

Bi₄Ti₃O₁₂ 박막의 구조적 특성과 유전 특성에 미치는 산소 열처리 효과

Effects of Oxygen Annealing on the Structural Properties and Dielectric Properties of Bi₄Ti₃O₁₂ Thin Films

차유정^{1,2}, 성태근³, 남 산², 정영훈^{1,a}, 이영진¹, 백종후¹

(Yu-Jeong Cha^{1,2}, Tae-Geun Seong³, Sahn Nahm², Young-Hun Jeong^{1,a}, Young-Jin Lee¹, and Jong-Hoo Paik¹)

Abstract

Bi₄Ti₃O₁₂ (BiT) thin films were grown on the Pt/Ti/SiO₂/Si substrate using a metal organic decomposition (MOD) method. Effects of oxygen annealing on the structural properties and dielectric properties of the BiT thin films were investigated. The BiT films were well developed when rapid thermal annealed at >500 °C in oxygen ambient. For the film annealed at 700 °C, no crystalline phase was observed under oxygen free annealing atmosphere while its crystallinity was significantly enhanced as the oxygen pressure increased. The BiT film also exhibited a smooth surface with defect free grains. A high dielectric constant and a low dielectric loss were achieved satisfactory in the frequency range from 75 kHz to 1 MHz. Especially, the BiT film, annealed at 700 °C and 10 torr oxygen pressure, showed good dielectric properties: dielectric constant of 51 and dielectric loss of 0.2 % at 100 kHz. Its leakage current was also considerably improved, being as 0.62 nA/cm² at 1 V. Therefore, it is considered that the oxygen annealing has effects on an enhancement of crystallinity and dielectric properties of the BiT films.

Key Words : Bi₄Ti₃O₁₂, Thin film, Oxygen, Annealing, Dielectric properties

1. 서 론

전자 부품의 소형화에 따라 후막 및 박막 기술이 발전하면서 전통적으로 스피커, 가습기, 초음파 세척기 등과 같은 다양한 분야에서 활용이 되어 왔던 대표적 압전 세라믹 소재인 Pb(ZrTi)O₃는 최근에는 적층형 액츄에이터, 트랜스포머, 초소형 전자기계 (MEMS, Microelectromechanical System) 등의 분야로 그 응용 범위가 더욱 확대되고 있다. 그러나 친환경 소재에 대한 관심이 급증하면서 압

전 세라믹 박막 소재 분야에서도 납을 사용하지 않는 비납계 압전 박막에 대한 관심도 급증하고 있는 실정이다. 대표적인 소재로서 Na_{0.5}K_{0.5}NbO₃ (NKN)을 비롯하여 (Bi,Nd)₄Ti₃O₁₂, Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃ 등 다양한 Bi계 박막에 관한 연구가 많이 보고되고 있다[1-4]. 주로 스퍼터링법이나 유기금속 화학 기상 증착법 (MOCVD, Metal Organic Chemical Vapor Deposition)법으로 제작된 이들과 달리 최근엔 에어로졸 (aerosol) 방법을 이용한 NKN계 세라믹 후막의 강유전 및 압전 특성에 관한 연구 결과가 발표되기도 하였다[5,6]. 소재 개발에 관한 연구뿐만 아니라 압전체 박막을 이용하여 발전기 (power generator)용 소자의 구조 개선에 초점을 둔 연구도 활발하게 진행되고 있다[7,8]. 하지만 비납계 압전체 박막 소재로서 대표적인 NKN은 휘발성이 강한 Na, K을 주원소로 하기 때문에 열처리 시 안정적인 박막을 제조하기가 쉽지 않다. 따라서

1. 요업기술원 전자부품팀
(서울시 금천구 가산동 233-5)
2. 고려대학교 신소재공학과
3. 고려대학교 나노반도체공학과
a. Corresponding Author : yhjeong@kicet.re.kr
접수일자 : 2009. 3. 12
1차 심사 : 2009. 3. 19
심사완료 : 2009. 3. 24

NKN을 대체하는 비납계 압전체 박막 소재 개발에 관한 연구가 요구된다.

