論 文
55C-8-3

BST 후막의 가변 유전특성과 큐리온도에 관한 연구

Tunable Dielectric Properties and Curie Temperature with BST Thick Films

金 寅 性† · 宋 在 成* · 閔 馥 基* · 全 素 賢**
(In-Sung Kim · Jae-Sung Song · Bok-Ki Min · So-Hyun Jeon)

Abstract - The properties of tunable dielectric materials on RF frequency band are important high tunability and low loss for RF variable devices, variable capacitor, phased array antenna and other components application. Various composite of BST(barium strontium titanate) ratio combined with other non-electrical active oxide ceramics have been formulated for such uses.

We present the tunable properties and Curie temperature on BST thick films. The grain growth of the weight ratio of $BaTiO_3$ increased. This can be explained by the substitute Sr^{2+} ion for Ba^{2+} ion in the $BaTiO_3$ system. The Curie temperature was shifted to lower temperature with increasing $SrTiO_3$ in the $BaTiO_3$-$SrTiO_3$ system, because of decreasing the lattice constant. Also, the dielectric constant, tunability and K-factor of $(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$ at over the Curie temperature decreased, at over the 60℃ fixation, maximum dielectric constant at Curie temperature and hence sharper phase transformation occurred at Curie temperature. The result were interpreted as a process of internal stress relaxation resulting form the increase of 90° domains induced the BST. As a result, It is concluded that over the Curie temperature, frequency response and DC field effect for the tunable properties of BST thick film are suppressed by the transition broadening. For the application of tunable devices, that the curie temperature was investigated to be increased.

Key Words : 가변 유전체, Tunable Dielectrics, BST, 큐리 온도, 고주파 가변 소자, 후막 유전체

1. 서 론

강유전체를 이용한 고주파 가변소자(tunable devices)는 반도체나 페라이트를 이용한 소자에 비하여 디바이스의 설계적 측면, 소형화, k-factor 및 고주파 전력(RF power)의 소모 면에서 상당히 우수한 특성을 가지고 있어서 마이크로웨이브나 밀리미터파의 튜닝(tuning)에 적절한 것으로 알려져 있다. 광대역(wide band)에서 가변소자(tunable devices)에 요구되는 중요한 사양으로는 회로의 소형화, 고주파 영역에서 500 이상의 Q-factor, 빠른 수용 속도와 큰 고주파전력 수용 능력인데 강유전체 소자는 이러한 사양을 만족할 뿐만 아니라 작은 직류 전압 하에서 튜닝이 가능하고 제조 가격이 저렴하여 위에서 언급한 여러 가지 문제점을 해결할 수 있는 매우 유망한 소재로써 가변 커패시터(tunable capacitor), 정렬안테나(beam-steerable antenna), 가변필터(tunable filter), 가변 진동자(tunable oscillator) 등으로 활용이 기대되고 있다.[1, 2]

† 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 선임연구원 공학박사,
E-mail : kimis@keri.re.kr
* 正 會 員 : 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 연구원
** 學生會員 : 경남대학교 대학원 신소재공학과
接受日字 : 2006年 6月 15日
最終完了 : 2006年 7月 3日

이러한 가변 유전체는 크게 벌크형과 박막형 소재 이외에 반도체와 페라이트를 적용한 소자가 있다. 그러나 이들 소재로 제작된 소자는 가격적인 측면의 단점뿐만 아니라 저주파 대역에서 널리 쓰이고 있는 반도체형 바랙터(varactor)의 경우 높은 가변율(tunability)을 갖기 위해 p-n 층의 도핑(doping) 정도가 낮아야 하는데 이 경우 도핑층의 영역(depletion 부분) 폭이 확대되고 이 영역은 저항체로 작용하게 되므로 마이크로웨이브 영역의 직렬저항 손실에 따른 Q 값이 저하되고 손실에 비례하여 소자의 사용 주파수 대역이 제한되는 단점이 있다.[3, 4] 또한 페라이트 소재를 적용한 위상변위기나 고주파 가변필터의 경우는 가격이 비싸고 만드는 공정이 복잡할 뿐만 아니라 튜닝 회로의 전력 소모가 50mA, 12 V 이상을 요구할 정도로 매우 크고 마이크로 스트립(micro strip)과 같은 미세 구조로 제작이 불가능하기 때문에 집적화가 어려운 단점이 있다. 그러므로 최근에는 상온 강유전체 물질을 고주파용 튜너블 디바이스에 적용하는 연구가 관심을 끌고 있다. 그중에서 $BaTiO_3$ 와 $SrTiO_3$는 모두 화학적으로 안정하며 페로브스카이트(perovskite) (ABO_3)구조를 갖는 대표적인 산화물이며, 특히 $BaSrTiO_3$ (barium strontium titanate)는 수 GHz 대역의 높은 주파수 영역에서도 가변 유전특성이 좋은 것으로 알졌다.[5, 6]

본 연구에서는 튜닝회로 및 주변소자와의 모듈화를 위해 박막과 벌크가 아닌 후막(thick film)을 세라믹스 성형방법 중 하나인 테이프케스팅법(tape casting)을 이용하여 $BaSrTiO_3$ 가변 유전체로 제조하였으며, $BaTiO_3$ 와 $SrTiO_3$

의 비율에 따른 상전이온도(curie temperature)와 전압-주파수 가변율의 관계에 대하여 연구하였다. 가변유전체(tunable dielectrics)의 상전이온도는 K-factor, Q 값, 주파수-전압 가변율에 지대한 영향을 미치므로 LTCC 소자와 모듈화를 위한 중요한 결과로 소자의 활용에 대한 문제점과 가능성을 제시하였다.

