

# Metal-Insulator-Metal 캐패시터의 응용을 위한 비정질 BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> 박막의 전기적 특성

홍경표·정영훈·남 산<sup>†</sup>·이확주\*

고려대학교 신소재공학과, \*한국표준과학연구원 전략기술연구부

## Electrical Properties of the Amorphous BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> Thin Films for Metal-Insulator-Metal Capacitors

Kyoung Pyo Hong, Young-Hun Jeong, Sahn Nahm<sup>†</sup> and Hwack Joo Lee\*

Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 1-5 Ka, Anam-Dong, Sungbuk-Ku,  
Seoul 136-701, Korea, \*Division of Advanced Technology, Korea Research Institute of Standard and  
Science, Deaduk Science Town, Taejeon 305-600, Korea

(2007년 9월 6일 접수 : 2007년 10월 17일 채택)

**Abstract** Amorphous BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> (BT<sub>4</sub>) film was deposited on Pt/Si substrate by RF magnetron sputter and their dielectric properties and electrical properties are investigated. A cross sectional SEM image and AFM image of the surface of the amorphous BT<sub>4</sub> film deposited at room temperature showed the film was grown well on the substrate. The amorphous BT<sub>4</sub> film had a large dielectric constant of 32, which is similar to that of the crystalline BT<sub>4</sub> film. The leakage current density of the BT<sub>4</sub> film was low and a Poole-Frenkel emission was suggested as the leakage current mechanism. A positive quadratic voltage coefficient of capacitance (VCC) was obtained for the BT<sub>4</sub> film with a thickness of <70 nm and it could be due to the free carrier relaxation. However, a negative quadratic VCC was obtained for the films with a thickness  $\geq 96$  nm, possibly due to the dipolar relaxation. The 55 nm-thick BT<sub>4</sub> film had a high capacitance density of 5.1 fF/ $\mu\text{m}^2$  with a low leakage current density of 11.6 nA/cm<sup>2</sup> at 2 V. Its quadratic and linear VCCs were 244 ppm/V<sup>2</sup> and -52 ppm/V, respectively, with a low temperature coefficient of capacitance of 961 ppm/°C at 100 kHz. These results confirmed the potential suitability of the amorphous BT<sub>4</sub> film for use as a high performance metal-insulator-metal (MIM) capacitor.

**Key words** BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub>, MIM capacitor, High-k, Voltage coefficient of capacitance (VCC), Temperature coefficient of capacitance (TCC).

### 1. 서 론

부품 크기의 소형화를 위해서는 높은 정전용량밀도를 갖는 Metal-Insulator-Metal(MIM) 캐패시터가 필요하다. 높은 정전용량밀도를 가지기 위해서는 높은 유전상수를 갖는 물질을 사용하거나 박막의 두께를 감소시키면 된다. 박막두께 감소는 누설전류와 전압변화에 따른 정전용량 변화(Voltage Coefficient of Capacitance: VCC)가 커지므로 많은 연구자들이 MIM 캐패시터의 정전용량밀도를 증가시키기 위해 높은 유전상수를 갖는 재료의 개발에 초점을 맞추고 있다. 현재 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub> 그리고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-HfO<sub>2</sub> 적층 박막이 MIM 캐패시터로 사용되고 있지만 정전용량밀도가 낮거나 또는 전압변화에 따른 정전용량변화가

크다는 단점을 가지고 있다.<sup>1-4)</sup> 또한 ZrO<sub>2</sub>, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막과 HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> barrier를 가진 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 박막은 높은 정전용량을 가지지만 다른 특성들은 만족스럽지 못하다.<sup>5-7)</sup> 최근 높은 정전용량밀도를 갖는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-HfO<sub>2</sub> 적층 박막, TiTaO 박막, HfO<sub>2</sub>(3 nm)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1 nm) barrier를 가진 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 박막이 보고되었다.<sup>8-11)</sup>

BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> (BT<sub>4</sub>) 세라믹은 36-38의 높은 유전상수, 6-10 GHz 영역에서 3500-5000의 높은 품질계수를 가지며 온도변화에도 안정적인 우수한 고주파 유전특성을 가지고 있다고 알려져 있다.<sup>12-14)</sup> 따라서 MIM 캐패시터의 우수한 후보인 BT<sub>4</sub> 결정화 박막을 성장시켜 구조와 유전특성을 조사하였다.<sup>15-17)</sup> 550°C에서 증착하고 900°C에서 후열처리한 BT<sub>4</sub> 결정화 박막은 MIM 캐패시터에 적합한 우수한 유전특성을 나타내었다.<sup>17)</sup> 그러나 반도체 back-end 라인 공정을 위해서는 공정온도가 너무 높다는 단점이 있다. 그러므로 BT<sub>4</sub> 박막을 MIM 캐패시터로 이용하기 위

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : snahm@korea.ac.kr (S. Nahm)

해서는 증착온도를 낮추는 것이 필수이다. 본 연구에서는 BT<sub>4</sub> 박막의 MIM 캐패시터 적용에 대한 적합성을 알아보기 위해 상온에서 증착하여 전기적 특성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

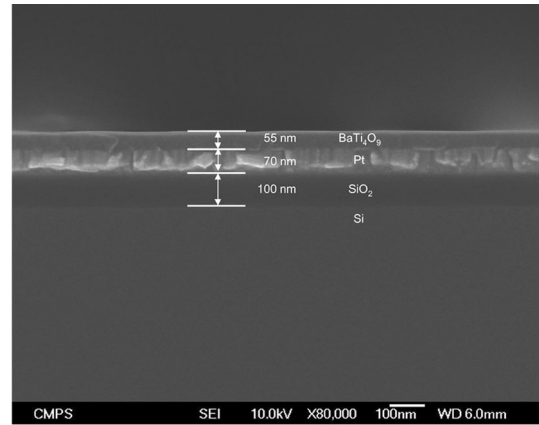
RF-magnetron sputtering과 통상적인 고상합성법으로 제작한 지름 3인치의 BT<sub>4</sub> target으로 Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si(100) 기판위에 비정질 BT<sub>4</sub> 박막을 성장시켰다. 증착은 아르곤과 산소를 혼합하여(Ar : O<sub>2</sub> = 4 : 1) 8.5 mTorr의 공정압력으로 상온에서 100 W의 파워로 10~50분간 행하였다. 박막의 구조특성은 주사전자현미경(SEM : JSM-7401F, JEOL LTD., Japan)과 원자간력현미경(AFM : JSPM-5200, JEOL LTD., Japan)으로 관찰하였다. 저주파 (100-1000 kHz)에서의 유전특성을 측정하기 위해 DC sputtering으로 Pt 상부전극을 BT<sub>4</sub> 박막 위에 증착하였다. 상부전극은 shadow 마스크를 사용하여 지름 360 μm의 원통 모양으로 형성하였다. 정전용량과 유전손실은 LCR meter(Agilent 4285A, USA)로 측정하였고, 누설전류는 Source meter(Keithley 2400, USA)를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

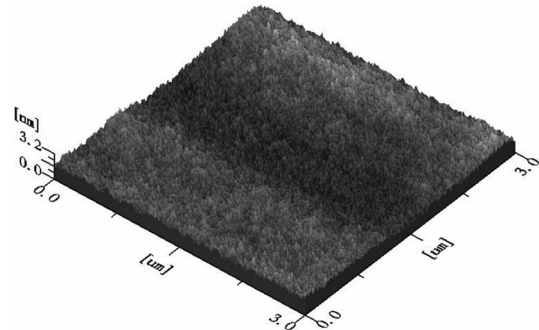
Fig. 1(a)는 상온에서 증착한 비정질 BT<sub>4</sub> 박막의 단면 SEM 사진이다. 55 nm 두께의 비정질 BT<sub>4</sub> 박막이 잘 형성되었으며 BT<sub>4</sub> 박막과 Pt 전극의 계면이 잘 형성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 BT<sub>4</sub> 박막 표면의 AFM 사진이다. 평균 표면 거칠기는 0.4 nm로 매우 평탄한 면을 가지고 있다. 따라서 비정질 BT<sub>4</sub> 박막은 Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si(100) 기판 위에 잘 성장함을 알 수 있다.

