

Curie Temperature and Tunable Dielectric Properties of Barium Strontium Titanate Thick Films

Sohyun Jeon,[†] Insung Kim,* Bokki Min,* Jaesung Song,* and Jondo Yoon

Department of Materials Engineering, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea

*Electric and Magnetic Devices Group, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon 641-120, Korea

(Received May 29, 2006; Accepted July 19, 2006)

티탄산 바륨 스트론튬($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$) 후막의 상전이온도와 가변 유전특성

전소현[†] · 김인성* · 민복기* · 송재성* · 윤준도

경남대학교 재료공학과

*한국전기연구원 전자기소자연구그룹

(2006년 5월 29일 접수; 2006년 7월 19일 승인)

ABSTRACT

(BaSr)TiO₃ thick films were prepared by tape casting method, using BaTiO₃ and SrTiO₃ powder slurry in order to investigate dielectric properties i.e. dielectric constant, ϵ_r , Curie temperature, T_c . Grain growth within (BaSr)TiO₃ thick films was observed with increasing weight ratio of BaTiO₃. This observation can be explained by phenomena of substitution of Sr²⁺ ion for Ba²⁺ ion in the BaTiO₃ system. Also, the Curie temperature in (BaSr)TiO₃ thick films was shifted to lower temperature range with increasing SrTiO₃. Furthermore, Curie temperature having maximum dielectric constant was in the range of -40°C to 30°C, and hence sharper phase transformation occurred at Curie temperature. There occurred decrease in tunability and k-factor of (Ba_{0.6}Sr_{0.4})TiO₃ calculated from the dielectric constant, ϵ_r , above Curie temperature. In addition, above the 60°C, phase fixation was observed. This means that internal stress relief occurred with increasing 90° domains.

Key words : BST, Thick films, Curie temperature, Tunability, Dielectric properties

1. 서 론

가변(tunable) 유전체의 개발은 부품 소재의 응용적인 측면에서 단순한 개인 휴대통신의 개념을 넘어 인공위성 통신, 텔레메트릭스, 대용량 PDA 등 차세대 통신 환경의 중요한 전환점이 될 수 있다. 유전체의 물리적 특성을 이용한 지능형 매칭 네트워크, 지능형 VCO 같은 차세대 RF 부품을 개발하기 위해서는 티탄산 바륨 스트론튬(BST)과 같은 강유전체 물질의 개발이 필요하며, 그러한 연구가 활발히 이루어졌다.¹⁾

최근 대부분의 연구들이 SrTiO₃와 같은 저온 강유전체 물질 대신 (Ba_xSr_{1-x})TiO₃과 같은 상온 강유전체 물질을 고주파용 가변 디바이스에 적용하고 있다. BaTiO₃와 SrTiO₃는 모두 화학적으로 안정하며 페로브스카이트(perovskite) ABO₃구조를 가지는 대표적인 산화물이며, (Ba_xSr_{1-x})TiO₃는 수 GHz의 높은 주파수 영역에서도 400~800°C의 높은 유전율과 안정된 가변 유전특성을 갖는 것으로 알려졌다.²⁾

가변 디바이스에 적용하기 위한 성형법으로 여러 층의 후막을 적층하는 방법이 있으며, 디바이스에 적용하기 위한 후막 제조기술에는 테이프캐스팅(tape-casting)법, 스크린 프린트법 및 주입법 등이 있다. 이중 건식적층법인 테이프캐스팅 공정은 얇은 두께로 고품질 대면적의 세라믹 시트를 제조하기 위한 저 비용 공정으로 산업체에서 널리 쓰이는 공정이다.³⁾ 순수한 (Ba_{0.5}Sr_{0.5})TiO₃의 소결온도는 1350°C 부근으로 알려져 있으며, 유전특성을 향상시키기 위해 BaTiO₃와 SrTiO₃의 비율을 다르게 하여 고유전율의 마이크로파 유전체 제조가 가능할 것이며, 이에 대한 연구가 진행 중이다.^{4,5)} 가변 디바이스에 적용하기 위해서는 유전율이 낮아야 하며, 가변 특성이 좋아야 한다. 가변 유전체인 (Ba_xSr_{1-x})TiO₃의 BaTiO₃와 SrTiO₃의 비율을 다르게 하여 소결온도를 제어하고 가변 특성과 상전이온도를 연구하고자 하였다.

