

YBCO coated conductor의 초전도 특성에 미치는 박막 증착 온도/압력의 영향

박찬, 고락길, 정준기, 최수정, 송규정, 박유미, 신기철*, Dongqi Shi, 유상임**
한국전기연구원, 부산대학교 무기재료공학과*, 서울대학교재료공학과**

The effect of deposition temperature/pressure on the superconducting properties of YBCO coated conductor

Chan Park, Rok-Kil Ko, Jun-Ki Chung, Soo-Jeong Choi, Kyu-Jeong Song, Yu-Mi Park, Ki-Chul Shin*, Dongqi Shi, Sang-Im Yoo**

Korea Electrotechnology Research Institute, Busan National University*, Seoul National University**

Abstract

YBCO coated conductor, also called the 2nd generation high temperature superconducting wire, consists of oxide multi-layer hetero-epitaxial thin films. Pulsed laser deposition (PLD) is one of many film deposition methods used to make coated conductor, and is the one known to be the best to make superconducting layer so far. As a part of the effort to make long length coated conductor, the optimum deposition condition of YBCO film on single crystal substrate (SrTiO₃) was investigated using PLD. Substrate temperature, oxygen partial pressure, and laser fluence were varied to find the best combination to grow high quality YBCO film.

Key Words : Coated conductor, YBCO, Thin film, Pulsed laser deposition

1. 서론

액체질소온도에서 고자장 대전력기기에 사용될 수 있는 초전도 특성을 가지는 YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) Coated conductor는 차세대 고온 초전도 선재로 알려져 있으며, 2축 배향성을 가지는 금속 기판 혹은 다결정 금속기판위에 증착된 2축배향 산화물층을 이용한 다층 산화물 hetero-epitaxial 박막 증착 방법으로 만들어진다. Coated conductor는 금속 모재/여러층의 산화물 완충층/초전도층/보호층의 구조를 가지며, 초전도층에 요구되는 2축배향을 어디서부터 (금속 모재 혹은 첫번째 완충층) 어떻게 얻느냐에 따라 Rolling-Assisted-Biaxially-Textured-Substrate (RABiTS)[1], Ionized Beam Assisted Deposition (IBAD)[2], Inclined Substrate Deposition (ISD)[3]등의 방법으로 제조된다.

Pulsed laser deposition (PLD), sputtering, evaporation, sol-gel, metal organic decomposition (MOD), metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD), liquid phase epitaxy (LPE) 등의 다양한 방법들을 이용하여 다층의 산화물층들을 경제적으로 만들려는 연구와 선재로 사용하기 위한 장산화 연구가 진행되고 있다. 가장 길고 성능이 우수한 coated conductor는 PLD 방법으로 제조되고 있다. PLD법은 고가의 장비가 필요하고 증착속도가 빠르지 않다는 단점에도 불구하고 coated conductor의 초전도층을 제조하는데 가장 적합한 공정으로 받아들여지고 있다.[4]

금속기판위에 다층의 산화물 완충층과 초전도층을 증착하기 위한 기초실험으로 단결정기판을 이용하여 초전도층의 증착조건을 알아보는 연구를 수행하

었다. 박막 증착은 PLD법을 이용하였으며, 기판 온도, 산소분압, 레이저에너지 등을 변화시키면서 증착되는 YBCO 박막의 특성을 분석하여 최적의 증착조건을 구하는 연구를 수행하였다.

2. 실험

YBCO박막 증착을 위해 사용된 PLD system은 Fig. 1 과 같은 구성을 가진다. 타겟면과 30°의 각도로 입사되는 KrF 엑시머 레이저(Lamda Physik LPX 220i, 248nm, focusing된 1 mm × 4 mm 크기의 레이저빔)를 사용하였다. 타겟과 기판 사이의 거리 65mm, 기판 온도 720℃~830℃, 산소분압 200mTorr, 300mTorr, 레이저 에너지 밀도 1~3 J/cm²를 이용하여 YBCO 박막을 증착하였다. 독일 Crystec Inc.의 SrTiO₃ (STO) 단결정 기판 (0.5mm 두께)을 silver paste를 이용하여 히터에 고정시켰다. YBCO박막의 두께는 100~200 nm 였다.

