

다양한 열처리 조건에 따른 $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ 박막의 전기적 특성

손 영 국[†]

부산대학교 재료공학부

(2001년 4월 7일 접수; 2001년 5월 14일 승인)

Electrical Properties of $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ Thin Film with Various Heat Treatment Conditions

Young-Gook Son[†]

School of Materials Science & Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received April 7, 2001; Accepted May 14, 2001)

초 록

$Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ 타겟을 이용 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판위에 R.F magnetron sputtering 방법으로 BST 박막을 증착하여 다양한 열처리 조건에 따른 BST 박막의 전기적 성질(정전용량, 누설전류)에 대해 박막의 결정성과 미세구조의 연관성에 대하여 연구하였다. BST 박막의 유전상수는 grain size에 영향 받으며, 열처리 온도가 증가할수록 유전상수는 증가함을 보였고 온도에 따른 누설전류는 저전압 영역에서는 Hopping conduction, 고전압 영역에서는 Schottky conduction mechanism을 따르는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

$Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ (BST) thin films were deposited on Pt/Ti/SiO₂/Si substrate by R.F magnetron sputtering methods. Effects of various heat treatment conditions on electrical properties (such as capacitance and leakage current) of the BST thin films were studied. The relationship between electrical properties and microstructures was also studied. It was revealed that dielectric constant is influenced by the grain size of the BST thin films. Leakage current depends on Hopping conduction mechanism in the low voltage region and Schottky conduction mechanism in the high voltage region, respectively.

Key words : BST, Thin film, Capacitor, Sputtering, Dielectric constant, Leakage current

1. 서 론

최근 전자정보통신 산업의 발달에 따라 전자부품의 소형화, 경량화, 집적화가 급속히 진행되어가고 있다. 특히 반도체 산업에서 DRAM(Dynamic Random Access Memory)은 새로운 세대로 비약적인 발전을 거듭하였다. DRAM의 capacitor로서 요구조건은 고집적화됨에 따라 capacitor 면적이 줄어들고 전원전압의 감소에 따른 충분한 축적용량의 확보와 데이터의 손실을 막기 위해 낮은 누설전류가 필요하다.¹⁾

충분한 축적용량을 확보하기 위해 기존의 물질을 사용하여 두께를 줄이는 것은 터널링으로 인한 누설전류의 우려가 있고 단면적을 늘리기 위해 Trench 또는 Stack 등의 3차원적인 cell을 구성하는 것 역시 그 물리적 한계에 도달해 소자의 신뢰성에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 기술과 공정상의 어려움으로 새로운 유전물질에 대한 연구가 필요하게 되었다.^{2,3)}

기존의 SiO₂나 NO(SiO₂/Si₃N₄)막의 경우 유전율이 낮고 현재 개발하여 생산중인 Ta₂O₅막 역시 유전율이 그다지 큰 편은 아니다. Giga급 이상의 DRAM을 실현하기 위해서는 고유전율을 가지는 Pb(ZrTi)O₃ [PZT], SrTiO₃[ST], Ba_{1-x}Sr_xTiO₃[BST], 등의 perovskite 구조를 가진 유전체 물질로의 전환이 요구되고 있다. PZT의 경우 유전율은 상당히 크지만 전이온도가 매우 높고 고주파에서 유전특성의 저하가 크고 누설전류가 큰 단점을 가지고 있다. BST는 유전율은 PZT에 비해 다소 떨어지지만 BaTiO₃와 SrTiO₃가 전을 고용체가기 때문에 조성조절이 용이하다. 또한 Ba/Sr의 비율을 조절함으로써 상온에서 상유전특성을 나타내고 PZT등의 강유전체 물질에서 나타나는 fatigue나 aging등의 문제를 배제시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 BST 박막은 기존의 SiO₂나 NO 박막에 비해 상대적으로 누설전류밀도가 크다는 단점이 있어 이를 개선시키기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.^{3,4)}

BST 박막은 sol-gel,⁵⁾ MOCVD⁶⁾(Metal Organic Chemical Vapor Deposition), Laser Ablation,⁷⁾ R.F magnetron spu-

[†]Corresponding author : ykson@hyowon.pusan.ac.kr

Table 1. Typical Deposition Conditions for Ti, Pt, BST Thin Film Preparation

	Glue Layer (Ti)	Top & bottom Electrode (Pt)	BST
Substrate	SiO ₂ (500 nm)/Si		Pt/Ti/SiO ₂ (500 nm)/Si
Base pressure	$< 8 \times 10^{-6}$ Torr	$< 8 \times 10^{-6}$ Torr	$< 8 \times 10^{-6}$ Torr
Working pressure	$5 \sim 10 \times 10^{-3}$ Torr	$5 \sim 10 \times 10^{-3}$ Torr	$5 \sim 10 \times 10^{-3}$ Torr
Ar flow	20sccm	20sccm	20sccm
Power	D.C (320 V, 300 mA)	D.C (320 V, 300 mA)	R.F 200 W
Substrate temperature	Room temp	Room temp	350°C
Pre-sputtering time	10 min	10 min	60 min
Deposition rate	111Å/min	120Å/min	75Å/min
Thickness	20 nm	100 nm	220 nm

tering⁸⁾ 등의 방법으로 다양하게 제조, 연구되고 있다. 현재 BST 박막을 포함한 고유전을 박막제조 연구에 있어서 중요한 관심사는 우수한 박막제조 뿐만 아니라 안정된 특성을 갖는 박막을 위한 전극의 개발이다. 전극 재료로는 Pt, Pd 등의 금속전극⁹⁻¹¹⁾과 RuO₂, IrO₂ 등의 산화물 전극이 유망한 것으로 알려져 있으며 낮은 누설전류와 전도 mechanism을 밝히기 위한 연구가 활발히 진행중이다.¹²⁾ 누설전류를 결정하는 요인으로 전극, 결정립계, 열처리 조건, 미세구조등이 논의되고 있으나 아직까지 이들 사이의 누설전류에 대한 기여도는 불분명한 상태이다.