본 연구에서는 (Ba_xSr_{1-x})TiO₃ 강유전체를 디바이스에 활용하기 위한 후막제조법 중의 하나인 테이프 캐스팅 방법을 이용하여 후막을 제조하였으며 더불어 BaTiO₃와 SrTiO₃의 비율에 따른 소결온도와 유전특성과 상전이온도의 관계를 연구하였다. BST 강유전체에 소결온도와 상전이온도의 변화가 유전특성에 미치는 영향을 조사하여 가변 디

[†]Corresponding author : Sohyun Jeon

E-mail : hyun3263@hotmail.com

Tel : +82-55-280-1647 Fax : +82-55-280-1590

바이스에 활용하기 위한 자료를 제시하였다.

2. 실험 방법

(Ba_xSr_{1-x})TiO₃ 합성을 위해서 분말의 순도가 99.9% 이상인 BaCO₃(cerac), SrCO₃(aldrich), TiO₂(cerac) 분말을 각각 x=0.5, 0.6, 0.7의 비율로 혼합하였다. 분말의 혼합을 위해 에탄올과 구형의 볼을 사용하여 볼밀 후 건조된 분말은 분쇄 후, 1200°C에서 2시간 유지시켜 하소하였다. 하소된 분말은 분쇄 후, 분말의 입자 크기를 줄이기 위해서 볼밀하였고, 건조 후 100 메쉬(mesh)로 체가름하여 BST 분말을 합성하였다.

합성된 분말을 사용한 슬러리 공정에서는 분말과 용매의 비율을 6.5:3.5로 혼합하였고, 용매는 에탄올과 MEK (Methyl Ethyl Ketone)를 6.5:3.5의 비율로 혼합하여 사용하였다. 응집된 입자들을 분산시키기 위해 상용화된 분산제 세라퍼스(ceraparse)-111을 분말의 1 wt%를 첨가하고 볼은 분말의 두배 부피를 적용하여 볼밀하였다. 분산된 입자들을 결합시키기 위해 결합제는 PVB(Poly Vinyl Butyral)를 분말의 6 wt% 첨가하였고 열가소성을 증대시킴으로써 고온에서 성형을 용이하게 하는 물질로 알려진 가소제 DBP(Dibutyl Phthalate)를 분말의 4.2 wt% 첨가하여 볼밀하였다. 볼밀이 끝난 후, 테이프를 성형하기에 적당한 점도를 만들기 위해 슬러리에 남아있는 기포를 5~10분 동안 교반시키면서 탈포하였다. SiO₂가 코팅된 폴리에틸렌 필름은 40 cm/min의 속도로 이송시켰으며, 닥터블레이드를 이용하여 두께가 100~120 μm 정도의 테이프를 제조, 건조, 절단하였다. 테이프캐스팅 공정은 Fig. 1에 나타내었다. 절단한 시편들은 전기로에 넣어 탈지와 소결을 하

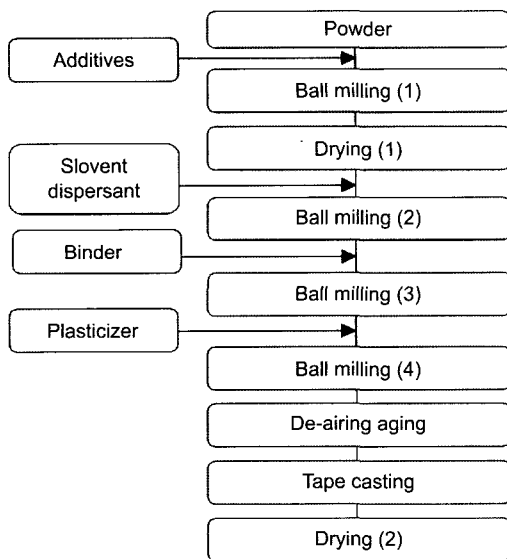


Fig. 1. Tape casting process.

였다. 적절한 소결온도를 알아내기 위한 선행 실험을 하였다. 각각의 탈지과정을 거친 테이프들을 1000~1400°C의 범위에서 50°C의 변화를 주면서 소결하여 소결정도를 알아보았다. 그 후 소결 범위의 온도 3~4가지를 선택하여 소결을 하였고 물성을 측정하였다.

