

(Sr_{0.85}·Ca_{0.15})TiO₃ 입계층 세라믹의 열자격전류 특성에 관한 연구

논문
9-4-9

A Study on the Properties of Thermally Stimulated Current of (Sr_{0.85}·Ca_{0.15})TiO₃ Grain Boundary Layer Ceramic

김진사*, 김성열*, 유명각**, 최운식*, 이준웅*

(Jin-Sa Kim, Sung-Yeol Kim, Young-Kag Yoo, Woon-Sik Choi, Joon-Ung Lee)

Abstract

In this paper, the (Sr_{0.85}·Ca_{0.15})TiO₃ of paraelectric grain boundary layer (GBL) ceramics were fabricated, and the analysis of microstructure and the thermally stimulated current(TSC) were investigated for understanding effects of GBL's interfacial phenomenon on variations of electrical properties. As a result, the three peaks of α , α' and β were obtained at the temperature of -20[°C], 20[°C] and 80[°C], respectively. The origins of these peaks are that the α peak observed at -20[°C] looks like to be ascribed to the ionization excitation from donor level in the grain, and the α' peak observed at 20[°C] appears to show up by detrapp of the trapped carrier of border between the oxidation layer and the grain, and the β peak observed at 80[°C] seems to be resulted from hopping conduction of existing carrier in the trap site of the border between the oxidation and second phase.

Key Words(중요용어) : Paraelectric(상유전성), Thermally stimulated current(열자격전류), Oxidation layer(산화층), Hopping conduction(호핑전도), Degradating properties(열화특성)

1. 서 론

오늘날 많은 가전제품을 비롯하여 통신기기, 제어기기등의 산업기기의 성장으로 세라믹 캐패시터(Ceramic Capacitor)의 수요가 크게 증가하고 있고, 이들 캐패시터는 소형화, 박막화, 고성능화 및 고신뢰화의 방향으로 연구개발이 꾸준히 진행되어 왔다. 이러한 전기·전자회로의 급속한 소형화에 따른 고용량성의 캐패시터를 개발하기 위하여, 세라믹에 반도체성을 부여한 후 얇은 유전층을 형성시키는 BL (Boundary Layer) 캐패시터의 제작방법이 연구되어 왔다.

초기에는 강유전성의 BaTiO₃계 캐패시터가 주류를 이루었으나, 최근에는 큰 정전용량을 가지면서 유전손실이 작고 온도특성이 양호한 상유전성 특성의 SrTiO₃계 BL 캐패시터의 개발이 활발히 연구되고 있다.^{1,2)}

한편, 우수한 특성의 캐패시터를 개발하기 위해서는 물리적, 화학적 및 구조와 그 전기적 특성에 대하여 전반적인 성질을 이해한 후, 결정입자와 입계층 사이의 계면현상을 제어하므로써 원하는 재료를 개발할 수 있는데, 그러한 물성을 이해하기

위한 방법의 하나가 열자격전류(Thermally Stimulated Current)라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 SrTiO₃계 세라믹에서 Sr의 일부를 Ca로 치환시켜 N₂ 분위기에서 강제환원 방식으로 소결한후, 반도체 세라믹의 표면에 CuO를 도포하여 1100[°C]에서 2시간 동안 열처리함으로써 세라믹의 결정입자(Grain) 사이에 얇은 유전층을 형성시키는 방법으로 입계층 세라믹을 제작하였다. 이와같이 제작된 입계층 세라믹의 전기적 특성변화와 미세구조 분석 및 전기적 특성을 조사하여 입계층의 구조와 입계층 세라믹의 전기적 특성변화에 영향을 미치는 하전입자의 기원과 거동을 밝히고자 열자격전류 특성을 적용하여 입계의 계면현상을 분석하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 시편 제작

본 실험에 사용된 주 시료는 SrCO₃, CaCO₃, TiO₂ 및 반도체화제로서 0.006 mol Nb₂O₅ 그리고 열처리시 열확산 산화물로서 CuO를 사용하였다.

각 시료는 기본 조성식 (Sr_{0.85}·Ca_{0.15})_mTiO₃+0.006Nb₂O₅ (0.996≤m≤1.004)에 따라 전자천평을 사용하여 칭량하였으며, 메칠 알콜을 분산매로 하여 알루미늄나 유발에서 혼합한 후 1100[°C]에서 2시간 동안 하소(calcining)하였다. 하소된 혼합물을 알루미늄나 유발에서 분쇄한 후 유기 바인더

* : 광운대학교 전기공학과

** : 충청전문대학 전자과

접수일자 : 1995년 7월 6일

심사완료 : 1995년 11월 1일

(P.V.A:polyvinyl alcohol)를 2[wt%] 혼합하여 원통형 금형(φ:20[mm])에 3[g]씩 넣고 1500[kg/cm²]의 압력으로 성형하였다.

