

TiN 기판 위에 성장시킨 비정질 BaSm₂Ti₄O₁₂ 박막의 구조 및 전기적 특성 연구

박용준 · 백종후 · 이영진 · 정영훈[†] · 남산*
요업(세라믹)기술연구원 전자부품 · 소재본부
*고려대학교 신소재공학과

Structural and Electrical Properties of Amorphous BaSm₂Ti₄O₁₂ Thin Films Grown on TiN Substrate

Yong Jun Park, Jong-Hoo Paik, Young-Jin Lee, Young Hun Jeong[†] and Sahn Nahm*

Electronic Components and Materials Division, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology

*Department of Materials Science and Engineering, Korea University

(2008년 2월 11일 접수 : 2008년 3월 27일 채택)

Abstract The structural and electrical properties of amorphous BaSm₂Ti₄O₁₂ (BSmT) films on a TiN/SiO₂/Si substrate deposited using a RF magnetron sputtering method were investigated. The deposition of BSmT films was carried out at 300°C in a mixed oxygen and argon (O₂:Ar=1:4) atmosphere with a total pressure of 8.0 mTorr. In particular, a 45 nm-thick amorphous BSmT film exhibited a high capacitance density and low dissipation factor of 7.60 fF/μm² and 1.3%, respectively, with a dielectric constant of 38 at 100 kHz. Its capacitance showed very little change, even in GHz ranges from 1.0 GHz to 6.0 GHz. The quality factor of the BSmT film was as high as 67 at 6 GHz. The leakage current density of the BSmT film was also very low, at approximately 5.11 nA/cm² at 2 V; its conduction mechanism was explained by the the Poole-Frenkel emission. The quadratic voltage coefficient of capacitance of the BSmT film was approximately 698 ppm/V², which is higher than the required value (< 100 ppm/V²) for RF application. This could be reduced by improving the process condition. The temperature coefficient of capacitance of the film was low at nearly 296 ppm/°C at 100 kHz. Therefore, amorphous BSmT grown on a TiN substrate is a viable candidate material for a metal-insulator-metal capacitor.

Key words MIM capacitor, thin film, microwave properties, BaSm₂Ti₄O₁₂, VCC

1. 서 론

금속-절연체-금속 형태의 캐패시터(metal-insulator-metal capacitors : MIM 캐패시터)는 RF 또는 analog/mixed 신호용 기술 분야에서 사용하기 위해서 높은 정전용량과 품질계수를 가져야 할 뿐만 아니라 인가된 바이어스에 따른 정전용량과 누설 전류의 변화를 나타내는 전압 선형성 및 누설전류밀도도 낮아야 한다.¹⁾ MIM 구조의 캐패시터는 식 (1)과 같이 유전체 막의 두께를 줄이면 보다 높은 정전용량을 얻을 수 있다.

$$C = \epsilon_0 k \frac{A}{d} \quad (1)$$

여기서, C는 정전용량, ϵ_0 는 진공상태의 유전상수, k는 유전체의 유전상수, A는 캐패시터의 면적, d는 유전체 막

의 두께이다. 그러나, 유전체 막의 두께를 줄이면 전기장이 증가하게 되어 누설 전류 특성과 전압의 선형성이 저하된다. 따라서 최근에는 높은 유전상수를 가진 유전체를 이용하여 MIM 캐패시터의 특성을 향상시킨 다양한 연구 결과가 보고되고 있다.²⁻⁷⁾ 최근에는 TiTaO (k = 45)와 SrTiO₃ (k = 147-169)과 같은 높은 유전상수를 갖는 물질을 이용하여 누설 전류 특성과 전압 선형성의 저하 없이 높은 정전용량을 가지는 MIM 캐패시터의 특성에 관하여 보고되었다.⁸⁻⁹⁾

마이크로웨이브 유전체 재료는 높은 유전상수와 높은 품질계수 그리고 우수한 전압 선형성을 가지고 있기 때문에 MIM 캐패시터의 절연체로 사용이 가능하다.¹⁰⁾ 이러한 마이크로웨이브 유전체 재료로서 BaSm₂Ti₄O₁₂ (BSmT), BaTi₄O₉ 및 Sm₂Ti₂O₇ 박막을 이용한 MIM 캐패시터가 RF와 아날로그 수동 소자에 응용할 수 있는 우수한 성능을 가진다는 보고가 최근에 발표되었다.¹¹⁻¹³⁾ 특히 플래티늄 (Pt) 기판 위에 성장시킨 35 나노미터의

