

전력용 고온초전도 금속테이프 제작을 위한 첨단 레이저공정 개발

Development of advanced laser processing for the fabrication of HTS metallic tapes for power applications

이 상 열
연세대학교 전기공학과
Sang Yeol Lee

Department of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - Good quality superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) thin films were grown on Hastelloy (Ni-Cr-Mo alloys) with yttria-stabilized zirconia (YSZ) buffer layers by in situ pulsed laser deposition in a multi-target processing chamber. Generally, Hastelloy exhibits excellent resistance to corrosion, fatigue, thermal shock, impact, and erosion. However, it is difficult to make films on flexible metallic substrates due to interdiffusion problems between metallic substrates and superconducting overlayers. To overcome this difficulty, it is necessary to use YSZ buffer layer since it will not only limit the interdiffusion process but also minimize the surface microcrack formation due to smaller mismatch between the film and the substrate. In order to enhance the crystallinity of YBCO films on metallic substrates, YSZ buffer layers were grown at various temperatures different from the deposition temperature of YBCO films. On YSZ buffer layer grown at higher temperature than that for depositing YBCO film, the YBCO thin film was found to be textured with c-axis orientation by x-ray diffraction and had a zero-resistance critical temperature of about 85K.

1. 서 론

고온 초전도체가 1986년에 발견된 이래로 높은 임계전류밀도(J_c)를 갖는 길고 유연한 고온 초전도체를 제작하기 위해 많은 연구가 진행 중이다[1-3]. 고온 초전도체 중 최근에 많이 사용되는 YBCO는 쉽게 부서지는 성질 때문에 선재로 만들어 이용하는 것은 바람직하지 못하고[4] 그 대신에 유연성을 갖는 금속기판 위에 증착시켜 사용한다. 이러한 금속기판상 고품질 YBCO 박막의 증착은 초전도 자석, 송전 케이블, current lead, 발전기 등의 전력용분야의 핵심이라 할 수 있다. 그러나, YBCO 박막을 금속기판에 직접 증착

시킬 경우 박막과 금속기판 사이의 계면확산현상으로 인해 초전도 특성의 저하를 가져오게 된다[5]. 그러므로 금속기판상 고품질의 YBCO 박막을 증착하기 위해서는 계면확산을 막는 버퍼층이 필요하다. 이를 위해 Si 기판 위에 버퍼층으로 보통 사용되고 있는 YSZ 버퍼층을 사용한다. YSZ 완충막은 계면확산의 방지는 물론 YBCO 박막과 금속기판으로 주로 사용되는 Hastelloy(Ni-Cr-Mo 합금) 사이의 열팽창계수의 차이($YBCO=13 \times 10^{-6} K^{-1}$, $YSZ=11.4 \times 10^{-6} K^{-1}$, $Hastelloy=11.3 \times 10^{-6} K^{-1}$)로 인한 박막의 균열현상 또한 방지한다[6-8]. 본 연구에서는 YSZ 버퍼층의 레이저 공정변수의

최적화를 통해 금속기판상 적층성장한 고품질 YBCO 박막을 구현하였다.

2. 실험 방법

그림 1에 나타난 펄스 레이저 증착시스템을 이용하여 금속기판에 YBCO 박막증착 실험을 하였다. 레이저 빔으로는 248 nm의 파장을 갖는 KrF 엑시머 레이저가 이용되었으며 타겟표면과 레이저 빔이 이루는 각도를 45° 로 유지하고 렌즈를 통해 집광시킨 레이저 빔의 에너지밀도를 YSZ 증착시 1.9 J/cm²로, YBCO 증착시 0.93 J/cm²로 유지시켰다. YSZ 타겟표면과 YBCO 초전도타겟 표면을 사포로 문질러 표면을 최대한 매끈하게 만든 후 타겟을 회전가능한 타겟홀더에 은페이스트를 이용하여 부착하였다. 금속기판은 Hastelloy를 사용하였으며 기판을 세척하기 위하여 아세톤, 메탄올, DI water 순으로 초음파 세척기로 5분씩 세척하여 질소가스로 건조시켰다. 기판온도는 700-850℃의 범위에서, 산소압은 200-400 mTorr의 범위에서 YSZ 버퍼층과 YBCO 박막을 증착시켰다. YSZ 타겟과 기판사이의 거리는 4.5 cm,

