

RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제조한 (Ba,Sr)TiO₃ 박막의 유전 및 초전특성

박재석 · 김진섭* · 이정희** · 이용현** · 한석룡*** · 이재신

울산대학교 재료금속공학부

*인제대학교 전자공학과

**경북대학교 전자전기공학부

***한국전자 종합연구소

(1999년 1월 19일 접수)

Dielectric and Pyroelectric Properties of (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films Grown by RF Magnetron Sputtering

Jae-Seok Park, Jin-Sup Kim*, Jung-Hee Lee**, Yong-Hyun Lee**,
Suk-Ryong Han*** and Jae-Shin Lee

School of Materials and Metallurgical Eng., University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

*Department of Electronics Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea

**School of Electronics and Electric Engineering, Kyung-Pook National University, Taegu 702-701, Korea

***Research Center, Korea Electronics Co., Kyung-Pook 730-031, Korea

(Received January 19, 1999)

초 록

RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 Pt/Ti/NON/Si 기판 위에 Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO₃ (BST) 박막을 증착한 다음 유전 및 초전특성을 살펴보았다. BST 박막을 증착할 때 기판온도를 300~600°C로 변화시킨 결과 기판온도가 증가할수록 박막의 결정성과 입도가 증가하여 유전율과 초전계수가 증가하였다. 한편 하부전극인 Pt의 증착조건이 BST 박막의 물성에 미치는 영향도 살펴보았다. Pt의 증착온도는 Pt의 미세구조와 결정성뿐만 아니라 상부에 형성된 BST 박막의 배향성에도 큰 영향을 미쳤으며, 그 결과 BST의 초전특성에도 큰 영향을 미쳤다. BST 박막과 Pt 하부전극의 증착조건을 적정화함으로써 본 연구에서는 상온에서 초전계수가 240 nCcm⁻²K⁻¹인 BST 박막을 얻었다.

ABSTRACT

The dielectric and pyroelectric properties of Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO₃ (BST) thin films grown on Pt/Ti/NON/Si using RF magnetron sputtering have been investigated. With increasing the substrate temperature during deposition of the BST film in the range of 300~600°C, the dielectric and pyroelectric constants of the film were increased due to improved crystallinity of the film. In addition, the dependence of the microstructural and electrical properties of BST films on the deposition temperature of the bottom Pt electrode was studied. The preferred orientation of the BST films as well as the microstructure of the Pt film was greatly influenced by the deposition temperature of the bottom Pt electrodes, and thus so were the pyroelectric properties of the BST film. The highest value of pyroelectric coefficient at room temperature obtained in this work was 240 nCcm⁻²K⁻¹, which is much higher than those previously reported on other perovskite ferroelectric thin films.

Keywords : Barium strontium titanate, Thin film, Proelectric property, Sputtering

1. 서 론

강유전체 재료의 초전효과를 이용하는 비냉각 적외선 영상기는 산업적, 군사적으로 활용가치가 높다. 세라믹

벌크재료를 이용한 비냉각 열영상기는 이미 실용화되었으며,¹⁾ 현재는 실리콘 반도체 기판 위에 강유전체 박막 재료를 형성하여 열영상기에 활용하고자 하는 연구가 활발하다. 그 이유는 박막 초전체료를 이용하면, 벌크형

재료보다 열응답성, 기기의 소형화, 양산성 등 여러 가지 면에서 유리하기 때문이다.²⁾ 이러한 목적으로 $PbTiO_3$,³⁾ $(Pb,La)TiO_3$,^{4,6)} $Pb(Zr,Ti)O_3$ ^{7,8)} 등의 perovskite 구조의 강유전체 박막 재료의 초전특성에 대한 연구논문들이 발표되었다. 그러나 대표적인 강유전체 재료인 $(Ba,Sr)TiO_3$ (BST)의 초전특성에 대한 연구는 거의 찾기 힘든 상태이다. 본 연구에서는 BST 박막의 비냉각 적외선 센서에 대한 응용가능성을 알아보기 위하여 Pt/BST/Pt/ $Ti/Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4/Si$ 구조의 다층 박막 구조를 제작하였다. 특히 RF 마그네트론 스퍼터링에 의해 하부전극인 Pt과 강유전체 재료인 BST를 증착할 때 각각의 기판 온도가 BST 박막의 유전 및 초전특성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 실험방법