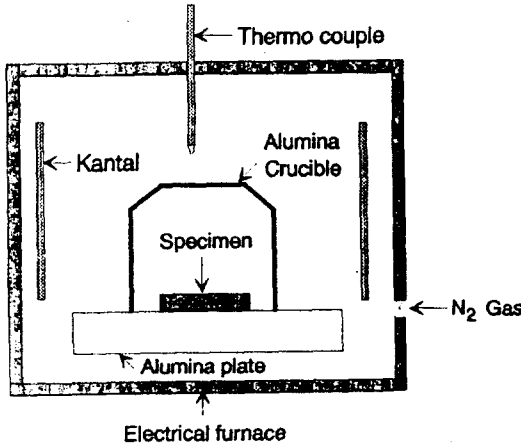


그림 1. 소결시 전기로와 도가니의 구조
Fig. 1. The structure of heating furnace and crucible

성형된 시편은 그림 1과 같이 배치하여 전기로에 넣어 1350[°C]에서 3시간 동안 N₂ 분위기에서 1차 소결하므로써 반도체 세라믹을 제작하였다. 이때 온도상승률은 200[°C/hr] 였다.

1차 소결로 부터 얻은 반도체 시편을 두께 1[mm]로 연마(polishing)하고 표면에 CuO를 도포하여 1100[°C]에서 2시간 동안 2차 열처리함으로써 입계를 절연화 시켰다. 2차 열처리된 시편의 양면에 Silver를 증착하여 전극으로 사용하였다. 표 1에는 본 연구에 사용된 시편의 종류를 나타낸 것이며, 그림 2는 시편의 제조 공정을 나타내었다.

표 1. 시편의 종류
Table 1. Kinds of specimen.

A:B Sr:Ca	0.996 : 1	1 : 1	1.004 : 1
0.85 : 0.15	SCT	SCTN	SC

2.2. 구조적 물성의 측정

1차 열처리하여 얻은 반도체 세라믹 시편의 조성에 따른 결정입자의 성장과정과 미세구조를 관찰하기 위하여 소결한 시편의 표면을 연마한 후 아세톤, 메틸알콜 등으로 세척하여 주사 전자 현미경(Scanning Electro Microscope:SEM)을 이용하여 관찰하였으며, 표면으로부터 금속 산화물을 열확산시킨 시편의 입계구조와 결정입자의 입계에 형성되는 유진층과 그 원소를 확인하기 위하여

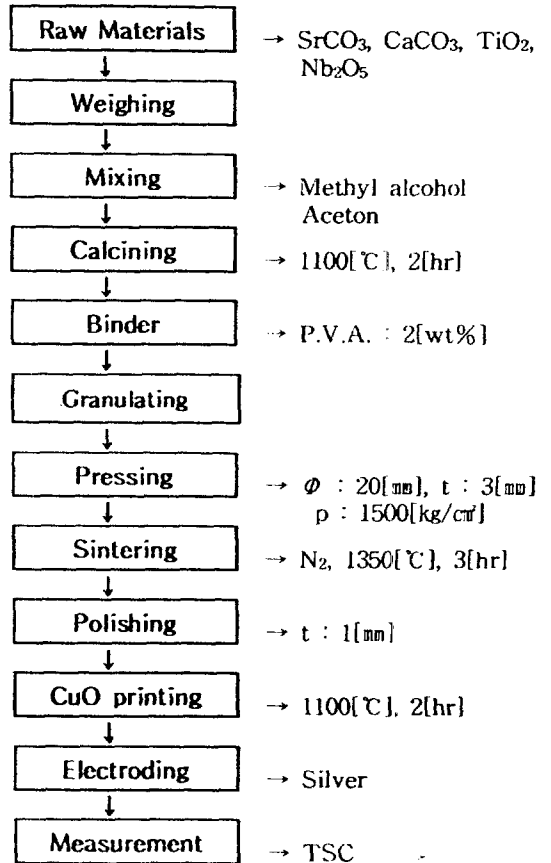


그림 2. 시편의 제조공정
Fig. 2. Manufacturing Process of Specimens

EDAX(Energy Dispersive Analysis Of X-ray)를 이용하여 분석하였다. 평균 결정립의 크기는 Jeffries의 면적 측정법을 이용하여 식 (1)과 식 (2)로 부터 구하였다.