[†]Corresponding author

E-Mail : yhjeong@kicet.re.kr (Y. H. Jeong)

두께를 가지는 비정질 BSmT 박막은 100 kHz에서 $9.9 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$ 의 정전용량밀도, 1 V에서 $1.79 \text{ nA}/\text{cm}^2$ 의 누설 전류밀도, 인가전압 및 온도 변화에 따른 정전용량의 변화를 나타내는 정전용량전압계수(VCC: Voltage Coefficient of Capacitance)와 정전용량온도계수(TCC: Temperature Coefficient of Capacitance)는 각각 $599 \text{ ppm}/\text{V}^2$ 과 $236 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 의 우수한 전압 선형성과 온도 안정성을 가지는 고성능 MIM 캐패시터 특성이 보고되었다.¹¹⁾ 그러나 유전체 박막의 전기적 특성은 전극으로 사용되는 기판의 종류에 따라 상당한 전기적 특성의 차이를 나타내며 하부 전극으로 사용된 Pt와 같은 귀금속은 높은 단가로 인하여 대량 생산을 필요로 하는 반도체 산업에 응용하기에는 적합하지 않다. 따라서 이러한 점을 고려하여 현재 산업체에서 사용되고 있는 비교적 낮은 단가의 TiN 또는 TaN 기판 위에 성장시킨 BSmT 박막의 구조와 전기적 특성에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 비정질 BSmT 박막을 MIM 캐패시터로 응용하기 위해서 TiN 기판 위에 성장시킨 후 구조적 특성 및 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

일반적인 고상 합성법을 사용하여 지름 3 인치 타겟을 제작한 후 TiN/SiO₂/Si(100) 기판 위에 RF 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 BSmT 막을 성장시켰다. 모든 BSmT 막의 성장은 300°C의 온도에서 이루어졌으며 스퍼터 챔버의 전체 압력은 8 mTorr이며, 공정시 산소(O₂)와 아르곤(Ar)을 1 대 4의 비율로 주입하고, 120 W의 플라즈마 전력을 인가하였다. 박막의 미세구조는 주사 전자 현미경(SEM: Hitachi S-4300, 일본)과 원자력간현미경(AFM: JSPM-5200, JEOL LTD., 일본)을 사용하였으며, 성장된 막과 기판의 경계면은 오제이 전자 현미경(AES: Physical Electronics PHI 680 Auger Spectroscopy)을 이용하여 분석하였다. 분광 엘립소미터(J. A. Woollam VASE, USA)를 사용하여 상온에서 준유전함수(pseudo-dielectric function) 스펙트럼을 측정하였으며, 다층 박막 분석을 통하여 BSmT 막의 굴절률을 구하였다. 저주파 대역(0.1~1.0 MHz)에서 유전 특성을 측정하기 위하여 일반적인 DC 스퍼터링 방식을 이용하여 MIM 캐패시터의 상부 전극을 형성시키고자 BSmT 막 위에 Pt를 전극으로 증착하였다. 상부 전극은 360 μm의 지름을 갖는 디스크(disk) 형태로 제작하기 위하여 새도우 마스크(shadow mask)를 사용하여 패터닝(patterning)하였다. 캐패시터의 정전용량과 품질계수는 precision LCR 미터(Agilent 4285A, 미국)를 사용하여 측정하였다. RF 영역에서의 유전 특성을 얻기 위하여, RF 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 BSmT 박막 위에 상부 전극으로 알루미늄을 증착

한 후, 원형 패치 캐패시터 구조를 제작하기 위하여 리소 그래피 공정을 이용하여 패터닝하였다. 벡터 네트워크 분석기(HP 8510C, USA)를 이용하여 1 GHz~6 GHz의 주파수 영역에서 BSmT 박막의 복소 반사 계수를 측정하였다. 동일한 외경과 서로 다른 내경을 가지는 두 개의 캐패시터로부터 추출한 복소 반사 계수로부터 정전용량과 유전 손실을 얻었다.¹⁴⁾ 누설 전류 밀도는 소스미터(Keithley 2400, USA)를 사용하여 측정하였다.