Fig. 2는 주파수 변화에 따른 정전용량밀도를 나타낸다. 66 nm 두께의 비정질 BT<sub>4</sub> 박막은 4.2 fF/μm<sup>2</sup>를, 40 nm 두께에서는 7.6 fF/μm<sup>2</sup>의 정전용량밀도를 가지며, 막의 두께가 얇아짐에 따라 정전용량밀도는 증가한다. 비정질 BT<sub>4</sub> 박막의 유전상수는 31~34를 가지며 이는 BT<sub>4</sub> 세라믹보다 약간 작은 값이다.<sup>18)</sup> 그러나 결정질 BT<sub>4</sub> 박막과 비슷한 값을 나타낸다. Fig. 2안의 그래프는 측정 주파수에 따른 정전용량변화를 나타낸다. 모든 박막들은 1.0%미만의 매우 작은 변화들을 보여주고 있으며 유전손실 또한 100 kHz에서 1.0%미만의 매우 적은 손실을 나타내고 있다. 국제반도체기술지표(ITRS)에 따르면 RF MIM 캐패시터로 사용하기 위해 2012년까지 5.0 fF/μm<sup>2</sup>의 정전용량밀도를 목표로 하고 있다.<sup>19)</sup> 따라서 비정질 55 nm이하의 두께를 갖는 BT<sub>4</sub> 박막은 이러한 요구조건을 만족하고 있다.

누설전류밀도 또한 MIM 캐패시터에서 매우 중요한 요소이다. Fig. 3(a)는 비정질 BT<sub>4</sub> 박막의 누설전류밀도를

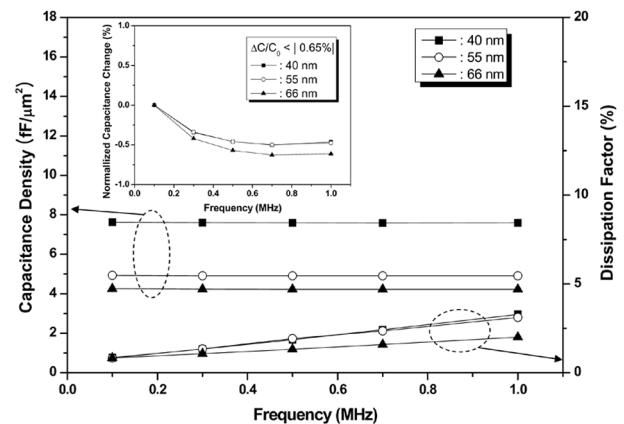


(a)



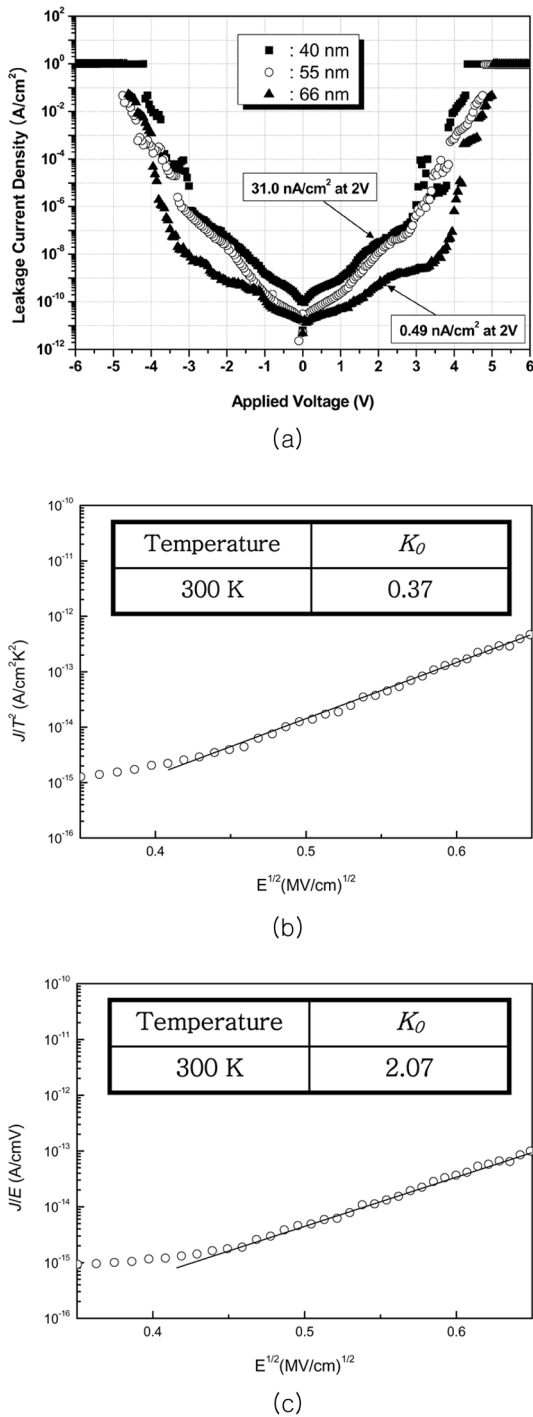
(b)

