

## 후속 열처리에 따른 Pt/SBT/Pt 캐패시터의 강유전 특성과 누설전류 특성

권용욱 · 박주동 · 연대중 · 오태성

홍익대학교 공과대학 금속·재료공학과  
(1999년 2월 24일 접수)

### Ferroelectric and leakage current characteristics of Pt/SBT/Pt capacitors with post annealing process

Yongwook Kwon, Joo Dong Park, Dae Joong Yeon and Tae Sung Oh

Department of Metallurgy and Materials Science, Hong Ik University, Seoul, Korea  
(Received February 24, 1999)

**요 약** - MOD 공정으로 제조한  $\text{SrBi}_{2.4}\text{Ta}_{2.0}\text{O}_9$  (SBT) 박막으로 Pt/SBT/Pt 캐패시터를 형성하여, 400~800°C 범위에서의 후속 열처리에 따른 강유전 특성 및 누설전류 특성의 변화 거동을 분석하였다. 후속 열처리 전의 SBT 박막은 leaky한 박막의 전형적인 분극이력곡선을 나타내었으나, 550~800°C에서 후속 열처리함에 따라 분극이력 특성이 현저히 향상되어 잘 발달된 강유전 이력곡선을 얻을 수 있었다. Pt/SBT/Pt 캐패시터는 600°C에서 후속 열처리시 잔류분극  $2P_r$ 이 9.72  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 의 최대값을 나타내었으며, 그 이상의 온도에서는 후속 열처리 온도의 증가에 따라  $2P_r$ 이 감소하였다. 후속 열처리 전의 SBT 박막은 75 kV/cm의 전계에서  $10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup>의 높은 누설전류밀도를 나타내었으나, 600~800°C에서 후속 열처리함에 따라 누설전류밀도가  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> 이하로 현저히 감소하였다.

**Abstract** - Pt/SBT/Pt capacitors were fabricated using the MOD-derived  $\text{SrBi}_{2.4}\text{Ta}_{2.0}\text{O}_9$  (SBT) films, and their ferroelectric and leakage current characteristics were investigated with post annealing at 400~800°C. Although the MOD-derived SBT film exhibited the hysteresis loop typical for the leaky film, the well-saturated ferroelectric hysteresis loop could be obtained by post annealing the Pt/SBT/Pt capacitors at 550~800°C. The remanent polarization  $2P_r$  of the SBT film exhibited a maximum value of 9.72  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  with post annealing at 600°C, and then decreased with increasing the post annealing temperature above 600°C. The MOD-derived SBT films exhibited the high leakage current density of  $\sim 10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup> at 75 kV/cm. With post annealing the Pt/SBT/Pt capacitor at 600~800°C, however, the leakage current density decreased remarkably to less than  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> at 75 kV/cm.

## 1. 서 론

강유전체 박막은 자발분극과 스위칭 특성을 지니고 있어 비휘발성 기억소자인 FRAM에 응용하기 위한 연구가 활발히 진행중에 있다. FRAM은 DRAM과 비교하여 기록된 정보가 지워지지 않는 비휘발성이고 방사선 내성이 우수하며, EEPROM에 비해 구동전압이 낮고 액세스 시간이 빠른 장점을 지니고 있어 가장 이상적인 기억소자로 생각할 수 있다. FRAM에 사용하기 위한 박막 재료로는 잔류분극 값이 크고 사용온도 범위가 넓은 PZT 박막이 가장 많이 연구되었다. 그러나 PZT 박막을

이용한 Pt/PZT/Pt 캐패시터에서는 분극피로와 imprint가 발생하여 FRAM 소자의 실용화에 가장 큰 문제점으로 작용하고 있다. 이에 따라 최근 Pt 전극을 사용한 Pt/강유전체/Pt 캐패시터 구조에서도 분극피로 및 imprint에 의한 특성 열화가 없는 새로운 강유전체 박막으로서 층상 페로브스카이트 구조를 갖는  $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$  박막에 관한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다.