2. 실 험

2.1 가변 유전체 후막제작

$BaSrTiO_3$ 합성을 위해 순도가 99.9 % 이상인 $BaCO_3$(cerac), $SrCO_3$(aldrich), TiO_2(cerac)를 각각 x=5, 6, 7 의 비율로 에탄올과 혼합하여 24시간 볼밀 후 건조하여 분쇄하고 분쇄한 분말은 1200℃ 에서 2시간 유지시켜 하소하였으며, 하소가 끝난 분말은 입자의 크기 조절을 위해 다시 분쇄, 볼밀, 건조 과정을 거쳐 체가름 함으로써 초기 $Ba_7Sr_{1-3}TiO_3$, $Ba_6Sr_{1-4}TiO_3$, $Ba_5Sr_{1-5}TiO_3$ 분말을 각각 합성하였다. 합성된 분말을 후막 테이프케스팅 방법에 적합하도록 슬러리 공정을 적용하였으며, 후막의 점도와 입자의 분산을 감안하여 분말과 용매(에탄올과 MEK(methyl ethyl ketone))의 비율을 6.5:3.5의 비율로 맞추어 혼합하였다. 입자들의 반발력을 증가시켜 분말의 응집된 입자들을 분산시키기 위해 상용화된 분산제(세라퍼스-111)를 1 wt% 정도 첨가하였으며, 결합제는 폴리비닐브티랄(poly vinyl butyral)을 분말의 6 wt% 첨가 하였다. 열가소성을 증대시킴으로써 고온에서 성형이 용이하도록 하기 위하여 디브틸 프탈레이트(dibutyl phthalate) 가소제를 첨가하고 볼밀한 후 슬러리에 남아있는 기포를 제거하여 적당한 점도를 유지시킴으로써 슬러리를 완성하였다. 후막 성형을 위해 실리콘 다이옥사이드(SiO_2)가 코팅된 폴리에틸렌 필름은 40 cm/min 의 속도로 이송시키고, 닥터블레이드(doctor blade)의 간격은 소결 후 수축율을 감안하여 후막의 두께에 맞게 100~120 μm 정도로 조절하여 성형한 다음 다시 건조시켜 절단함으로써 후막 유전체를 제조하였다. 성형한 후막 시편은 1000 ~ 1400 ℃ 의 범위에서 50℃ 씩 차이를 두어 소결정도를 알아보았으며, 소결 범위의 온도를 3~4가지로 달리 선택하여 진행하였다. 테이프케스팅 방법에 의한 상세한 후막 제조 공정은 그림 1 과 같다.

2.2 분석 및 가변 특성 측정

소결온도에 따른 후막의 결정화 정도를 알아보기 위해 XRD 분석을 하였으며, 소결체 밀도는 아르키메데스(archimedes)법을 이용하여 측정하였고 미세구조는 전자주사현미경으로 관찰하여 결정립 크기와 그레인(grain)의 소결 특성을 확인하였다. 고주파 가변 유전특성을 측정하기 위해 시료의 표면에 상하부 전극을 마주보게 각각 500 ㎛의 원형 마스크를 이용하여 금(Au)을 스퍼터링 방법으로 증착한 다음 임피던스 분석기(impedance analyzer 4194A)로 정전 용량과 손실을 측정하여 유전 특성을 분석하였으며, 이때 DC 바이어스 전압을 인가하여 전압 가변에 따른 주파수-정전용량 가변율을 측정하였다.

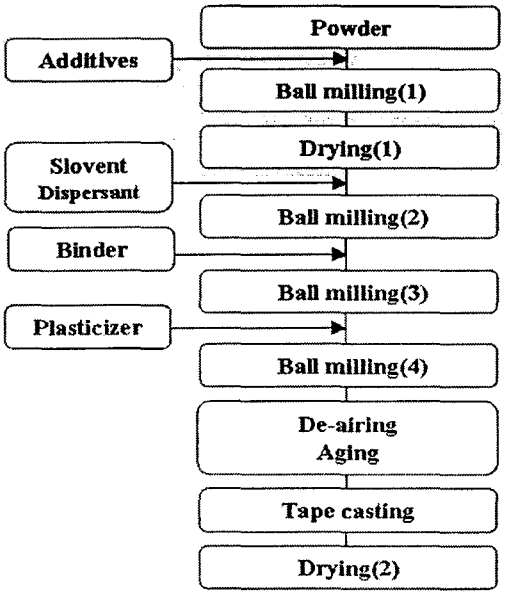


그림 1 테이프 케스팅에 의한 후막 제조공정

Fig. 1. Fabrication of thick films by tape casting process

가변율과 k-factor는 식 1, 2과 같이 계산하여 나타내었다. 또한 큐리 온도와 가변 특성을 알아보기 위해 위의 가변 유전체 시료를 -80℃~180 ℃ 까지 측정 가능한 저온-고온 챔버(espec 877) 내부에 설치한 후 바이어스 전압을 인가하면서 정전용량과 손실값을 측정하여 가변 유전특성과 큐리온도의 상관관계를 조시하였다.