산소와 아르곤 혼합기체의 플라즈마를 이용하여 RF 스퍼터링 방법으로 BST 박막을 증착하였다. 본 실험에 이용된 세라믹 타겟의 화학적 조성은 SrO 가 4 mole % 과잉으로 첨가된 $Ba_{0.66}Sr_{0.34}TiO_3$ 이었으며, 일반적인 세라믹 공정방법으로 자체 제작하였다. SrO 를 과잉으로 첨가한 이유는 본 연구의 예비실험에서 증착된 BST 박막의 조성을 분석한 결과 $(Ba+Sr)/Ti$ 의 비가 1 이하임을 확인하였기 때문이다. 고순도의 $BaCO_3$, $SrCO_3$, TiO_2 세라믹 분말을 이용하여 원하는 조성을 갖도록 평량한 다음, 증류수와 지르코니아 분쇄매체를 이용하여 ball milling 방법으로 24시간 혼합하였다. 혼합된 반죽을 건조시킨 후 하소, 성형, 소결, 가공 공정을 차례로 거쳐 직경이 7.5 cm인 세라믹 타겟을 제작하였다. $Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$ (NON)가 차례로 성막된 Si wafer를 기판으로 사용하였다. NON을 하부 절연막으로 사용한 이유는 초전 박막을 membrane 형태로 가공하기 위해서는 Si 기판을 식각하는 공정에서 NON이 우수한 내식성을 가지기 때문이다. 두께가 각각 10 nm, 400 nm인 Ti과 Pt 박막을 Ar 플라즈마 중에서 RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로

증착하여 하부전극 재료로 이용하였다. 그 위에 제작된 세라믹 타겟을 이용하여 스퍼터링 방법으로 BST 박막을 다시 800 nm의 두께로 증착하였다. Table 1에 본 연구의 증착조건을 요약하여 나타내었다. 특히 본 연구에서는 Pt 및 BST를 증착할 때 300~600°C의 범위에서 기판온도를 변화시켰다.

박막의 두께는 stylus system으로 측정하였으며, 표면형상은 atomic force microscopy(AFM)과 scanning electron microscopy(SEM)으로 관찰하였다. 박막의 결정성은 X-ray diffractometer(XRD)로 분석하였다. 전기적 특성을 측정하기 위하여 금속 차폐마스크를 이용하여 지름이 0.3 mm인 원형의 Pt 상부전극을 BST 박막 위에 역시 스퍼터링 방법으로 증착하였다. 시편을 항온조에 넣고 온도를 변화시키면서 상온 부근에서 유전을 및 유전손실의 온도의존성을 1 kHz에서 impedance analyser(HP 4194A)로 측정하였다. 시편의 온도를 변화시키면서 발생하는 초전전류를 electrometer(Keithley 6512)로 측정하면서 다음 식을 이용하여 초전계수를 계산하였다.⁹⁾

$$i_p = pA (dT/dt)$$

윗 식에서 i_p 는 초전전류이고, p 는 초전계수, A 는 전극의 면적, (dT/dt) 는 온도변화속도이다. 본 실험에서는 시편의 온도변화속도는 4°C/mm였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. BST 박막 증착온도의 영향

Ti/NON/Si 기판 위에 300°C의 기판온도에서 Pt 박막을 증착한 다음, 그 위에 기판온도를 300°C에서 600°C까지 변화시키면서 BST 박막을 증착하였다. 기판온도의 변화에 따른 BST 박막의 표면형상의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 300°C에서 증착한 BST 박막에서는 결정립 관찰이 어려웠으나, 400°C 이상의 기판온도에서 증착한 BST 박막은 구형의 미세한 입상을 나타내었고, 기판온도가 증가할수록 결정립의 크기가 증가하는 경향을 나타낸다. 600°C에서 증착한 BST의 결정립 크기는 50~100 nm를 나타내었다. 기판온도의 증가에 따라 BST 박막의 결정립이 증가하는 현상은 Horikawa 등¹⁰⁾이 보고한 결과와도 일치하는 것으로 기판온도의 증가에 따라 박막표면에서의 원자들의 이동도가 증가하기 때문이다.