$\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$  박막의 제조공정으로는 sol-gel[1, 2], MOD (metalorganic decomposition)[3, 4], MOCVD[5, 6], RF 마그네트론 스퍼터링[7], pulsed laser ablation[8], LSMCD 등이 다양하게 연구되고 있다. 이중 MOD법은 다성분계

박막의 제조시, 스퍼터링이나 MOCVD법에 비해 박막의 조성비를 맞추기가 쉽고 비교적 성막이 용이하다는 장점이 있다. 또한 가수분해가 요구되는 sol-gel 코팅용액은 시간에 따라 코팅용액의 특성이 변하기 때문에 박막 특성의 재현성이 떨어지며 코팅용액의 장기간 보관이 어려운 반면에, MOD 용액은 가수분해 과정이 불필요하고 대기 중에서 매우 안정하여 박막 특성의 재현성이 우수하고 장기간 보관이 가능한 장점을 가지고 있다. MOD 공정으로 제조한 SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> 박막에서 Bi/Ta 몰비에 따른 강유전 특성을 분석한 결과, 과잉 Bi를 첨가한 조성의 박막이 Bi 결핍 조성의 박막에 비해 우수한 강유전 특성을 나타내며 x = 1.2 조성인 SrBi<sub>2.4</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> 박막에서 최적의 강유전 특성을 얻을 수 있다고 보고되었다 [9-11]. 또한, Bi가 과잉으로 첨가된 조성의 SBT 박막은 Bi 결핍 조성의 박막에 비해 더 높은 누설전류밀도를 나타내나, Pt 상부전극을 증착한 Pt/SBT/Pt 시편의 후속 열처리에 의해 누설전류밀도가 크게 저하한다고 보고되었다 [11].

본 연구에서는 Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판상에 MOD 공정으로 제조한 SrBi<sub>2.4</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> (SBT) 박막에 Pt 상부전극을 스퍼터 증착하여 Pt/SBT/Pt 구조의 캐패시터를 제조 후, 400~800°C 범위에서의 후속 열처리에 따른 강유전 특성 및 누설전류 특성의 변화 거동을 분석하였다.

## 2. 실험

Sr-2-ethylhexanoate, Bi-2-ethylhexanoate 및 Ta-2-ethylhexanoate 전구체를 butyl-acetate로 희석하였다. SBT 박막의 열처리시 증기압이 높은 Bi 산화물의 휘발을 보상하기 위해 Bi 전구체 용액의 함량을 화학양론적 조성보다 20 mol% 과잉으로 첨가한 SrBi<sub>2.4</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> 조성으로 이들 전구체 용액을 혼합하여 0.05 M 농도의 MOD 코팅용액을 제조하였다. 코팅용액을 Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 적하시킨 다음 용액이 기판에 완전히 wetting될 수 있도록 30초간 유지시킨 후, 3000 rpm으로 30초간 스핀 코팅하였다. 스핀코팅된 박막을 공기 중에서 400°C로 10분 동안 건조시켰으며, 산소분위기 열처리 후 최종 박막의 두께가 400 nm가 되도록 이와 같은 과정을 반복하였다. MOD법으로 성막한 박막을 산소분위기에서 800°C의 온도로 1시간 유지하여 열처리 후, 상부전극으로 200 nm 두께의 Pt dot(직경 : 200 μm)을 스퍼터 증착하여 Pt/SBT/Pt 구조의 캐패시터를 형성하였다. Pt/SBT/

Pt 구조의 시편을 산소분위기 중에서 400~800°C로 10분 동안 후속 열처리하였다.

Stylus profiler를 이용하여 SBT 박막의 두께를 측정하고 주사전자현미경으로 박막의 표면 미세구조를 관찰하였으며, 여각 X-선 회절분석기를 사용하여 SBT 박막의 결정상을 분석하였다. RT66A를 이용하여 SBT 박막의 분극이력곡선을 측정하고, 잔류분극 2P<sub>r</sub>과 항전계 E<sub>r</sub>를 분석하였다. HP4194A와 HP4145B를 사용하여 SBT 박막의 C-V 특성과 누설전류 밀도를 측정하였다. 후속 열처리에 의한 Pt/SBT 계면반응을 분석하기 위해, Auger depth profile을 이용하여 후속 열처리 전·후의 Pt/SBT 계면을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)에 산소분위기에서 800°C로 열처리한 SBT 박막의 X-선 회절패턴을 나타내었으며, Fig. 1(b)~(f)에는 400~800°C로 10분간 후속 열처리한 시편들의 X-선 회절패턴을 나타내었다. MOD 공정으로 제조한 SBT 박막은 800°C에서의 산소분위기 열처리에 의해 우선방향성이 없는 다결정 박막으로 결정화되었다. 400~800°C에서 10분간 후속 열처리 후에도 Fig. 1(a)와 동일한 X-선 회절패턴을 나타내어 후속 열처리에 따른 결정상의 변