소결온도에 따른 후막의 결정성을 조사하기 위하여 XRD 분석을 하였으며, 소결체의 밀도는 아르키메데스(archimedes) 법을 이용하여 측정하였다. 소결체의 조성에 따른 BST의 미세구조를 알아보기 위해서 소결체 표면을 주사전자현미경으로 결정립 크기를 파악했으며, 또한 XRD와 밀도 수축률 관계를 해석하여 소결특성을 확인하였다.

고주파 가변 유전특성을 측정하기 위해 지름이 1.5 mm의 원형 마스크를 이용하여 시료의 표면에 금(Au)을 이온코팅 하였다. Impedance analyzer(4194A)로 정전 용량을 측정하여 유전상수를 구했으며, 식 (1)에 의해 가변율(tunability)을 계산하였고, 식 (2)에 의해 손실값이 적용된 k-factor를 구하였다.

$$\text{Tunability}(\%) = \frac{\epsilon_{r(0)} - \epsilon_{r(\text{app})}}{\epsilon_{r(0)}} \times 100 \quad (1)$$

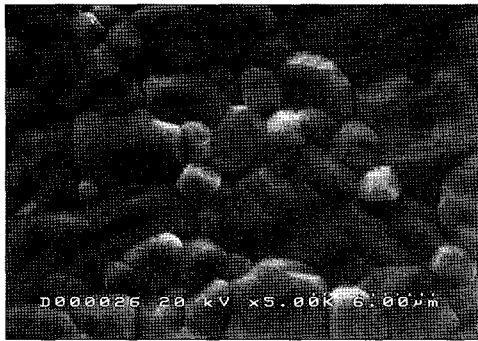
$$k\text{-factor} = \frac{\text{tunability}}{\tan \delta} \times 100 \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

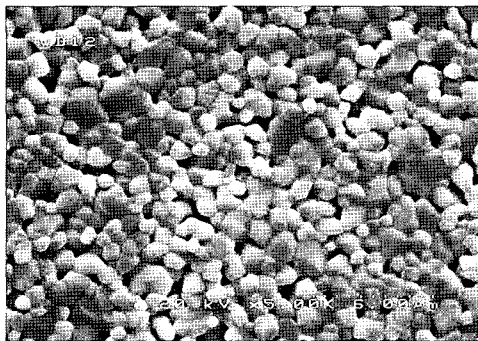
(Ba_xSr_{1-x})TiO₃ 강유전체를 x=0.5, 0.6, 0.7로 후막을 제조하였으며, 조성에 따른 소결특성과 유전특성을 조사하였다. 일반적으로 두 물질이 치환형 고용체를 형성하기 위해서는 결정구조가 같아야 하고, 이온의 상대적인 크기 차이가 15% 이내이어야 한다. Ba²⁺와 Sr²⁺의 이온반경은 각각 1.43, 1.27 Å으로 size factor가 15% 보다 작기 때문에 전 조성범위에서 고용체를 형성하며, 고용체를 형성하는 주된 역할은 상호 이온 확산에 의해 고용체를 형성하는 것으로 알려져 있다.⁶⁾

(Ba_xSr_{1-x})TiO₃ 강유전체의 비율과 소결온도의 변화에 따른 소결성은 미세구조 사진에서 관찰할 수 있다. Fig. 2는 조성에 따라 소결한 시료의 표면을 SEM을 이용하여 관찰한 미세구조 사진이다. 1350°C의 같은 소결온도에서는 BaTiO₃의 양이 증가할수록 BST 결정립이 크고 치밀하며 기공이 거의 없다. BaTiO₃의 양이 증가에 따른 치밀화 증진, 입성장 효과와 기공의 감소에 따른 기공을 통한 방전억제 효과에 의한 것으로 볼 수 있다.^{7,8)} 반면 (Ba_{0.7}Sr_{0.3})TiO₃에서 과잉소결로 인한 결정의 크기가 고르지 못하며, 이것은 유전특성의 저하를 가져올 것으로 예상된다.