페로브스카이트 (Perovskite) 층이 Bi_2O_2 층에 의해 보호를 받고 있는 층상 페로브스카이트 구조를 가지는 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BiT) 박막은 대표적인 강유전체 박막으로서 이들의 고유한 특성인 분극반전과 이력 특성을 이용하여 반도체 산업의 급속한 발전과 함께 비휘발성 강유전체 메모리 (NVFRAM, Non-Volatile Ferroelectric Random Access Memory)에 응용이 가능하다. 뿐만 아니라 BiT 박막은 상형성 온도가 비교적 낮고, 구성 성분도 2 성분계 (Bi, Ti)로서 제작하기가 용이한 장점을 가지고 있다[9]. 그러나 BiT 박막은 분극 특성의 피로 (fatigue) 현상으로 인하여 메모리 소자에 적용하기가 쉽지 않아 상대적으로 이들 박막에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다[10]. 특히 안정적인 BiT 박막을 성장시키기 위한 공정 개발에 관한 연구는 이들 박막을 MEMS 공정, 마이크로 발전기 (micro power generation) 등 다양한 분야에 활용하기 위하여 더욱 절실하다.

이에 본 연구에서는 Bi 계열의 압전체 소재인 BiT를 제조 공정이 비교적 용이한 유기금속 분해법 (MOD, Metal Organic Decomposition)법을 사용하여 박막으로 성장시킨 후 열처리 공정 시 산소 분압에 따라 성장된 BiT 박막의 구조적 특성 및 유전 특성의 변화를 관찰하여 이들 특성에 미치는 산소의 효과를 조사하였다.

2. 실험

Bi계 압전 세라믹 박막을 제조하기 위한 주원료는 (주)고순도화학연구소 (KOJUNDO CHEMICAL LAB CO., LTD; Japan)의 EMOD (Enhanced Metal Organic Decomposition) 코팅 재료를 사용하였으며 박막 증착용 솔루션을 제조하기 위한 출발 원료의 농도와 제조사는 표 1에 나타내었다.

표 1. 출발원료 및 제조회사.

Table 1. Starting materials and production company.

Production Name	Composition	Concentration	Remarks
SYM-BI05	$\text{BiO}_{1.5}$	0.5 (mol/liter)	KOJUNDO CHEMICAL LAB.
SYM-TI05	TiO_2	0.5 (mol/liter)	KOJUNDO CHEMICAL LAB.
1-Butyl Acetate	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$	90 - 100 %	J. T. Baker

출발원료로 사용한 각 전구체 (precursor)는 공기와의 반응 및 수분에 대한 영향을 최소화하기 위해 비활성기체인 아르곤 (Ar) 분위기의 글러브 박스 (glove box) 내에서 칭량하였다. 개별적으로 제작된 precursor인 Bi와 Ti를 조성비에 맞게 혼합하여 0.03 M의 BiT 코팅 솔루션 (coating solution)을 제작하였다. 박막은 스핀 코터 (MIDAS, USA)를 사용하여 500 rpm에서 20초 회전시킨 후, 연속적으로 3000 rpm에서 30초 동안 다시 회전시켜 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판 위에 형성시켰다. 코팅이 끝나면 150 °C에서 1분 동안 baking을 실시하여 유기물을 소진 (burn out)하였다. 그 후 급속 열처리 (RTA, Rapid Thermal Annealing, VTS Korea)를 사용하여 400 °C - 700 °C의 온도범위에서 3분 동안 열처리하여 박막을 제조하였다. 열처리 시 산소 분압을 0 torr에서 10 torr까지 변화시켰다. BiT 박막을 제조하기 위한 공정 순서도를 아래 그림 1에 나타내었다.