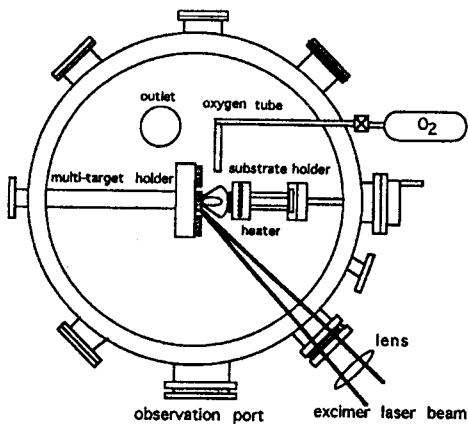


그림 1. 펄스 레이저 증착시스템 개략도.

YBCO 타겟과 기판사이의 거리는 6 cm이었다. 레이저 반복율은 5 Hz이었고 YSZ와 YBCO는 각각 15분씩 증착되었고 YSZ 증착에 이어 곧바로 in-situ로 YBCO 박막을 증착시켰다. YBCO 증착이 끝난 후 산소압을 500 Torr로 증가시켜 550℃까지 천천히 냉각시키고 그 온도에서 30분간 어닐링을 하고난 후 상온으로 냉각시켰다. Scanning electron microscopy(SEM)와 Raman spectroscopy를 이용하여 YBCO 박막을 분석하였고 X-ray diffraction (XRD)을 이용하여 박막의 결정성을 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

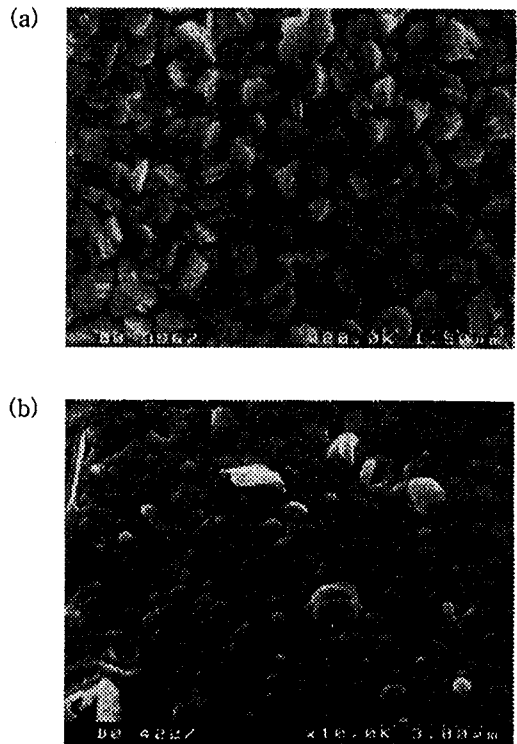


그림 2. YBCO 박막표면의 SEM 사진. (a) YSZ 버퍼층이 780℃에서 증착된 경우, (b) YSZ 버퍼층이 830℃에서 증착된 경우.

그림 2는 YBCO 박막표면의 SEM 사진을 보이고 있다. YSZ 버퍼층이 YBCO 박막의 증착온도와 같은 780°C에서 증착되어진 경우(그림 2(a)) 박막의 표면은 거칠고 granular 형태의 모습을 보이는 반면에, YSZ 버퍼층이 YBCO 박막의 증착온도보다 높은 830°C에서 증착되어진 경우(그림 2(b))에는 표면이 상당히 매끈하다는 사실을 알 수 있다.

