

## TmBCO Coated Conductors 제조 및 전류 전송 특성 평가

권오정\*, 고락길\*\*, 배성환\*, 구현\*, 정명진\*, 오상수\*\*, 박찬\*\*\*\*  
 서울대학교 재료공학부\*, 한국전기연구원\*\*, 서울대학교 신소재공동연구소\*\*\*

### Fabrication and Current Transport Properties of TmBCO Coated Conductors

O-Jong Kwon\*, Rock-Kil Ko\*\*, Sung-Hwan Bae\*, Hyun Koo\*, Myung-Jin Jung\*, Sang-Soo Oh\*\*, Chan Park\*\*\*\*  
 Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University Korean University\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute\*\*  
 Research Institute of Advanced Materials(RIAM), Seoul National University Korean University\*\*\*

**Abstract** - 고온초전도체 REBCO(RE=rare earth) 선재는 높은 전류전송밀도를 가지고 있기 때문에 고용량의 전류가 요구되는 응용분야에 사용되어 전력기기 등의 성능을 높일 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이전까지 대부분의 REBCO 선재 연구들은 GdBCO, NdBCO, YBCO 등 비교적 Tc값이 높은 고온초전도체에 집중되어 왔다. 반면에 TmBCO는 대부분의 REBCO 보다 Tc값이 낮기 때문에 선재 연구 분야에서 거의 주목받지 않았다. 하지만 본 연구 결과에 따르면 TmBCO 선재는 비교적 낮은 Tc(88K) 값에도 불구하고 우수한 전류전송밀도( $J_c=2.3\text{MA}/\text{cm}^2$ ) 특성을 나타내기 때문에 고온초전도 선재로서 활용이 가능하다. 또한 NdBCO 선재에 비해 낮은 기판온도에서 제조가 가능함으로써 공정상의 이점을 가질 수 있음을 확인하였다.

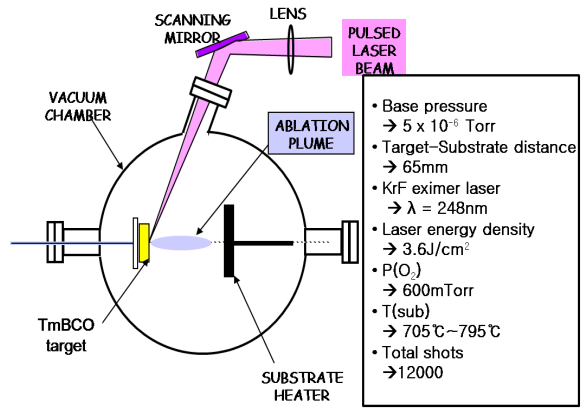
#### 1. 서 론

고온 초전도체 (high temperature superconductor:HTS)인  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (RE=rare earth, REBCO) 재료들은 액체질소(77K)의 온도 이상에서도 초전도 특성을 나타내며, 구리와 같은 금속도체보다 훨씬 높은 전류 밀도(current density)를 가지고 있다. 그래서 전력케이블, 모터등과 같은 대용량 전류가 요구되는 전력기기들에서 기존의 금속 도체를 HTS REBCO 선재로 대체하기 위해 HTS REBCO를 선재(tape/wire) 형태로 제조하기 위한 많은 연구가 진행되어 오고 있다. REBCO 선재는 일반적으로 금속 테이프 위에 박막 형태로 제작되며 금속 테이프와 REBCO 박막 사이에 texture 전달, 확산방지 등의 역할을 하는 다층 세라믹 박막을 증착하여 제조한다. REBCO 선재의 초전도 층으로서 REBCO중 YBCO가 가장 먼저 연구가 시작되었으며 최근에는  $\text{RE}^{3+}$  ion 사이지가 큰 REBCO(NdBCO, SmBCO, GdBCO, etc)을 이용한 선재가 활발히 연구되고 있다[1]. 반면 크기가 작은  $\text{RE}^{3+}$  ion을 사용한 REBCO 재료들은 비교적 낮은 초전도 전이 온도( $T_c$ ) 때문에 많은 관심을 받지 않고 있다. RE=Tm의 이온 환경은 대부분의 rare earth 원소 중에서 가장 작으며, 벌크 TmBCO의 초전도 전이 온도는 약 91K으로 여타 REBCO보다 낮고 YBCO와 비슷하다[2][3]. 이전 연구에서  $\text{SrTiO}_3$  단결정 위에 제조된 TmBCO 박막은 88K의 낮은 Tc값에도 불구하고 높은 전류 밀도 ( $J_c=4.6\text{MA}/\text{cm}^2$  at 62nm)를 가질 수 있음을 확인하였다[1]. 본 연구에서는 TmBCO 박막을 사용한 선재를 제조 하여 전류전송특성을 분석하였으며, 이를 토대로 TmBCO 박막을 이용한 선재의 응용 가능성을 논의하였다.