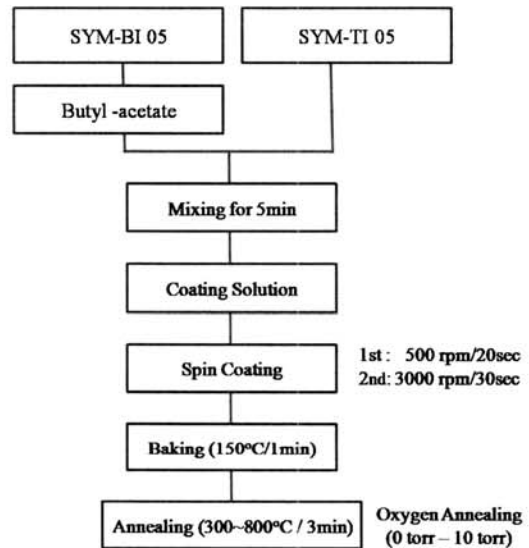


그림 1. $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 박막의 제작 공정도.

Fig. 1. Flow chart of fabrication of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films.

성장된 박막의 결정 구조를 확인하기 위해 X-선 회절 분석을 하였다. 박막의 X-선 회절 패턴은 Rigaku사에서 제조한 RINT/2000 X-선 회절기를 사용하여 얻었으며, Cu-K α Radiation ($\lambda=1.5418$ Å)을 사용하여 촬영하였다. 회절 스펙트럼은 20° - 60°의 회절각 (2 θ) 범위에서 4°/min.의 속도로 측정하여 얻었다.

성장된 박막의 두께를 측정하기 위하여 주사전자 현미경 (SEM: Hitachi S-4300, Japan)을 사용하여 박막의 단면과 표면에 대한 이미지를 촬영하였다. 표면 거칠기와 표면 굴곡을 측정하기 위해 원자력간 현미경 (AFM: JSPM, JEOL, Japan)을 이용하였으며, 시편의 3 μm x 3 μm 면적에서의 평균 거칠기 (RMS: Root Mean Square) 또한 관찰하였다. 성장된 박막의 유전특성을 측정하기 위하여, 상부 전극으로 Pt를 사용한 금속-절연체-금속 (MIM, Metal-Insulator-Metal) 구조의 캐패시터를 제작하였다. 제작된 캐패시터는 직경이 360 μm인 shadow mask를 사용하여 디스크 형태로 제작하였다. 박막의 유전특성은 CPW (Coplanar Waveguide) probe station에서 LCR meter (Agilent 4285A, USA)를 이용하여 75 kHz-1 MHz의 주파수 범위에서 정전용량 및 손실계수를 측정하였고 유전율은 식 (2-1)을 사용하여 계산하였다.

$$\frac{C}{A} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{1}{t} \quad (2-1)$$

여기서 C는 캐패시턴스, A는 캐패시터 면적, ε₀는 진공의 유전율, ε_r는 박막의 유전율, t는 박막의 두께이다. 또한 누설전류밀도 (Leakage Current Density)를 측정하기 위해서 Electrometer (Keithley 617, USA)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판 위에 성장시킨 박막의 열처리 온도의 변화에 따른 XRD 회절 패턴 결과를 나타낸다. 열처리 온도가 400 °C에서 이르기까지 결정상을 나타내는 어떠한 피크도 관찰되지 않았다. 그러나 500 °C에서 열처리 온도를 증가시킨 경우, 결정성을 나타내는 피크를 관찰할 수 있었으며, 이는 Bi₂Ti₄O₁₁ 상에 해당하는 피크로 확인이 되었다. Bi₂Ti₄O₁₁ 상은 BiT 세라믹의 저온상 (low temperature phase)으로서 관찰된 바 있다 [11]. 그러나 제조된 솔루션의 Bi와 Ti의 성분비를 고려하면 Bi₂O₃ 상이 나타나야 하나 XRD 측정결과에서 관찰되지 않음은 강도 (intensity)가 낮기 때문인 것으로 판단된다. 열처리 온도가 600 °C로 높아짐에 따라 BiT 상이 나타나기 시작하였으나 피크의 강도는 매우 낮았으며, 700 °C로 열처리 온도를 증가시키기에 따라 BiT 상의 결정성은 더욱 증가하였음을 알 수 있다.