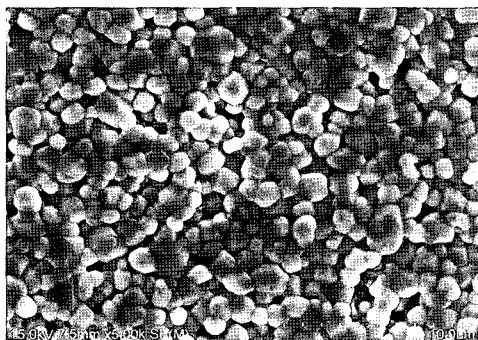
Fig. 3은 조성에 따른 BST를 1350°C의 온도에서 소결한 시료의 X-ray 분석 결과를 나타낸 것이다. BST의 회절피크가 뚜렷하게 나타난 것으로 보아 결정화가 잘 된 것으로 사료된다. 조성에 따른 회절패턴의 변화는 없었고,



(a) $(Ba_{0.7}Sr_{0.3})TiO_3$



(b) $(Ba_{0.6}Sr_{0.4})TiO_3$



(c) $(Ba_{0.5}Sr_{0.5})TiO_3$

Fig. 2. SEM micrographs of $(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$ sintered at $1350^\circ C$.

회절강도에서 차이를 보였다. $(Ba_{0.6}Sr_{0.4})TiO_3$ 의 회절피크 강도가 가장 높은 값을 나타내었으며, 이것은 결정성장의 증가를 보여준다. $1350^\circ C$ 의 온도에서는 $(Ba_{0.6}Sr_{0.4})TiO_3$ 의 결정성장이 뚜렷한 것으로 나타났다. 또한 결정성이 증가에 의해 결정의 입경이 커질수록 비유전율을 저하시키는 입계의 단면적이 감소하므로 입경이 증가할수록 비유전율이 증가하는 것으로 보고되고 있다.^{9,10)} Fig. 4는 $(Ba_{0.6}Sr_{0.4})TiO_3$ 에 소결온도의 변화를 준 110 면의 회절피크를 나타낸 것이다. 소결온도가 증가할수록 면간거리는 좁아지는 것을 알 수 있다. 이것은 BST의 고용체를 형성할 때 이온반경이 작은 Sr^{2+} 이 이온반경이 큰 Ba^{2+} 와 치환되는데, $SrTiO_3$ 의 양이 증가하면 이온반경이 작은 이온으로 치환

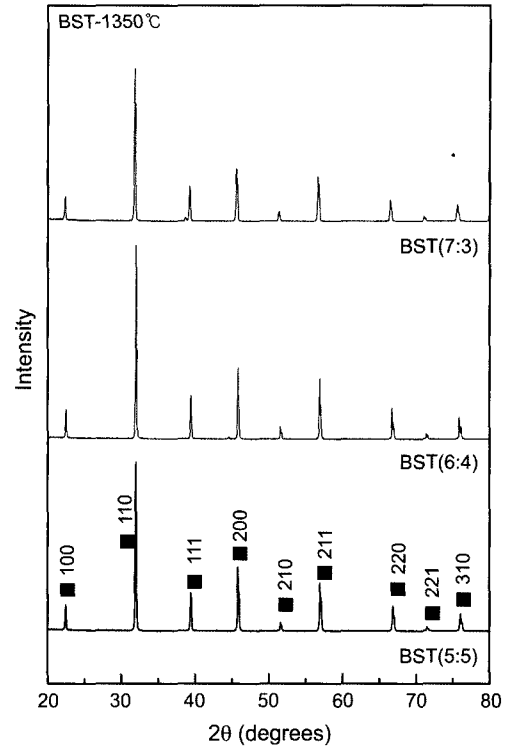


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of $(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$ with a ratio of Ba to Sr.