본 실험에서는 Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃의 조성을 갖는 target을 제작하고 R.F magnetron sputtering법을 이용하여 BST 박막을 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판위에 증착한 후 MIM(Metal-Insulator-Metal) 구조를 형성하여 다양한 후열처리 조건에 따른 전기적 특성을 분석함으로써 최적의 열처리조건을 확립하고 누설전류의 mechanism을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

BST target의 제조는 일반적인 세라믹 소결 공정을 통하여 제조하였다. 출발물질로 BaTiO₃(Aldrich, 99.99%)와 SrTiO₃(Aldrich, 99.99%)를 1:1의 몰비로 칭량한 후 에탄올과 ZrO₂ ball을 넣어서 24시간 동안 습식분쇄 하였다. 분쇄된 원료분말을 건조로에서 120°C의 온도에서 24시간 동안 건조한 후, 900°C에서 2시간 동안 하소하였다. 하소한 분말을 다시 분쇄하고 24시간 동안 습식분쇄한 후 건조하여 결합제로 PVA를 사용하여 상온에서 200 kgf/cm²로 일축방향으로 가압성형한 후 1100°C에서 2시간동안 소결하여 지름 2 inch, 두께 6~7 mm의 target을 제작하였다.

R.F magnetron sputtering 방법을 사용하여 하부 전극이 증착되어진 Pt(100 nm)/Ti(20 nm)/SiO₂(500 nm)/Si 기판위에 350°C에서 BST 박막을 증착하였다. 박막의 증착조건을 Table 1에 나타내었다. Pt 하부전극 위에 증착된 BST 박막

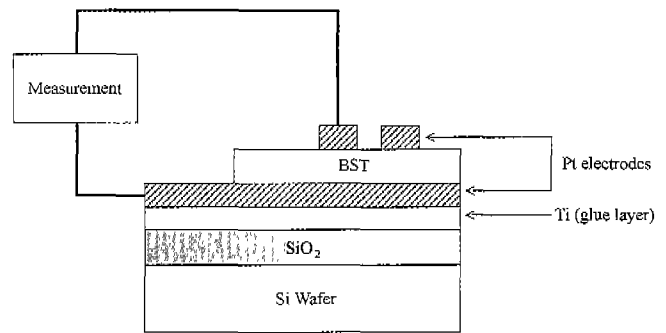


Fig. 1. The schematic view of experimental Pt/BST/Pt capacitor structure.

의 전기적 특성을 평가하기 위하여 상부전극으로 dot 형태의 Pt 박막을 D.C sputtering 방법으로 증착하여 Fig. 1와 같은 MIM capacitor 구조를 형성하였다. 후열처리는 공기 중 분위기에서 450~750°C로 온도를 높여가며 1시간 동안 행하였고(furnace annealing), 1분간 급속열처리(RTA, rapid thermal annealing)를 실시하여 후열처리 조건에 따른 물성을 비교하였다.

박막의 상형성 정도를 고찰하기 위하여 XRD 분석(D/MAX형, Rigaku Japan)을 행하였다.

이때 사용한 X-선은 30 kV, 25 mA의 Cu-Kα radiation (λ=1.5405Å)을 이용하였고, 주사속도는 12°/min으로 scanning angle을 20°~60°(2θ)까지 변화시키며 측정하였다.

박막의 두께를 확인하기 위하여 Tencor α-step를 이용하였으며 이때 시편의 step을 형성시키기 위해 H₂O, H₂SO₄ (1% dilute)와 HF(50% dilute)를 각각 50:40:10의 비율로 혼합한 etchant를 이용하여 etching 하였다. 또한 주사전자현미경(FESEM : Field Emission Scanning Electron Microscope, Hitachi S-4200)을 사용하여 표면형태등의 미세구조를 관찰하였다. 박막의 유전 특성은 HP4192A Impedance Analyzer를 사용해 주파수 변화에 따른 유전 특성을 측정하였으며 박막의 누설전류 특성은 KEITHLEY 237 Source-