**Fig. 1.** (a) Cross sectional SEM and (b) AFM images of the 55 nm-thick amorphous BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> film grown at room temperature.



**Fig. 2.** Capacitance density of the amorphous BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> films measured at various frequencies. The inset shows the normalized capacitance change as a function of the frequency.

나타내고 있다. 막의 두께가 감소함에 따라 누설전류는 증가하는 경향을 나타내는데 이는 두께가 다른 막에 같은 전압(V)이 가해졌을 경우 두께가 얇은 막에 더 강한



**Fig. 3.** (a) Leakage current density measured at various applied voltages and the plots of (b)  $\log(J/T^2)$  vs.  $E^{1/2}$  and (c)  $\log(J/E)$  vs.  $E^{1/2}$  of the amorphous BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> capacitor.

전계(MV/cm)가 가해지기 때문이다. 66 nm 두께의 BT<sub>4</sub> 박막은 2.0 V에서 0.49 nA/cm<sup>2</sup>의 매우 낮은 누설전류밀도를 가지며 5.0 V의 높은 breakdown 전압을 가졌다. 40 nm 두께의 BT<sub>4</sub> 박막 또한 2.0 V에서 31.0 nA/cm<sup>2</sup>의 낮은 누설전류밀도를 보여 그 변화가 두드러지게 나타났

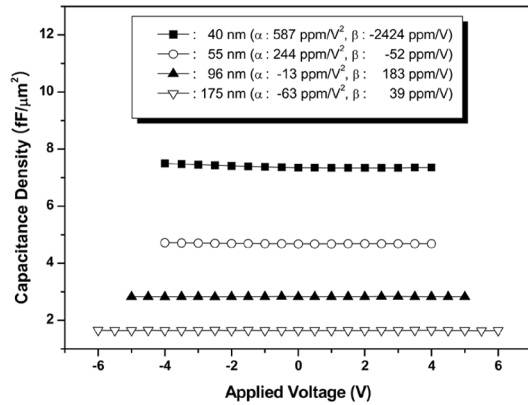
않았다. ITRS에 따르면 MIM 캐패시터로 사용하기 위해 7 fA/pF·V이하의 누설전류밀도를 요구하고 있다.<sup>19)</sup> 40 nm 두께의 BT<sub>4</sub> 박막은 1.22 fA/pF·V의 값을 가져 ITRS의 요구조건을 만족시키고 있다.