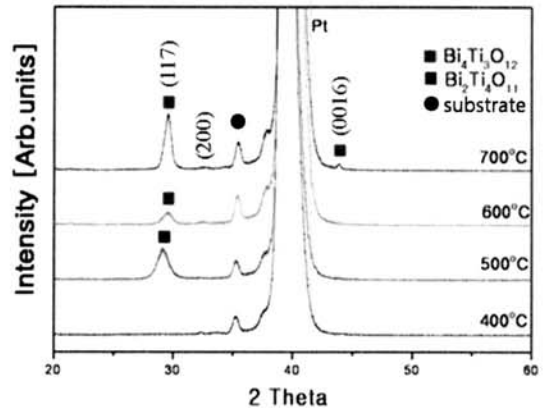


그림 2. 열처리 온도의 변화에 따른 Bi₄Ti₃O₁₂ 박막의 XRD 회절 패턴.

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of Bi₄Ti₃O₁₂ thin films annealed at various temperature.

그림 3은 10 torr 산소 분압에서 다양한 열처리 온도의 변화에 따른 BiT 박막의 SEM 표면 이미지이다. 400 °C에서 열처리한 경우, 이미 XRD 패턴에서 확인한 바와 같이 비정질 상으로서 매끈한 표면을 관찰할 수 있었다.

500 °C로 열처리 온도를 증가시킨 경우, XRD 패턴에서는 Bi₂Ti₄O₁₁ 상이 관찰되었으나, SEM 표면은 여전히 평탄하고 부드러운 표면 이미지가 관찰되었다. XRD 분석에 의하면 비록 결정성은 관찰되었지만 피크가 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 것으로 보아 나노 사이즈의 미세한 grain을 가지는 결정상과 비정질 상이 공존하는 것으로 주된 상임으로 판단된다[그림 2 참조]. 그러나, 600 °C에서 열처리 온도를 더욱 증가시킨 경우는 나노 스케일의 미세한 입자 및 나노 기공 (nano pore)를 가지는 비교적 낮은 밀도의 표면 이미지를 관찰할 수 있었다. 700 °C의 열처리 온도에서는 입자가 더욱 성장함과 동시에 600 °C에서 열처리한 박막의 표면에서 관찰되었던 기공들이 사라지면서 표면 밀도도 크게 향상되었음을 알 수 있다. 그림 4는 산소 분압의 변화에 따라 700 °C에서 열처리한 BiT 박막과 상온, 10 torr의 산소 분압에서 열처리한 BiT 박막의 XRD 회절 패턴을 보여주고 있다. 상온에서 증착한 경우는 결정성을 나타내는 피크는 관찰이 되지 않았다. 뿐만 아니라 산소 없이 700 °C에서 열처리한 박막의 경우도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 700 °C의 열처리 온도에서