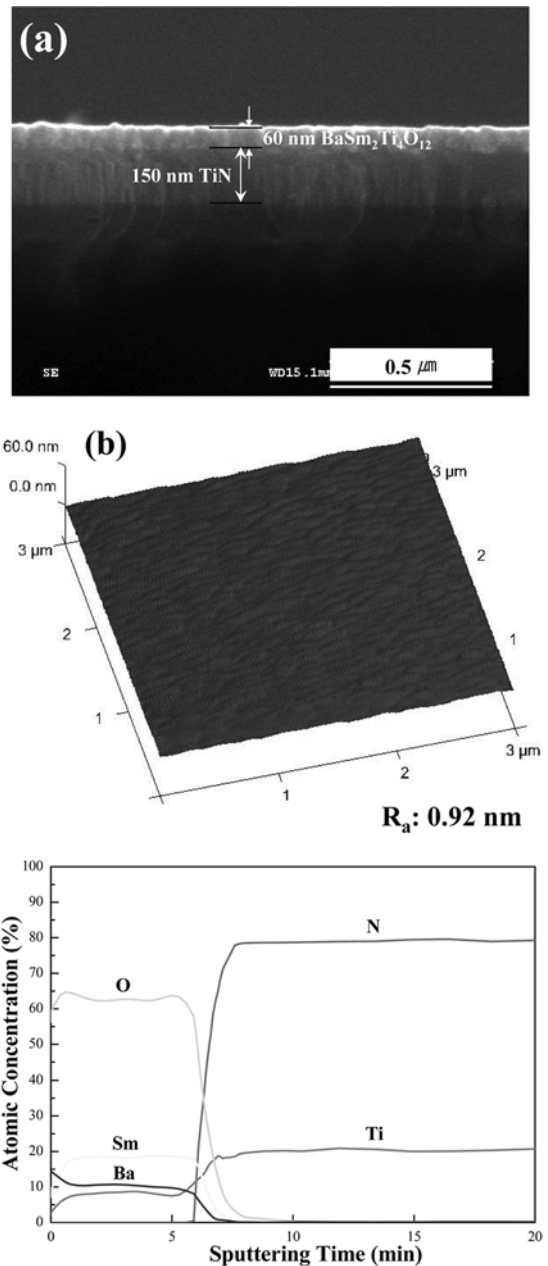


Fig. 1. (a) Cross-sectional SEM (b) AFM images, and (c) AES depth profile of 60 nm-thick amorphous BaSm₂Ti₂O₁₂ film deposited at 300°C.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)는 주사전자현미경을 이용하여 300°C에서 성장시킨 BSmT 박막의 단면 미세구조를 보여준다. 60 나노미터의 두께를 가지는 BSmT 막과 하부의 TiN 전극과의 계면이 선명하게 보이므로 BSmT 막은 안정적으로 성장하였음을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 AFM을 이용하여 60 나노미터 BSmT 막의 표면 거칠기를 나타내고 있다. 성장된 막의 평균 표면 거칠기(R_a)가 0.92 nm의 낮은 값을 가지기 때문에 성장된 BSmT 막의 표면은 매우 매끄러운 상태임을 알 수 있다. Fig. 1(c)는 TiN 기판 위에 성장한 BSmT 막의 depth profile을 나타내었다. BSmT 막을 구성하는 Ba, Sm, Ti 그리고 O 성분이 하부의 TiN 전극으로 확산되거나 TiN 전극으로부터 상부의 BSmT 층으로 확산된 Ti나 N의 양이 비교적 적은 것으로 볼 때, BSmT 층과 하부의 TiN 층과의 계면은 화학적으로도 매우 안정된 것으로 판단된다. 따라서, 60 나노미터의 두께를 가진 BSmT 막은 TiN 기판 위에 물리적, 화학적으로 안정하게 성장한 것으로 고려되었다. 또한 다른 두께를 가진 BSmT 박막에서도 유사한 결과를 나타내는 미세구조를 관찰할 수 있었다.

Fig. 2에서는 여러 두께를 가지는 BSmT 막의 정전용량밀도와 손실계수(dissipation factor)를 다양한 주파수에서 측정한 결과를 나타내었다. 110 나노미터의 두께를 가지는 BSmT 막의 경우, 100 kHz에서 측정된 정전용량밀도는 약 3.3 fF/ μm^2 로 매우 낮은 값을 보였으며, 손실계수 또한 0.83%로 매우 낮은 값을 나타내었다. 45 나노미터의 두께를 가지는 BSmT 막의 경우, 막의 두께가 감소하면서 정전용량밀도는 동일한 측정 주파수에서 7.6 fF/ μm^2 로 증가하였다. 본 연구에서 조사한 모든 BSmT 막은 100 kHz의 측정 주파수에서 1.5% 이하의 매우 낮은 손