비정질 BT<sub>4</sub> 박막의 누설전류기구(leakage current mechanism) 또한 연구하였다. 일반적으로 high field에서의 유전박막 누설전류구기는 Schottky emission과 Poole-Frenkel emission으로 나뉜다.<sup>20,21)</sup> 터널링에 의한 누설전류가 발생할 수 있지만 이는 절연막 두께가 5 nm이하일 경우 발생한다.<sup>20)</sup> 따라서 본 실험에 사용된 비정질 BT<sub>4</sub> 박막은 5 nm보다 두꺼우므로 터널링은 누설전류구기로 작용할 수 없다. Schottky emission의 경우  $E^{1/2}$ 값에 따른  $\ln(J/T^2)$ 를 그렸을 때 직선이 나타난다. 이때  $E$ 는 electric field,  $J$ 는 전류밀도,  $T$ 는 온도이다. 또한 이 직선의 기울기로부터 optical range 주파수에서의 유전상수( $K_0$ )를 계산할 수 있다.<sup>20,21)</sup> 만약 계산된  $K_0$ 가 굴절률  $n$ 의 제곱이면 누설전류구기는 Schottky emission이 되는 것이다.<sup>20,21)</sup> 반면  $E^{1/2}$ 값에 따른  $\ln(J/E)$ 를 그렸을 때 나온 직선의 기울기로부터 계산된  $K_0$ 가  $n^2$ 과 같다면 누설전류구기는 Poole-Frenkel emission이 된다.<sup>20,21)</sup> Fig. 3(b)와 (c)는 55 nm 두께의 BT<sub>4</sub> 박막의 누설전류를  $\log(J/T^2)$  vs.  $E^{1/2}$ 와  $\log(J/E)$  vs.  $E^{1/2}$ 로 각각 나타낸 그래프이다. Fig. 3(b)와 (c)에서 구한  $K_0$ 값은 각각 0.37과 2.07이다. 비정질 BT<sub>4</sub> 박막의 굴절률을 문헌들을 통해 찾을 수 없어  $K_0$ 의 실험값을 얻지 못하였으나 일반적으로 유리의 굴절률이 1~2이므로<sup>22)</sup> 비정질 BT<sub>4</sub> 박막의 굴절률도 1~2의 값을 가질 것으로 생각된다. 계산된  $K_0$ 값을 비교하면 누설전류구기는 Poole-Frenkel emission에 부합된다. 두께가 다른 박막들에서도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

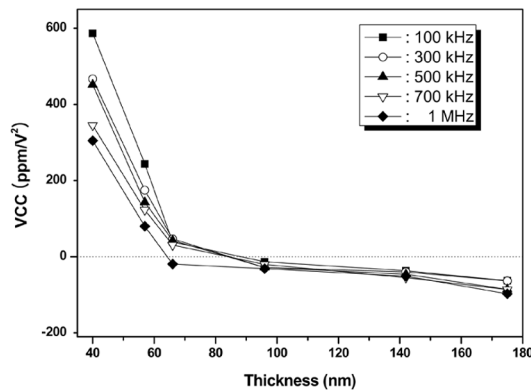
낮은 VCC는 이날로그 회로에서 중요한 요소 중 하나이다. BT<sub>4</sub> 박막의 VCC는 다음의 2차 다항식으로 얻어진다.

$$C(V)/C_0 = \alpha V^2 + \beta V + 1$$

여기서  $C_0$ 는 전계를 가하지 않았을 때 정전용량 값이고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 2차 계수와 1차 계수를 나타낸다.<sup>2)</sup> 100 kHz에서 다양한 두께의 BT<sub>4</sub> 박막의 전압변화에 따른 정전용량밀도 변화를 Fig. 4(a)에 나타내었다. Table 1은 주파수 변화에 따른  $\alpha$ 와  $\beta$ 값을 두께별로 정리한 것이다. 특히  $\alpha$ 는 MIM 캐패시터에서 중요한 수치이다. 주파수 변화에 따른 두께가 다른 박막들의  $\alpha$ 값을 Fig. 4(b)에 나타내었다. 175 nm 두께의 BT<sub>4</sub> 박막은 100 kHz에서 -63 ppm/V<sup>2</sup>의 낮은 값을 나타내었고, 두께가 감소함에 따라 값이 조금씩 증가하였다. 그리고 측정 주파수 변화에 따른  $\alpha$ 값의 변화는 거의 없었다. 그러나 96 nm보다 얇아질 경우  $\alpha$ 값은 양수가 되고 막의 두께가 감소할수록, 측정 주파수가 감소할수록 그 값은 눈에 띄게 증가하였다.