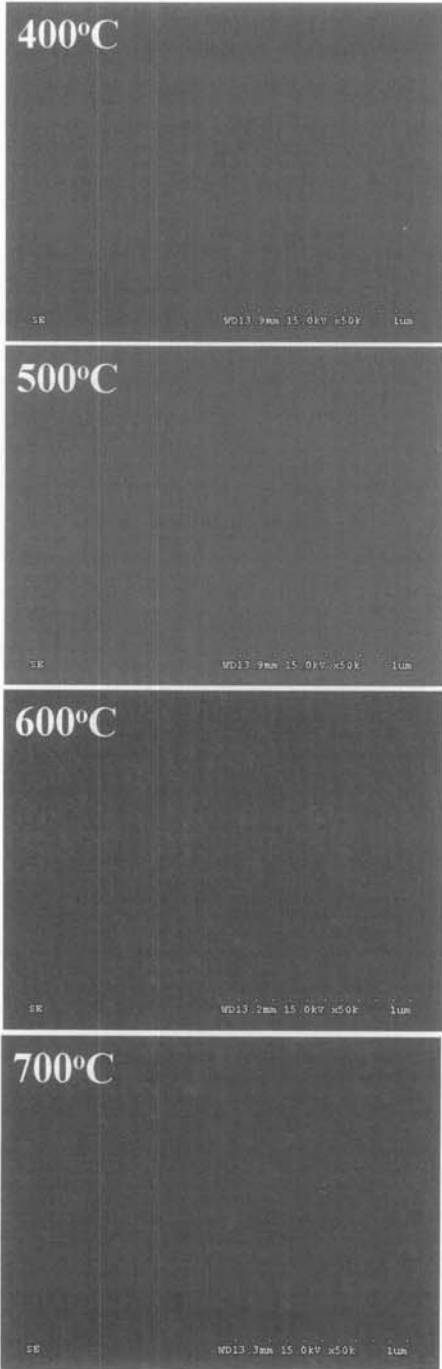


그림 3. 10 torr 산소 분압에서 다양한 열처리 온도의 변화에 따른 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 박막의 SEM 표면 이미지.

Fig. 3. SEM surface images of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin film annealed at various temperatures under 10 torr oxygen pressure.

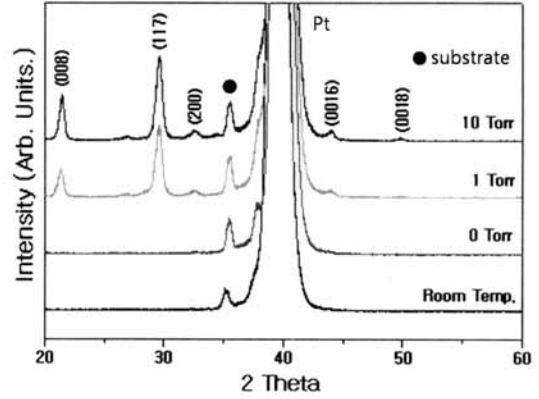


그림 4. 700 °C에서 열처리한 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 박막의 산소 분압의 변화에 따른 XRD 회절 패턴 (단 아래: 상온 10 torr 산소분압 처리).

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films annealed at 700 °C with a variation of annealing temperature (bottom: annealed at room temperature under 10 torr oxygen pressure).

산소분압을 1 torr로 증가시킬 경우 BiT 결정상과 일치하는 피크를 관찰할 수 있었으며, 산소 분압을 10 torr까지 증가시키면 피크의 강도는 더욱 증가한 것으로 보아 결정성이 크게 향상되었음을 알 수 있었다. 이로부터 BiT 박막을 성장시키기 위해서는 열처리 온도도 중요하지만 열처리 시 산소의 분압이 매우 중요함을 알 수 있다.

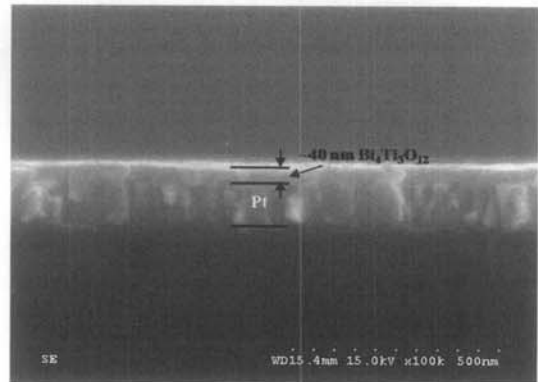


그림 5. 700 °C, 10 torr 산소분압에서 열처리한 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 박막의 단면 SEM 이미지.

Fig. 5. Cross-sectional SEM image of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin film annealed at 700 °C under 10 torr oxygen pressure.

그림 5는 700 °C, 10 torr 산소 분압에서 3분 동안 열처리한 BiT 박막의 단면 SEM 이미지이다. 성장한 결정질 BiT 박막은 약 40 nm 두께를 가지며, 그림에서 볼 수 있듯이 Pt 하부전극과 증착된 BiT 박막과의 경계는 명확한 것으로 보아 BiT 박막은 안정적으로 성장하였음을 알 수 있다.

