] 인가 후 측정하였다. 열처리 시편의 비유전율(relative dielectric constant: ϵ_r)은 LCR Meter (HP 4194A)를 이용하여 온도범위 -150~+210 °C에서 1 [kHz], 1 [V_{rms}]의 교류전계하에서 정전용량을 측정 한 후 식 (1)에 의하여 계산하였다.

$$\epsilon_{APP} = \frac{Cd}{\epsilon_0 S} \quad (1)$$

여기서, ϵ_{APP} : 겉보기 비유전율, ϵ_0 : 진공중의 유전율 [F/m], C : 정전용량 [F], S : 전극의 면적 [m²], d : 시편의 두께 [m]이다.

또한, 정전용량의 주파수 특성은 100 [Hz]~10 [MHz]의 범위에서 LCR meter로 정전용량을 측정하여 알아 보았다.

열처리하여 제작된 각 시편의 전압-전류특성을 측정하기 위한 개략도는 그림 3과 같다. 측정온도는 25~125 °C였으며, 각 온도에서 전압 인가후 6분 경과후의 값을 정상전류로 하여 측정하였다.

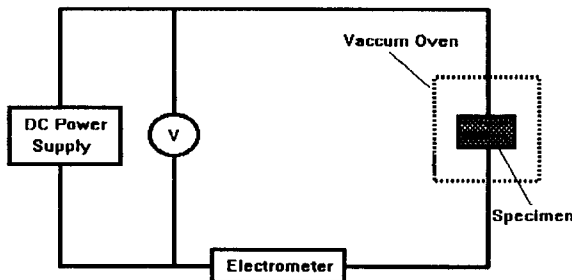


그림 3. 전기전도 실험장치의 블록도
Fig. 3. Block diagram of electrical conduction

III. 결과 및 고찰

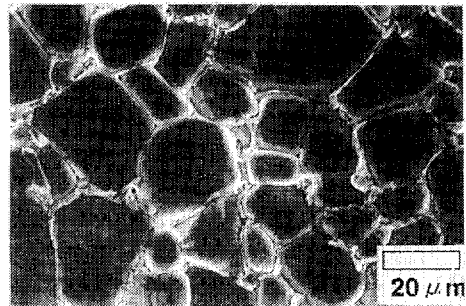


사진 1. 열처리된 시편의 전자현미경 사진
Photo. 1. SEM photograph of thermal treated specimen.

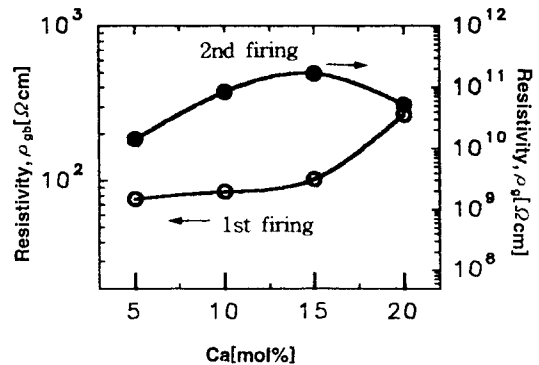


그림 4. Ca의 치환량에 따른 환원 및 열처리 시편의 비저항
Fig. 4. Resistivity of reduced(1st fired) and 2nd fired specimens with the content of Ca.

III-1. 구조적인 특성

사진 1은 CuO를 도포하여 1100 °C에서 열처리한 시편의 미세구조를 나타낸 것이다. 표면으로부터 열확산된 CuO는 결정립 사이의 입계에 얇은 입계상을 형성하고 있음을 알 수 있다¹¹⁾.

그림 4는 Ca의 치환량에 따른 환원 및 열처리 시편의 비저항을 나타낸 것이며, 반도체 시편의 비저항은 <math><10^3 [Ωcm]</math>, 열처리한 시편의 비저항값은 $10^9 \sim 10^{11} [Ωcm]$의 값을 나타내었다.

III-2. 유전율의 온도특성

그림 5에 Ca의 치환량에 따른 소결 후 (Sr,Ca)TiO₃ 세라믹스의 유전상수의 온도특성을 나타낸다. Ca의 치환량이 증가함에 따라 15 [mol%]까지는 큰 변화가 없으나 그 이상 치환되면 유전상수가 급격히 감소하는 것으로 보아 양호한 특성을 얻을 수 있는 Ca의 치환 한계는 15

[mol%] 이하라고 생각된다.