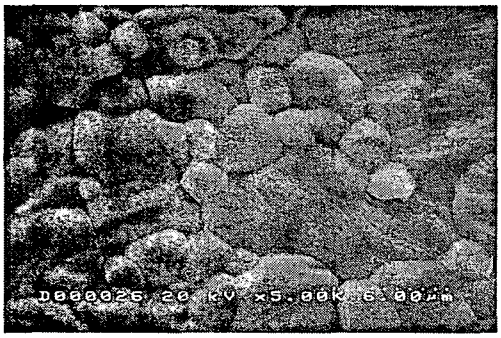
$$Tunability(\%) = \frac{\varepsilon_{r(0)} - \varepsilon_{r(app)}}{\varepsilon_{r(0)}} \times 100 \quad - (1)$$

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

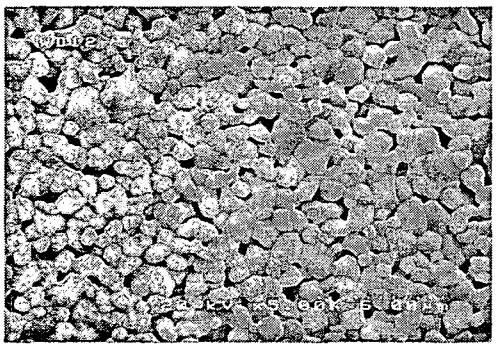
3. 결과 및 고찰

$BaSrTiO_3$ 경우는 삼성분계로써 바륨(Barium), 스트론튬(strontium) 비율에 따라 일반적으로 두 물질이 치환형 고용체를 형성하기 위해서는 결정구조가 같아야 하고, 이온의 상대적 크기 차이가 15 % 이내이어야 한다. Ba^{2+}와 Sr^{2+}이온의 반경은 각각 1.43Å, 1.27Å으로 크기 요소(size factor)가 15 %보다 작기 때문에 전 조성범위에서 고용체를 형성하며, 고용체를 형성하는 주된 역할은 이온들의 간단한 상호확산에 의해 고용체를 형성하는 것으로 알려져 있다.[7] $(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$의 비율에 따라 소결 후 시료의 표면을 SEM을 이용하여 촬영한 그레인의 미세구조를 그림 2에 나타내었다. 1350 ℃의 소결온도에서 $BaTiO_3$의 양이 증가할수록 BST 결정크기가 크고 치밀하며 기공이 거의 없음을 알 수 있다. 아르키메데스 방법에 의한 밀도 측정 결과 이상적인 소결 밀도인 5.8에 가까운 5.65 로 나타나 SEM 분석 결과와 일치하였다. Ba_xSr_{1-x}의 비율이 6:4, 5:5에서는 1~2 ㎛ 정도의 그레인을 이루었으나 7:3에서는 3 ㎛ 이상의 그레인

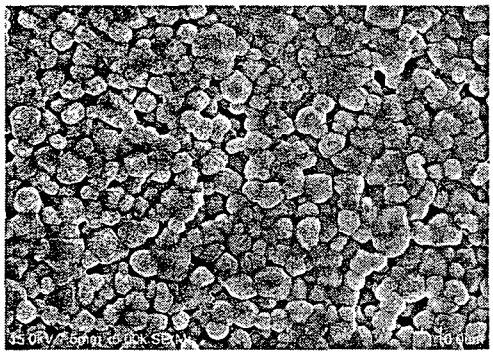
이 다수 관찰되었다. 즉, $BaTiO_3$ 양의 증가에 따른 치밀화 증진, 입자성장 효과와 기공의 감소에 기인하여 기공을 통한 방전억제 효과에 의한 것으로 볼 수 있다.[8] 또한 $Ba_7Sr_3TiO_3$ 비율의 1400 ℃ 소결 온도 범위에서는 그림 3의 (b)의 A, B, C와 같이 6~10 ㎛ 이상의 비정상 그레인이 발견되었다. 일반적으로 소결 온도가 변함에 따라 나타나는 상전이 전 현상이나 또는 불순물에 의한 것으로 알려져있으며, 유전특성 변화를 가져올 것으로 예상되어 고찰에 결과로 나타내었다.