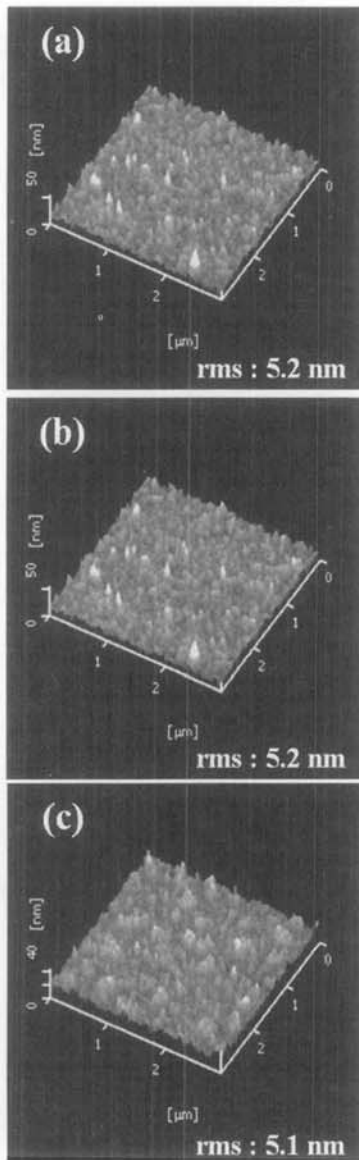


그림 6. 700 °C, 다양한 압력의 산소 분압에서 열처리한 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 박막의 AFM 이미지.

Fig. 6. AFM images of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films annealed at 700 °C under various oxygen pressures.

그림 6은 700 °C에서 다양한 압력의 산소 분압 아래 열처리한 BiT 박막의 AFM 이미지이다. 산소 분압이 0 torr에서 10 torr까지 증가함에 따라 표면 거칠기 (roughness)는 5.8 nm에서 5.1 nm로 약간 감소하였다. 이로부터 열처리 시 산소는 표면의 거칠기를 감소시켜 안정적인 박막을 성장시키는데 효과가 있음을 알 수 있다.

다양한 산소 분압에서 700 °C에서 열처리한 BiT 박막의 주파수 변화에 따른 유전상수 및 손실계수를 그림 7에 나타내었다. 100 kHz의 주파수에서 비유전율과 유전손실은 각각 51과 0.2 %를 나타내었으며 주파수가 1 MHz까지 증가함에 따라 비유전율은 거의 일정하였으며, 유전손실은 약간 증가하였으나 1 MHz에서도 모든 박막의 유전손실이 2.5 % 이하로 낮은 우수한 특성을 보여주었다. 일반적으로 교류전기장을 인가한 상태에서 전기장의 방향에 따라 유전분극이 바뀌는 강유전체는 유전 분산 (dielectric dispersion)에 의해서 주파수가 증가함에 따라 유전분극이 전기장의 변화를 따라가지 못하여 비유전율이 감소하고 유전손실이 발생하게 된다. 그러나 기존의 보고에 따르면 10 kHz-10 MHz까지의 주파수에서는 쌍극자 (dipole)들의 배향에 의한 배향분극이 비유전율에 기여한다고 한다[12]. 본 연구의 측정주파수 범위 내에서 BiT 박막의 비유전율에 기인하는 분극기구는 주로 쌍극자들에 의한 것이며 전극과 BiT 박막 사이의 계면에서 발생하는 미세한 계면분극에 의한 효과만이 기인한다고 생각된다. 그러므로 본 연구의 주파수 범위에서 BiT 박막의 유전상수는 주파수가 증가함에 따라 거의 일정한 특성을 나타내었다.

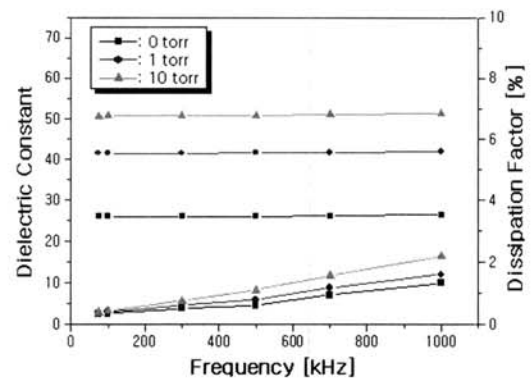


그림 7. 700 °C, 다양한 산소 분압에서 열처리한 $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 박막의 주파수 변화에 따른 유전상수 및 손실계수.