$$N_G = \frac{n_c + (n_i/2)}{A/m^2} \tag{1}$$

여기서, N_G: 단위면적당의 입자수 [개/m²]
n_c: 원내의 입자수 [개/m²]
n_i: 원주에 걸린 입자수 [개/m]
A: 원의 면적 [m²]
m: 배율

위식에서 1/N_G은 1개의 입자가 점유하는 면적이므로 평균 결정입자의 크기 G_s는 식 (2)와 같다.

$$G_s = \frac{2}{\sqrt{\pi N_G}} \tag{2}$$

2.3. 열자격전류 측정

열자격전류 측정 실험에서는 향온조(Toyo Seiki

사), 온도 조절 장치(UTP-137-340) 및 직류전압 발생기(HARRISON 6521A, DC Power Supply) 및 전위계(Keithley Electrometer, 610C)와 기록계(J.J. Lloyd Instrument Ltd. Recorder CR 503)를 사용하였고 열차격전류 측정 장치의 구성은 그림 3에 나타냈었다.

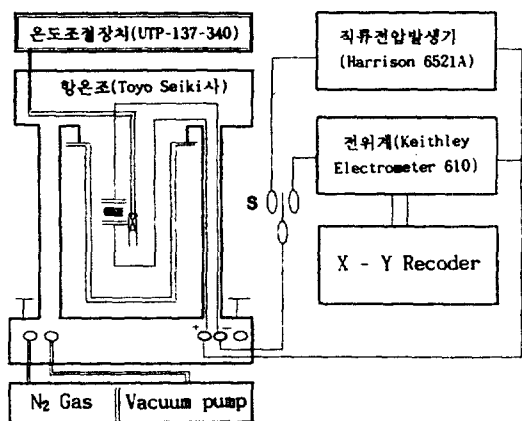


그림 3. TSC 측정장치의 구성
Fig. 3. Configuration of TSC measuring apparatus.

측정 시편의 두께 1[mm], 전극 직경 10[mm]인 시편으로 형성 온도 $T_f(50 \sim 130[^\circ\text{C}])$ 에서 형성 전계 $E_f(500[\text{V}/\text{cm}] \sim 2[\text{kV}/\text{cm}])$ 를 형성 시간 $t_f(15 \sim 60[\text{min}])$ 를 인가하고 급냉시켜 분극 상태를 동결한 후, 형성 전압을 차단하여 양전극을 단락시키고 전위계 및 기록계를 연결하여 일정한 승온속도($5[^\circ\text{C}/\text{min}]$)로 가열하면서 열차격전류를 측정하였다.

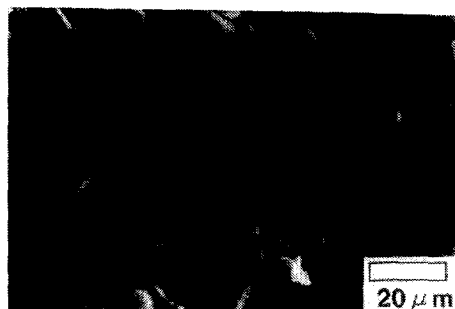
3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 미세구조 및 EDAX분석

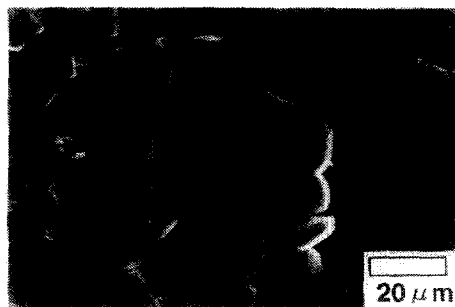
사진 1은 SCT, SCTN, SC 시편의 물분율에 따른 소결시편의 SEM 사진을 나타낸 것으로 A-site와 B-site의 물분율이 1:1인 경우(SCTN) 결정입자(grain)가 가장 크게 성장하였으며, 다음으로 B-site 과잉(SCT), A-site 과잉(SC)순으로 결정입자가 성장하였음을 볼 수 있다. 이것은 물분율 변화에 따른 A-site와 B-site의 잉여 생성물이 공용액상에서 더이상 고용되지 못하고 입계근처에 산화물 형태로 존재하기 때문이라 생각된다.³⁾

사진 2는 CuO를 도포하여 1100°C 에서 2차 열처리한 시편(SCTN)의 SEM 사진을 나타낸 것이며, 표면으로부터 열확산시킨 CuO는 결정입자 사이의 입계에 연속적으로 얇은 유전층이 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 시편의 평균결정입자 크기는 표 2와 같다.