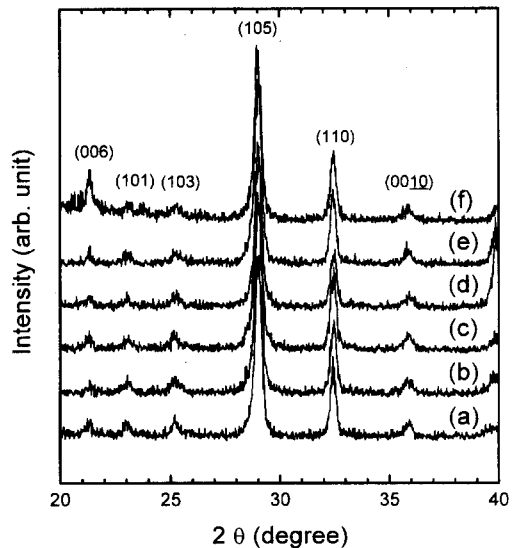
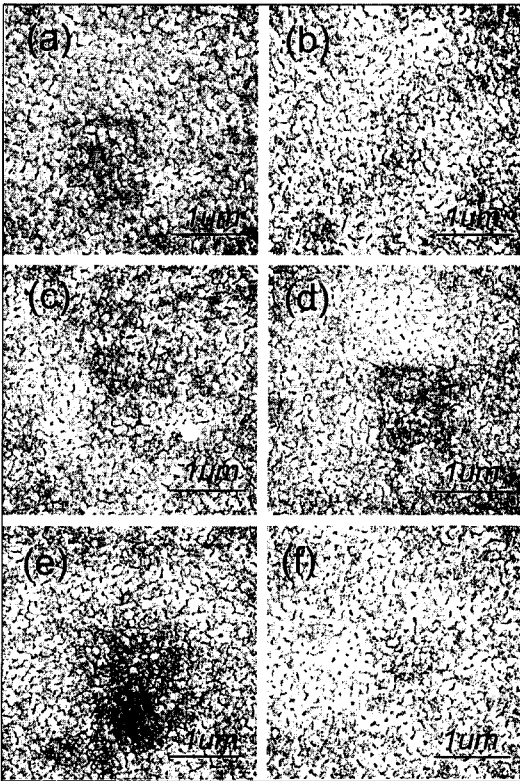


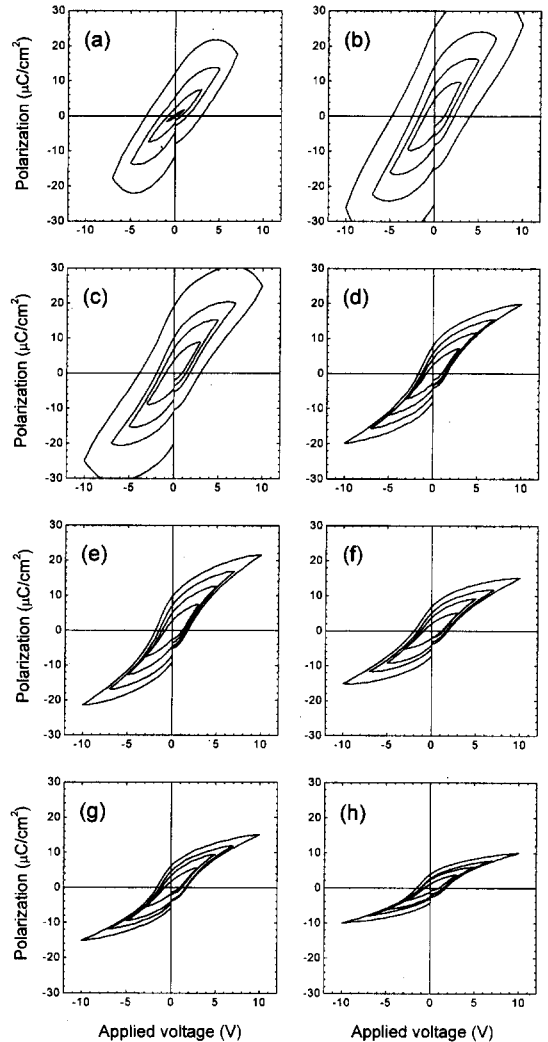
Fig. 1. XRD patterns of the MOD-derived SBT films : (a) before post annealing, and after post annealing at (b) 400°C, (c) 500°C, (d) 600°C, (e) 700°C, and (f) 800°C for 10 minutes.