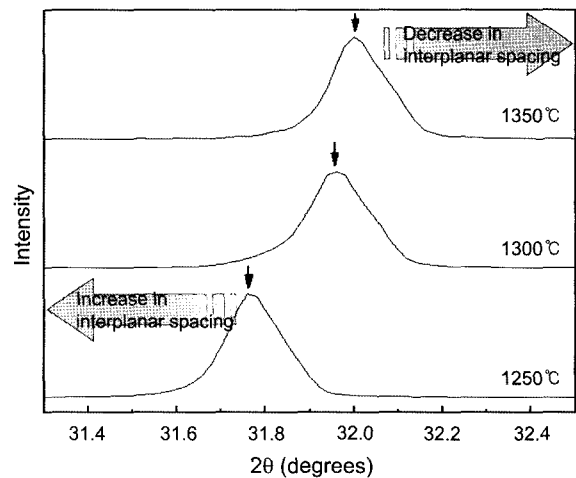


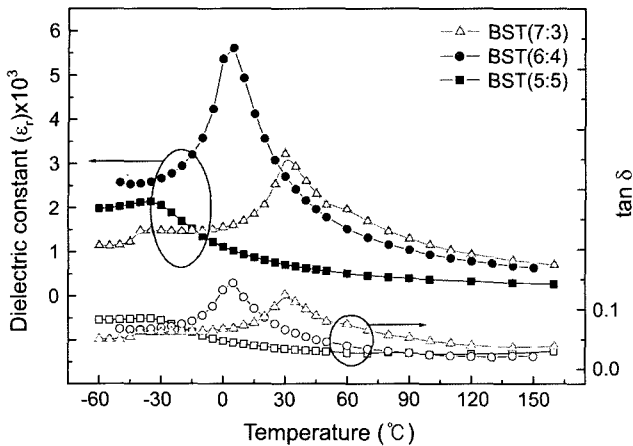
Fig. 4. Sintering temperature dependence of X-ray diffraction intensity of (011) plane for $(Ba_{0.6}Sr_{0.4})TiO_3$.

되므로 격자상수가 줄어들며, 상전이온도와 유전상수도 낮아질 것으로 예상된다.

Table 1은 소결온도의 변화에 따른 X-ray 회절 패턴을 측정하여 BST 결정의 대표적인 011 면 피크의 면간거리를 나타내었다. 이것은 Ba^{2+} 이온 대신에 이온반경이 작은 Sr^{2+} 을 치환했을 경우 산소는 더 강하게 결합하게 되고 그 결과 분극이 일어나기 어렵게 된다. 따라서 총 분

Table 1. Sintering Temperatures Dependence of Lattice Constant for a $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$; as a Ratio of Ba to Sr

Composition								
BST(7:3)			BST(6:4)			BST(5:5)		
T_s	2θ	d_{110} (nm)	T_s	2θ	d_{110} (nm)	T_s	2θ	d_{110} (nm)
1350°C	31.82	1.4621	1350°C	32	1.4547	1400°C	31.92	1.4580
1300°C	31.72	1.4662	1300°C	31.96	1.4564	1375°C	31.96	1.4564
1250°C	31.78	1.4637	1250°C	31.76	1.4646	1350°C	31.98	1.4556
1200°C	31.7	1.4671				1300°C	31.8	1.4629

**Fig. 5.** Temperature dependence of dielectric constant and loss tangent of $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$ with the ratio of Ba to Sr.

극의 양이 적어지기 때문에 유전상수는 작아지고 상전이 온도는 저온으로 이동한다.¹¹⁾ 미세구조사진에서 나타낸 것처럼 BaTiO_3 의 양이 증가할수록 낮은 온도에서 소결이 이루어지며 격자상수도 커져서 BST 강유전체의 유전특성이 좋을 것으로 예상된다.

격자상수의 감소는 상전이온도를 저온 영역 쪽으로 이동시킨다는 연구가 보고되었다.¹²⁾ 그러므로 BaTiO_3 의 양이 증가할수록 격자상수가 커지며 상전이온도가 높아질 것으로 예상된다. Fig. 5는 온도 변화에 따른 유전상수 값을 나타낸 것이다. BaTiO_3 의 양이 증가할수록 상전이온도는 증가한다.¹³⁾ $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$ 는 상전이온도가 -40°C 부근과 30°C 부근에서 나타났다. 이것은 $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3$ 의 상전이온도가 나타난 -40°C 부근이므로, $(\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})\text{TiO}_3$ 의 분말이 소결 중 완전한 고용체를 이루지 못한 $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3$ 의 고용체 일부가 남아 -40°C 에서 나타났다고 사료된다. 단결정의 경우와는 다르게 다 성분계의 소결은 완전한 고용체형성이 어렵다. 후막으로 소결한 경우 완전한 고용체와 더불어 미량의 부산물이 존재한 것으로 사료된다.