(a) $(Ba_7Sr_3)TiO_3$



(b) $(Ba_6Sr_4)TiO_3$

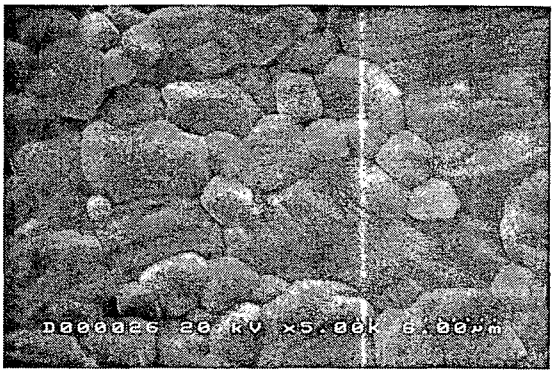


(c) $(Ba_5Sr_5)TiO_3$

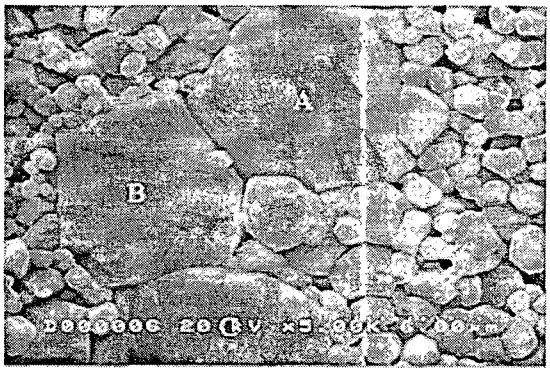
그림 2 $BaSrTiO_3$ 1350℃에서 소결한 후 SEM 이미지
Fig. 2. SEM image of the sintered at 1350℃ for a $BaSrTiO_3$

그림 4은 조성에 따른 $BaSrTiO_3$ 후막을 1350℃에서 소결한 후 X-ray 분석 결과를 나타낸 것이다. BST 회절피크가 뚜렷하게 나타난 것으로 보아 합성이 잘되고 소결온도가 적정한 것으로 사료된다. 조성에 따른 회절피크의 변화는 없었고, 회절 피크의 강도에서 차이를 보였다.

Ba_xSrTiO_3 조성일때 X-ray 회절피크의 강도가 가장 강하게 나타났으며, 이것은 다른 조성에 비해 결정성장의 증가를 간접적으로 보여주는 것으로 1350℃에서는 $BaSrTiO_3$의 결정성장이 뚜렷하다고 할 수 있다. 또한 결정성 증가에 의해 결정 입경이 커질수록 유전 특성을 저하시키는 입계 단면적이 감소함으로 비유전율이 증가하는 것으로 보고되고 있다. 이것은 그림 2의 SEM 결과에서와 같이 크게 성장한 입자의 경우에 해당하며 그림 5의 결과에서도 $BaSrTiO_3$의 조성에 의해 높은 유전율을 나타낸 것으로 설명 되어질 수 있다.[9]



(a) 정상 성장 입자 (1350℃)



(b) 비정상 성장 입자 (1400℃)

그림 3 $BaSrTiO_3$의 소결 조건에 따른 그레인 비교
Fig. 3 SEM image of grain morphology as a sintered condition for $Ba_7Sr_3TiO_3$

그림 5는 $BaSrTiO_3$의 적정한 소결온도를 찾기 위해 소결온도를 달리했을 때 110 면의 회절피크를 나타낸 것이다. 소결온도가 증가할수록 면간거리는 좁아지는 것을 알 수 있다. 즉, 소결 과정에서 고용체를 형성할 때 이온반경이 작은 Sr^{2+}이온이 이온반경이 큰 Ba^{2+}와 치환되는데, $SrTiO_3$의 양이 증가하면 이온반경이 작은 이온으로 치환되어야 함으로 격자상수가 줄어들며, 상전이온도와 유전상수도 낮아질 것을 간접적으로 시사하는 결과이다. 가변유전체 후막에서 유전율 및 가변율은 소결 정도에 의존적임을 간접적으로 알 수 있으며, 뒤에서 언급할 큐리 온도의 분포와 영역에 영향을 끼친다. 큐리온도의 분포는 유전특성에 의존적이며, 가변 소자의 사용 온도 범위를 결정지을 수 있다.