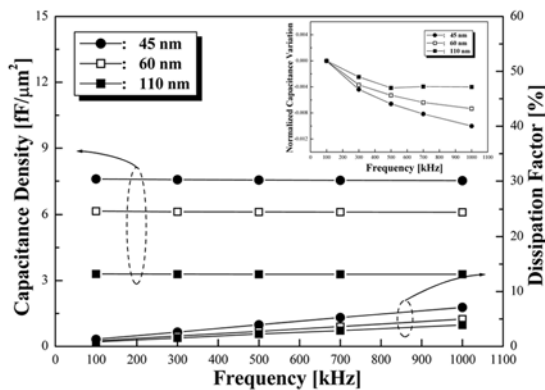


Fig. 2. Capacitance densities and dissipation factors of the amorphous BaSm₂Ti₄O₁₂ films with various thicknesses measured at low frequencies (0.1~1.0 MHz). The inset shows normalized capacitance variation of the films as a function of frequency.

실계수 값을 보여주었다. 한편 110 나노미터 두께를 가지는 BSmT 막의 유전율은 Pt 기판 위에 성장한 BSmT 막의 유전율과 유사한 41 정도를 나타내었다.¹¹⁾ 하지만, 유전체 막의 두께가 감소함에 따라 유전율도 약간 감소하였으며, 45 나노미터의 두께를 가진 BSmT 막의 경우 38의 유전율을 나타내었다. 측정 주파수의 증가에 따른 정전용량의 변화를 Fig. 2의 삽화로 나타내었다. 측정 주파수가 0.1 MHz에서 1.0 MHz로 증가함에 따라 정전용량은 모든 막의 경우에서 1.0% 이하의 매우 낮은 변화율을 나타내었다.

BSmT 막을 사용한 MIM 커패시터를 RF 소자에 응용하기 위한 가능성을 조사하기 위하여 GHz 영역에서의 정전용량밀도와 품질계수를 측정하였다. Fig. 3은 여러 두께를 가지는 BSmT 막의 정전용량밀도와 품질계수를 1 GHz에서부터 6 GHz까지의 주파수 영역에서 측정한 결과를 나타낸 것이다. BSmT 막의 GHz 영역에서의

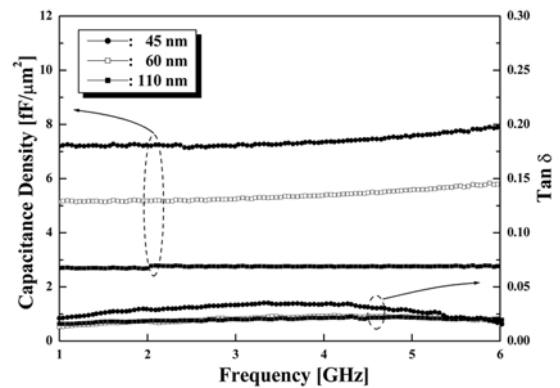


Fig. 3. Capacitance densities and $\tan\delta$ of the amorphous BaSm₂Ti₄O₁₂ films with various thicknesses measured in the high frequency range (1~6 GHz).

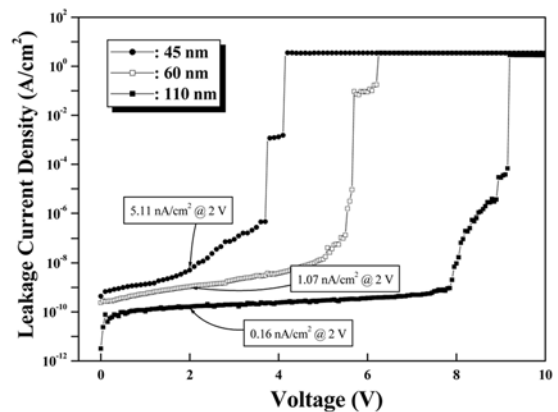


Fig. 4. Leakage current densities of the amorphous BaSm₂Ti₄O₁₂ films with various thicknesses.

정전용량밀도는 낮은 주파수 대역(0.1~1.0 MHz)에서 측정된 결과와 유사한 값을 보였다. 특히 45 나노미터 두께를 가지는 BSmT 막은 6 GHz에서 7.89 fF/μm²의 높은 정전용량밀도와 67의 우수한 품질계수를 얻을 수 있었다. 국제반도체 기술 로드맵(ITRS ; International Technology Roadmap for Semiconductors)에 따르면, 2012년까지 RF MIM 캐패시터에 적용을 하기 위해서 요구되는 유전체 막의 정전용량밀도와 품질계수는 각각 5.0 fF/μm²과 50이다.¹⁾ 따라서, 60 나노미터 이하의 두께를 갖는 BSmT 박막은 이러한 ITRS에서 요구하는 조건을 모두 만족시킨다.