사진 3은 2차 열처리한 SCTN 시편의 결정입자와 입계에 대한 미세구조와 EDAX 분석결과를 나



SCT



SCTN



SC

사진 1. 환원 시편의 SEM 사진
Photo. 1. SEM of reduced sample.

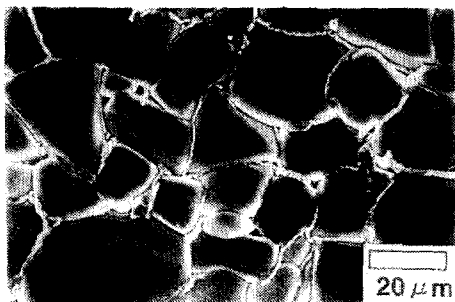


사진 2. 2차 열처리한 시편의 SEM 사진
Photo. 2. SEM of Secondary Fired Sample.

표 2. 물분율에 따른 시편의 평균입자 크기
Table 2. Average grain size of sample due to mol%

Sr:Ca	A:B 0.996 : 1 (SCT)	1 : 1 (SCTN)	1.004 : 1 (SC)
0.85 : 0.15	9.258	16.970	10.854

타내며, EDAX 분석결과 시편내부로 침투된 Cu는 결정입자(grain boundary)에만 존재하며 입계에 제 2상을 이루고 있음을 알 수 있었다.⁴⁵⁾

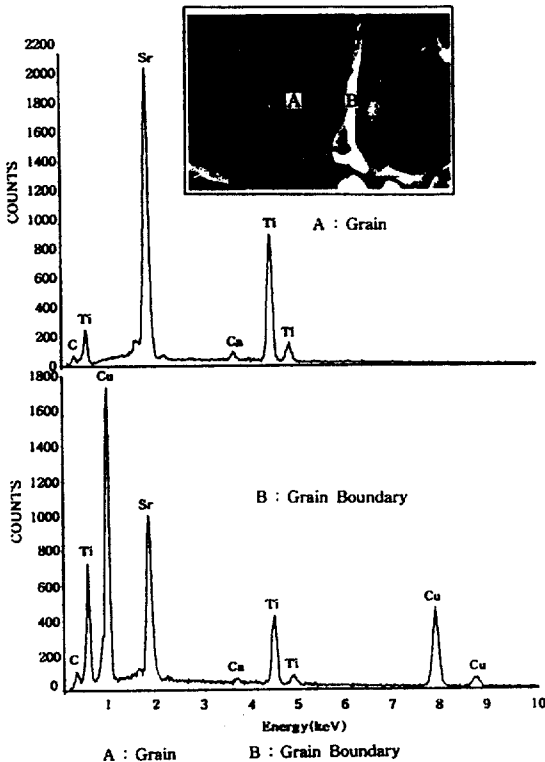


사진 3. 2차 열처리한 SCTN 시편의 EDAX 분석

Photo. 3. EDAX analysis of secondary fired SCTN sample.

3.2. 열자격전류 특성

(1) 형성전계 의존성

그림 4는 형성온도(T_f)를 50[$^{\circ}$ C], 형성시간(t_f)를 30분으로 일정하게 유지하면서 형성전계(E_f)를 500~2000 [V/cm]까지 변화시켜 -120[$^{\circ}$ C]에서 200[$^{\circ}$ C]의 온도범위에서 승온속도를 5[$^{\circ}$ C/min]으로 하여 관측한 열자격전류(TSC) 스펙트라이다. 저온으로부터 각각 -10[$^{\circ}$ C], 20[$^{\circ}$ C] 및 80[$^{\circ}$ C]에서 3개의 피

이크가 관측되었으며, 이들 피이크를 α , α' 및 β 라 한다. 실온이하의 영역에서 관측된 α 피이크는 형성전계의 증가에 따라 최대전류온도(T_m)는 저온측으로 약간 이동함을 알 수 있었으며, 20[$^{\circ}$ C] 부근에서 관측된 α' 피이크는 저전계에서 보다는 2000[V/cm]의 고전계에서 뚜렷하게 관측되었다. 또한, 80[$^{\circ}$ C] 부근에서 관측된 β 피이크는 형성전계의 증가에 따라 최대전류(I_m)은 거의 일정하게 증가하였고, T_m 은 고온측으로 이동하고 있음을 알 수 있었다.