BaTiO_3 세라믹스의 유전특성은 입경에 크게 의존한다는 사실은 잘 알려져 있다. 구조적인 관점에서 BaTiO_3 는 상전이온도에서 정방정(tetragonal)화 변형이 일어날 때 강유전체의 전형적인 특징 중의 하나인 강유전 분역이라는

독특한 구조가 유기된다. 즉, 고온에서 냉각될 때 상전이 온도에서 a축으로 줄어들고 c축으로 늘어나는 자발분극 방향이 되며, 이 과정에서 발생하는 내부응력과 정전기적 에너지를 최소화하기 위해 강유전 분역(ferroelectric domains)이 생성된다. 이때 정방정 BaTiO_3 에는 인접한 분역간에 자발분극 방향이 이루는 각도에 따라 90° 분역과 180° 분역이 있을 수 있는데 180° 분역만 존재하면 한 방향으로 일방적으로 늘어나거나 줄어들어 주위 입자에 구속되어 소결체에 유기된 내부응력이 해소되지 못하는 반면, 90° 분역이 생성되면 c축과 a축이 교대로 배열되면서 격자상수의 늘고 줄어들이 상쇄되어 내부응력이 최소화 된다. 많은 연구자들이 상전이 온도에서 상유전체로부터 강유전체로 전이될 때의 응력해소과정에 있어서 90° 분역의 역할을 입경을 매개로 하여 상온 비유전율을 비롯한 유전특성과 결부시켜 설명하였다. 입경이 커질수록 비유전율을 저하시키는 입계의 단면적이 감소하므로 입경이 증가할수록 상전이 온도에서의 비유전율이 증가하는 것으로 보고되고 있다.^{14,15)}

Table 2는 BST의 조성에 따른 상전이온도와 고주파와 저주파 영역에서 유전특성을 나타내었다. BaTiO_3 의 양이 증가할수록 상전이온도는 증가하였으며, 낮은 주파수 일 때에는 유전상수는 높았고, 손실은 낮아 좋은 특성을 나타냈다.

가변 소자로 활용하기 위한 고주파 가변 유전체는 유전율이 낮아야 하며, 가변율은 높아야 한다. 특히 이 두 가지 특성이 더하여진 k-factor가 높아야 하는데 이는 앞의 식 (2)에서 표시하듯이 유전손실에 의존적이다. Fig. 6은 온도의 변화에 따른 가변율을 나타낸 것이다. 상전이 온도에서 정방정화 변형이 일어날 때 강유전체의 전형적인 특징 중의 하나인 강유전 분역이라는 독특한 구조가 유기된다. c축과 a축이 교대로 배열되면서 격자상수의 늘고 줄어들이 상쇄되어 내부응력이 최소화 된다.¹⁴⁾ 그러므로 상전이온도 이상에서는 내부응력이 최소화되어 유전상수가 저하된다. 상전이온도를 전후로 상전이가 일어나면서 유전율의 차이와 가변율 변화가 나타났다. 상전이온도 이상에서 가변율이 점점 낮아지며 60°C 이상에서는 BST의 조성에 상관없이 일정한 값을 나타내고 있다. 이것은 BST의 상전이가 일어남으로써 구조의 변화와 더불어 유

Table 2. Dielectric Constant and Loss Tangent (Ba_xSr_{1-x}) TiO_3 at High and Low Frequencies

Composition ($T_s=1350^\circ C$)	Curie temperature ($^\circ C$)	High frequency (1 MHz)		Low frequency (1 kHz)	
		ϵ_r	$\tan \delta$	ϵ_r	$\tan \delta$
BST(5:5)	-35 ± 2.5	1890	0.316	2404	0.082
BST(6:4)	5 ± 2.5	3220	0.391	4100	0.081
BST(7:3)	30 ± 2.5	1599	0.278	2084	0.054

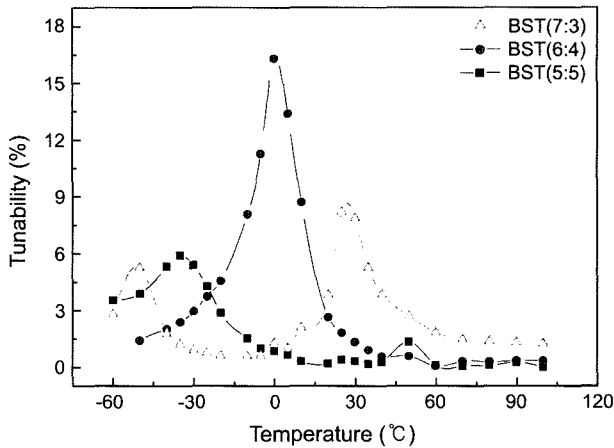


Fig. 6. Temperature dependence of the tunability of (Ba_xSr_{1-x}) TiO_3 with the ratio of Ba to Sr.