Fig. 2에 증착온도의 변화에 따른 BST 박막의 X선 회절 패턴의 변화를 나타내었다. 하부전극인 Pt은 (111) 우선배향성을 나타내며, 일부 (200) 피크도 관찰된다. 400°C 이하에서 증착한 BST의 회절패턴은 (110)의 피크위치에서 완만한 피크를 보이며, 비정질상에 가까운

Table 1. Deposition Conditions for Pt and BST Films

Deposition material	Pt	BST
Substrate temperature (°C)	300~600	300~600
Working pressure (mTorr)	20	20
Gas	Ar	Ar/O ₂ =9/1
Substrate	Ti/NON/Si	Pt/Ti/NON/Si
RF power density (W/cm ²)	1.8	2.26

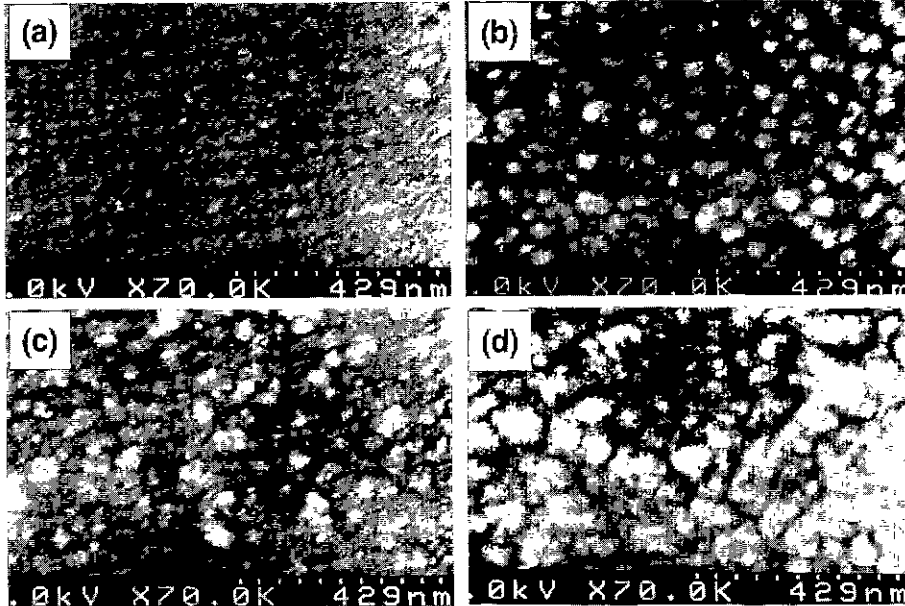


Fig. 1. The surface SEM micrographs of BST thin films on Pt/Ti/NON/Si substrates grown at substrate temperature of (a) 300°C. (b) 400°C, (c) 500°C and (d) 600°C.

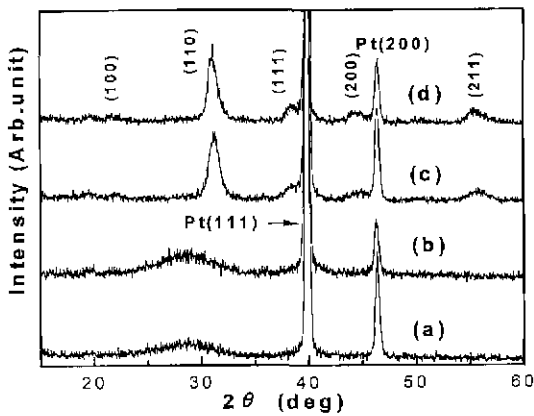


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of BST thin films on Pt/Ti/NON/Si substrates grown at substrate temperature of (a) 300°C. (b) 400°C, (c) 500°C and (d) 600°C.

양상을 나타낸다. 그러나, 500°C 이상에서 증착한 박막은 뚜렷한 (110)면의 배향성을 나타낸다.

Fig. 3에 BST 박막의 증착온도에 따른 상대유전율(ϵ_r)의 온도 의존성을 나타내었다. 증착온도가 400°C 이하인 경우 상대유전율은 100 이하의 낮은 값을 나타내었으나, 증착온도가 증가함에 따라 증가하여 600°C 인 경우 400 정도에 도달하였다. BST 박막의 증착온도가 증가함에 따라 상대유전율이 증가하는 이유는 앞에서

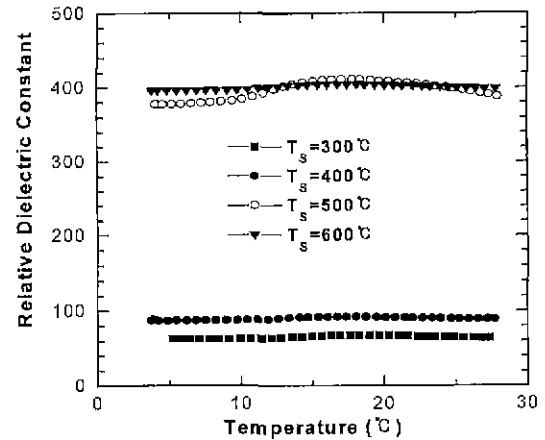


Fig. 3. Temperature dependence of the relative dielectric constant of BST thin films grown at different substrate temperatures.