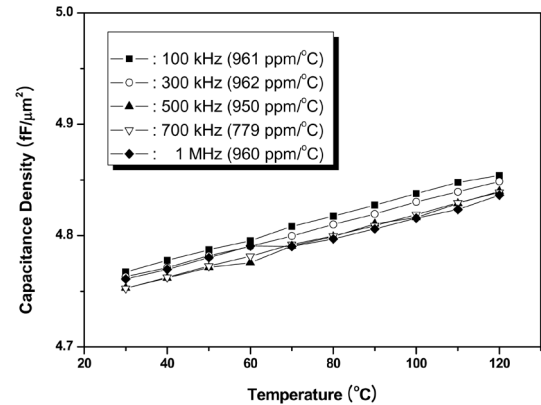
(a)



(b)

**Fig. 4.** (a) Variation of the capacitance density of the amorphous BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> MIM capacitor measured at 100 kHz and (b) the change of the quadratic VCC with respect to the thickness measured at various frequencies.

일반적으로 높은 유전상수를 가지는 MIM 캐패시터는 양수의  $\alpha$ 값을 가지고, 막의 두께와 주파수가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이때 두께와 주파수에 따른  $\alpha$  값은 free carrier relaxation으로 설명된다.<sup>23),24)</sup> 음수의  $\alpha$  값은 dipolar relaxation(Kerr effect)으로 설명되고 PECVD로 성장시킨 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>에서 관찰된다. 이 경우  $\alpha$ 는 주파수 변화에 영향을 받지 않으며 전계의 변화에 약간



**Fig. 5.** Variation of the capacitance density of the 55 nm-thick amorphous BaTi<sub>4</sub>O<sub>9</sub> MIM capacitor measured at various frequencies as a function of the temperature.

영향을 받는다.<sup>24)</sup> 음수의  $\alpha$ 값은 Ba<sub>0.6</sub>Sr<sub>0.4</sub>TiO<sub>3</sub> 박막에서도 발견되며, 입계(grain boundary)와 전극/유전층 계면에 존재하는 산소 공공(oxygen vacancies)과 산소 음이온(negatively charged oxygen)에 영향을 받는 dielectric relaxation으로 설명된다.<sup>25)</sup> 그러므로 96 nm보다 얇은 비정질 BT<sub>4</sub> 박막의 전압 및 주파수 변화에 따른 정전용량 변화는 free carrier와 free carrier relaxation이 주요하게 작용한 것으로 사료된다. 막의 두께가 두꺼워질수록 전계가 감소하므로 free carrier는 감소하여 dipolar relaxation이 주 요소로 작용하게 되는데, 이는 96 nm보다 두꺼운 비정질 BT<sub>4</sub> 박막에서 관찰할 수 있었다. 그러나 비정질 BT<sub>4</sub> 박막에서 어떤 dipolar가 존재하는지는 명확하지 않다.

두께별 BT<sub>4</sub> 박막의 측정온도에 따른 정전용량밀도 변화(Temperature Coefficient of Capacitance: TCC)를 Fig. 5에 나타내었다. MIM 캐패시터를 120°C로 가열한 플레이트에 놓고 120°C에서 30°C까지 온도를 낮춰가며 100 kHz에서의 정전용량밀도를 측정하였다. 다양한 주파수와 두께에서 측정된 TCC값을 Table 2에 정리하였다. 66 nm 두께의 BT<sub>4</sub> 박막은 100 kHz에서 215 ppm/°C의 낮은 값을 나타내었고, 막의 두께가 감소함에 따라 값은 증가하

**Table 1.** Quadratic and linear voltage coefficients of capacitance of the amorphous BT<sub>4</sub> films with various thicknesses measured at various frequencies.