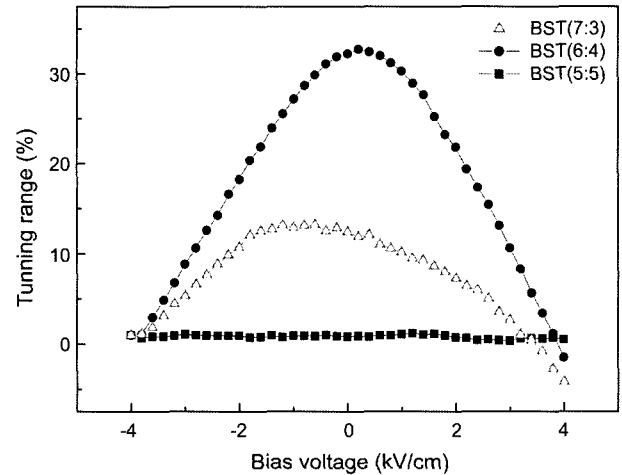


Fig. 8. Bias dependence of tunability of (Ba_xSr_{1-x}) TiO_3 with the ratio of Ba to Sr.

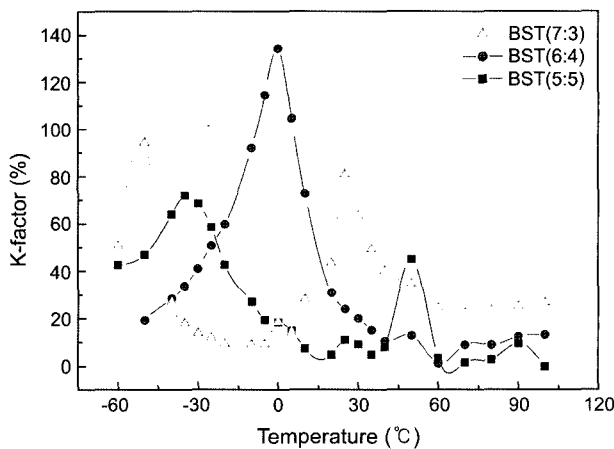


Fig. 7. Temperature dependence of k-factor of (Ba_xSr_{1-x}) TiO_3 with the ratio of Ba to Sr.

전특성의 변화를 가져온 것으로 사료된다.

Fig. 7은 온도의 변화에 따른 k-factor를 나타낸 것이다. 상전이온도에서 가장 높은 값을 나타내었으며, 가변율과 비슷한 경향을 나타내었다. ($Ba_{0.7}Sr_{0.3}$) TiO_3 의 경우는 다른 조성과는 달리 유전특성에 관련된 두 개의 피크가 뚜렷하게 나타났다. 또한 가변율과 k-factor를 분석한 결과로 미루어 볼 때 가변 유전특성과 유전손실은 상전이온도에 의존적인 것으로 확인되었다. 가변 소자로 활용하기에 꼭 필요한 특성으로 유전율의 변화그래프를 보고 예상했듯

이 ($Ba_{0.6}Sr_{0.4}$) TiO_3 가 가장 높은 가변율을 갖는 것으로 조사되었다.

Fig. 8은 $-40 V$ 에서 $40 V$ 까지 바이어스 전압 변화에 따른 유전율을 구하여 가변율을 나타낸 것이다. 가변소자로 활용하기에 필요한 특성으로 유전율의 변화를 보고 예상한 바 ($Ba_{0.6}Sr_{0.4}$) TiO_3 가 가장 높은 값을 나타냈다. 그러나 상전이온도는 보다 복잡한 메커니즘으로 가변 유전특성에 의존하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 테이프 캐스팅법을 이용하여 ($BaSr$) TiO_3 후막을 제조하였으며 더불어 $BaTiO_3$ 와 $SrTiO_3$ 의 비율에 따른 소결온도와 상전이온도의 변화를 연구하였다.