Fig. 7. Dielectric constants and dissipation factors of the $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin film annealed at 700 °C under various oxygen pressures.

누설 전류 특성은 강유전체 박막을 메모리 소자에 응용하고자 할 때 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 누설전류가 증가하면 소비전력이 증가하고 박막에 인가되는 전기장이 제한되는 등의 문제가 발생되기 때문이다. 그림 8은 다양한 산소 분압 아래, 700 °C에서 열처리한 40 nm BiT 박막의 인가전압에 따른 누설 전류 밀도 변화를 나타낸 것이다. 그림 8에서 보듯이, 5 V 아래의 인가전압에서는 산소 분압이 증가함에 따라 누설 전류 밀도가 감소하였으나 인가전압을 5 V 이상으로 계속해서 증가시키면 항복 (breakdown)이 일어났다. 산소 열처리를 하지 않은 경우는 XRD 패턴에서 이미 확인하였듯이 비정질 박막으로 항복전압이 12 V 이상으로 높았다. 그러나 산소 분압을 1 torr, 10 torr로 증가시키면서 결정화된 BiT 박막의 항복전압이 각각 5.2 V, 5.5 V로 크게 감소하였다. 이는 박막이 결정화되면서 전도성 증가에 기인하는 입계 밀도가 증가함에 따른 것으로 판단된다. 특히 10 torr의 산소분압에서 열처리된 BiT 박막은 1 V에서 0.62 nA/cm²의 매우 낮은 누설전류 특성을 나타내었으며, NVFRAM에 응용하기에 충분히 가능성이 있다고 생각된다. 하지만 전압의 증가에 따라 급격히 증가하는 누설 전류 특성은 열처리 과정 중에 발생한 Bi와 산소공공들이 전도에 기여하여 항복전압 특성을 급격히 저하시키기 때문에 이의 개선을 위하여 도너 도핑 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

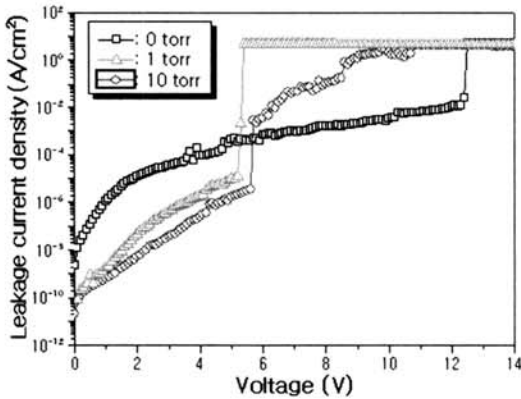


그림 8. 700 °C, 다양한 산소 분압에서 열처리한 Bi₄Ti₃O₁₂ 박막의 누설전류밀도.

Fig. 8. Leakage Current Densities of the Bi₄Ti₃O₁₂ thin films annealed at 700 °C under various oxygen pressures.

4. 결 론

MOD 법을 사용하여 BiT 박막을 700 °C의 열처리 온도 및 산소 분위기에서 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판 위에 안정적으로 성장시켰으며 산소 분압을 변화시키면서 BiT 박막의 구조적 특성 및 유전 특성의 변화를 분석하여 산소 열처리에 따른 효과를 조사하였다. 이에 따른 결과는 다음과 같다.