**Fig. 2.** SEM micrographs observed on the surface of the SBT films : (a) before post annealing, and after post annealing at (b) 400°C, (c) 500°C, (d) 600°C, (e) 700°C, and (f) 800°C for 10 minutes.

화가 없음을 확인하였다. Fig. 2에 주사전자현미경으로 관찰한 후속 열처리 온도에 따른 SBT 박막의 표면 미세 구조를 나타내었다. 후속 열처리 온도에 무관하게 SBT 박막은 후속 열처리 전과 동일하게 약 150 nm의 구형 결정립으로 이루어져 있었으며, 이로부터 400~800°C 범위에서 10분간의 후속 열처리에 의해 SBT 박막의 결정립 성장이 발생하지 않았다는 것을 알 수 있었다.

Pt/SBT/Pt 캐패시터의 후속 열처리 온도에 따른 분극 이력곡선을 Fig. 3에 나타내었다. MOD 공정으로 제조한 400 nm 두께의  $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$  박막에서 후속 열처리 전에도 잘 발달된 강유전 분극이력곡선을 얻을 수 있었던 보고[11]와는 달리, 본 실험에서는 후속 열처리 전의 SBT 박막에서 Fig. 3(a)와 같이 leaky한 강유전체 박막의 전형적인 분극이력곡선이 관찰되었다. 동일한 코팅 용액을 사용하여 동일한 공정으로 제조하였으나, Pt 상부전극의 스퍼터링 power의 증가에 의해 SBT 박막의



**Fig. 3.** Hysteresis loops of the SBT films : (a) before post annealing, and after post annealing at (b) 400°C, (c) 500°C, (d) 550°C, (e) 600°C, (f) 650°C, (g) 700°C, and (h) 800 for 10 minutes.

분극이력곡선이 이와 같은 큰 차이를 나타내었다. 이 이유는 현재 명확히 규명할 수는 없으나, 후속 열처리 전 SBT 박막의 높은 누설전류밀도에 기인하는 것으로 판단된다. 후속 열처리 전에 강유전 분극이력곡선을 나타내었던 400 nm 두께의 SBT 박막도 본 실험의 결과와 유사하게 3 V 이상에서  $10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup> 이상의 누설전류밀도를 나타내었다[11]. 이와 같이 높은 누설전류밀도를 갖는 박막에서는 Pt 상부전극의 스퍼터 조건에 따른 Pt/SBT 계면 거칠기의 변화에 의해서도 분극이력곡선의

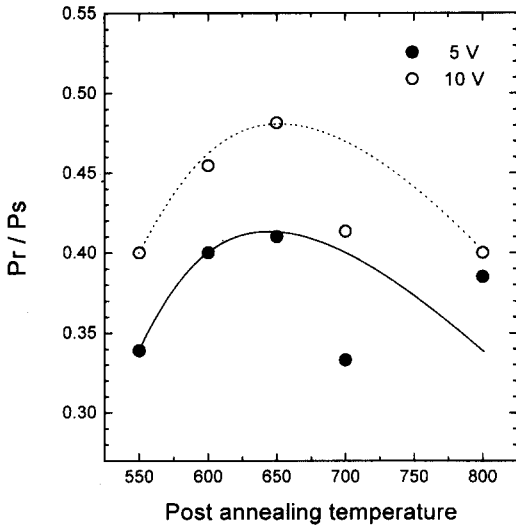


Fig. 4.  $P_r/P_s$  ratio of the SBT films at 5 V and 10 V as a function of the post annealing temperature.