살펴본 BST 박막의 미세구조의 변화와 연관시킬 수 있다. 즉 BST 박막의 증착온도가 증가함에 따라 박막의 결정성이 향상되고, 입도가 증가하였기 때문으로 생각된다. Horikawa 등¹⁰⁾도 역시 BST 박막의 결정성이 증가함에 따라 상대유전율이 증가함을 보고하였다. 400°C 이하에서 증착하여 비정질상을 나타낸 BST 박막들은 유전율의 온도 의존성을 나타내지 않았지만, 500°C 이상에서 증착한 결정상의 BST 박막은 18°C 부

근에서 완만한 피크를 보였다. Sr/Ba 비가 34/66인 BST 세라믹 재료의 큐리점이 20°C 부근인 점¹¹⁾을 고려하면 BST 박막의 큐리온도가 상온 부근인 것으로 결론 내릴 수 있다. 한편, 일반적으로 강유전체의 경우 Curie-Weiss 법칙에 따라 큐리점에서 예리한 상대유전율의 피크를 나타내지만, 본 연구에서 큐리점 부근에서 유전율의 변화가 완만한 것은 입도가 미세한 박막의 경우 잔류응력이 크기 때문으로 추측된다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 얻은 BST 박막의 입도는 100 nm 이하임을 상기할 필요가 있다. 입자크기가 1 μm 이하로 미세해지면 입자당 분역(domain)의 수가 작아져서 큐리점 이하로 냉각될 때 잔류응력이 증가하게 되고 이에 따라 격자의 정방성과 유전율이 감소한다고 알려져 있다.⁹⁾ 이러한 완만한 전이현상은 BST 박막에 대한 다른 문헌들^{11,12)}에서도 관찰할 수 있다.

Fig. 4에 BST 박막의 초전계수의 온도의존성을 나타내었다. 기판온도에 무관하게 전반적으로 상온에서 초전계수의 최대치를 나타내고 있다. 초전계수는 자발분

극의 온도에 대한 미분치로 정의되기 때문에 상온부근에서 자발분극의 변화가 크다는 것을 의미하며, 이는 상

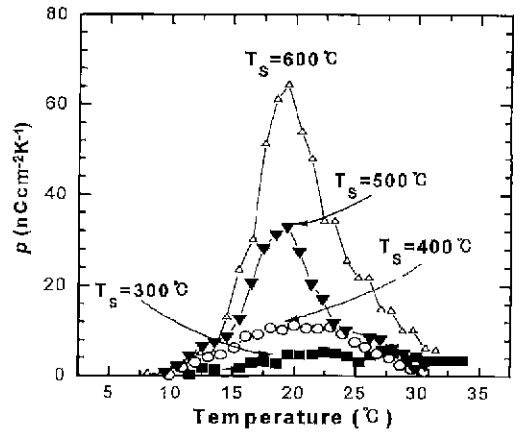


Fig. 4. Temperature dependence of the pyroelectric coefficient of BST thin films as a function of the substrate temperature.