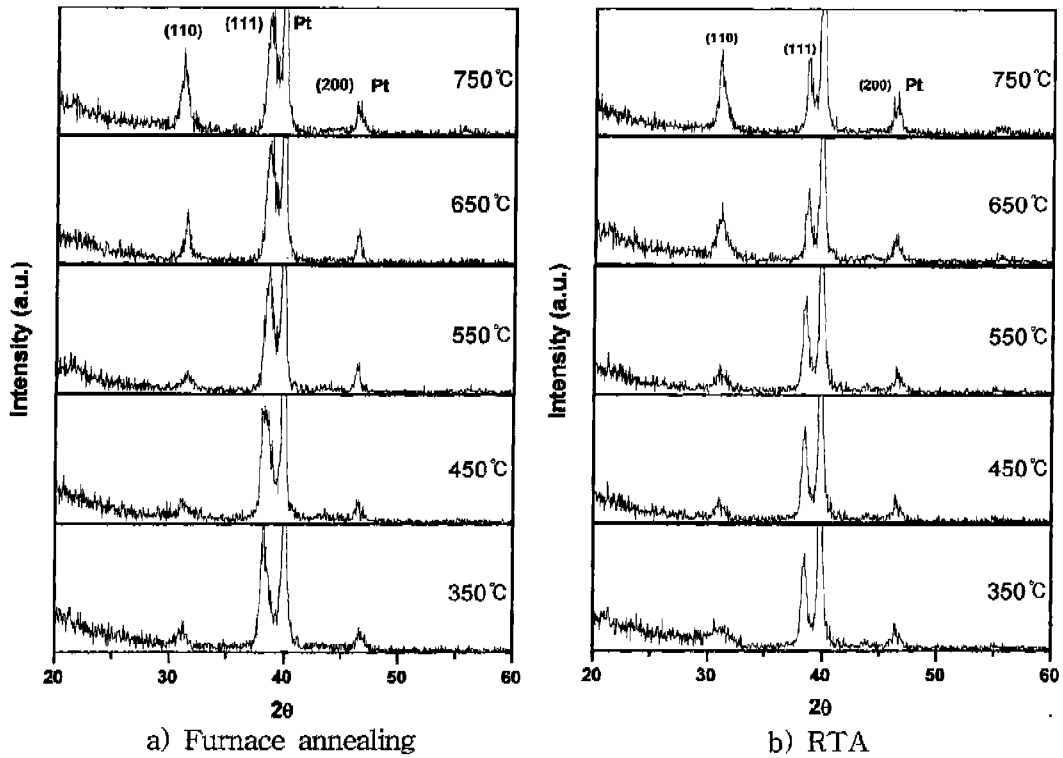


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of BST thin films with annealing at various temperatures.

Measure Units를 사용해 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

BST 박막의 결정성과 배향성을 알아보기 위해서 XRD 분석을 행하였다. Fig. 2는 350°C에서 증착되어진 BST 박막의 furnace annealing 결과이다.

350°C에서 성장된 BST 박막의 경우 거의 결정성이 나타나지 않고 비정질상에 가깝게 나타나고 있다. 온도가 올라갈수록 BST 박막의 결정성이 증가함을 알 수 있는데 (111) 피크는 온도에 거의 영향을 받지 않고 (110), (200) 피크는 온도가 증가할수록 성장하는 양상을 나타내고 있다. 상대적으로 (110) 피크 강도가 (111) 피크 강도보다 크게 나타나는 결과¹³⁾들과 달리 본 실험에서는 (111) 피크 강도가 크게 나타나고 있다. 그 이유는 증착되어지는 박막의 경우 하부전극의 배향성과 관련지어 설명할 수 있다. 즉 하부전극 Pt의 경우 (111) 방향의 우선 배향성을 나타내고 있다. 따라서 이 배향성의 영향으로 인해 최밀충진면인 (111) 방향으로 성장한 것으로 여겨진다.

RTA의 경우 furnace annealing과 거의 같은 양상을 보이고 있다. 하지만 (110) peak의 경우 furnace annealing과 다르게 온도가 증가함에 따라서 (111) 피크와의 상대적 강도 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉 온도가 증가할수록 (111) 피크의 강도가 작아진다. 또한 (200) 피크의 경우

650°C 이상에서 급격하게 성장하는 것을 알 수 있다.

350°C에서 증착된 BST 박막을 후열처리 450~750°C로 1시간동안 furnace annealing 하거나, 450~750°C까지 1분간 급속열처리(RTA)하여 그 표면형상의 변화를 Fig. 3에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 550°C에서의 1시간동안의 annealing에서는 BST 박막 입자들의 성장이 완전하게 이루어지지 않았으며(a), 750°C에서의 1시간동안의 annealing에서는 입자들이 매우 크게 성장해 있음을 보인다(b). 또한 급속열처리의 경우도 BST 박막의 입자크기는 550°C까지는 큰 변화를 보이지 않으며(c), 750°C에서는 크게 성장되어 있음을 알 수 있다(d).