$BaTiO_3$ 의 양이 증가할수록 BST 결정크기가 커졌으며, 면간거리도 커졌다. ($Ba_{0.7}Sr_{0.3}$) TiO_3 의 상전이온도는 $30^\circ C$ 부근과 $-40^\circ C$ 부근에 두 곳에서 나타났다. 이것은 소결 중 완전한 고용체($Ba_{0.7}Sr_{0.3}$) TiO_3 를 이루지 못한 ($Ba_{0.5}Sr_{0.5}$) TiO_3 가 일부 남아 $-40^\circ C$ 부근에서 나타난 것이다. ($Ba_{0.6}Sr_{0.4}$) TiO_3 의 유전상수, 가변율, k-factor가 가장 높게 나타났으며, 상전이온도 이상에서 감소하다가 상전이온도 부근에서는 가장 높은 값을 나타냈다. 그러나 상온 이상($60^\circ C$)에서는 일정하게 유지되었다. 이러한 유전특성의 변화는

90° 분역 생성의 촉진 및 그에 따른 내부응력의 완화과정으로 해석하였다. 1350°C에서 소결한 (Ba_{0.7}Sr_{0.3})TiO₃의 유전특성은 다소 나빠졌지만 소결온도를 낮추면 유전특성이 좋아질 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. R. R. Tummala, "Ceramic and Glass-Ceramic Packaging in the 1990s," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74** [5] 895-908 (2001).
2. P. C. Jochi and M. W. Cole, "Mg-Doped Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃ Thin Film for Tunable Microwave Applications," *Appl. Phys. Lett.*, **77** [2] (2000).
3. W.-S. Lee, C.-H. Kim, M.-S. Ha, S.-J. Jeong, J.-S. Song, and B.-K. Ryu, "The Characterizations of Tape Casting for Low Temperature Sintered Microwave Ceramics Composite(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42** [2] 132-39 (2005).
4. D. Koo and K. Auh, "A Study on the Glass Fabrication and Sintering Behaviour of Glass/Ceramics for SiO₂-TiO₂-RO (RO: BaO, CaO, SrO) System," *Kor. Assoc. Cryst. Growth*, **8** [4] 189-94 (1999).
5. D. S. Heo, W. S. Lee, S. J. Jeong, J. S. Song, F. Utsuno, and B. K. Ryu, "Sintering and Dielectric Properties of BaO-Nd₂O₃-TiO₂ Microwave Ceramics with Glass-Ceramic(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **41** [61] 444-49 (2004).
6. M. Halmi, G. Desgardin, and B. Raveau, "Improved Lead Perovskite Compounds (PFN-PFT) for Z₅U Capacitor Applications," *Adv. Ceram. Mater.*, **3** [1] 32-7 (1998).
7. S.-G. Lee, Y.-H. Lee, and S.-G. Bae, "A Study on the Structural and Dielectric Properties of (Ba,Sr,Ca)TiO₃ with Sintering Conditions," *J. Kor. Ins. Electrical*, **14** [6] 460-65 (2001).
8. I. S. Kim, J. S. Song, B. K. Min, and S. H. Jeon, "Sintering and Tunability of Dielectrics Thick Film Added MgO/Li₂CO₃ to BST," pp. 17-20, *CARTS Europe 2005*, October, 2005.
9. Y.-G. Son, "Electrical Properties of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ Thin Film with Various Heat Treatment Conditions(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [5] 492-98 (2001).
10. I. S. Kim, B. K. Min, J. S. Song, and S. Y. Jeon, "A Study on the Sintering Condition and Electric Properties of BST Thick Film," pp. 2013-14, Proceeding of the KIEE Annual Summer Conference, 2005.
11. K. H. Yoon, N. Y. Lee, and K. H. Jo, "Dielectric Properties of BaTiO₃-SrTiO₃ System(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **21** [4] 341-48 (1984).
12. J. H. Kim, "Effect of Aggregates on the Sintering Behavior of BaTiO₃(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **28** [11] 926-34 (1991).
13. B. Su, J. E. Holmes, C. Meggs, and T. W. Button, "Dielectric and Microwave Properties of Barium Strontium Titanate (BST) Thick Films on Alumina Substrates," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23** 2699-703 (2003).
14. J.-M. Cho and B. H. Kim, "Dielectric Properties of BaTiO₃ Ceramics Having Abnormally Grown Grains(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **36** [9] 965-73 (1999).
15. S. H. Jeon, I. S. Kim, J. S. Song, B. K. Min, and J. D. Yoon, "Effect of the Addition of Li₂CO₃ on Dielectric Properties of Barium Strontium Titanate Thick Film with Annealing Condition," pp. 311-12, Proceeding of the KIEEME Annual Summer Conference, 2006.