현격한 차이가 유발될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 3과 같이 Pt/SBT/Pt 캐패시터를 400°C와 500°C에서 후속 열처리시에는 분극이력 특성이 크게 향상되지 않았으나, 550~800°C의 온도에서 후속 열처리함에 따라 분극이력 특성이 현저히 향상되어 잘 발달된 강유전 이력곡선을 얻을 수 있었다. 550~800°C의 온도에서 후속 열처리한 Pt/SBT/Pt 시편에 대해 분극이력곡선의 squareness 특성을 나타내는 잔류분극과 포화분극의 비 ( $P_r/P_s$ )를 5 V와 10 V의 인가전압에서 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 후속 열처리 온도가 증가함에 따라 분극이력곡선의 squareness 특성이 향상되어 650°C에서 후속 열처리시  $P_r/P_s$  비의 최대값을 나타낸 후, 그 이상의 후속 열처리 온도에서는 squareness 특성이 저하하였다. 550°C 이상에서 후속 열처리하여 강유전 이력곡선을 나타낸 시편들에 대해 인가전압 5 V에서 잔류분극  $2P_r$ 과 항전계  $E_c$ 를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 후속 열처리 온도가 550°C에서 600°C로 증가함에 따라 SBT 박막의 잔류분극  $2P_r$ 이 8.51  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 에서 9.72  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 으로 약간 증가하였으나, 600°C 이상에서 후속 열처리시에는  $2P_r$ 이 감소되어 800°C의 후속 열처리에 의해  $2P_r$ 이 5.7  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 저하하였다. 반면에 550~800°C 범위의 후속 열처리 온도에 따른 항전계  $E_c$ 의 변화는 거의 관찰되지 않았다. Fig. 4 및 Fig. 5로부터, MOD 공정으로 제조한 Pt/SBT/Pt 캐패시터의 강유전 특성은 600°C의 후속 열처리에 의해 최적화되었음을 알

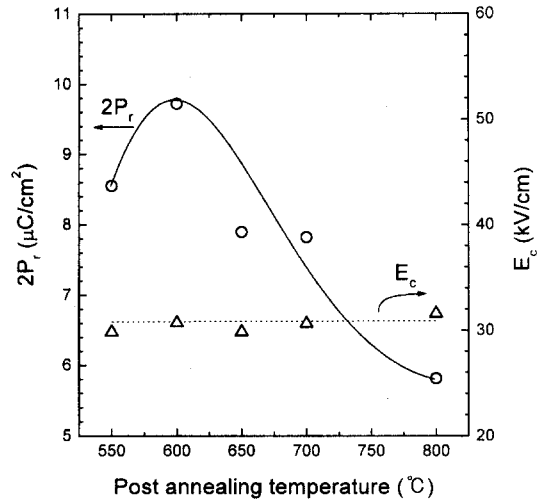


Fig. 5. Remanent polarization  $2P_r$  and coercive field  $E_c$  at 5 V as a function of the post annealing temperature.

수 있다.

Fig. 6에 Pt/SBT/Pt 캐패시터의 후속 열처리 온도에 따른 누설전류 특성을 나타내었다. 후속 열처리 전의 SBT 박막은 75 kV/cm의 전계에서  $10^{-3}$  A/cm<sup>2</sup>의 높은 누설전류밀도를 나타내었다. 이와 같은 이유로는 Pt/SBT 계면의 거칠기에 의한 결함 형성에 기인하거나 [12], 과잉으로 첨가하여 SBT 결정에 고용되지 않은 Bi에 의해 결정립의 삼중점이나 결정립계에 전기전도도가 높은 Bi 산화물이나 금속성 Bi가 형성되는데 기인하는 것 [9, 12, 13]으로 판단된다. Fig. 1(a)와 같이, 본 실험에서는 SrBi<sub>2.4</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> 박막에서 Bi 산화물에 기인한 X-선 회절피크가 관찰되지 않았으나, Bi를 더욱 과잉으로 첨가한 SrBi<sub>3.2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> 조성의 박막에서는 Bi 산화물에 기인한 것으로 생각할 수 있는 X-선 회절피크가 관찰되었다 [10, 11]. Fig. 6와 같이, 400°C에서 후속 열처리시에는 Pt/SBT/Pt 캐패시터의 누설전류 특성이 전혀 향상되지 않았다. 그러나, 500°C 이상에서 후속 열처리시에는 후속 열처리 온도의 증가에 따라 누설전류밀도가 급격히 감소하였으며, 600~800°C에서 후속 열처리한 Pt/SBT/Pt 캐패시터는 75 kV/cm까지의 전계에서  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> 이하의 우수한 누설전류 특성을 나타내었다.