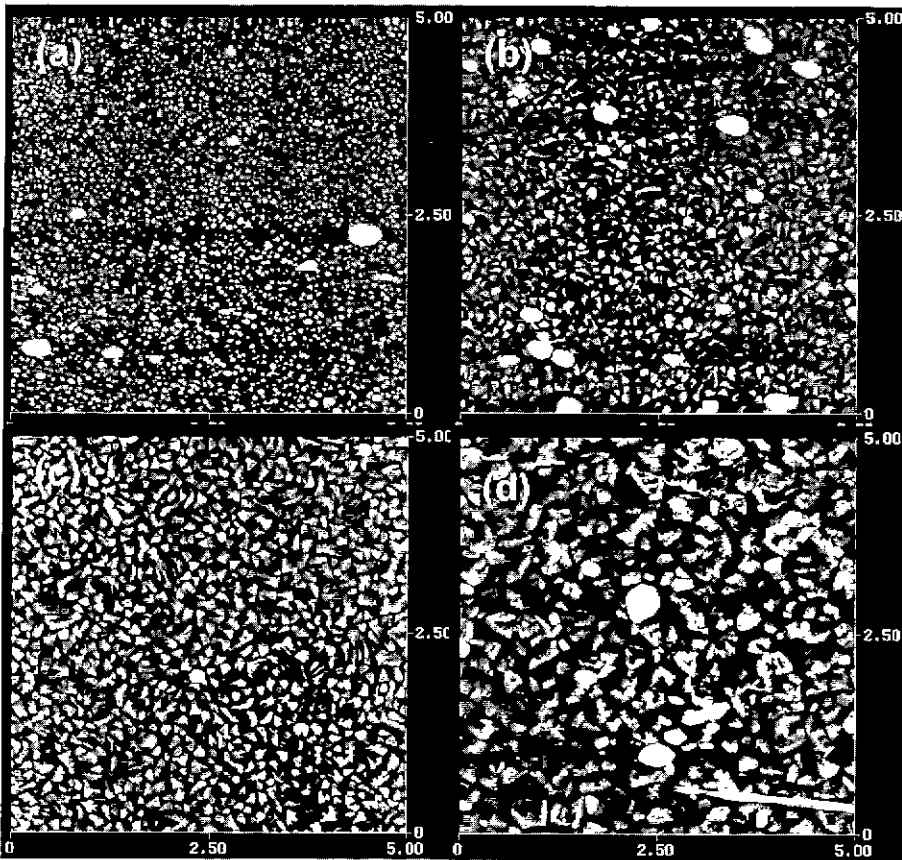


Fig. 5. AFM images of the surface of Pt thin films grown on Ti/NON/Si at substrate temperature of (a) 300°C, (b) 400°C, (c) 500°C and (d) 600°C. Scanned area for each specimen was 5×5 μm².

온에서 큐리점을 갖기 때문으로 볼 수 있다. 그러나 초전계수의 최대치는 기판온도가 증가할수록 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 3에서 나타난 증착온도에 따른 BST 박막의 유전율의 변화와도 일치하는 것으로 기판온도가 증가할수록 BST 박막의 결정성이 향상되었기 때문으로 판단된다.

3.2. 하부전극 Pt 증착온도의 영향

본 연구에서는 하부전극인 Pt의 증착조건이 BST 박막의 물성에 미치는 영향을 조사하기 위해서 기판온도를 변화시켜 제조한 Pt의 물성을 살펴보았다. 기판온도를 300°C에서 600°C까지 변화시키면서 Ti/NON/Si 기판 위에 증착한 Pt 박막의 표면형상을 AFM으로 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 기판온도가 300°C인 경우 Pt의 입도가 100 nm 정도로 작았으나, 증착온도가 증가함에 따라 입도가 증가하여 600°C에서 증착한 Pt의 결정립 크기는 500 nm 정도를 나타내었다. 기판온도의 변화에 따른 Pt 박막의 X선 회절패턴의 변화를 관찰한 결과 하부전극인 Pt은 (111) 우선배향성을 나타내었으며, 일부 (200) 피크도 관찰되었다.

기판온도를 변화시켜 제조한 Pt 전극 위에 BST 박막을 600°C에서 증착하여 BST 박막의 물성변화를 살펴보았다. Fig. 6에 Pt 하부전극의 증착온도에 따른 BST 박막의 표면 미세구조의 변화를 나타내었다. 전체적으로 결정립이 잘 관찰되었으며, 결정립의 크기도 50~100

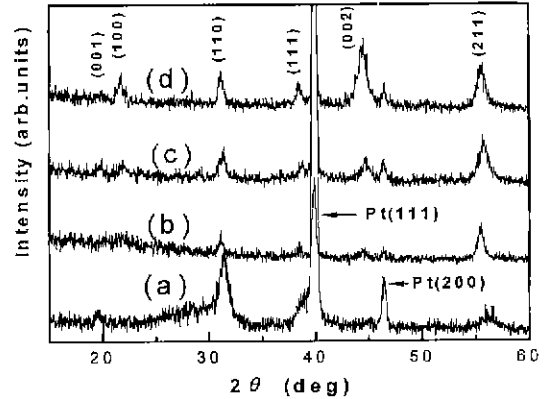


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of BST thin films on Pt/Ti/NON/Si. The bottom Pt electrodes were grown at substrate temperature of (a) 300°C, (b) 400°C, (c) 500°C and (d) 600°C.