Frequency (kHz)	Voltage Coefficient of Capacitance ( $\alpha$ : ppm/V <sup>2</sup> , $\beta$ : ppm/V)											
	40 nm		55 nm		66 nm		96 nm		142 nm		175 nm	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
100	587	-2424	244	-52	39	86	-13	183	-37	-300	-63	39
300	467	-1795	175	-557	47	42	-28	182	-40	-279	-63	45
500	452	-1368	143	-441	43	111	-28	182	-46	-308	-86	126
700	345	-1378	123	-384	31	111	-20	182	-55	-312	-86	86
1000	305	-1127	80	-202	-18	-28	-31	-67	-51	25	-97	-1

**Table 2.** Dielectric constant, capacitance density, leakage current density, breakdown voltage and TCC of the amorphous BT<sub>4</sub> films with various thicknesses.

Values	Thickness	40 nm	55 nm	66 nm	96 nm
Dielectric Constant (k)		34	32	31	31
Capacitance Density [fF/ $\mu\text{m}^2$ ] at 100 kHz		7.6	5.1	4.2	2.9
Leakage Current Density [nA/cm <sup>2</sup> ]	1 V	0.93	0.23	0.05	0.05
	2 V	31.0	11.6	0.49	0.07
Breakdown Voltage [V]		4.30	4.75	5.00	8.00
TCC [ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ]	100 kHz	2500	961	215	133
	300 kHz	2400	962	206	118
	500 kHz	2210	950	203	107
	700 kHz	2010	779	203	125
	1 MHz	2210	960	205	102

였다. 40 nm 두께의 박막은 100 kHz에서 2500 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  의 높은 TCC를 나타내었다.

#### 4. 결 론

66 nm 두께의 비정질 BT<sub>4</sub> 박막은 4.2 fF/ $\mu\text{m}^2$ 의 정전 용량밀도를 가지고, 두께가 얇아질수록 값은 증가하여 40 nm 두께의 박막은 7.6 fF/ $\mu\text{m}^2$ 을 나타내었다. 비정질 BT<sub>4</sub> 박막의 유전상수는 32로 높은 값을 가지며 이는 결정질 BT<sub>4</sub> 박막과 비슷한 값이다. BT<sub>4</sub> 박막의 누설전류밀도는 두께가 감소함에 따라 조금씩 증가하는 경향성을 가지며 누설전류기구는 Poole-Frenkel emission으로 생각된다. 70 nm보다 얇은 BT<sub>4</sub> 박막은 양수의 VCC 2차 계수를 가지며 이는 free carrier relaxation에 의한 것일 가능성이 있다. 반면 96 nm보다 두꺼운 비정질 BT<sub>4</sub> 박막은 음수의 VCC 2차 계수를 가지며 이는 dipolar relaxation이 전계와 주파수에 따른 정전용량밀도 변화에 영향을 끼친 것으로 보인다. 55 nm의 박막은 1 V에서 0.23 nA/cm<sup>2</sup>의 낮은 누설전류 밀도를 가졌으며 100 kHz에서 VCC의 2차 계수와 1차 계수는 각각 244 ppm/V<sup>2</sup>와 -52 ppm/V, TCC는 961 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 비록 박막의  $\alpha$ 값은 요구조건( $\alpha < 100$  ppm/V<sup>2</sup>)보다 크지만 이는 공정조건변화를 통한 누설전류밀도 개선으로 감소시킬 수 있다. 그러므로 이와 같은 결과들은 비정질 BT<sub>4</sub> 박막이 고성능 MIM 캐패시터로의 응용에 적합하다는 것을 확신케 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 기술개발 사업인 나노기술 개발사업의 출연금으로 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. S. B. Chen, C. H. Lai, A. Chin, J. C. Hsieh, and J. Liu, IEEE Electron Device Lett., 23, 185 (2002).
2. H. Hu, C. Zhu, Y. F. Lu, M. F. Li, B. J. Cho, and W. K. Choi, IEEE Electron Device Lett., 23, 514 (2002).
3. S. J. Kim, B. J. Cho, M. F. Li, X. Yu, C. Zhu, A. Chin, and D. L. Kwong, IEEE Electron Device Lett., 24, 387 (2003).
4. S. J. Ding, H. Hu, C. Zhu, M. F. Li, S. J. Kim, B. J. Cho, D. S. H. Chan, M. B. Yu, A. Y. Du, A. Chin, and D. L. Kwong, IEEE Electron Device Lett., 25, 681 (2004).
5. S. Y. Lee, H. S. Kim, P. C. McIntyre, K. C. Saraswat, and J. S. Byun, Appl. Phys. Lett., 82, 2874 (2003).
6. C. Wenger, J. Dabrowski, P. Zaumseil, R. Sorge, P. Formanek, G. Lippert, and H. J. Mussig, 7, 227 (2004).
7. S. J. Kim, B. J. Cho, M. B. Yu, M. F. Li, Y. Z. Xiong, C. Zhu, A. Chin, and D. L. Kwong, IEEE Electron Devices Lett., 26, 625 (2005).
8. K. C. Chiang, C. C. Huang, A. Chin, W. J. Chen, S. P. McAlister, H. F. Chiu, J. R. Chen and C. C. Chi, IEEE Electron Device Lett., 26, 504 (2005).
9. S. J. Kim, B. J. Cho, M. F. Li, S. J. Ding, C. Zhu, M. B. Yu, B. Narayanan, A. Chin, and D. L. Kwong, IEEE Electron Device Lett., 25, 538 (2004).
10. S. J. Kim, B. J. Cho, M. B. Yu, M.-F. Li, Y. Z. Xiong, C. Zhu, A. Chin, and D. L. Kwong, IEEE Electron Device Lett., 26, 625 (2005).
11. K. C. Chiang, C. C. Huang, G. L. Chen, W. J. Chen, H. L. Kao, Y. H. Wu, A. Chin, and S. P. McAlister, IEEE Trans. Electron Devices, 53, 2312 (2006).
12. K. Wakino, K. Minai, and H. Tamura, J. Am. Ceram. Soc., 67, 278 (1984).
13. T. Negas, G. Yeager, S. Bell, N. Coats, and I. Minis, Am. Ceram. Soc. Bull., 72, 80 (1993).
14. J. H. Choy, Y. S. Han, J. H. Sohn, and M. Itoh, J. Am. Ceram. Soc., 78, 1169 (1995).
15. M. Cernea, E. Chirtop, D. Neacsu, I. Pasuk, and S.