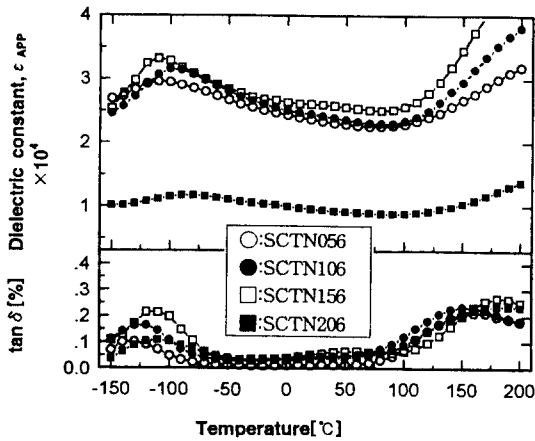


그림 5. Ca의 변화량에 따른 유전상수 및 유전손실(tan δ)의 온도 의존성

Fig. 5. Temperature dependence of dielectric constants and dielectric loss(tan δ [%]) with contents of Ca.

본 연구에 사용된 시편이 고유전율을 나타내는 것은 열처리 시편의 표면으로부터 열확산된 Cu 유리상 (glass phase)과 입계에 존재하는 TiO₂상과의 반응이 활발히 진행되어 입자 주위에 균일한 액상막이 형성되면서 제 2상에 의한 정전용량의 기여가 증가되어 유전상수가 커지게 되며, Ca의 치환량이 15 [mol%]를 넘으면 (Sr,Ca)TiO₃ 산화층의 확산이 급격히 진행되어 유전층의 두께가 증가하면서 유전상수가 감소하게 되는 것으로 생각된다.

또한 고온측(>100°C)에서 정전용량이 급격히 증가하고 있는데 이는 (Sr·Ca)TiO₃ 확산층의 저항이 온도가 증가함에 따라 감소하고 그 결과 정전용량의 크기에 영향을 미치는 입계층의 두께가 얇아져서 전체적으로 정전용량이 증가하는 것이라 생각할 수 있다.

III-3. 유전율의 주파수 특성

그림 6은 정전용량의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 10⁶Hz 이상에서 정전용량의 분산(dispersion)이 일어남을 알 수 있으며, 이는 여러물질로 이루어진 다층 유전체에 대한 Maxwell-Wagner 이론에 의하여 설명된다⁴⁾. 또한, BL구조에서의 주파수 특성의 주 원인은 서로 다른 유전층에서의 유전완화 (dielectric relaxation)에 의한 것으로 설명할 수 있으며, n형 반도체와 절연층으로 구성된 입계

층 세라믹에서 완화 (relaxation) 주파수 (f_m:Hz)는 식 (2)와 같이 반도체부의 비저항 (ρ)과 저주파 (수십 MHz)에서의 유전상수 (ε)의 함수로 나타낼 수 있다⁵⁾.

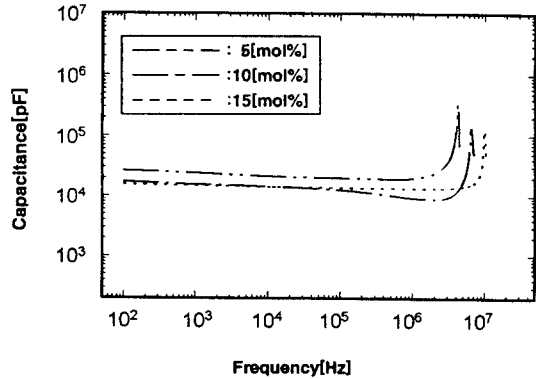


그림 6. 정전용량의 주파수 의존성

Fig. 6. Frequency dependance of capacitance.

$$f_m = 1.8 \times \frac{10^{12}}{\epsilon \rho} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

즉, 반도체부의 비저항이 증가하면 완화주파수는 감소하게 되며, 본 연구에 사용된 환원시편의 비저항 측정결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