#### 2. 본 론

TmBCO 선재 제조를 위해 NiW/CeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub> 구조의 RaBITS(rolling-assisted biaxially textured substrate) 기판을 사용하였다. TmBCO 박막은 PLD(Pulsed laser deposition) 공정으로 제조하였으며 3.6J/cm<sup>2</sup>의 에너지 밀도의 레이저(KrF 248nm)를 Tm1Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> 타겟에 12000번 조사하였다. 기판은 silver-paste를 사용하여 히터 표면에 직접 부착하였으며, 기판온도는 히터 내부에 삽입된 k-type thermocouple을 통해 측정하였다. 기판과 타겟 사이의 거리는 65 mm이다. 진공 챔버 내부의 압력은 5x10<sup>-6</sup> Torr 이하로 떨어뜨린 후에 MFC(Mass Flow Control)를 통해 O<sub>2</sub> gas를 흘려주며 600 mTorrO<sub>2</sub>의 일정한 값을 유지시켰다.

기판은 50℃/min으로 승온 하였으며, TmBCO 박막 증착 중에는 705℃~785℃의 온도에서 일정하게 유지시켰다. 증착 과정이 끝난 후에는 -20℃/min의 속도로 450℃까지 서냉하였다. TmBCO 박막의 산화 공정을 위해 챔버 안을 550 TorrO<sub>2</sub>의 압력으로 바꾸고서 450℃, 30min 동안 in-situ annealing 하였다. 산화 공정이 끝난 후에는 300℃까지 -10℃/min의 속도로 온도를 낮추고, 300℃에서 24℃까지 별도의 온도 제어 없이 자연 냉각시켰다. TmBCO 박막의 Ic(critical current)와 Tc(critical transition temperature) 측정을 위한 Ag 전극은 별도의 패턴 없이 RF sputter를 사용하여 박막 전 면적에 약1 μm 두께로 증착하였다. 그리고 550℃와 1기압의 O<sub>2</sub> 산화 분위기에서 2 hr 동안 ex-annealing을 실시하여 Ag 전극의 접촉저항을 낮추었다. Ic 측정은 액체질소를 사용하여 77K의 온도와 외부자장이 가해지지 않은 조건에서 측정하였다. 각 시편의 Tc값은 크라이오제닉 칼러를 사용하여 온도를 제어하며 측정하였다. TmBCO 박막의 상 분석과 in-plane texture를 측정하기 위하여 각각 Bruker XRD를 사용하였다.

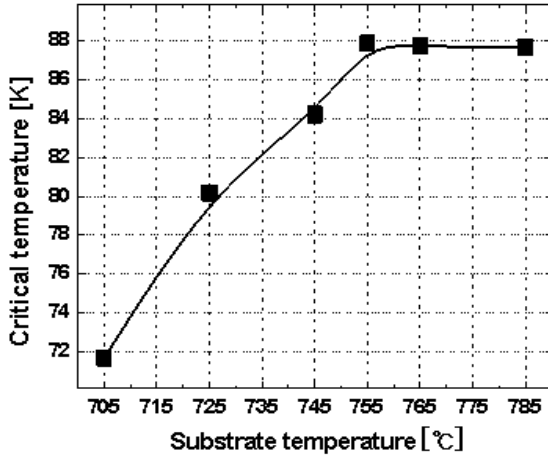


〈그림 1〉 TmBCO 박막 증착 공정

705℃와 785℃ 사이의 온도에서 NiW/CeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub> 기판 위에 증착된 TmBCO 박막들은 XRD theta-2theta 측정에 따르면 모든 샘플에서 TmBCO의 날카로운 (001) 피크들만 확인되었으며, 그 외 TmBCO의 다른 방향의 면에 대한 피크는 전혀 관찰되지 않았다. 그리고 705℃와 785℃ 사이에서 증착된 모든 TmBCO 박막들은 (103)면에 대한 phi-scan peak의 FWHM이 6° 이내의 값을 보이는 in-plane texture를 가지고 성장하였음이 확인되었다. 초전도 박막의 Jc(critical current density) 특성은 박막의 texture된 정도에 영향을 크게 받으며, 단결정에 가까운 texture 정도를 가질수록 더 많은 전류를 흘릴 수 있는 것으로 알려져 있다[4]. TmBCO 박막의 theta-2theta diffraction pattern과 TmBCO (103)면에 대한 phi-scan pattern들의 분석 결과에 따르면 705℃~785℃ 사이의 온도 영역에서 NiW/CeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub> 기판 위에 증착된 TmBCO 박막들은 단