Fig. 3에서 Fig. 6까지 나타낸 후속 열처리 온도에 따른 Pt/SBT/Pt 캐패시터의 강유전 특성과 누설전류 특성의 변화 거동은 후속 열처리 중에 발생하는 Bi 산화물의 휘발 및 Pt/SBT 계면에서의 반응 정도에 기인하는 것으로 사료된다. Pt/SBT/Pt 캐패시터를 후속 열처리하면 결

정립의 삼중점이나 결정립계에 형성되어 있던 Bi 산화물의 휘발이나 결정내로의 확산이 발생하며[13], 이와 같이 전기전도도가 높은 Bi 산화물[9]의 소멸에 의해 SBT 박막의 누설전류밀도가 감소할 수 있다[12]. 또한 후속 열처리에 의해 Pt/SBT 계면에서 반응이 발생하여 계면 거칠기가 저하하며, 계면에 있던 미세기공과 결합이 Bi와 Pt의 상호확산에 의해 소멸되므로써 누설전류밀도가 감소할 수 있다. Pt/SBT/Pt 캐패시터를 400°C의 낮은 온도에서 후속 열처리시에는 Bi 산화물의 휘발이나 확산 및 Pt/SBT 계면반응이 거의 발생하지 않았기 때문에 누설전류밀도가 거의 변하지 않았으며, 분극이력 특성도 향상되지 않았다. 후속 열처리 온도를 500°C로 증가시에는 Bi 산화물의 휘발이나 Pt/SBT 계면반응이 일부 발생하여 누설전류밀도가 감소하였으나, 그 정도는 아직 강유전 이력곡선을 나타내기에는 충분치 않았던 것으로 판단된다. 반면에, 550°C 이상에서 후속 열처리시에는 Bi 산화물의 휘발이나 Pt/SBT 계면반응이 조장되어, 누설전류밀도가 현저히 감소됨으로써 강유전 분극이력곡선을 나타낸 것으로 판단된다. 550°C 이상에서 후속 열처리시에도 후속 열처리 온도의 증가에 따라 Bi 산화물의 휘발이나 Pt/SBT 계면반응이 더욱 용이하게 발생하기 때문에, Fig. 6와 같이 후속 열처리 온도의 증가에 따라 누설전류밀도가 조금씩 감소하였다. 그러

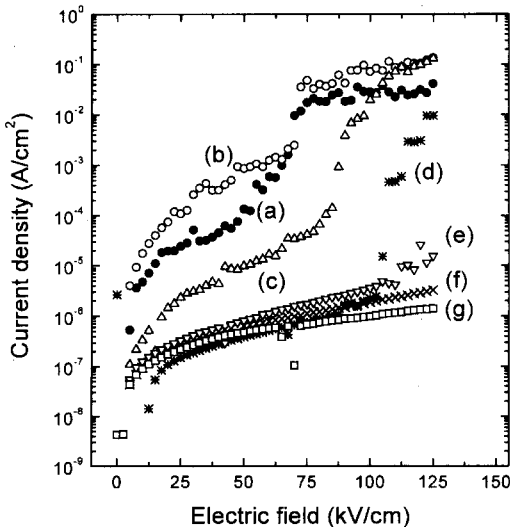


Fig. 6. Leakage current density of the SBT films : (a) before post annealing, and after post annealing at (b) 400°C, (c) 500°C, (d) 550°C, (e) 600°C, (f) 700°C, and (g) 800°C.

나 Fig. 5와 같이, 600°C 이상에서는 후속 열처리 온도의 증가에 따라 SBT 박막의 잔류분극 2P<sub>r</sub>이 현저히 저하하였다. 이와 같은 이유는 후속 열처리 온도의 증가에 의해 Pt/SBT 계면에서 Bi와 Pt 사이의 상호확산 및 반응이 촉진됨에 따라, 계면에 비강유전성의 Bi-Pt 화합물이