1. 상온에서 400 °C까지 열처리한 경우는 결정화되지 않았으나 500 °C에서는 Bi₂Ti₄O₁₁상이, 600 °C 이상의 온도에서 BiT 결정상이 생성되었다.
2. 700 °C에서 열처리된 40 nm BiT 박막은 박막의 산소 분압이 증가함에 따라 결정성은 증가하였으며, 표면거칠기 (roughness)는 감소하였다.
3. 700 °C, 10 torr의 산소 분압에서 열처리한 40 nm BiT 박막의 유전상수와 유전손실은 100 kHz에서 각각 51과 0.2 %를 나타내었으며 75 kHz - 1 MHz의 측정 주파수 범위에서 유전상수의 변화는 없었으며 유전손실은 주파수가 증가함에 따라 1 MHz에서도 2.5 % 이하로 안정적인 특성을 나타내었다.
4. 누설전류밀도는 산소 분압의 증가에 따라 개선되었으며 700 °C, 10 torr의 산소 분압에서 열처리한 BiT 박막은 결정화되면서 항복전압이 5.5 V로 약간 감소하였으나 1 V에서 0.62 nA/cm²으로 매우 우수한 누설전류특성을 나타내었으며 향후 도너도핑 등에 대한 추가적인 연구를 통하여 메모리 소자 등에 대한 활용이 기대된다.

감사의 글

본 연구내용은 요업기술원에서 수행한 “기본연구사업”의 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] M. Blomqvist, J.-H. Koh, S. Khartsev, A. Grishin, and J. Andreasson, "High-performance epitaxial (K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃ thin films by magnetron sputtering", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, p. 337, 2002.
- [2] A. Z. Simões, M. A. Ramirez, A. Ries, J. A. Varela, E. Longo, and R. Ramesh, "Electromechanical properties of calcium bismuth titanate films: A potential candidate

- for lead-free thin-film piezoelectrics", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p. 072916, 2006.
- [3] F. Rémondière, A. Wu, P. M. Vilarinho, and J. P. Mercurio, "Piezoforce microscopy study of lead-free perovskite $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ thin films", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, p. 152905, 2007.
- [4] T. Kojima, T. Sakai, T. Watanabe, and H. Funakubo, "Large remanent polarization of $(\text{Bi,Nd})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ epitaxial thin films grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, p. 2746, 2002.
- [5] C.-R. Cho, I. Katardjiev, M. Grishin, and A. Grishin, " $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$ thin films for voltage controlled acoustoelectric device applications", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, p. 3171, 2002.
- [6] J.-H. Ryu, J.-J. Choi, B.-D. Hahn, D.-S. Park, and W.-H. Yoon, "Ferroelectric and piezoelectric properties of $0.948(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3$ - 0.052LiSbO_3 lead-free piezoelectric thick film by aerosol deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 92, p. 012905, 2008.
- [7] W. J. Choi, Y. Jeong, J.-H. Jeong, R. Sood, and S. G. Kim, "Energy harvesting MEMS devices based on thin film piezoelectric cantilevers", *J. Electroceram.*, Vol. 17, p. 543, 2006.
- [8] F. Marco, F. Vittorio, M. Daniele, and T. Andrea, "Modeling, fabrication and performance measurements of a piezoelectric energy converter for power harvesting in autonomous microsystems", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 55, p. 2096, 2006.
- [9] E. Kato, Y. Watanabe, T. Tsukamoto, and T. Tsuchiya, "Preparation of highly oriented Bismuth titanate thin films by sol-gel process", *J. Ceram. Soc. Jpn.*, Vol. 104, p. 1015, 1996.
- [10] T.-J. Cho, D.-K. Kang, and B.-H. Kim, "Electrical properties of sol-gel derived ferroelectric $\text{Bi}_{3.35}\text{Sm}_{0.65}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ thin films by rapid thermal annealing", *Trans. EEM*, Vol. 6, p. 51, 2005.
- [11] E. I. Speranskaya, I. S. Rez, L. V. Kozlova, V. M. Skorikov, and V. I. Slavov, " Bi_2O_3 - TiO_2 system", *Inorg. Mater.*, Vol. 1(2), p. 232, 1965.
- [12] S. K. Dey and J. J. Lee, "Cubic paraelectric (nonferroelectric) perovskite PLT thin films with high permittivity for ULSI DRAMS's and decoupling capacitors", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 39(4), p. 1607, 1992.