본 연구에 사용된 유전체가 relaxor 즉, 유전율의 피크가 주파수 증가에 따라 고온쪽으로 이동하는 것인지를 알아보기 위하여 x=0.10 시편에 대하여 1, 10, 20, 100 [kHz]의 주파수에서 유전율의 온도특성을 측정하여 그림 7에 나타내었다. 그

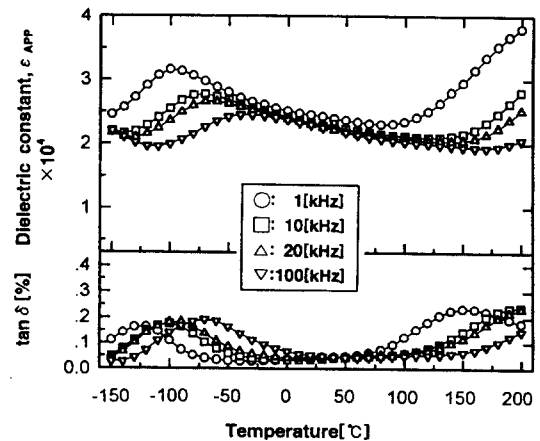


그림 7. 온도의 함수로서 유전상수의 주파수 의존성

Fig. 7. Frequency dependence of dielectric constant as a function of temperature,

림으로부터 본 연구에 사용된 시편은 relaxor임을 확인할 수 있었으며, 이러한 완화 현상은 Johnson⁶⁾등이 제시한 바와 같이 Sr²⁺, Ca²⁺ 등의 A-site 공공들의 구조적인 결합이 Nb⁵⁺이온들로 치환된 결과라고 해석할 수 있다.

이상과 같은 유전특성의 결과로부터 본 연구에 사용된 시편에 있어서 25000 이상의 고유전율을 얻을 수 있었다. 이 결과를 토대로 복합기능소자로서의 응용 가능성을 확인하기 위하여 전기전도 특성을 검토하였다.

III-4. 전기전도특성

일반적으로 다결정체인 전자세라믹스의 입계에는 전위 (dislocation)나 격자결함 (lattice defects)이 많고, 불순물들의 편석도 일어나기가 쉽기 때문에 트랩 (trap)이나 불순물 준위가 형성된다. 따라서 반도체화한 입자가 접촉된 입계에는 이러한 트랩이나 불순물 준위에 의한 에너지 장벽이 형성되고 이들이 전도기구에 기여할 것으로 생각된다.

본 실험에서는 유전특성의 결과로부터 비교적 양호한 것으로 판단되는 SCTN106 시편에 대한 전압-전류특성을 그림 8에 나타낸다. 전압-전류특성은 측정온도가 상승함에 따라 누설전류도 증가하고, 약 200[V/cm] 이하의 전계에서의 전류는 인가전계에 거의 비례하여 증가하며, 그 이상의 전계에서의 전류는 비직선적으로 증가하여 파괴에 이르고 있음을 나타내고 있다.

이와같이 상유전 영역에서 파괴가 순간적으로 일어나지 않고 전류가 서서히 증가하여 파괴에 이르는 것을 岡崎清은 그림 9와 같이 설명⁷⁾하고 있다. 즉, T_c 이하(강유전 영역)에서 결정립 내의 하전입자에 인가되는 유효전계는 그림 9(a)와 같이 P₁(자발분극)에 의한 반전계에 의하여 인가전압 E₀와 상쇄됨으로서 극히 작게 되고, 그 때문에 P₂(공간전하분극)는 생성되지 않는다. 따라서 T_c 이하의 온도 영역에서의 파괴는 입계층의 상유전성 재료의 파괴가 지배적인 요인으로 된다고 하였다. 또한 T_c 이상 (상유전영역)에서의 절연파괴는 결정립 자체의 성질에 영향을 받는다. 즉, 전계를 인가하면 강유전체와 같은 자발분극이 없기 때문에 인가된 전압은 그대로 결정립 내의 하전입자에 가해지고 그림 9(b)에서와 같은 P₂가 발생한다. 이때 결정립 내부의 표면층에 P₂에 의한 공간전하층이 형성되고, P₂가 어느 한계를 넘게되면 급격히 노화하여 파괴에 이르게 된다. 따라서 본 연구에 사용된 시편이 상유전재료임을 고려할때 그림 8에 나타낸 파괴양상은 인가전압이 증가됨에 따라 결정립 내