Fig. 4에서는 여러 두께를 가지는 BSmT 막의 누설전류밀도를 나타내었다. 110 나노미터의 BSmT 막의 경우, 2 V에서 측정된 누설전류밀도는 0.16 nA/cm²로 매우 낮았다. 뿐만 아니라, 45 나노미터의 비교적 얇은 두께를 가지는 BSmT 막의 경우도 2 V에서 측정된 누설전류밀도는 5.11 nA/cm²로 여전히 낮은 값을 보였다. 일반적으로 MIM 캐패시터에서 유전체막의 두께가 감소하면 식 (1)에서 보듯이, 정전용량은 증가하게 된다. 그러나 동일한 전압이 두께가 서로 다른 캐패시터에 인가된 경우, 보다 얇은 두께의 캐패시터에는 강한 전기장이 작용하게 되어, 캐패시터의 성능을 떨어뜨리는 누설전류도 동시에 증가하게 된다. 따라서 두께에 상당히 좌우되는 캐패시터의 누설전류에 관한 특성은 정전용량과 인가전압이 동시에 고려되어야 한다. 이에 MIM 캐패시터의 누설전류특성은 캐패시터의 단위면적당 누설전류의 크기를 나타내는 누설전류밀도(A/cm²)를 정전용량밀도(fF/μm²)와 인가전압(V)으로 동시에 나눈 단위인 fA/pF·V를 사용하기도 한다. ITRS에서는 정밀 아날로그 캐패시터에 적용하기 위하여 요구되는 누설전류특성으로, 7 fA/pF·V 이하의 값을 필요로 한다.¹⁾ 45 나노미터의 두께를 가지는 BSmT 막의 누설전류특성은 3.36 fA/pF·V의 매우 낮은 값을 얻을

수 있었다. 이 값은 누설전류밀도(5.11 nA/cm²)를 정전용량밀도(7.60 fF/μm²)와 인가된 전압(2 V)으로 나눈 값으로부터 얻을 수 있다. 이로부터, 45 나노미터 이상의 두께를 가진 BSmT 막은 ITRS의 누설전류특성 요구조건을 만족함을 알 수 있다. 한편 Pt 기판 위에 성장시킨 60 나노미터 두께의 BSmT 막의 누설전류밀도는 인가 전압 1 V에서 약 0.41 nA/cm²로 TiN 기판 위에 성장시킨 BSmT 막의 누설전류밀도와 유사하다.¹¹⁾ (Table 1 참조) 그러므로, Pt 보다 낮은 일함수를 가진 TiN 기판 위에 성장한 BSmT 막의 누설전류 특성 역시 매우 우수하였다.

Fig. 5는 다양한 두께를 가지는 BSmT 막의 인가 전압에 따른 정전용량의 변화를 100 kHz에서 측정된 결과이다. VCC는 아래의 2차 다항식으로부터 계산할 수 있다.

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

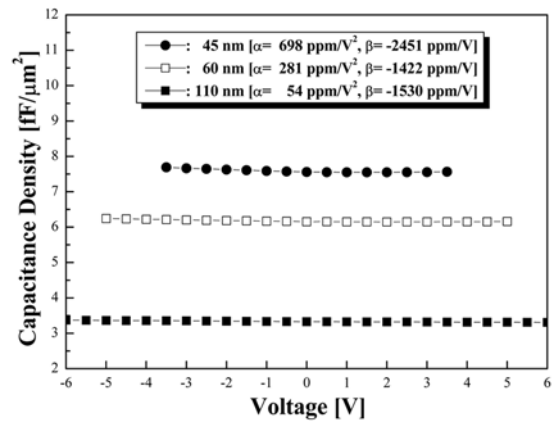


Fig. 5. Variation in the capacitance density of the amorphous BaSm₂Ti₂O₁₂ films with various thicknesses measured at 100 kHz as a function of applied voltage.