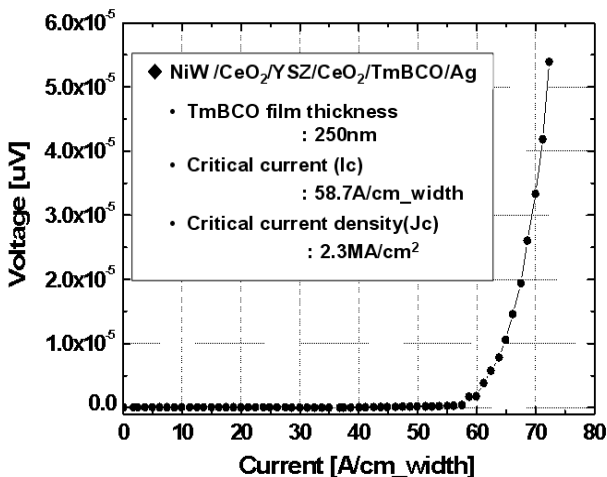
결정에 가까운 texture를 가지고 성장되었음이 확인 되었다.

TmBCO 박막 증착시 사용된 기판 온도와 NiW/CeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub>/TmBCO(CYC/TmBCO)의 Tc 값의 변화를 <그림2>에 나타내었다. 705℃~755℃의 기판온도 영역에서는 제조된 CYC/TmBCO는 기판온도가 높아질수록 TmBCO 박막의 Tc값이 선형적으로 증가하였으며, 최종적으로 755℃의 기판온도에서 제조된 CYC/TmBCO는 문헌상의 TmBCO의 Tc 값보다 약 3K정도 낮은 88K를 나타내었다. 755℃ 이상의 기판온도에서 제조된 CYC/TmBCO의 Tc 값은 약 88K로 일정한 Tc값을 유지하였다.



<그림 2> 기판온도 vs TmBCO 박막의 Tc

CYC/TmBCO들의 Ic 값은 755℃의 기판온도에서 제조되었을 때 가장 높은 것으로 확인되었다(Ic=58.7MA/cm\_width at 77K, self field). Step-profilometer를 통해 확인된 TmBCO 박막의 두께는 250nm이며, Ic값과 두께로부터 계산된 CYC/TmBCO의 Ic 값은 2.3MA/cm<sup>2</sup>이다. 이는 지금까지 알려진 TmBCO 선재의 전류전송 특성값(Jc=1.0MA/cm<sup>2</sup>, Ic=19.7 A/cm\_width)[1] 과 비교하면 약 2배정도 향상된 값이다. 또한 같은 PLD system에서 buffered metal substrate 에 증착된 NdBCO 박막의 최적 증착 조건과 비교해보면 CYC/TmBCO의 기판온도가 약 20℃정도 낮다[3].



<그림 3> TmBCO 선재의 Ic 특성

### 3. 결 론

PLD 박막 증착 공정을 사용하여 NiW/CeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub> 구조의 buffered metal substrate위에 TmBCO 선재를 성공적으로 제조하였다. 755℃의 기판온도에서 제조된 TmBCO 선재는 비교적

낮은 Tc값(=88K)을 가짐에도 불구하고 Jc=2.3MA/cm<sup>2</sup> (at 77K, self field)의 높은 Jc 값을 보였으며, critical current, Ic 값은 58.7 A/cm\_width(at 77K, self field)을 나타내었다. 본 연구를 통해서 TmBCO 선재는 기존의 REBCO(GdBCO, NdBCO, YBCO, SmBCO, etc.) 선재와 비교될 만큼 우수한 전류전송특성을 가진다는 것을 확인하였다. 또한 TmBCO 선재는 NdBCO 선재보다 낮은 기판 온도에서 제조가 가능하다는 공정상의 이점을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.(RIAM)

### [참 고 문 헌]

- [1] Rock-kil Ko, O-Jong Kwon, Kyu-Jeong Song, Dawood Ahmad, Chan Park, Joon-Ho Lee, Seung-Su An, Nam-Jin Lee, Sang-Soo Oh and young-Cheol Kim, "TmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> Superconducting Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 17, no.2, pp.3545-3548, 2007.
- [2] J.G. Lin, C.Y. Huang, Y. Y. Xue, C. W. Chu, X. W. Cao and J. C. Ho, "Origin of the R-ion effect on Tc in RBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>," Phys. Rev. B, vol. 51, no. 18, pp.12900-12903, 1995.
- [3] C. Sulkowski, D. Wlosewicz, M. Matusiak, T. Plackowski, A. Sikora and R. Horyn, " Superconducting and transport properties of TmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> and comparison to YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>," Physica C, vol. 387, pp. 187 - 190, 2003.
- [4] D. Dimons, P. Chaudghari, J. Mannhart, and F. K. LeGoues, "Orientation Dependence of Grain-Boundary Critical Currents in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> Bicrystals," Phys. Rev. Lett., vol. 61, no. 2, pp.219-222, 1988.
- [3] S. H. Wee, S. H. Moon, C. Park, and S. I. Yoo, "High-Jc NdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> coated conductors on IBAD-YSZ templates by PLD process," Physica C, vol.426-431, pp.990-995, 2005.