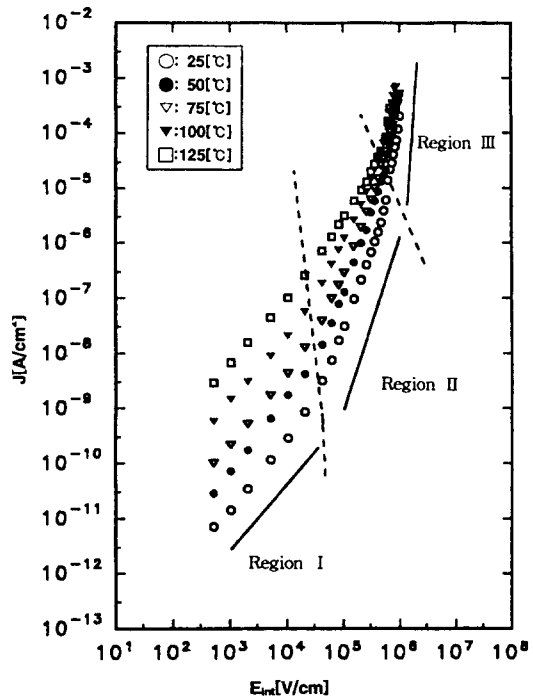


그림 8. SCTN106 시편의 lnJ와 E_{int}와의 관계
Fig. 8. The relation between the SCTN106 specimen.

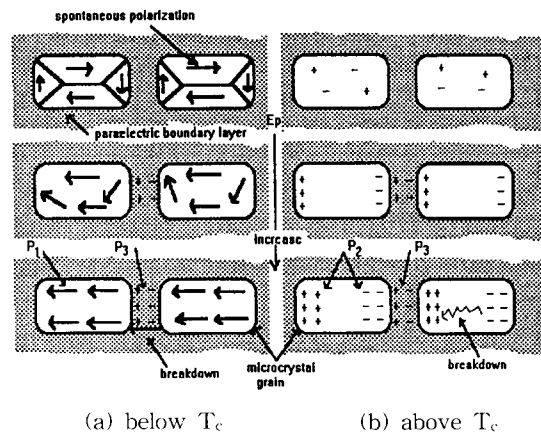


그림 9. 공간전하분극에 의한 절연파괴 모델
Fig. 9. Models of breakdown at below curie temperature and above.

부의 표면에 형성된 공간전하에 의한 결정립 자체의 파괴이거나 입계층의 파괴에 그 원인이 있는 것으로 생각할 수 있으므로 그림 8의 전압-전류특성을 이해할 수 있다.

그림 8에서와 같이 전도 특성은 전도 양상에 따라 몇 개의 영역으로 구분하여 해석할 수 있음을 볼 수 있으며, 각 영역에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

1. 제 I 영역

이 영역에서의 전류는 인가전계에 따라 거의 직선적으로 증가하며, 이온전도 이론식으로부터 저전계 ($eEa \ll kT$) 일때는 $J \propto E$ 이므로 이 영역의 전류밀도는 전계에 비례하는 오옴의 법칙으로 설명할 수 있다. 또한 측정온도의 증가에 따라 전류도 크게 증가하고 있는 것으로부터 전계보다는 온도에 크게 영향받고 있음을 알 수 있다. 이러한 특성으로 부터 이 영역의 전도기구는 열에 민감한 이온에 의한 것으로 추론된다. 이온이 생기는 기원으로는 시료 제작시 첨가되는 각종 불순물이나 부분 치환에 의해서 생긴 Sr^{2+} , Ca^{2+} , Ti^{4+} 이온등의 격자결함인 것으로 생각된다¹¹³⁾. 본 연구에 있어서는 비화학 당량으로 첨가한 Nb_5 에 의해서 생성되는 Ti^{2+} 와 미치환된 Nb^{5+} , A-site 공공 (vacancy)이나 이온화된 미반응 Ca^{2+} , Sr^{2+} 등의 이온들이 불순물로 작용하며 이 영역에서의 전도에 기여하는 것으로 생각된다.