또한 550°C의 두 시편 모두 비교적 표면이 매끄러운 것을 알 수 있다. 하지만 750°C의 시편의 표면형상은 거친 것을 알 수 있다. 즉 후열처리 시간과 온도에 따라 입자의 성장이 좌우되며, 이는 BST 박막의 유전특성이나 누설전류 특성에 큰 영향을 미칠 것이라 예상된다. 이러한 후열처리 온도 변화에 따른 상대 유전율의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 실온에서 증착된 BST 박막의 경우는 상대 유전율이 170~100정도로 매우 낮았다. 이는 증착시 계면에 저 유전율의 비정질층이 형성되었기 때문이라 생각한다. furnace annealing와 RTA 모두 온도가 증가함에 따라 유전특성이 향상되고 있다. 이는 후열처리를 통해 계면에 생성된 저 유전율의 비정질층이 결정화되거나 결정의 성장에 기인하는 것으로 생각된다.¹⁴⁾ 같은 맥락에서 상대 유전율이 증가하는

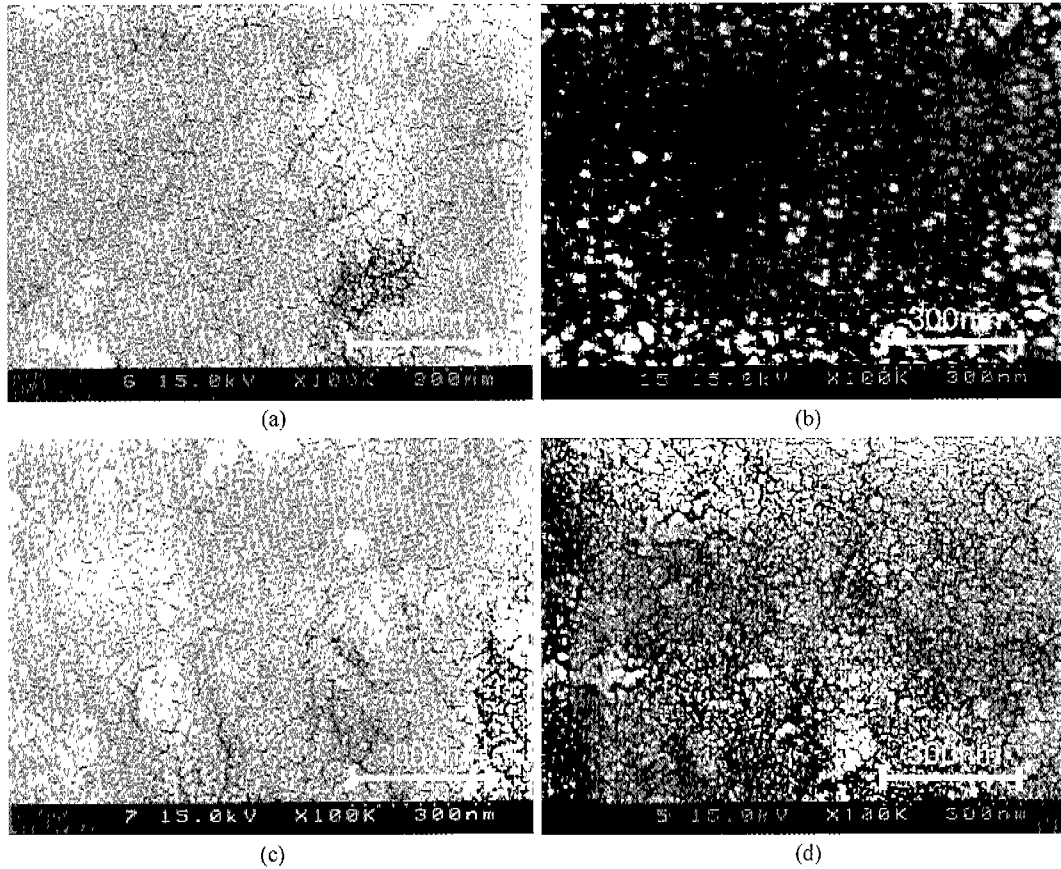


Fig. 3. SEM micrographs of BST thin film surface deposited at 350°C and then (a) annealed at 550°C, (b) 750°C for 1 h, (c) rapid thermal annealed at 550°C and (d) 750°C for 1 min.

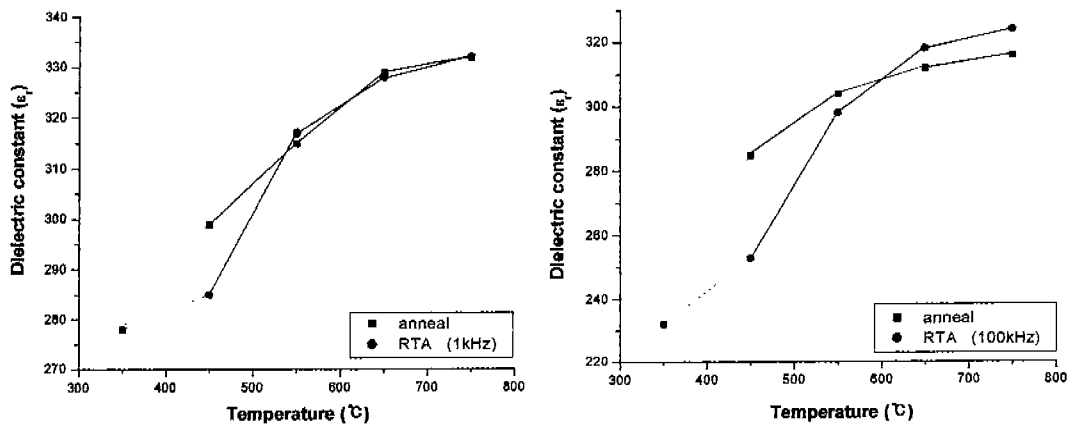


Fig. 4. Change of relative dielectric constant with various heat treatment temperatures.