제작된 YBCO박막은 박막의 집합조직을 살펴보기 위하여 Bruker사의 D8 Discover XRD와 AXS HI-STAR area detector 로 이루어진 GADDS (General Area Detector Diffraction System)를 이용하여 X-선 회절분석을 행하였다. 박막 표면 미세구조는 Hitachi사의 S-2700 SEM을 이용하여 관찰하였다. YBCO 박막의 초전도 특성은 1μm 정도의 두께를 가지는 Ag 층을 sputtering을 이용하여 증착한 후 측정하였다. YBCO 박막의 두께는 Tencor 사의 Alpha-step 500을 이용하여 측정하였다. I_c와 T_c는 자체 제작한 별도의 장비를 이용하여 4-probe 법으로 측정하였다.

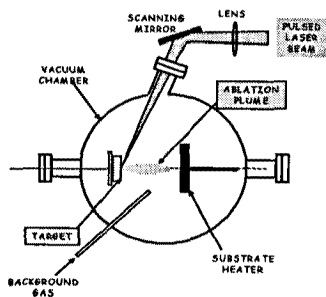


그림 1. schematic diagram of PLD system

3. 결과 및 고찰

그림 2는 300mTorr 산소분압, 830℃ 기판온도에서 입사 레이저 에너지를 달리 하면서 증착한 YBCO 박막들의 θ -2 θ XRD패턴을 보여준다. 모든 박막들이 c-축으로 배향되어 있음을 보여주고 있다. 에너지밀도와 산소압을 달리하였을 때 YBCO (005)면의 Rocking curve fwhm값은 800℃이하의 기판온도에서는 0.4~0.65의 값을 가졌고 810℃이상의 기판온도에서는 비교적 낮은 값인 0.4~0.5였다. 그림 3은 830℃ 기판온도, 300mTorr 산소압, 1.5 J/cm² 에너지 밀도로 증착한 박막의 in-plane orientation을 알 수 있는 ϕ (phi) 스캔을 나타내며, 그 fwhm은 ~1°였다.

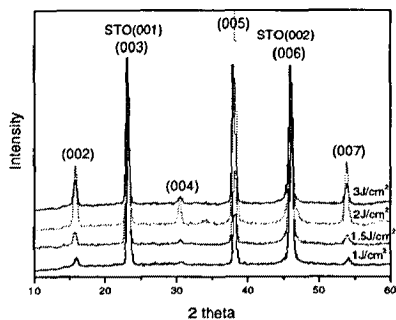


그림 2. θ -2 θ patterns of YBCO films deposited with different laser energy densities

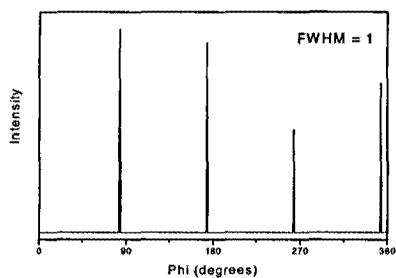


그림 3. XRD phi scan for (103) peak of YBCO film deposited with oxygen pressure of 300mTorr, substrate temperature of 830℃ and laser energy density of 1.5J/cm²

그림 4의 (a)와 (b)는 산소 분압이 300mTorr일 경우의 증착온도에 따른 초전도 특성의 변화를 보여준다. 레이저 펄스 에너지 150mJ와 타겟과 기판 사이의 거리 65mm를 사용하였을 경우 YBCO 박막의 증착속도는 약 0.1Å/shot 이었다. 기판온도가 800C 이상 까지 증가할수록 Jc 값이 증가함을 알 수 있다. 접촉식 히터를 사용할 경우 단결정 기판과 금속기판의 온도가 상당히 다를 수 있으므로, 금속기판을 이용하여 YBCO 박막을 제조할 경우 적당한 기판온도의 범위는 단결정 기판의 경우보다 30C ~ 50C 낮다고 볼 수 있다.

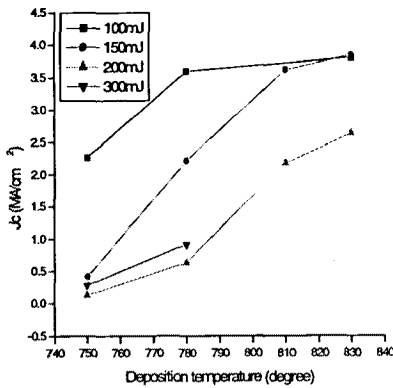


그림 4. The critical current densities of YBCO films versus the substrate temperature at oxygen pressure of 300mTorr.