nm로 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 X선 회절분석 결과 박막의 배향성은 큰 차이를 나타내었다. Fig. 7에 Pt 증착온도 변화에 따른 BST/Pt/Ti/NON/Si 다층박막의 X선 회절패턴 변화를 나타내었다. Pt에 해당하는 피크를 제외하면 입방정 perovskite 구조에 잘 일치하는 패턴을 나타낸다. BST 박막의 경우 Pt 증착온도가 300°C일 때 (110) 우선적 배향면을 나타내었으나, Pt 증착온도가 증가함에 따라 (110) 피크가 상대적으로 감소

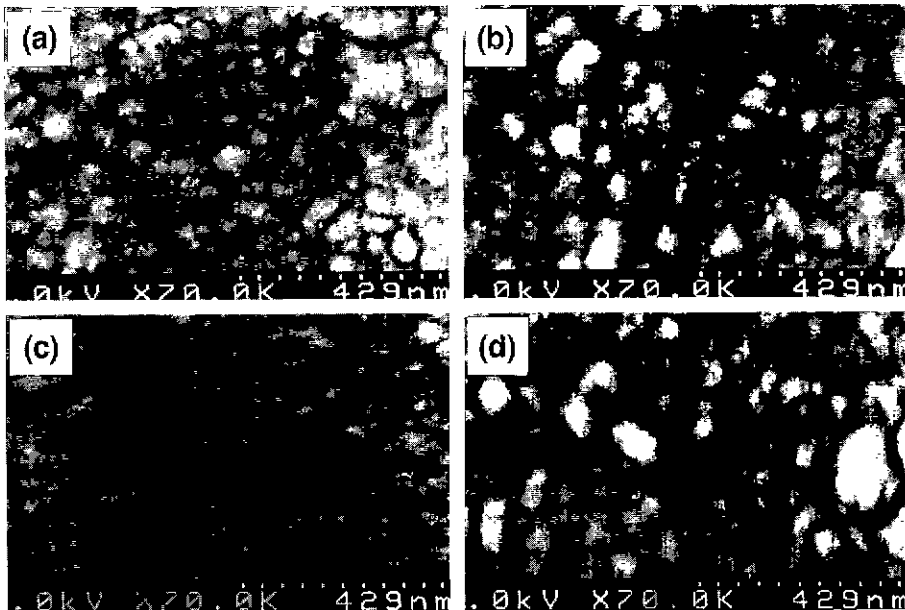


Fig. 6. The surface SEM micrographs of BST thin films on Pt/Ti/NON/Si substrates. The substrate temperature during Pt deposition was (a) 300°C, (b) 400°C, (c) 500°C and (d) 600°C.

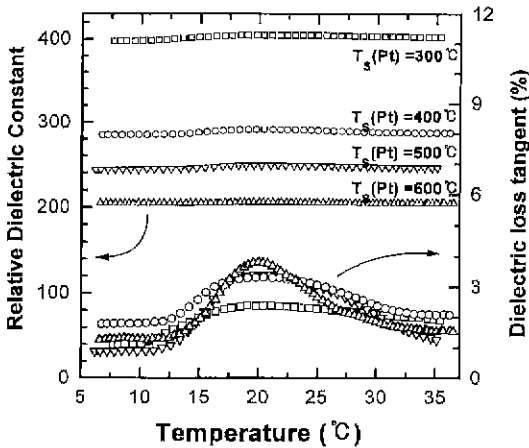


Fig. 8. Temperature dependence of the relative dielectric constant and dielectric loss tangent of BST thin films on Pt/Ti/NON/Si as a function of the substrate temperature during deposition of the bottom Pt electrode.

하고 (200), (211), (100) 등의 다른 방향의 입자들이 성장되었음을 볼 수 있다.

Fig. 8에 BST 박막의 유전특성의 온도의존성을 나타내었다. 유전율의 경우 역시 온도의존성이 거의 없었으나, 유전손실의 경우 큐리점인 20°C에서 뚜렷한 피크를 나타내었다. 이러한 피크는 큐리점 부근에서 상전이에 따른 분역(domain)의 재배열이 일어나기 때문으로 여겨진다. 상대유전율은 Pt의 증착온도가 300°C일 때 400이었으나, Pt 증착온도가 증가함에 따라 감소하여 600°C에서 증착한 Pt의 경우 유전율이 200정도를 나타내었다. Pt의 증착온도가 300°C에서 600°C까지 증가함에 따라 BST 박막의 유전율이 2배 정도 감소한 사실로 BST의 배향성의 변화와 연관짓기는 어렵다. 그러나 Pt의 증착온도가 높은 경우 Pt와 BST 박막 사이에 유전율이 낮은 TiO₂가 형성되었을 가능성이 있는 것으로 보인다. 강유전체 박막의 하부전극으로 이용되는 Pt/Ti 전극의 경우 그 위에 강유전체가 있거나,¹³⁾ 없는 경우에도¹⁴⁾ 산소분위기에서 열처리하면 Ti가 Pt 박막 위로 확산해 나와 TiO₂를 형성하여 박막의 접착력이 저하되는 문제가 발생한다고 보고되었다. 본 연구에서도 Pt의 증착온도가 500°C 이상인 경우 BST 박막을 증착한 다음 접착력이 저하되는 문제가 발견되었다. 이 현상을 자세히 규명하기 위해서는 보다 깊은 연구가 필요한 상태이다. 아무튼 하부전극의 형성조건이 BST 박막의 유전특성에 큰 영향을 미친다는 결론을 얻을 수 있다.