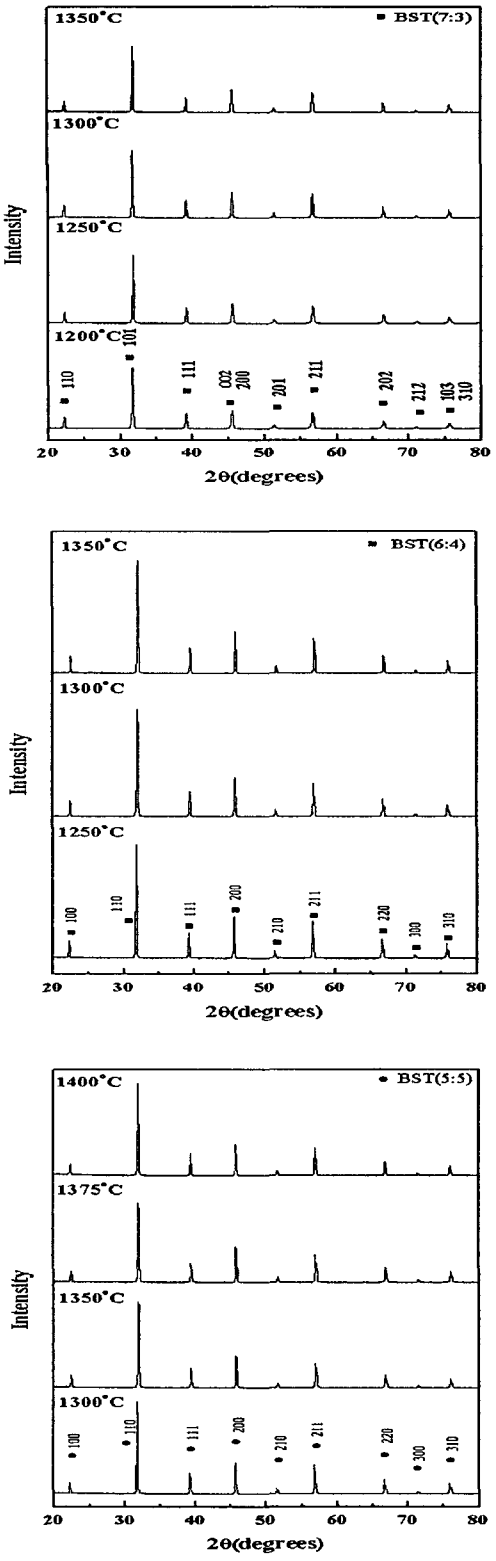


그림 4 $BaSrTiO_3$ 의 조성에 따른 X-ray 피크 패턴

Fig. 4. X-ray diffraction patterns as a function of $BaSrTiO_3$ ratio

표 1은 소결온도 변화에 따른 X-ray 회절 패턴을 측정하고 $BaSrTiO_3$ 결정의 011면 피크를 이용하여 격자면간 거리와 2θ를 나타내었다. $SrTiO_3$의 양이 증가할수록 소결온도가 높아지는 것을 알 수 있으며, 상온에서 중간 조성인 $(Ba_5Sr_{1-5})TiO_3$ 격자 상수가 a_0=3.9471 Å인 입방정상 구조를 나타내었다. 이것은 이온반경이 더 큰 Ba^{2+}자리에 Sr^{2+}가 치환되기 위해서는 구조내의 Ba^{2+}의 결합을 끊고 그사이에 Sr^{2+}가 들어가 새로운 결합을 해야 함으로 높은 에너지를 필요로 하기 때문이다.[9] $SrTiO_3$의 양이 증가하면 Sr^{2+}가 새로운 결합을 해야 할 이온들이 많아지므로 높은 에너지를 필요로 하며, 필요한 에너지는 소결온도를 높임으로써 반응이 원활히 진행된다.

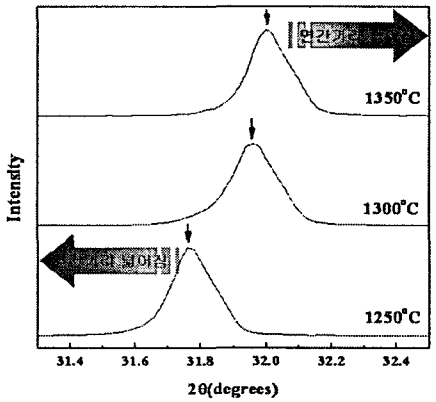


그림 5 의 $(Ba_6Sr_4)TiO_3$의 소결온도에 따른 X-ray 분석

Fig. 5. Sintering temperatures dependence of X-ray diffraction patterns for $(Ba_6Sr_4)TiO_3$

그러므로 소결온도는 1350℃ 보다 다소 높을 것으로 예상된다. 미세구조사진과 XRD 분석에서 나타냈듯이 $BaTiO_3$의 양이 증가할수록 낮은 온도에서 소결이 이루어지며 격자상수는 커지고, 큐리온도는 상온으로 이동하는 것으로 생각할 수 있다.[10, 11] 이런 결과는 다음에 설명할 그림 7에서도 마찬가지로 BaSr (5:5), (6:4), (7:3) 조건에서 $SrTiO_3$보다 $BaTiO_3$이 많을수록 상온으로 이동한 큐리온도가 나타냄을 알 수 있다.