이유는 앞에서 살펴본 바와 같이 BST 박막의 미세구조의 변화와 연관시킬 수 있다. 즉 BST 박막의 열처리온도가 증가함에 따라 박막의 결정성이 증가하였기 때문인 것으로 여겨진다. 이러한 경향성은 Horikawa등도 결정성이 증가함에 따라서 상대 유전율이 증가한다고 보고하고 있다.^{15,16)} 측정 값에서 알 수 있듯이 1 kHz와 100 kHz 모두 550°C 이상

에서는 거의 비슷한 값을 나타내는 양상을 보이고 있다. 그러나 100 kHz의 경우 650°C 이상에서의 상대 유전율은 furnace annealing보다 RTA가 조금 더 높은 값을 나타내고 있다. 즉 furnace annealing보다 RTA한 BST 박막의 유전 분산이 더 적게 나타남을 알 수 있다. 그러나 550°C 이하에서는 두 측정결과 모두 furnace annealing이 더 높은 상

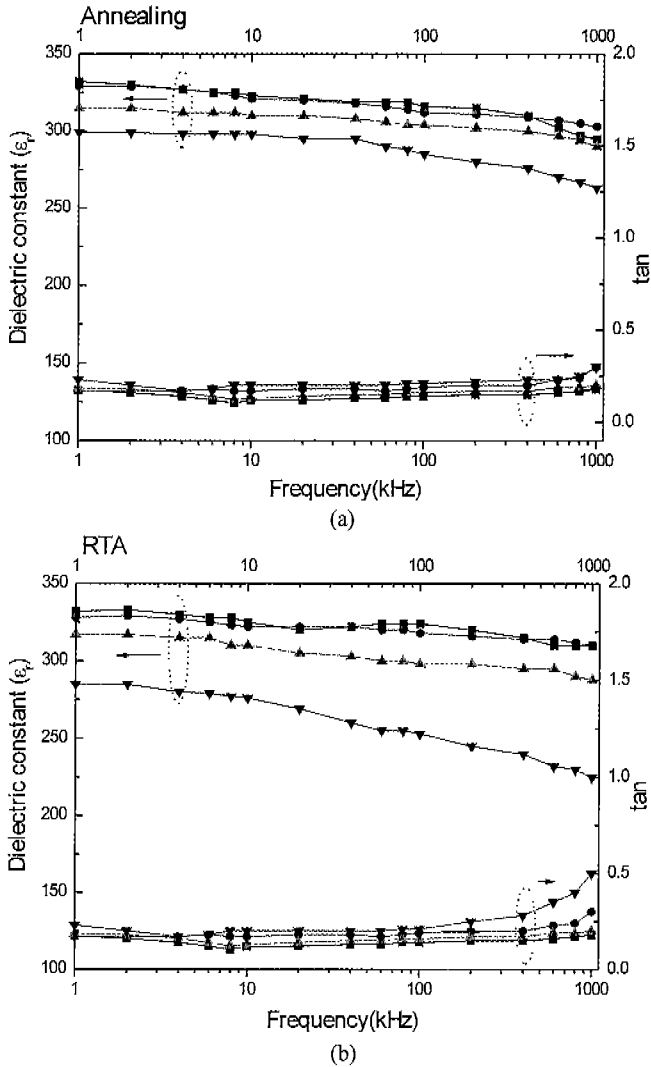


Fig. 5. Dielectric constant-Frequency characteristics of BST MIM capacitor on (a) annealing temperature and (b) RTA temperature.

대 유전율을 나타내고 있다. 이것은 BST의 결정화 온도가 550°C 이상이라는 것을 고려하면 RTA를 한 박막은 단 시간내에 결정화를 할 수 있는 충분한 열에너지를 공급받지 못했기 때문이며, furnace annealing은 비록 충분한 열에너지를 공급받지 못했으나 긴 열처리 시간으로 인해 RTA한 BST 박막보다 더 많은 결정화가 이루어졌다고 할 수 있겠다.

350°C에서 증착된 BST 박막을 일반적인 annealing과 급속열처리의 방식으로 후열처리하여 주파수에 따른 유전특성을 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 주파수가 증가함에 따라 유전율은 약간씩 감소하며 유전손실(tan δ)은 증가한다. 이는 주파수가 증가할수록 유전 분극이 전기장의 변화를 따라가지 못하게 되어 야기되는 위상의 늦음으로 인해 유전손실로 나타나는 것이다. 그러나 DRAM의 실제 동작 주파수인 1 kHz 주변에서는 유전분산이 거의 일어나지 않음을 알