Fig. 9에 Pt 증착온도의 변화에 따른 BST 박막의 초전계수의 변화를 나타내었다. 유전율의 변화 경향과 상

요약화하지

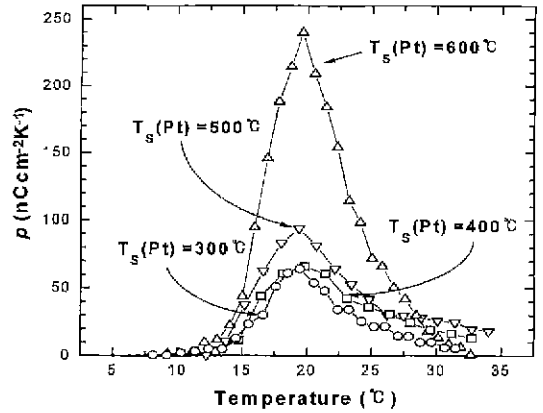


Fig. 9. Temperature dependence of the pyroelectric coefficient of BST thin films. The bottom Pt electrodes were grown at different substrate temperatures.

반되게 Pt의 증착온도가 증가할수록 초전계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 Pt의 증착온도가 BST의 배향성에 영향을 미치기 때문으로 보인다. Perovskite 구조의 BST의 분극방향은 c축이며, Fig. 7에서 보았듯이 Pt의 증착온도가 증가함에 따라 BST 박막의 결정 배향성이 <110> 방향에서 <200> 방향으로 변화하였음을 상기할 필요가 있다. Fig. 7의 X선 회절패턴은 큐리점 이상의 온도인 25°C에서 측정된 자료이다. BST 박막은 큐리점 이하의 온도에서는 정방정 구조를 갖게 되고, 큐리점 이상의 온도에서 a축 방향으로 배향된 입자들이 c축 배향으로 전이될 가능성이 크기 때문이다. 그 이유는 기판면에 대하여 결정축 방향으로 성장된 입방정 구조를 가진 박막의 경우 기판면에 대하여 수평방향보다 수직방향으로의 변형이 더 용이하기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 완전한 c축 배향성을 가진 BST 박막을 얻을 수 없었으며, 이에 대한 연구는 더 필요한 상태이다.

참고로 지적할 점은 현재까지 다른 강유전체 박막에 대하여 보고된 초전계수 값들^{3,6)}이 100nCcm⁻²K⁻¹ 이하였던 점을 고려하면 본 연구에서 얻은 상온 초전계수의 최대치는 240nCcm⁻²K⁻¹로 매우 우수한 결과임을 알 수 있다. 적외선 검출소자에 응용하기 위한 소재의 물성에만 관련된 성능지수(figure of merit)는 다음 식과 같이 정의된다.

$$F_r = \frac{P}{(c' \epsilon)}$$

윗 식에서 c'는 열전도도이다. 세라믹 BST의 열전도도 값인¹⁵⁾ 3.2 Jcm⁻³K⁻¹를 윗 식에 대입하여 본 연구에서

얻은 BST 박막의 F_V 최대치를 구하면 약 4×10^{-10} cmCJ⁻¹에 이른다. 이 값 역시 현재까지 다른 강유전체 박막재료에서 보고된 값보다 훨씬 우수한 결과이다.