표 1 소결온도와 $(BaxSr_1-x)TiO_3$의 비율에 다른 회절각 및 격자면 거리

Table 1. The distance of lattice plane and 2θ as a function of $(BaxSr_1-x)TiO_3$ ratio

BST(7:3)			BST(6:4)			BST(5:5)		
T_s (℃)	2θ	d110 (nm)	T_s (℃)	2θ	d110 (nm)	T_s (℃)	2θ	d110 (nm)
1350	31.82	1.4621	1350	32	1.4547	1400	31.92	1.4580
1300	31.72	1.4662	1300	31.96	1.4564	1375	31.96	1.4564
1250	31.78	1.4637	1250	31.76	1.4646	1350	31.98	1.4556
1200	31.7	1.4671				1300	31.8	1.4629

즉, $BaSrTiO_3$ 후막 가변 유전체를 적용한 가변 필터, 바랙터, 공진기, 위상 변위기 등이 정상적인 가변율을 갖고 동작하기 위해서는 큐리온도 영역을 감안한 $BaTiO_3$의 량에

지배적인 영향을 받는 것을 알 수 있다.[12]

그림 6는 $BaSrTiO_3$ 후막 유전체를 가변 소자에 활용하기 위해서 바이어스 전압을 -250 V부터 +250V 까지 인가하여 유전율 변화를 나타낸 것으로 시편의 두께는 일정하게 110 ㎛(±5㎛)이며, $BaSrTiO_3$ (7:3) 조건에서 DC 바이어스 전압에 따른 유전율 변화가 가장 큰 것으로 조사되었다. 바이어스 전압 인가에 따른 유전율 변화는 곧 고주파 가변 소자로 활용을 위한 가변율과 밀접하게 연관되므로 k-factor와 함께 매우 중요한 특성이다. 유전율 변화는 $BaTiO_3$의 비율이 클수록, $SrTiO_3$의 비율이 작을수록 크게 나타났으며, $BaSrTiO_3$ 비율에 따라 반비례 하면서 가변율이 다른 것으로 조사되었다. 또한 큐리 온도 전후로 유전 특성이 다르게 나타나 앞에서 언급한 결정구조와 소결 메커니즘에서와 같이 가변율은 큐리 온도에 의존적인 것으로 조사되었다.

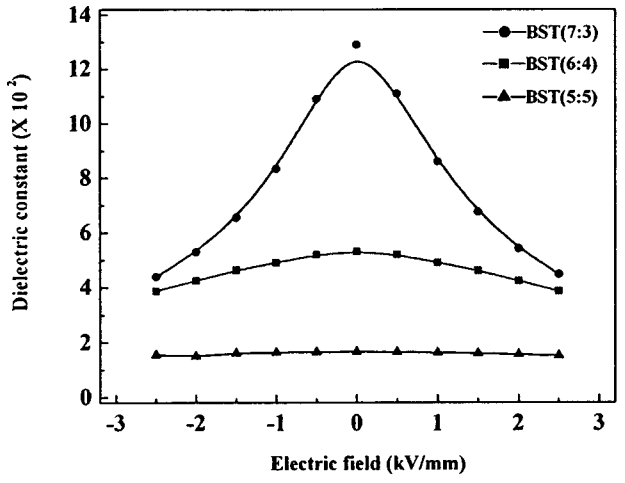


그림 6 $BaSrTiO_3$ 의 바이어스 전압에 따른 유전율

Fig. 6. Dielectric constant of $(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$ ratio as a function of DC bias voltage

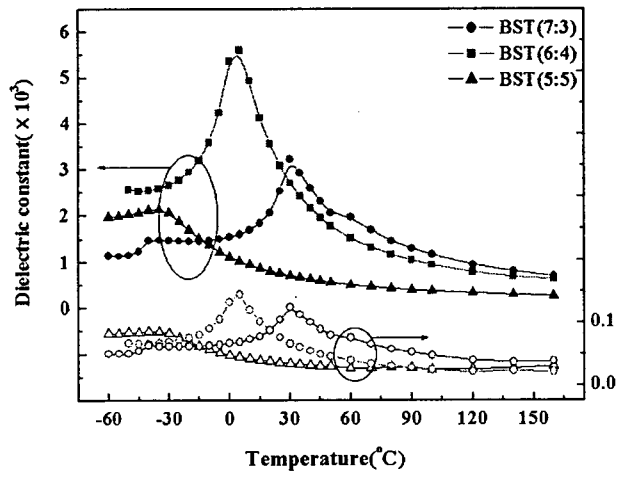


그림 7 $(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$ 비율에 따른 큐리온도와 유전율

Fig. 7. Curie-temperature and dielectric properties as a function of $(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$ ratio

강유전체 ABO 구조에서 외부의 전기장이 유도 되었을 때 분자구조 내의 격자중 〃B〃의 위치가 격자와 격자중의 〃A〃와 불일치(dislocation) 하여 가변 현상이 나타나는 이론으로 비추어 보면 적정한 가변율을 갖는 $SrTiO_3$의 비율은 $BaSrTiO_3$ (7:3)으로 해석된다. 그러나 박막인 경우 $(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$ (6:4) 또는 (5:5)의 조건에서 가변율이 제일 크다는 연구결과도 있다.[14] 본 연구에서 적용한 가변유전체인 BST(barium strontium titanate)의 경우는 $BaSrTiO_3$ (7:3) 일 때 가장 큰 가변율이 조사되었으며, 뒤 부분의 고찰에서와 같이 큐리 온도에 크게 의존적이다. 고주파 대역의 튜너블 디바이스로 활용하기 위해선 유전율이 낮고 손실이 작아야 하며, tunability는 높아야 한다. 특히 최종적으로는 k-factor가 커야 하는데 이것은 전반적으로 유전손실에 의존적이다.