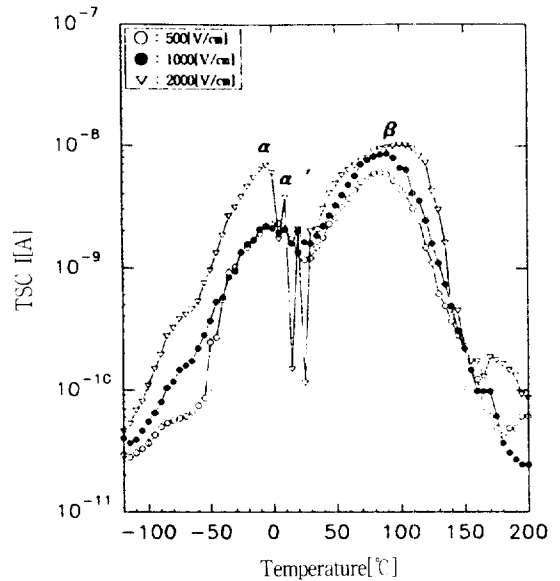


그림 4. 형성전계에 따른 TSC 스펙트라
Fig. 4. TSC Spectra due to forming field.

(2) 형성온도 의존성

그림 5는 형성전계를 2000[V/cm], 형성시간을 30분으로 일정하게 유지하면서 형성온도를 50~130[$^{\circ}$ C]으로 변화시켜 그림 4와 같은 방법으로 관측한 TSC 스펙트라이다. -10[$^{\circ}$ C] 부근에서 관측된 α 피이크의 I_m 은 형성온도 90[$^{\circ}$ C]까지는 일정한 증가를 보이다가 130[$^{\circ}$ C]에서 줄어듦을 나타내고 있다. 각각 형성온도 20[$^{\circ}$ C], 90[$^{\circ}$ C] 부근의 α' , β 피이크는 형성온도가 증가함에 따라 I_m 은 증가하다가 형성온도 130[$^{\circ}$ C]에서 줄어듦을 나타내고 T_m 은 고온측으로 약간씩 이동됨을 알 수 있었다.

(3) 형성시간 의존성

그림 6은 형성전계를 2000[V/cm], 형성온도를 50[$^{\circ}$ C]으로 일정하게 유지하면서 형성시간을 각각 15, 30, 60 [min]으로 변화시켜 그림 4와 같은 방법으로 관측한 TSC 스펙트라이다. -10[$^{\circ}$ C] 부근의 α 피이크의 T_m 은 형성시간이 증가함에 따라 약간 저온측으로 이동되었고 I_m 은 일정하게 증가하였으

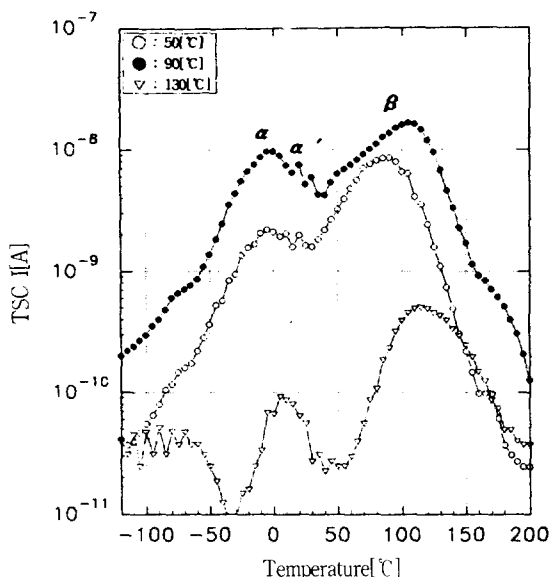


그림 5. 형성온도에 따른 TSC 스펙트라
 ($E_f=2000[\text{V}/\text{cm}]$, $t_f=30[\text{min}]$, $\beta=5[^\circ\text{C}/\text{min}]$)
 Fig. 5. TSC Spectra due to forming temperature.

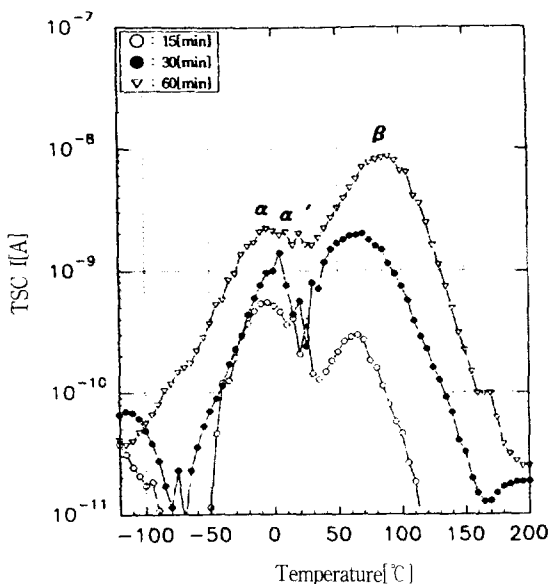


그림 6. 형성시간에 따른 TSC 스펙트라
 ($E_f=2000[\text{V}/\text{cm}]$, $T_f=50[^\circ\text{C}]$, $\beta=5[^\circ\text{C}/\text{min}]$)
 Fig. 6. TSC Spectra due to Forming Time.