- Iordanescu, J. Am. Ceram. Soc., 85, 499 (2002).
16. B. Y. Jang, Y. H. Jeong, S. J. Lee, K. J. Lee, S. Nahm, H. J. Sun, and H. J. Lee, J. Amer. Cer. Soc., 88, 1209 (2005).
  17. B. Y. Jang, Y. H. Jeong, S. J. Lee, K. J. Lee, S. Nahm, H. J. Sun, and H. J. Lee, J. Euro. Cer. Soc., 26, 1913 (2006).
  18. B. Y. Jang, B. J. Kim, S. J. Lee, K. J. Lee, S. Nahm, H. J. Sun, and H. J. Lee, Appl. Phy. Lett., 87, 112902-3 (2005).
  19. International Technology Roadmap for Semiconductors, (2005).
  20. L. I. Maissel, R. Glang, Handbook of Thin Film Technology., p.14-13~14-25, McGraw-Hill, New York, (1970).
  21. S. M. Sze, Physics of Semiconductor., p. 403, John Wiley & Sons, New York, (1981)
  22. W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, Introduction to Ceramics., p. 662, John Wiley & Sons, New York, (1976)
  23. C. Zhu, H. Hu, X. Yu, S. J. Kim, A. Chin, M. F. Li, B. J. Cho and D.-L. Kwong, in Proc. of IDEM, 879 (2003).
  24. S. Blonkowski, M. Regache, and A. Halimaoui, J. Appl. Phys., 90, 1501 (2001).
  25. F. M. Pontes, E. R. Leite, E. Longo, J. A. Varela, E. B. Araujo and J. A. Eiras, Appl. Phys. Lett. 76, 2433 (2000).