그림 7은 온도 변화에 따른 유전율 변화를 나타낸 것이다. 상전이 온도 부근에서 유전율 변화가 크게 일어남을 알 수 있다. 상전이온도에서 정방정화 변형이 일어날 때 강유전체의 전형적인 특징중 하나인 강유전 분역(domain)이라는 독특한 구조가 유기되어 재배열이 일어나기 때문으로 설명된다. 즉, c-축과 a-축이 교대로 배열되면서 격자상수의 늘고 줄어듦이 상쇄되어 내부응력이 최소화되어 나타나는 현상으로 해석되고 있다.[13] 그러므로 상전이 온도 이상에서는 내부응력이 최소화되어 유전율이 현저히 저하된다고 볼 수 있다.

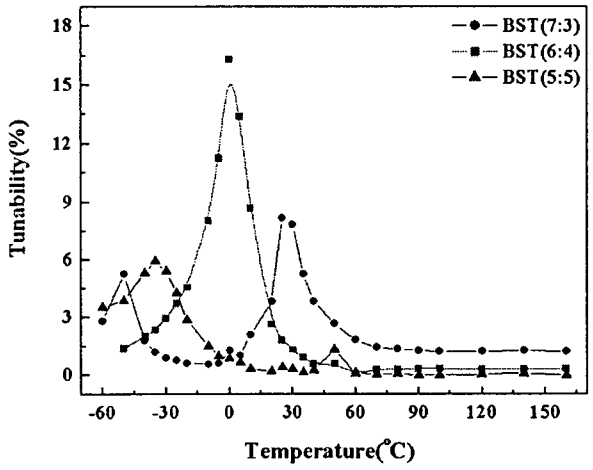


그림 8 $BaSrTiO_3$ 비율에 따른 큐리온도와 가변율

Fig. 8. Curie-temperature and tunability as a function of $BaSrTiO_3$ ratio (1MHz, 바이어스 전압 가변 -40 V ~+40 V)

본 연구에 적용한 가변유전체 후막에서 상전이온도를 전후로 분역의 재배열이 일어나면서 유전율의 차이와 가변율 변화가 크게 나타났다. 상전이온도 이상에서부터 90 ℃까지 가변율은 점점 낮아지며 $BaSrTiO_3$의 조성에 관계없이 일정한 값을 나타내고 있다. $BaSrTiO_3$ 상전이가 일어남으로써 구조의 변화와 더불어 유전특성의 변화를 가져온 것으로 해석되며 곧 가변 소자에 적용할 경우 중요한 고려 사항중 하나로 풀이된다. 그림 8에서와 같이 높은 가변율 범위를 소자에 적용할 경우 큐리 온도 범위를 더 상온으로 올릴 필요가 있는 것으로 사료된다.

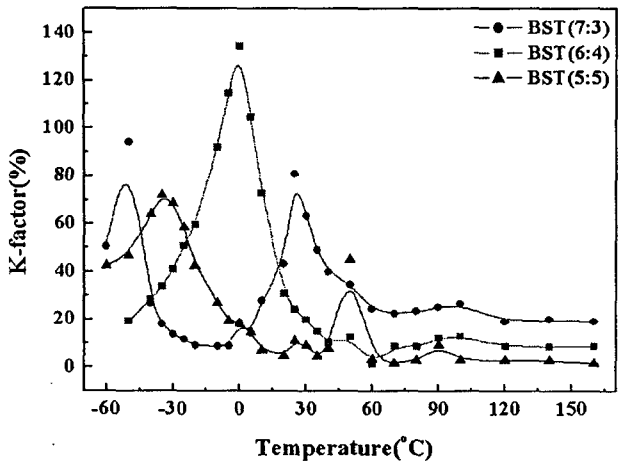


그림 9 $BaxSrTiO_3$ 비율에 따른 큐리온도와 k-factor

Fig. 9. Curie-temperature and k-factor as a function of $BaSrTiO_3$ ratio

그림 9는 온도 변화에 따른 k-factor를 나타낸 것이다. 상전이온도 범위에서 가장 높은 값을 나타내었으며, 조성에 따라 유전손실은 크게 온도에 지배적이지 않기 때문에 가변율과 비슷한 경향을 나타내었다. 또한 큐리온도 이상의 온도 영역에서 나타나는 두 개의 피크는 Ba와 Sr의 비율에 따라 나타나는 β-상변태(phase transition) 현상으로 해석되어진다.