며, $20[^\circ\text{C}]$ 부근의 α' 피이크의 I_m 은 형성시간이 증가함에 따라 일정하게 증가하였다. $80[^\circ\text{C}]$ 부근의 β 피이크는 형성시간이 증가함에 따라 T_m 은 고온측으로 이동하였으며, I_m 은 거의 일정하게 증가하였다.

3.3. 열자격전류 피이크의 기원

TSC는 저온에서 동결되어 있는 하전입자가 승온에 의하여 해방되어 이동할때 관측되는 전류로서 TSC에 기여하는 하전입자는 일반적으로 쌍극자, 트랩전자, 이동이온에 기인된 것으로 보고하고 있다.¹²⁾ 유전체중에는 쌍극자, 전자, 정공 및 이온 등이 공존하는 경우가 많기 때문에 TSC의 기원을 정확히 밝히는데 어려움이 많으나 각각의 기원은 서로 다른 특징을 나타낸다. 즉, 쌍극자는 시료내부에 균일하게 분포하고 있다고 생각할 수 있으며, 분극과 탈분극 사이의 전하이동은 완전히 반대로 되므로 TSC의 방향은 V_f 의 방향과 반대로 되며 TSC 피이크의 면적으로부터 구해지는 전하량이나 최대전류 I_m 은 V_f 에 일정하게 비례한다. 이와같이 기구는 이온결정의 불순물 이온과 공공에 의한 쌍극자에도 적용되며,¹³⁾ 접근한 트랩에 의하여 생기는 포텐셜우물(potential well) 사이를 전자가 천이하는 Two site hopping 기구¹⁴⁾에도 해당된다. 하전입자가 시료 내부를 거시적으로 이동하는 트랩전자(정공)인 경우에는 승온에 의하여 트랩전자는 전도대로 여기되며 그 이동에는 전계를 필요로 한다.⁹⁾

또, 시료 내부를 이동하여 공간전하분극¹⁵⁾을 일으키는 이온에 대한 TSC의 연구는 그다지 많지 않지만 일반적으로 V_f 의 증가와 함께 TSC의 T_m 은 저온측으로 이동하며 활성화 에너지도 변하게 되는데 이것은 전계에 의하여 이온의 포텐셜이 변화되기 때문이다. 또한 TSC 특성은 하전입자의 종류뿐만 아니라 그들 거동의 차이에 의해서도 변한다. 즉, 이온에 기인하는 TSC에서도 이동이온에 의한 것과 이온결정중에서 불순물 이온과 공공의 쌍에 의해 만들어지는 쌍극자에 의한 TSC는 다르다.¹³⁾ 또, 트랩전자에 있어서도 Two site hopping 기구라면 쌍극자와 같은 거동을 하는 부분도 있다.

① α 와 α' 피이크의 기원

TSC 스펙트라의 각 피이크 특성과 활성화 에너지로부터 각 피이크의 기원에 대하여 고찰하기 위해 TSC 해석방법으로 사용되는 활성화 에너지를 형성전계에 따른 TSC 스펙트라에서 초기상승법으로 구하여 표 3에 나타냈다. 표 3에서 알 수 있는 바와같이 α 피이크의 활성화 에너지는 형성전계에 따라 $0.148\sim 0.109[\text{eV}]$ 이며, α' 피이크는 $0.290\sim 0.285[\text{eV}]$ 이다. 또한 그림 4로부터 알 수 있는 바와같이 α 피이크는 인가전계가 증가함에 따라 T_m 이 저온측으로 약간 이동함을 알 수 있고, α' 피이크의 T_m 은 인가전계가 증가함에 따라 거의 일정함을 보이고 있다. 이와같이 활성화 에너지와 피이크 특성이 다르기 때문에 α , α' 피이크의 기원은 서로 다르다고 생각된다.¹⁰⁾

만약, TSC 피이크의 기원이 쌍극자에 의한 것이 하면 다음식과 같이 Q_{TSC} 는

$$Q_{TSC} = \frac{Nd\mu d^2}{3kT_f} E_f \quad (3)$$

이므로 I_m 은 형성전계에 비례하여 계속 증가하

표 3. 초기상승법으로 얻는 활성화 에너지
Table 3. The activation energy obtained by initial rise method.