Table 1. Dielectric constant, capacitance density, Q-value, leakage current density, breakdown voltage and TCC of the amorphous BSmT films with various thicknesses

Values	Thickness	45 nm	60 nm	110 nm
Dielectric Constant (k)		38.0	41.0	41.0
Capacitance Density [fF/mm ²]	at 100 kHz	7.60	6.16	3.30
	at 6 GHz	7.89	5.81	2.78
Q value	at 100 kHz	78	100	121
	at 6 GHz	67	67	50
Leakage Current Density [nA/cm ²]	@ 1 V	1.35	0.55	0.11
	@ 2 V	5.11	1.07	0.16
Breakdown Voltage [V]		4.15	6.25	9.2
	100 kHz	296	291	288
TCC [ppm/°C]	300 kHz	290	279	261
	500 kHz	279	231	234
	1 MHz	254	36	262

Table 2. Quadratic and linear voltage coefficients of capacitance (VCC) of the BSmT films with various thicknesses measured at various frequencies

Frequency (kHz)	Voltage Coefficient of Capacitance (α : ppm/V ² , β : ppm/V)					
	45 nm		60 nm		110 nm	
	α	β	α	β	α	β
100	698	-2451	281	-1422	54	-1530
300	568	-2029	241	-1321	38	-1404
500	504	-1828	206	-1296	36	-1393
1000	346	-2167	139	-1829	-9.1	-2169

여기서, C_0 는 0 V에서의 정전용량, α 와 β 는 각각 2차 및 1차 VCC이다.³⁾ 다양한 주파수에서 측정된 여러 두께를 가진 BSmT 막의 α 와 β 값의 변화는 Table 2에 나타내었다. MIM 캐패시터에서 정전용량의 전압 특성을 나타내는 대표적인 인자인 α 의 경우, 110 나노미터의 두께를 가진 BSmT 막에서는 약 54 ppm/V²였으며, 측정주파수가 증가함에 따라 약간 감소하였다. 막의 두께가 감소함에 따라서 α 는 증가하였으며, 45 나노미터의 두께를 가진 BSmT 막의 α 는 698 ppm/V²으로 RF 소자에 응용하기 위하여 ITRS에서 요구하는 값인 100 ppm/V²보다 높지만 공정 조건의 개선을 통하여 α 를 줄일 수 있다.¹⁾

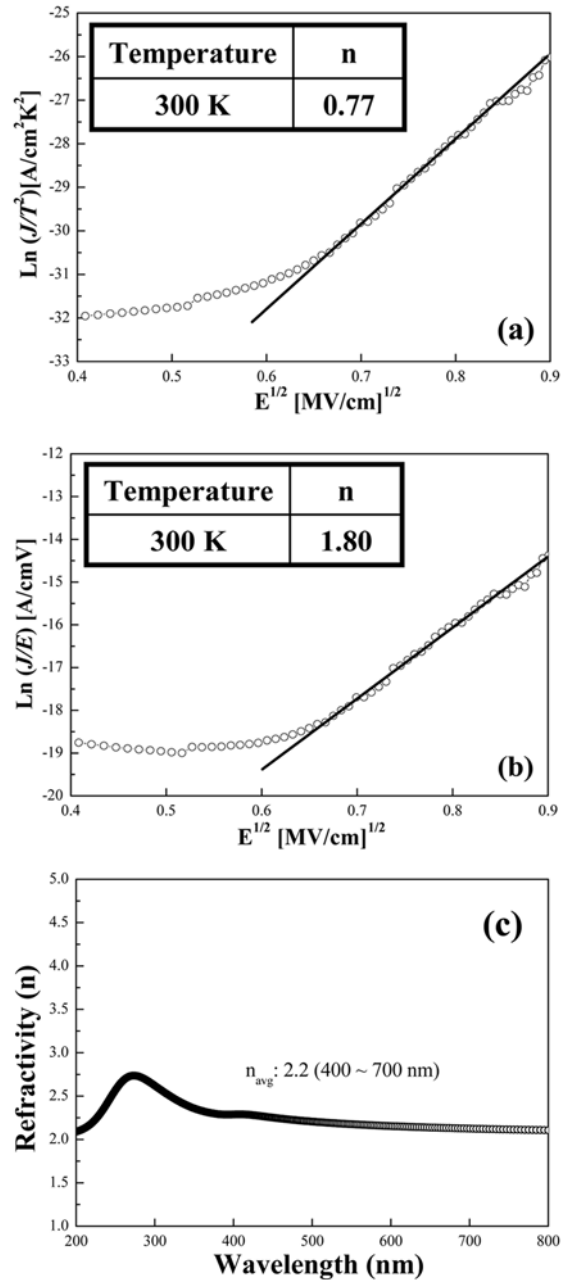
한편, 낮은 일함수를 가지는 TiN 기판에서 성장한 BSmT 막이 예상과 달리 우수한 누설전류 특성을 가지는 원인을 분석하기 위하여 45 나노미터의 두께를 가진 BSmT 막의 누설전류 메커니즘을 조사하였다. 일반적으로 유전체 박막의 누설전류 메커니즘은 비교적 높은 인가 전압 아래에서 Schottky 메커니즘과 Poole-Frenkel 메커니즘의 두 가지 경우를 가지게 된다. 우선, Schottky 메커니즘의 경우 아래의 식 (3)로부터 구할 수 있다.