그림 5는 STO 단결정을 이용하여 기판온도 830C, 산소분압 300mTorr, 레이저 펄스 레이트 10Hz, 레이저 펄스 10,000shot의 조건에서 증착한 YBCO 박막의 I-V 특성을 보여준다. 임계전류 (Ic) 와 임계전류밀도 (Jc) 는 각각 14.8A 와 3.8 MA/cm²이었으며, coated conductor의 Ic값을 발표할 때 널리 사용되는 1cm 너비의 박막의 경우로 환산하면 약 49A/cm-width의 Ic를 가진다. 그림 6은 주사전자현미경으로 관찰한 표면 미세구조를 보여준다. PLD법으로 증착된 박막의 특징으로 알려져있는 표면입자들(particulates)이 많이 관찰된다. 침상형태의 입자는 0.2~1µm정도의 크기분포를 가지고 있는데, 일반적으로 이러한 침상형태의 입자들은 a-축 배향된 YBCO입자 혹은 Cu-rich phase인 것으로 알려져 있다. 기존의 문헌[5]과 비

교시 입자의 크기가 작고 XRD 결과에서도 a-축 성장을 보여주는 피크가 관찰되지 않은 것으로 볼 때 a-축으로 성장된 입자는 아닌 것으로 보여지며 이의 규명을 위하여 EDS, EPMA 등을 통한 분석이 진행중이다.

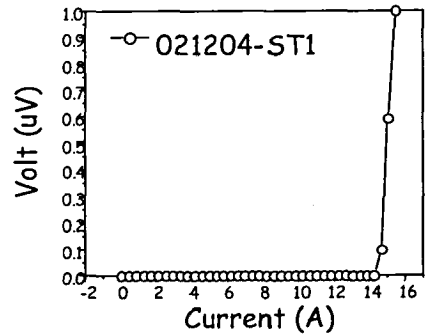


그림 5. I-V curve of YBCO film deposited at substrate temperature 830C, oxygen pressure 300mTorr.

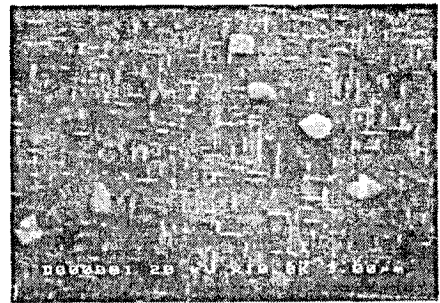


그림 6. Scanning electron micrograph of YBCO film deposited at 300mTorr oxygen pressure, 830 °C substrate temperature, and 1.5J/cm² laser energy density.

4. 결론

금속기판을 이용하여 YBCO coated conductor 초전도 선재를 제조하기 위한 기초단계의 실험으로, 단결정 기판을 이용하여 YBCO 초전도 박막 증착조건을 알아내기 위한 실험을 행하였다. pulsed laser deposition법과 SrTiO₃ (100) 단결정이 사용되었다. 기판온도, 산소분압, 레이저 펄스 에너지 등을 변수로 하여 coated conductor 제조에 이용할 수 있는 적합한 YBCO 증착조건을

찾았다. 800C 이상까지 기판온도가 증가할수록 임계전류밀도 (J_c) 가 증가하는 경향을 나타내었으며, 이로부터 금속기판을 사용할 경우의 적당한 기판온도 및 산소분압 범위를 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구 개발 사업인 차세대 초전도 응용기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 사의 글 내용이 들어가는 부분입니다.

참고 문헌

- [1] D. P. Norton, A. Goyal, J. D. Budai, D. K. Christen, D. M. Kroeger, E. D. Specht, Q. He, B. Saffian, M. Paranthaman, C. E. Klabunde, D. F. Lee, B. C. Sales, and F. A. List, "Epitaxial YBa₂Cu₃O₇ on biaxially Textured Nickel (001): An approach to superconducting tapes with high critical current density", *Science*, 274, 755 (1996)
- [2] Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno, and Y. Ikeno, "processing and transport characteristics of YBCO tape conductor formed by IBAD method.", *Appl. Phys. Lett.* 60, 769 (1992)
- [3] K. Fujino, N. Yoshida, S. Okuda, T. Hara, T. Ohkuma, and H. Ishii, *Advances in Superconductivity VII*, p.629, Springer, Tokyo (1995); K. Hasegawa, K. Fujino, H. Mukai, M. Konishi, K. Hayashi, K. Sato, S. Honjo, Y. Sato, H. Ishii, and Y. Iwata, *Applied Superconductivity*, 4, 487 (1996).
- [4] Rajiv K. Singh and D. Kumar, "Plused laser deposition and characterization of high T_c YBCO superconducting film.", *Mat. Sci. and Eng.*, 22, 113 (1998)
- [5] Q. X. Jia, S. R. Foltyn, P. N. Arendt, and J. F. Smith, "High temperature superconducting thick films with enhanced supercurrent carrying capability.", *Appl. phy. Lett.*, 80, 1601 (2002)