피이크	조건	형성전계(E _f)[V/cm]		
		500	1000	2000
α		0.148	0.129	0.109
α'		0.290	0.249	0.285
β		0.435	0.340	0.353

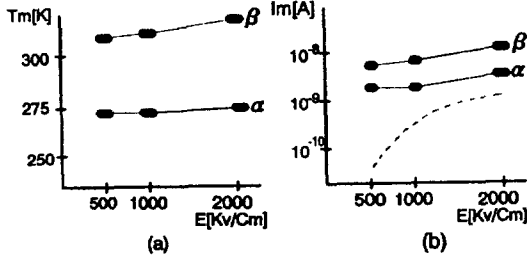


그림 7. 형성전계에 따른 T_m, I_m의 변화
Fig. 7. Variation of T_m, I_m with forming field.

는 그림 7(b)의 쇄선과 같이 되어야 하며, 형성온도의 변화에 대해서도 피이크 온도는 일정해야 한다. 그러나 α, β 피이크는 형성전계의 증가에 따라 I_m이 비례하지 않고, 형성전계의 증가에 따라 T_m은 약간 고온측으로 이동하고 있다. 그러므로 이들 피이크의 기원은 쌍극자로는 설명할 수 없기 때문에 dondr 준위로 부터의 ion화 여기가 아닌지 이온에 의한 Hopping 일것으로 생각된다.

만일, 이온에 의한 Hopping이 α 피이크의 기원이라면 이들 이온은 P_b의 전계 의존성은

$$P_b = 2qNa \nu \exp(-\frac{H}{kT}) \sinh(\frac{qaE_b}{2kT_b}) \quad (4)$$

이므로 P_b는 E_b에 sinh 함수관계를 갖는다. 그리고 이온은 열에 의해 확산 이동하는 열민감성 캐리어이기 때문에 실온이하에서 관측되는 α 피이크는 열에 의해 확산이동하는 이온이 기원이라고 생각하기는 힘들다. 또, α 피이크는 비교적 일정한 활성화 에너지를 나타내고 있기 때문에 α 피이크의 기원은 donor 준위로 부터의 ion화 여기에 기인된 것이라 생각된다.⁽⁶⁾

한편, α' 피이크의 I_m은 저전계에서 보다는 고전계에서 더욱 뚜렷하게 관측할 수 있었으며, 형성온도 90[°C]까지는 증가를 나타내다가 130[°C]에서는 포화됨을 알 수 있었다. 그러므로 α' 피이크는 전계에 의해 강요된 결정입자와 산화층경계부에서 트랩내 트랩전자들의 탈트랩에 기인된 것이라 생각된다.^{8,9)}

② β 피이크의 기원

고온영역에서 관측된 β 피이크는 α 피이크보다 활성화 에너지가 크고 형성전계의 증가에 따라

T_m은 1000[V/cm]까지는 일정하다 2000[V/cm]에서 증가를 나타내고, 형성온도의 증가에 따라서는 T_m이 고온측으로 이동하다가 다시 포화되는 것으로 부터 이동이온에 의한 피이크로 생각된다. 일반적으로 세라믹에 있어서 열처리효과는 입계의 결정상(crystalline phase)이 변하거나 결정입계가 조잡한 상태(coarse state)로 변하며, 또 미지의 결정상이 형성되기도 한다. 이러한 현상을 본 실험에 사용된 시편의 열처리 효과에 적용할 수 있다면 시편 제작시 첨가된 각종 불순물 이온, Sr²⁺, Ca²⁺, Ti⁴⁺ 및 Cu²⁺이온과 산소 이온들은 TSC의 안정성에 영향을 미친다고 가정할 수 있다. 이러한 불순물 이온들은 결정입계에서 결합을 통하여 쉽게 확산 이동할 수 있다. 그러므로 열화에 대한 열처리의 효과는 이러한 양이온들이 열처리하는 동안 계면으로 확산하여 산소이온들과 결합하기 때문에 결국 양이온의 감소에 의한 것으로 설명할 수 있다. 그러므로 이동이온이 결정립계에서 공간전하의 분포에 크게 영향을 미치고 전위장벽의 변화를 일으켜 열화의 원인이 된다고 생각된다.⁽¹¹⁾

또한, 고전계 인가시 전위장벽의 경사가 급해져서 Pool-Frenkel에 의해 전위장벽의 감소와 두께가 얇아져서 tunneling이 되는 것으로 생각되고 tunneling 이후에는 trap site가 무시되어 방전 TSC가 감소되어 나타난다.