$$\ln(J/T^2) \text{ vs. } E^{1/2} \quad (3)$$

여기서, J 는 누설전류밀도, T 는 온도, E 는 전기장이다. 식 (3)로부터 직선 영역을 구할 수 있으며, 광 영역(optical range)의 주파수 대역에서 유전상수(K_0)는 식 (3)으로부터 구한 직선의 기울기로부터 계산할 수 있다.¹⁵⁻¹⁶⁾ 만일 계산된 K_0 가 유전체 막의 굴절률(n)을 거듭제곱한 값과 동일하다면, 즉 $K_0 = n^2$ 이라면 누설전류 메커니즘은 전극과의 계면 특성에 주로 의존하는 Schottky 메커니즘을 따른다. 반면에, Poole-Frenkel 메커니즘의 경우 아래의 식 (4)로부터 구할 수 있다.

$$\ln(J/E) \text{ vs. } E^{1/2} \quad (4)$$

식 (4)의 직선 영역의 기울기에서 도출한 K_0 가 n^2 과 동일하면 누설전류 메커니즘은 Poole-Frenkel 메커니즘이다.¹⁵⁻¹⁶⁾ Figs. 6(a)와 (b)는 각각 45 나노미터의 두께를 가지는 BSmT 막의 누설전류를 분석하기 위하여 Schottky 메커니즘과 Poole-Frenkel 메커니즘을 가정하여 각각 식

**Fig. 6.** Plots of (a) $\ln(J/T^2)$ vs. $E^{1/2}$ and (b) $\ln(J/E)$ vs. $E^{1/2}$ of the BaSm₂Ti₄O₁₂ MIM capacitor and (c) the refractive index of the amorphous BaSm₂Ti₄O₁₂ film as a function of wavelength.

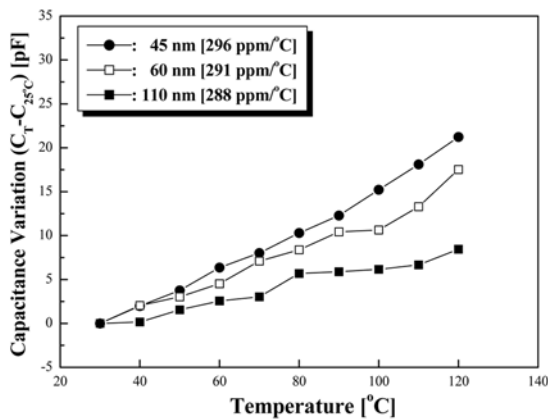


Fig. 7. Capacitance variation of the amorphous $\text{BaSm}_2\text{Ti}_2\text{O}_{12}$ films with various thicknesses measured at 100 kHz as a function of temperature.

(3)과 (4)를 적용하여 그린 그래프이다. Figs. 6(a)와 (b)로부터 얻은 굴절률 n 은 각각 0.77과 1.80이었다. 엘립소미터(ellipsometer)를 이용하여 광 영역에서 측정된 파장에 따른 BSmT 막의 굴절률의 변화를 Fig. 6(c)에 나타내었다. 파장 400 nm~700 nm의 영역에서 측정된 BSmT 막의 평균 굴절률은 대략 2.2 정도였다. 한편 식 (4)의 Poole-Frenkel 메커니즘을 나타내는 식으로부터 계산된 굴절률은 엘립소미터를 사용하여 실험적으로 측정된 값과 거의 유사하였다. 측정값과 계산값은 서로 약간의 차이가 있지만 이는 실험적인 오차에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, BSmT 막의 누설전류 메커니즘은 벌크에 의존하는 Poole-Frenkel 메커니즘을 따르는 것으로 고려된다. 다른 두께를 가진 BSmT 막의 누설전류 메커니즘을 분석한 결과도 역시 유사하였다. 또한 Fig. 6(b)로부터 약 0.65 MV/cm와 0.9 MV/cm의 전기장 영역에서 BSmT 막의 트랩 에너지(trapping energy)는 0.75 eV로 계산되었다.