2. 제 II 영역

이 영역에서의 전압-전류 특성은 인가전계가 증가함에 따라 전류는 비직선적인 변화를 보이며 증가함을 알 수 있다. 작은 전계의 변화에도 전류 밀도가 급격히 증가하는 비오옴특성을 나타내고 있는 것으로 부터 이 영역에서의 전도특성은 온도에 의한 이온 및 불순물들의 활성화에 의한 기여보다는 공핍층에 포획되어 있던 전자들이나 이온들이 인가전계의 상승에 따라 활성화되면서 이들이 전도에 크게 기여하고 있는 것으로 생각된다.

또한 입계 근방의 전자구조는 (1)입계준위, (2)이온화한 donor, (3)bulk trap으로 이루어지고 있으며, 계면준위는, (a)결정의 주기성의 결여, (b)전위, 격자결함의 밀집, (c)불순물 원소의 존재, (d)이상(異相) 등으로 형성¹¹⁴⁾되고 있으므로 입계층의 불순물 준위 또는 트랩을 고려하여 제시된 Schottky 방출이론과 Poole-Frenkel 방출이론으로 해석¹¹⁵⁾할 수 있다.

본 실험의 경우에 표면으로 부터 열확산 시킨 Cu가 결정립간에 고정함을 갖는 절연층을 형성하고 있는 것으로 해석된 구조적분석의 결과로부터 영상전하를 고려하지 않은 Poole-Frenkel 방출이론으로 고찰하고자 한다.

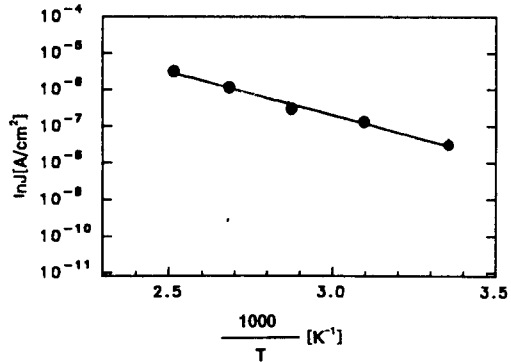


그림 10. 제 II 영역에서의 lnJ-1/T 특성
Fig. 10. lnJ-1/T characteristics in the region II.

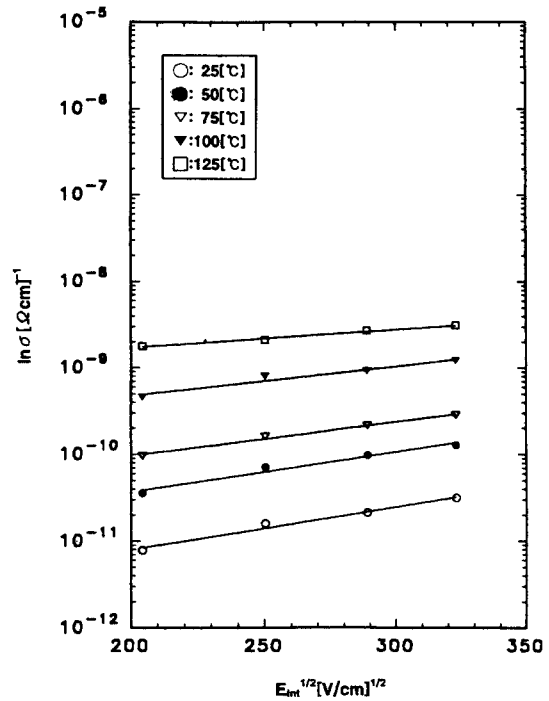


그림 11. 제 II 영역에서의 ln σ - E_m^{1/2} 특성
Fig. 11. ln σ - E_m^{1/2} characteristics in the region II.

Poole-Frenkel 방출이론에 의하면 식 (3)으로부터 전도도 ln σ와 전계 E^{1/2} 사이에 직선적인 관계가 성립하며 정(正)의 기울기를 나타낸다. 또한 식 (4)로부터 lnJ ~ 1/T의 plot은 직선적인 관계가 성립하며 부(負)의 기울기를 나타낸다.

$$\sigma = \sigma_o \exp\left[-\frac{\beta_{PF} E^{1/2}}{2kT} \right] \quad (3)$$

$$J = J_o \exp\left[-\frac{\beta_{PF} E^{1/2}}{2kT} \right] \quad (4)$$

$$\beta_{PF} = \left(\frac{e^3}{\pi \epsilon} \right)^{1/2} = 2\beta_s$$

본 실험의 결과로부터 얻은 전압-전류 특성의 제 II 영역에서의 $\ln J - 1/T$ 와 $\ln \sigma - E^{1/2}$ 을 도시하면 그림 10, 그림 11과 같이 되며, 그림으로 부터 Poole-Frenkel 조건을 만족하고 있으므로 Poole-Frenkel 방출이론을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