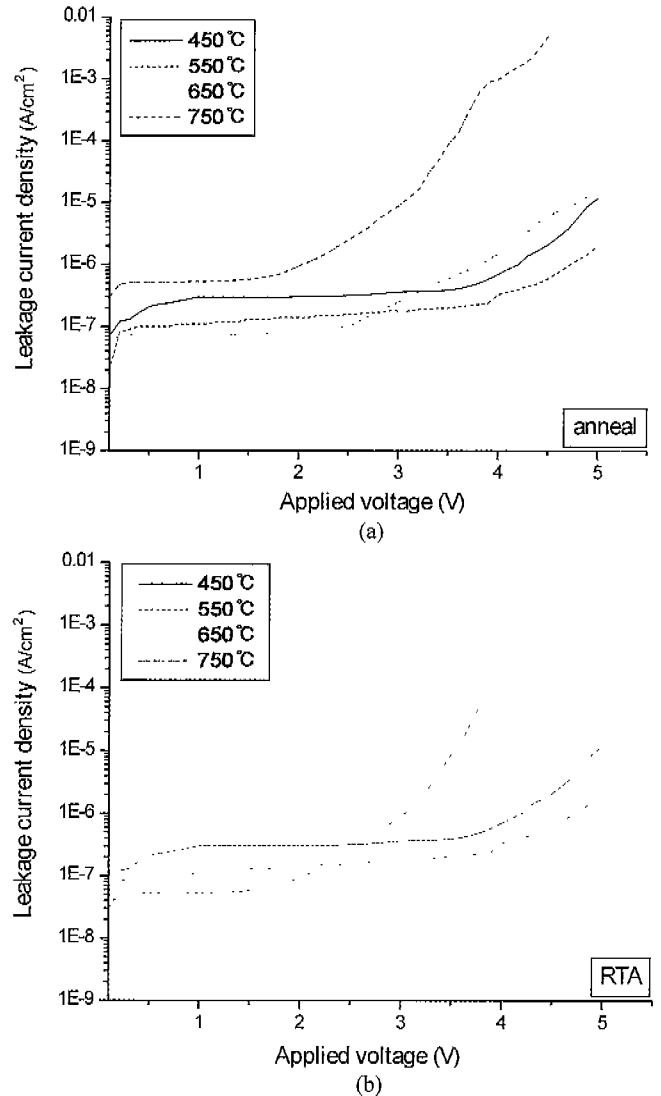


Fig. 6. Current-Voltage characteristics of BST MIM capacitor on (a) annealing temperature and (b) RTA temperature.

수 있다.

Fig. 6은 furnace annealing과 RTA 온도에 따른 전압과 누설전류의 관계를 나타낸 것이다. furnace annealing한 경우의 누설전류특성은 450~650°C로 열처리 온도가 증가함에 따라 향상된다. 그러나 750°C에서는 오히려 누설전류가 증가한다. 이는 상·하부전극인 Pt 박막이 후열처리에 의해 hillock의 생성이나 거칠어짐에 의한 것으로 여겨지며¹⁷⁾ 750°C의 시편의 경우 앞에서의 SEM 이미지에서 볼 수 있듯이 결정립의 커짐과 동시에 미세한 균열이 발생하여 누설전류가 증가하는 것으로 판단된다. RTA의 경우는 450~650°C로 온도가 증가함에 따라 누설전류는 감소한다. 그러나 750°C에서는 furnace annealing한 경우와 마찬가지로 650°C에 비해 누설전류가 더 높게 나타나고 있다. 또한 2V 이상의 영역에서는 누설전류가 다소 증가함을 나타내는데 이 또한

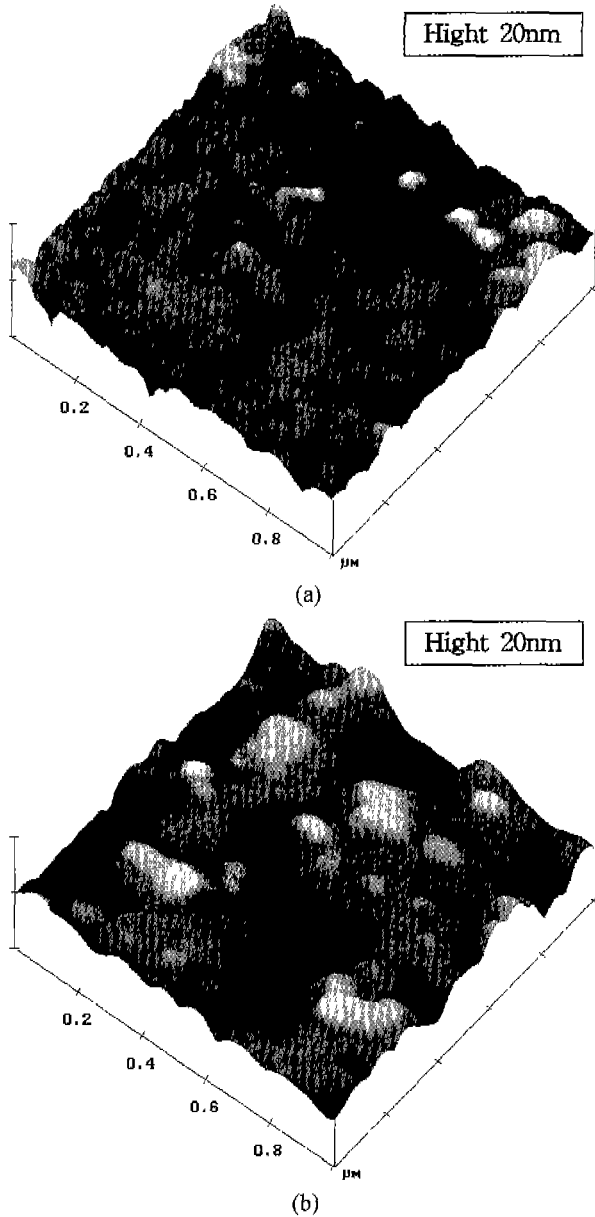


Fig. 7. AFM images of Pt thin film on BST thin film deposited at 350°C and then (a) annealed at 750°C for 1 h (b) rapid thermal annealed at 750°C for 1 min.