4. 결 론

RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 상온 초전특성이 우수한 BST 박막을 제작하였다. BST 박막의 초전특성은 BST 증착온도 뿐만 아니라 하부전극인 Pt 증착온도에도 큰 영향을 받았다. BST 증착온도가 증가함에 따라 박막의 결정성이 향상되어 초전특성이 향상되었다. Pt의 증착온도는 Pt의 배향성 뿐만 아니라 BST 박막의 배향성에도 영향을 미쳐서 BST 박막의 초전특성에도 큰 영향을 미쳤다. 본 연구에서는 증착조건을 적정화함으로써 상온에서 초전계수가 $240 \text{mCcm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 이고, 성능지수가 4×10^{-10} cmCJ⁻¹인 BST 박막을 얻을 수 있었다. 따라서 스퍼터링에 의해 얻은 BST 박막이 상온에서 동작하는 비냉각 열영상기용 재료로 유망하다고 결론 내릴 수 있다.

감사의 글

본 연구는 STEPI(과제계약번호 : G-19-1) 지원하에 수행되었으며, 일부 울산대학교 RRC(기계부품 및 소재 특성 평가연구센터)의 지원을 받아 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- 1 C. Hanson, H. Beratan, R. Owen, M. Corbin and S. Mckenney, "Uncooled Thermal Imaging at Texas Instruments," *Infrared Detectors, State of the Art, SPIE* 1735, 17-26 (1992).
- 2 M. Kohli, C. Wuehrich, K. Brooks, B. Willing, M. Forster, P. Murali, N. Setter and P. Ryser, "Pyroelectric Thin-Film Sensor Array," *Sensors and Actuators*, A60, 147-153 (1997).
- 3 A. Bell, Y. Huang, M. Kohli, O. Paul, P. Ryser and M. Forster, "PbTiO₃ Thin Films for Pyroelectric Detection," *Integrated Ferroelectrics*, 6, 231-240 (1995).
- 4 K. No, S. G. Choi, D. S. Yoon, T.-H. Sung, Y. C. Kim, I. S. Jeong and W. J. Lee, "Pyroelectric Properties of Sol-Gel Derived Lanthanum Modified Lead Titanate Thin Films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35(5A), Part 1, 2731-2733 (1996).
- 5 T. Kamada, R. Takayama, A. Tomozawa, S. Fujii, K. Iijima and T. Hirao, "Preparation and Pyroelectric Properties of La-Modified PbTiO₃ Thin Films by RF-Magnetron Sputtering," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 433, 377-387 (1996).
- 6 J.R. Choi, D.H. Lee, H.J. Nam, S.M. Cho, J.H. Lee and K.U. Kim, "Epitaxially Grown Pyroelectric Infrared Sensor Array for Human Body Detection," *Integrated Ferroelectrics*, 6, 241-251 (1995).
- 7 K.K. Deb, K.W. Bennet, P.S. Brody and B.M. Melnick, "Pyroelectric Characteristics of a Thin PZT(40/60) Film on a Platinum Film for Infrared Sensors," *Integrated Ferroelectrics*, 6, 253-264 (1995).
- 8 M. Kobune, S. Fujii, R. Takayama and A. Tomozawa, "Preparation and Pyroelectric Properties of (Pb,La)(Zr,Ti)O₃ (PLZT) Thin Films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35 (9B), Part 1, 4980-4983 (1996).
- 9 A.J. Moulson and J.M. Herbert. "Electroceramics," pp. 318-337, Chapman and Hall, New York, NY, 1990.
- 10 T. Horokawa, N. Mikami, T. Makita, J. Tanimura, M. Kataoka, K. Sato and M. Nunoshita, "Dielectric Properties of (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films Deposited by RF Sputtering," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32(9B), Part 1, 4126-4130 (1993).
- 11 K. Abe and S. Komatsu, "Thickness Dependence of Induced Ferroelectricity in Epitaxially Grown Ba_{0.44} Sr_{0.56} TiO₃ Thin Films," *Mat. Res. Soc. Proc.*, 361, 465-470 (1995).
- 12 Z. Surowiak, A.M. Margolin, I.N. Zakharchenko, and S. V. Biryukov. "The Influence of Structure on the Piezoelectric Properties of BaTiO₃ and (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films with a Diffuse Phase Transition," *Thin Solid Films*, 176, 227-246 (1989).
- 13 황유상, 백수현, 백상훈, 박치선, 마재평, 최진석, 정재경, 김영남, 조현춘, "Pt/Ti/Si 기판 위에 형성시킨 PZT 박막의 특성," *한국재료학회지*, 4(2), 143-151 (1994).
- 14 이태곤, 김영호, 최덕균, 권오경, "강유전체 하부전극용 Pt/Ti 박막의 필 접촉력에 미치는 열처리의 영향," *한국재료학회지*, 6(6), 610-617 (1996).