4. 결 론

본 연구에서는 주파수 튜닝회로 및 주변소자와의 모듈화를 위해 박막과 벌크가 아닌 $BaSrTiO_3$(barium strontium titanate) 후막을 세라믹스 성형방법중 하나인 테이프케스팅법(tape casting)을 이용하여 가변 유전체를 제조하였으며, $BaTiO_3$ 와 $SrTiO_3$의 비율에 따른 상전이온도(curie temperature)와 전압-주파수 가변율의 관계에 대하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

$(Ba_xSr_{1-x})TiO_3$ 강유전체 후막에서 $BaTiO_3$의 양이 증가할수록 $BaSrTiO_3$ 결정 크기가 크고 치밀하며 소결후 밀도가 높은 것으로 조사되었다. 반면에 $Ba_7Sr_3TiO_3$에서 과잉소결로 인한 결정의 비정상 입성장이 발견되었으며, 유전특성이 크게 변화하였다. 한편 Ba_xSr_{1-x} (5:5), (6:4), (7:3) 조건에서 $SrTiO_3$보다 $BaTiO_3$이 많을수록 높은 큐리온도를 갖고 있었으며, $BaTiO_3$는 많을수록 큐리온도는 상온으로 이동하고 유전율에 크게 영향을 미치는 것으로 조사되었다. $BaSrTiO_3$는 큐리온도영역에서 상전이가 일어남으로써 구조 변화와 더불어 유전특성의 변화를 가져온 것으로 해석되며 곧 가변 소자에 적용할 경우 중요한 고려 사항중 하나로 풀이된다. 높은 가변율 범위를 소자에 적용할 경우 손실은 줄이고 큐리온도 범위를 더 상온으로 올릴 필요가 있는 것으로 조사되었다.

참 고 문 헌

[1] Linnanmaa, Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Technology, University of Oulu, March 26th, 2004.

[2] Sang-Chul Lee, Sung-Pil Nam, Sung-Gap Lee and Young-Hie Lee, "The Structural and Dielectric Properties of the PZT/BST Heterolayered Thin Films with RF Power" KIEE International Transactions on Electrophysics and Application, Volume 54 Number 1 pp.13-17, 2005,

[3] Kyung-Jin Hong, Yong-Ki Min, Jae-Cheol Cho, "Fractal Surface Morphology of Nanostructured BST Thin Films", KIEE International Transactions on Electrophysics and Application, Vol.12-C No 1, pp.47-51, 2002

[4] M. S. Tyagi, "Introduction to Semiconductor Materials and Devices" John Wiley and Son, New Yok, 301(1991)

[5] D. E. Oates, A. Pique, K. S. Harshavardhan, J. Moses, J. F. Yang and G. F. Dionne IEEE Trans, Appl. Supercondoctor 7, 2338(1997)

[6] S. Harsany, "Principles of Microwave Trchnology" Prentice-Hall, Columbus, 110(1997)

[7] 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," J. Kor. Ceram. Soc., Vol. 41, No. 61, 444-49, 2004

[8] M, Halmi, G. Desgradin and B. Raveau, "Improved Lead Perovskite Compounds (PFN-PFT) for Z5U Capacitor Applications," Advanced Ceramic Mater., Vol. 3, No. 1, pp. 32-37 (1998)

[9] Young-Gook Son, "Electrical Properties of Ba0.5Sr0.5TiO3 Thin Film with Various Heat Treatment Conditions," Journal of Korean Ceramic Sociiety, Vol. 38, No. 5, pp.492~498 2001

[10] Powder Diffraction File, International Center for Diffraction Data, Swarthmore, Pennsylvania, 1989, Card No. 5-626

[11] Powder Diffraction File, International Center for Diffraction Data, Swarthmore, Pennsylvania, 1989, Card No. 35-734

[12] B. SU, J.E.Holmes, C.Meggs, T.W.Button, "Dielectric and microwave properties of barium strontium titanate(BST) thick films on alumina substrates," Journal of the European Ceramic Society, 23 2699-2703 (2003)

[13] Ji-Man Cho, Byong Ho Kim.,"Dielectric Properties of BaTiO3 Ceramics Having Abnormally Grown Grains," Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 36, No. 9. pp.965'973, 1999

[14] Sengupta et al. "ceramic ferroelectric composite material BST-MgO. US Patent 5,427,998, 1998

저 자 소 개

김 인 성 (金 寅 性)

2003년 부산대 대학원 전기공학 (박사)
현재 : 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 선임연구원
관심분야 : 고주파 소재, RF 디바이스, 강유전체 박/후막
E-mail : kimis@keri.re.kr

송 재 성 (宋 在 成)

1991년 KAIST 전자재료 (박사)
현재 : 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 그룹장
관심분야 : 전자재료, PZT 유전체, 엑추에이터
E-mail : jssong@keri.re.kr

민 복 기 (閔 馥 基)

1993년 고려대 대학원 재료공학 (박사수료)
현재 : 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 책임연구원
관심분야 : 자성재료, 유전체, 고주파 소자
E-mail : bkmin@keri.re.kr

전 소 현 (全 素 賢)

현재 : 경남대 대학원 재료공학 (석사과정)
관심분야 : 유전체, 전자재료
E-mail : hyun3253@hotmail.com