3. 제 III 영역

이 영역은 온도의 영향을 거의 받지않고, 인가 전계의 증가에 따라 전류가 급증하며 파괴에 이르고 있음을 볼 수 있다. 이 영역의 전류 급증을 설명할 수 있는 이론으로는 공간전하 제한전류(SCLC), 쇼트키 방출이론과 전자사태 파괴이론 등이 제안되고는 있으나 실험적인 사실을 충분히 설명하는 이론은 제안되지 않고 있으며, 이 영역에 있어서의 해석은 양자역학적인 터널이론이 지배적으로 적용되고 있다.

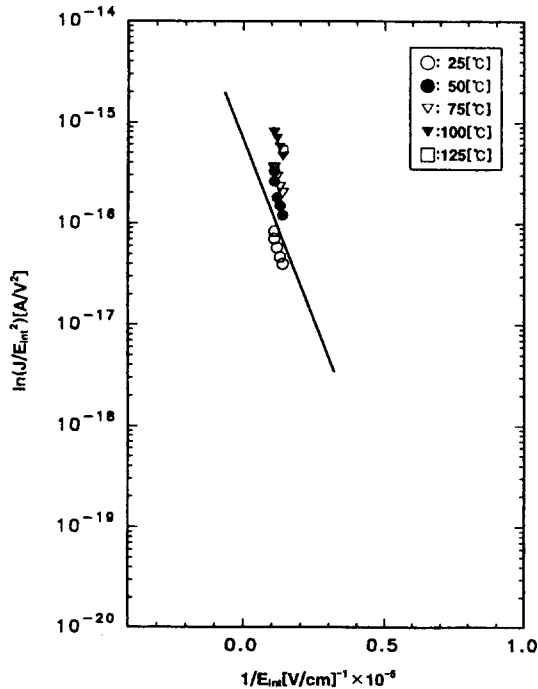


그림 12. 제 III 영역에서 $\ln(J/E_{int}^2)$ 와 $1/E_{int}$ 의 관계

Fig. 12. The relation between the $\ln(J/E_{int}^2)$ and $1/E_{int}$ in the region III.

터널효과에 의한 전류식인 식 (5)로부터 $\ln(J/E_{int}^2)$ 와 $1/E_{int}$ 의 관계는 부(負)의 기울기를 갖는

직선으로 된다. 본 실험의 결과를 $\ln(J/E_{int}^2)$ 와 $1/E_{int}$ 에 대하여 도시하면 그림 12와 같다. 그림 12는 터널이론의 조건을 만족하고 있음을 보여주고 있다. 즉, 이 영역에서의 파괴에 이르는 현상은 인가전계의 증가에 따라 가전자대에 있던 전자들이 터널효과에 의해서 전도대로 전이(遷移)하게 되고 결국 전도대의 전자수를 급증시켜 종국에는 파괴에 이르는 것이라 설명할 수 있다¹⁰⁾.

$$J = \frac{2.2e^3 V^2}{8\pi h \phi_D d^2} \exp\left(\frac{8\pi d}{2.96heV}\right) (2m)^{1/2} \phi_D^{3/2} \\ = AE^2 \exp(-B/E) \quad (5)$$

또한 이영역에서의 비선형지수($\alpha = \ln I / \ln V$)는 7 이상의 값을 나타내었으며, 따라서 본 연구에 사용된 시편은 고용량성 바리스터로서 응용하기에 충분하리라 사료된다.

IV. 결 론

(Sr_{1-x}·Ca_x)TiO₃ + 0.6[mol%]Nb₂O₅ (0.05 ≤ x ≤ 0.2)계 세라믹을 제작하여 유전 및 전도특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 표면으로 부터 열확산 시킨 Cu가 형성하는 제 2상에 의해 유전율이 증가하였으며, Ca의 치환량이 20 [mol%] 이상에서는 급격히 감소하였다. 또한 분산주파수는 10⁶ [Hz] 이상이었으며, 본 연구에 사용된 모든 시편은 온도의 함수로서 주파수 증가에 따라 유전완화 현상을 나타내었다.
- 2) 전압-전류특성 곡선을 3 영역으로 분리하여 고찰함으로써 얻게된 각 영역에서의 전도기구는 다음과 같다.