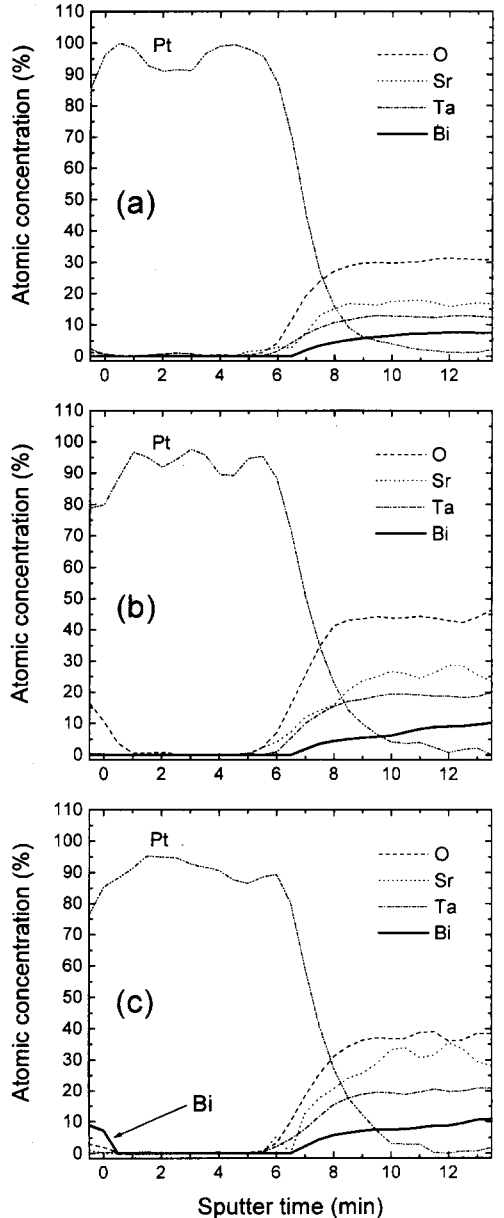


Fig. 7. Auger depth profiles at the Pt/SBT interfaces : (a) before post annealing, and after post annealing at (b) 600°C, and (c) 800°C.

보다 많이 형성되어 SBT 박막의 유효 분극도를 저하시키기 때문에 사료된다. 이외에 SBT 박막의 잔류분극은 결정립 크기에 의존한다고 보고되었다[9]. 그러나 Fig. 2와 같이, SBT 박막의 결정립 크기와 형상이 후속 열처리 온도에 무관하게 일정하기 때문에, 후속 열처리 온도에 따른 SBT 박막의 강유전 특성의 변화에 결정립 크기 효과는 기여하지 않는다고 판단된다.

후속 열처리 온도에 따른 Pt/SBT/Pt 캐패시터의 강유전 특성과 누설전류 특성의 변화가 Bi 산화물의 휘발 및 Pt/SBT 계면반응에 기인하는 것을 확인하기 위해, 후속 열처리 전·후의 Pt/SBT 계면을 Auger depth profile로 분석하였다. Fig. 7(a)에 후속 열처리 전 시편의 Auger depth profile을 나타내었으며, (b)와 (c)에는 각기 600°C와 800°C에서 후속 열처리한 시편의 결과를 나타내었다. Fig. 7(a) 및 (b)와 같이, 후속 열처리 전의 시편이나 600°C에서 후속 열처리한 시편에서는 Pt/SBT 계면에서 Bi와 Pt의 상호확산이 관찰되지 않았다. 그러나 Fig. 7(c)와 같이, 800°C에서 후속 열처리한 시편에서는 Pt 상부전극의 표면에서 Bi가 검출되었으며, 이로부터 후속 열처리 온도의 증가에 따라 Pt/SBT 계면반응이 조장된다는 것을 알 수 있었다. 후속 열처리 온도에 따른 Pt/SBT/Pt 캐패시터의 C-V 특성을 Fig. 8에 나타내었다. 후속 열처리 전의 시편은 최대 정전용량의 비대칭 거동을 나타내었으나 후속 열처리 온도의 증가에 따라 점차 대

칭적으로 변하였으며, 이로부터 후속 열처리 온도의 증가에 따라 Pt 상부전극과 SBT 박막의 계면 상태가 SBT/Pt 하부전극 계면과 동일하게 변한다고 판단된다.

#### 4. 결 론

MOD 공정으로 제조한 SBT 박막은 400~800°C 범위의 후속 열처리 온도와 무관하게 후속 열처리 전과 동일한 ~150 nm의 구형 결정립으로 이루어져 있었다. 후속 열처리 전의 SBT 박막은 leaky한 강유전체 박막의 전형적인 분극이력곡선을 나타내었으며, 400°C와 500°C에서 후속 열처리시에는 분극이력 특성이 거의 향상되지 않았다. 그러나, 550~800°C의 온도에서 후속 열처리함에 따라 분극이력 특성이 현저히 향상되어 잘 발달된 강유전 이력곡선을 얻을 수 있었다. 후속 열처리 온도를 550°C에서 600°C로 증가시키에 따라 2P<sub>i</sub>가 증가하였으나 그 이상 온도에서는 2P<sub>i</sub>가 저하하여, 600°C에서 후속 열처리시 2P<sub>i</sub>: 9.72 μC/cm<sup>2</sup>과 E<sub>c</sub>: 30.7 kV/cm의 최적 강유전 특성을 나타내었다.