상·하부 전극에 의해 영향받은 것으로 예상된다. 그리고 furnace annealing한 BST 박막의 누설전류가 RTA를 행한 BST 박막의 누설전류가 1 order 더 큰 값을 나타내고 있다. 750°C에서 열처리한 Pt 상부전극의 AFM 이미지를 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 furnace annealing된 Pt 박막은 RTA를 행한 것에 비해 표면 형상이 더 거칠게 나타나며 이것은 위의 누설전류와의 상관관계를 뒷받침 해 주고 있다.

이와 같은 결과들로부터 1시간 동안 furnace annealing한 경우는 온도가 증가함에 따라 유전특성은 향상되지만 650°C

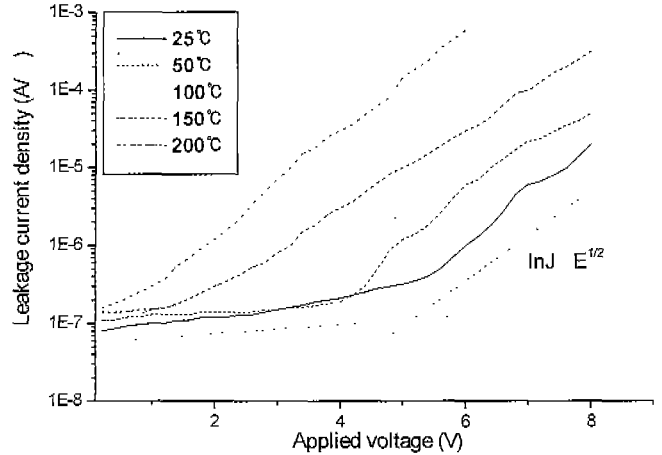


Fig. 8. Current-Voltage characteristics of BST thin film deposited at 350°C with various measurement temperatures.

이상의 온도에서는 누설전류가 급격히 증가함을 보여 최적의 열처리온도는 650°C임을 알 수 있다.

Fig. 8은 누설전류의 mechanism을 고찰하기 위해서 350°C에서 증착된 BST 박막에 대해서 온도를 변화시켜가며 누설전류특성을 분석한 결과이다. 25°C에서 측정된 누설전류 곡선은 낮은 인가전압 범위(1~5 Volt)에서는 인가전압의 증가에도 불구하고 누설전류 밀도가 크게 증가하지 않는 flat 영역이 나타난다. 이 영역은 일반적으로 hopping conduction 영역이라 불리는데 이는 시편의 열처리 과정에서 형성된 BST 박막내의 활성화된 산소가 상부 전극으로 빠져나가 환원되어 전도 전자농도가 증가함으로써 Schottky 접촉에 의한 계면전위장벽이 증가하여 낮은 누설전류를 나타내는 것으로 여겨진다. 5 Volt 이상에서는 인가전압에 따라 누설전류가 크게 증가하는데 이 영역은 Schottky conduction 영역으로 의 양상을 보인다. 또한 측정시편의 온도가 증가함에 따라서 누설전류 밀도가 증가하는 것은 계면전위장벽을 넘을 수 있는 전자의 활성화 에너지가 증가하여 누설전류의 밀도가 증가하는 것으로 여겨진다. 이러한 누설전류의 mechanism은 증착 박막의 종류, 전극종류 및 박막의 morphology에 따라 변하는 것으로 알려져 있고 현재에도 많은 연구자들이 연구물^{17,18)} 진행하고 있다. 본 실험에서 증착된 BST 박막도 이러한 누설전류 mechanism을 따르는 것으로 보여지며 측정온도가 증가함에 따라 BST 박막의 누설전류가 크게 증가하고 있다. 온도에 따른 누설전류를 schottky emission과 hopping current에 적용하면 앞에서 언급한 current mechanism의 수식과 비교적 잘 일치하는 양상을 보인다.

4. 결 론

본 실험에서는 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판위에 R.F magnetron

sputtering 방법으로 기판온도를 달리하여 $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ 박막을 증착시키고, 저온($350^\circ C$)에서 증착된 박막을 1시간동안의 일반적인 annealing이나 1분간의 급속열처리의 방법으로 후열처리하여 열처리 조건에 따른 박막의 물성변화, 즉 정성, 미세구조, 그리고 전기적 특성의 변화를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. BST 박막의 경우 여러 가지 후열처리를 통해서 배향성의 변화는 보이지 않으며 단지 결정립만이 향상되었다.
2. 후열처리의 온도가 증가함에 따라 결정립의 크기가 커지며 거친 표면형상을 가지게 된다. 이러한 결정립의 크기나 표면형상은 누설전류특성과 유전특성에 큰 영향을 미친다.
3. BST 박막의 유전적 특성은 후열처리 온도가 높아짐에 따라 향상되며 이는 결정성의 증가에 따른 것이며 결정립의 크기 증가와도 무관하지 않은 것으로 생각된다.
4. 누설전류 특성은 후열처리 온도가 증가함에 따라 향상되다가 $650^\circ C$ 온도 이상에서는 오히려 저하하는 양상을 보인다. 이는 누설전류가 상하부 전극의 morphology, 박막의 미세구조에 크게 의존하기 때문이다. 1시간동안의 furnace annealing보다 RTA 방식이 누설전류특성이 더 우수하였다.
5. 누설전류의 mechanism은 저전압 영역에서는 Hopping conduction, 고전압 영역에서는 Schottky conduction mechanism을 따르는 것으로 나타났다.