① 제 1 영역

제 1 영역에서의 전도특성은 전류가 전계에 비례하는 오옴의 법칙으로 설명할수 있었다.

② 제 2 영역

제 2 영역에서의 전도특성은 온도에 의한 이온 및 불순물들의 활성화에 의한 기여보다는 공핍층에 포획되어 있던 전자들이 인가전계의 상승에 따라 활성화되면서 이들이 전도에 크게 기여하고 있는 것으로 생각된다. 따라서 입계층의 불순물 준위 또는 트랩을 고려하여 제시된 Poole-Frenkel 방출이론으로 해석할 수 있다.

③ 제 3 영역

제 3 영역에서는 온도의 영향을 거의 받지 않

고, 전류가 급증하며 파괴에 이르렀으며, $\ln(J/E_{im}^2)$ 와 $1/E_{im}$ 의 관계가 부(負) 기울기를 갖는 직선적인 관계가 성립하였다. 따라서 전류 급증을 설명하는 여러 이론중 터널이론의 조건을 만족하고 있으므로 터널이론으로 해석할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1] P.E.C. Franken, M.P.A.Jiengers et al., "Microstructure of SrTiO₃ Boundary-Layer Capacitor Material", J.Am. Ceram. Soc., Vol.64(12), pp.687~690, 1981.
- 2] Nobotatsu Yamaoka, "SrTiO₃-Based Boundary-Layer Capacitors", Ceram. Bull., Vol.65(8), pp. 1149~52, 1986.
- 3] Nobutatsu Yamaoka, "SrTiO₃-Based Boundary Layer Capacitor Having Varistor Characteristics", Ceram. Bull., Vol.62(6), pp.698~703, 1983.
- 4] Masayuki Fujimoto, Yet-Ming Chiang et al., "Microstructure and Electrical Properties of Sodium-Diffused and Potassium-Diffused SrTiO₃ Barrier-Layer Capacitors Exhibiting Varistor Behavior", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 68 (11), pp.c-300~c-303, 1985.
- 5] A.R. von Hippel, Dielectrics and Waves, John Willey and Sons Inc., New York, p.228, 1954.
- 6] W. Johnson, L.E.Cross, F.A. Hummel, "Dielectric Relaxation in Strontium Titanates Containing Rare-Earth Ions", J. Appl. Phys., Vol. 41, pp.2828~2833, 1970.
- 7] 岡崎 清, "セラミック誘電體工学", 學獻社, pp. 200~203, 1992.
- 8] 向江和郎, セラミクス, 16, p.473, 1981.
- 9] L. M. Levinson and H. R. Philipp, "The physics of metal oxide varistors", J. Appl. Phys., Vol.46(3), p.1332, 1975.
- 10] J. D. Levine, "Theory of varistor electronic properties", CRC Crit. Rev. Solid State Sci., Vol.5, p.597, 1975.
- 11] 최운식, 김충혁, 이준웅, "(Sr·Ca)TiO₃계 입계층 세라믹의 Ca 변화량에 따른 미세구조 및 유전 특성", 한국전기·전자재료학회, 11, 534~542, 1994

저자소개



최운식
1962년 4월 17일생. 1989년 2월 광운대학교 전기공학과 졸업. 1991년 2월 광운대학교 전기공학과 석사. 1995년 2월 광운대학교 전기공학과 박사.



이준웅
1940년 10월 24일생. 1964년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 1970년 2월 한양대학교 전기공학과 석사. 1979년 9월 France 국립 Montpellier 전기공학과(공학박). 1990년 1월-12월 미국 미시시피 주립대 교환교수. 1995년 현재 광운대 전기공학과 교수. 현재 당 학회 편수 위원장.



김충혁
1959년 9월 27일생. 1986년 2월 광운대학교 전기공학과 졸업. 1988년 9월 광운대학교 전기공학과 석사. 1993년 2월 광운대학교 전기공학과 박사. 1995년 현재 사회교육원 교수.