후속 열처리 전의 SBT 박막은 75 kV/cm의 전계에서 10<sup>-3</sup> A/cm<sup>2</sup>의 높은 누설전류밀도를 나타내었으나, 500°C 이상에서 후속 열처리함에 따라 누설전류밀도가 급격히 감소하였으며 600~800°C에서 후속 열처리시 75 kV/cm 까지의 전계에서 10<sup>-6</sup> A/cm<sup>2</sup> 이하의 누설전류밀도를 나타내었다. 후속 열처리 온도에 따른 Pt/SBT/Pt 캐패시터의 강유전 특성과 누설전류 특성의 변화 거동은 Bi 산화물의 휘발 및 Bi와 상부 Pt 전극 사이의 계면반응에 기인하는 것으로 사료된다. 후속 열처리 전 시편이나 600°C에서 후속 열처리한 시편과는 달리 800°C에서 후속 열처리한 시편에서는 Pt 상부전극의 표면에서 Bi가 검출되어, 후속 열처리 온도의 증가에 따라 Pt/SBT 계면 반응이 조장된다는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 과학기술기초 중점연구 과제 지원 (과제번호 : 1998-015-D00124)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

[1] Y. Ito, M. Ushikubo, S. Yokoyama, H. Matsunaga,

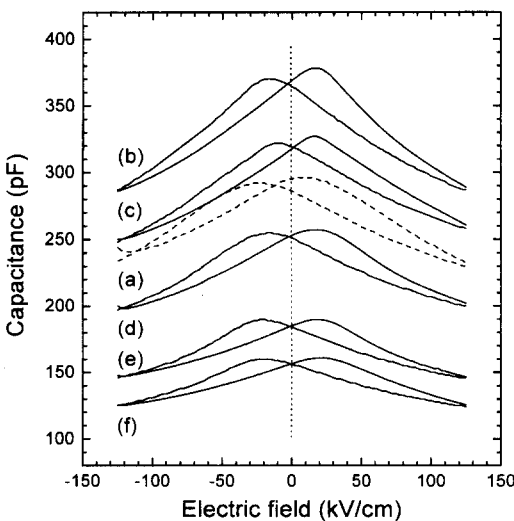


Fig. 8. C-V characteristics of the Pt/SBT/Pt capacitors : (a) before post annealing, and after post annealing at (b) 400°C, (c) 500°C, (d) 600°C, (e) 700°C, and (f) 800°C.

- T. Atsuki, T. Yonezawa, and K. Ogi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 4925 (1996).
- [2] K. Watanabe, A. J. Hartman, R. N. Lamb, and J. F. Scott, *J. Appl. Phys.* **84**, 2170 (1998)
- [3] D. J. Yeon, J. D. Park, and T. S. Oh, *J. Kor. Phys. Soc.* **30**, S173 (1998).
- [4] A. Furuya, K. Amanuma, and Y. Maejima, *Jpn. J. Appl. Phys.* **7**, 4037 (1998).
- [5] Y. Zhu, S. B. Desu, T. Li, and S. Ramanathan, *J. Mater. Res.* **12**, 783 (1997).
- [6] T. Li, Y. Zhu, S. D. Desu, C.-H. Peng, M. Nagata, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 616 (1996).
- [7] T. K. Song, J.-K. Lee, and H. J. Jung, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 3839 (1996)
- [8] S. B. Desu and D. P. Vijay, *Mater. Sci. Eng.* **B32**, 75 (1995).
- [9] T. Chen, T. Li, X. Zhang, and S. B. Desu, *J. Mater. Res.* **12**, 1569 (1997).
- [10] H. Watanabe, T. Mihara, H. Yoshimori, and C. A. P. Araujo, *Jpn. J. Appl. Phys.* **34**, 5240 (1995).
- [11] D. J. Yeon, Y. Kwon, J. D. Park, and T. S. Oh, to be published in *J. Kor. Vac. Soc.* (1999).
- [12] I. Koiwa, K. Tani, J. Mita, and T. Iwabuchi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, 5192 (1998).
- [13] I. Koiwa, Y. Okada, J. Mita, A. Hashimoto, and Y. Sawada, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 5904 (1997).