REFERENCES

1. 이병수, "DRAM 기술의 발전 및 커패시터 재료의 연구 동향," *Bulletin of Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, **11**(2), 145-148 (1998).
2. A. I. Kingon and S. K. Streiffer, "Ferroelectric Films and Devices," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **4**(1), 39-44 (1999).
3. K. D. Yang, H. J. Cho, H. S. Cho and H. J. Kim, "Characterization of Electric Properties of $Ba_{0.65}Sr_{0.35}TiO_3$ Thin Film Deposited by RF Magnetron Sputtering," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **32**(4), 441-447 (1995).
4. C. S. Hwang, "(Ba,Sr)TiO₃ Thin Films for Ultra Large Scale Dynamic Random Access Memory. A Review on the Process Integration," *Mater. Sci. and Eng. B*, **56**(2-3), 178-190 (1998).
5. H. Shiibashi, H. Matsuda and M. Kuwabara, "Low-temperature Reparation of (Ba,Sr)TiO₃ Perovskite Phase by Sol-gel Method," *J. of Sol-Gel Sci. & Tech.*, **16**(1-2), 129-134 (1999).
6. J. H. Joo, J. B. Park, Y. Kim, K. S. Lee, J. S. Lee, J. S. Roh and J. J. Kim, "Low Temperature Chemical Vapor Deposition of (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films for High Density Dynamic Random Access Memory Capacitors," *Jpn. J. of Appl. Phys. Part 2-Letters*, **38**(2B), 195-198 (1999).
7. S. Saha and S. B. Krupanidhi, "Study of the Electrical Properties of Pulsed Laser Ablated (Ba_{0.5}Sr_{0.5})TiO₃ Thin Films," *Mater. Sci. and Eng. B*, **57**(2), 135-146 (1999).
8. Y. H. Lee, M. K. Lee, K. W. Ryu and S. G. Bae, "A Study on the Electrical Properties of (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films Fabricated by the RF Sputtering Technique," *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering*, **1**, 123-126 (1999).
9. Y. Tsunemine, T. Okudaira, K. Kashihara, K. Hanafusa, A. Yutani, Y. Fujita, M. Matsushita, H. Itoh and H. Miyoshi, "A Manufacturable Integration Technology of Sputter-BST Capacitor with a Newly Proposed Thick Pt Electrode," *Proceedings of the Electron Devices Meeting*, 811-814 (1998).
10. H. J. Cho, C. S. Kang, C. S. Hwang, J. W. Kim, H. Horii, B. T. Lee, S. I. Lee and M. Y. Lee, "Structural and Electrical Properties of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ films on Ir and IrO₂ Electrodes," *Jpn. J. of Appl. Phys. Part 2-Letters*, **36**(7A) (1997).
11. B. Nagaraj, T. Sawhney, S. Perusse, S. Aggarwal, R. Ramesh, V. S. Kaushik, S. Zafar, R. E. Jones, J. H. Lee, V. Balu and J. Lee, "(Ba,Sr)TiO₃ Thin Films with Conducting Perovskite Electrodes for Dynamic Random Access Memory Applications," *Applied Physics Letters*, **74**(21), 3194-3196 (1999).
12. 인태경, 안진호, 백성기, "BST 축적박막의 누설전류 평가," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **34**(8), 803-810 (1997).
13. Y. C. Choi and B. S. Lee, "Bottom Electrode Dependence of the Properties of (Ba,Sr)TiO₃ Thin Film Capacitors," *Materials Chemistry and Physics*, **61**(2), 124-129 (1999).
14. 전장배, 김덕규, 박춘배, "BST 박막의 RTA에 따른 전기적 특성," *한국전기전자재료학회지*, **12**(12), 1111-1118 (1999).
15. 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. of Appl. Phys.*, **32**(Part 1), 4126-4130 (1993).
16. J. S. Park, J. S. Kim, J. H. Lee, Y. H. Lee, S. R. Han and J. S. Lee, "Dielectric and Pyroelectric Properties of (Ba, Sr)TiO₃ Thin Films by RF Magnetron Sputtering," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **36**(4), 403-409 (1999).
17. J. C. Shin, J. Park, C. S. Hwang and H. J. Kim, "Dielectric and Electrical Properties of Sputter Grown (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films," *J. of Appl. Phys.*, **86**(1), 506-513 (1999).
18. M. S. Tsai and T. Y. Tseng, "Conduction Mechanism and Temperature-dependent Current-voltage in (Ba,Sr)TiO₃ Thin Films," *J. of the Electroche. Soc.*, **145**(8), 2853-2860 (1998).
19. C. S. Hwang and S. H. Joo, "Variations of the Leakage Current Density and the Dielectric Constant of Pt/(Ba,Sr)TiO₃/Pt Capacitors by Annealing under a N₂ Atmosphere," *J. of Appl. Phys.*, **85**(4), 2431-2436 (1999).