4. 결 론

(Sr_{0.85}, Ca_{0.15})_mTiO₃+0.006Nb₂O₅(0.996≤m1.004 세라믹을 제조하여 미세구조 및 열자격전류에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1] 불순물에 따른 각시편의 입자성장은 A-site와 B-site가 1:1인 경우가 가장 크게 성장했으며, 한쪽 site의 과잉은 입자 성장이 다소 작아졌다.

2] 시편의 EDAX 분석결과 2차 열처리시 도포한 CuO은 결정 입자에만 고르게 분포하고 있었다.

3] 열자격전류 피이크의 기원은 다음과 같다.

- (1) α의 피이크는 결정입자에서 donor 준위로 부터의 ion화 여기에 기인된 것이라 생각된다.
- (2) α'의 피이크는 결정입자와 산화층 경계면의 트랩 캐리어들의 hopping 전도에 기인된 것이라 생각된다.
- (3) β의 피이크는 산화층과 제 2상 사이에 있는 경계면의 내부전계 증가에 의한 trap site에서 hopping 전도에 기인된 것으로 생각된다.

이상과 같은 결과로부터 본 연구에 사용된 GBL 세라믹의 구조적인 특성을 확인할 수 있었으며, 열자격전류에 미치는 영향에 대해서는 어느 한 인자에 기인된 것이라 단정지을 수 없으며 얻어진 특성으로부터 유전층의 영향이 지배적이라 생각된다.

참 고 문 헌

1. P.E.C.FRANKEN, M.P.A.VIEGERS, and A.P.

- GEHRING "Microstructure of SrTiO_3 Boundary-Layer Capacitor Materials". J.Am. Ceram.Soc., Vol.64, No.12, pp.687-690(1981)
2. NOBUTATSU YAMAOKA "SrTiO₃-Based Boundary Layer Capacitor" CERAMIC BULLETIN, Vol. 65, No.8, pp.1150-1152(1986)
 3. MASAYUKI FUJI and W.DAVID KINGERY, "Microstructures of SrTiO₃ Internal Boundary Layer Capacitors During and After Processing and Resultant Electrical Properties". J.Am.Ceram.Soc., Vol.68, No.4, pp.169-173 (1985)
 4. Yoshitaka Nakano, Masamitsu Watanabe and Tomoharu Takahashi "Investigation of interface states in $(\text{Sr,Ca})\text{TiO}_{3-x}$ -based Ceramics" J.Appl.Phys., Vol.70, No.3, pp. 1539-47(1991)
 5. 유재근, 최성걸, 이용상, "SrTiO₃계 Grain Boundary Layer Capacitor에서 2차 열처리 산화물의 Frit화가 유전적 성질에 미치는 영향" Journal of the Korean Ceramic Society, Vol.28, No.4, pp.261-268(1991)
 6. Akira Dol "Evaluation of Activation Energies for Polarization in Glass from Thermally-Stimulated Depolarization Currents" J.J.Appl. Phys., Vol.21, No.7, pp.987-989(1982)
 7. Kazuo EDA and Michio MATSUOKA Wireless Research Laboratory et al "Thermally Stimulated Current in Nonohmic ZnO Ceramics" J.J.Appl.Phys., Vol.16, No.1,pp. 195-196 (1977)
 8. MONTE V. DAVIS "Analysis of Electron Trapping in Alumina Using Thermally Stimulated Electrical Currents" J.Appl. Phys.,Vol.44, No.6, pp.2636-2643(1970)
 9. S.Pickard, M.V.Davis "Analysis of Electron Trapping in Trapping Using Thermally Stimulated Electrical Current" J.Appl.Phys., Vol.41, No.6, pp.2036-2243 (1970)
 10. 김충혁 "(Sr·Pb)TiO₃계 세라믹의 유전, 전기 전도특성 및 하전입자의 거동에 관한 연구" pp.77-86 (1992)
 11. Kazuo Eda, Atsushi Iga, and Michio Matsuoka "Degradation mechanism of non-ohmic zinc oxide ceramic" J.Appl.Phys., Vol.51, No.5, pp.2678-84 (1890)
 12. Martin M.Perlman, "Thermally Stimulated Currents and Voltages and Dielectric Properties" J.Electrochem. Soc., Vol.119, No. 7, pp.892-898 (1972)
 13. C.Bucci, R.Fieshi, G.Guidi, "Ionic Thermocurrents in Dielectrics", Phys. Rev. 148, pp. 816-823 (1966)
 14. A.Servini, A.K.Jonscher, "Electrical Conduction in Evaporated Silicon Oxide Films", Thin Solid Film, 3, pp.341 (1969)
 15. Y.Inuishi, "Effect of Space Charge and Structure on Breakdown of Liquid and Solid", IEEE, Vol.EI-17, NO.6, pp.488-492 (1982)