Fig. 7에서는 여러 두께를 가진 BSmT 박막의 온도 변화에 따른 정전용량의 변화를 나타내었다. 모든 박막의 정전용량은 120°C까지 공기중에서 가열한 후 상온으로 냉각하면서 100 kHz에서 측정된 결과이다. TCC는 BSmT 막의 두께가 감소함에 따라 약간 증가하였으나 모든 BSmT 막에서 300 ppm/°C 이하의 우수한 온도 안정성을 나타내었다. 또한 다양한 주파수에서 측정된 여러 두께의 BSmT 막의 TCC를 Table 1에 나타내었다.

4. 결 론

TiN 기판 위에 300°C에서 안정적으로 균일하게 성장한 BSmT 막의 구조 및 전기적 특성을 조사하였다. 특히, 45 나노미터 크기의 두께를 가진 BSmT 박막은 100 kHz에서 7.60 fF/ μm^2 의 높은 정전용량밀도와 1.5% 이하의 낮은

손실계수를 나타내었다. 뿐만 아니라 1.0~6.0 GHz의 주파수 영역에서도 유사한 값의 우수한 정전용량밀도를 나타내었으며, 품질계수 특성 역시 6.0 GHz에서 67 정도로 비교적 우수하였다. 2차 정전용량의 전압계수와 온도계수는 100 kHz에서 각각 698 ppm/V²와 296 ppm/°C으로 정전용량 전압계수가 비록 ITRS에서 요구하는 100 ppm/V²C보다 약간 높았지만 공정 조건의 개선을 통하여 향상될 수 있다. 또한 45 나노미터 두께의 BSmT 막은 2 V의 인가 전압에서 약 5.11 nA/cm²의 매우 낮은 누설전류밀도 특성을 나타내었으며, 전도 메커니즘은 Poole-Frenkel 메커니즘으로 고려되었다. 따라서, TiN 기판 위에 성장시킨 비정질 BSmT 박막은 RF 및 아날로그 소자용 MIM 캐패시터에 사용가능한 우수한 특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. International Technology Roadmap for Semiconductors. On the Web. Retrieved February 8, 2008 from <http://www.itrs.net>
2. S. B. Chen, C. H. Lai, A. Chin, J. C. Hsieh and J. Liu, IEEE Electron Device Lett., **23**, 185 (2002).
3. H. Hu, C. Zhu, Y. F. Lu, M. F. Li, B. J. Cho and W. K. Choi, IEEE Electron Device Lett., **23**, 514 (2002).
4. 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).
5. C. Wenger, J. Dabrowski, P. Zaumseil, R. Sorge, P. Formanek, G. Lippert and H.-J. Mussig, Mat. Sci. Semicon. Proc., **7**, 227 (2004).
6. S.-Y. Lee, H. Kim, P. C. McIntyre, K. C. Saraswat and J.-S. Byun, Appl. Phys. Lett., **82**, 2874 (2003).
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 Device 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. 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 Dev., **53**, 2312 (2006).
10. K. Wakino, K. Minai and H. Tamura, J. Am. Ceram. Soc., **67**, 278 (1984).
11. Y. H. Jeong, J. B. Lim, S. Nahm, H. -J. Sun, and H. J. Lee, IEEE Electron Device Lett., **28**, 17 (2007).
12. B.-Y. Jang, B.-J. Kim, S.-J. Lee, K.-J. Lee, S. Nahm, H.-J. Sun and H.-J. Lee, Appl. Phys. Lett., **87**, 112902 (2005).
13. Y. H. Jeong, J. C. Kim, J. B. Lim, K. P. Hong, S. Nahm, H. -J. Sun, T. H. Ghong, Y. D. Kim, and H. J. Lee, J. Appl. Phys., **101**, 084108 (2007).
14. Z. Ma, A. J. Becker, P. Polakos, H. Huggins, J. Pastalan, H. Wu, K. Watts, Y. H. Wong, and P. Mankiewich, IEEE Trans. Electron Dev., **45**, 1811 (1998).
15. L. I. Maissel, R. Glang, Handbook of Thin Film Technology, 2nd ed., p. 14-28, McGraw-Hill, New York, USA, (1970).
16. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed., p. 402, John Wiley & Sons, New York, USA, (1981).