Raman 분석결과에서도 YSZ 버퍼층이 YBCO 박막의 증착온도보다 높은 830°C에서 증착되어진 경우에 1-2-3 상(phase)이 형성되어짐을 알 수 있었다. 또한, XRD 패턴도 YSZ 버퍼층이 YBCO 박막의 증착온도보다 높은 온도에서 증착되어진 경우에 좁은 FWHM (Full Width at Half Maximum)을 나타내는 데, 이것은 YBCO 박막이 대부분 c축 배향으로 형성되었음을 의미한다.

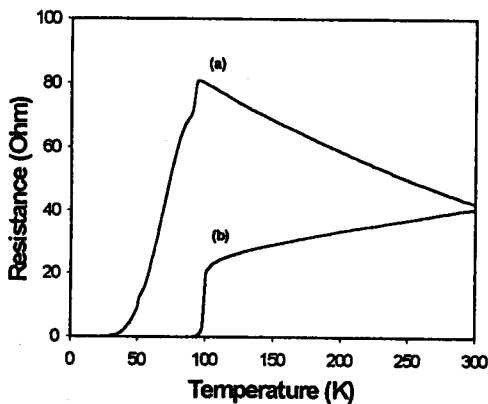


그림 3. YBCO 박막의 RT 특성. (a) YSZ 버퍼층이 780°C에서 증착된 경우, (b) YSZ 버퍼층이 830°C에서 증착된 경우.

그림 3은 YBCO 초전도박막의 임계온도를 보이고 있다. 그림 3(a)에서 보는 것과 같이 YSZ 버퍼층이 YBCO 박막의 증착온도와 같은 780°C에서

증착되어진 경우 YBCO 박막에 대한 저항의 온도의존성이 상전도상태에서 반도체성을 보이며 on set 온도가 95K, 임계온도가 24K 임을 알 수 있다. 반면에, YSZ 버퍼층이 YBCO 박막의 증착온도보다 높은 830°C에서 증착되어진 경우 YBCO 박막에 대한 저항의 온도의존성이 상전도상태에서 금속성을 보이며 임계온도가 85K 임을 그림 3(b)를 통해서 알 수 있다.

그림 4는 온도변화에 따른 임계전류밀도를 나타내고 있는 데, 온도가 증가할수록 임계전류밀도가 감소함을 알 수 있다. 펄스당 증착물을 고려한 박막의 측정된 두께로부터 임계전류밀도는 77K에서 약 4700 A/cm² 임을 알 수 있었다. 차후 연구에서는 임계전류밀도 향상을 위해 이상과 같은 펄스 레이저 증착법에 의한 공정기술을 바탕으로 ion beam assisted deposition (IBAD) 이나 RABiT (Rolling-Assisted Biaxially -Textured) Hastelloy 기판 등을 이용하여 YSZ 버퍼층의 텍스처링을 인위적으로 유도하는 공정법이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

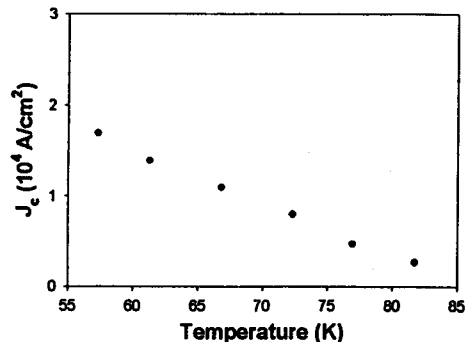


그림 4. YSZ 버퍼층이 YBCO 박막의 증착온도보다 높은 온도에서 증착된 박막의 온도대 임계전류밀도 그래프

4. 결 론

YSZ 비퍼층이 증착된 Hastelloy 기판 위에 고품질의 c축 배향된 초전도 YBCO 박막을 in situ 펄스 레이저 증착법으로 증착하였다. YSZ 비퍼층의 증착온도가 YBCO 박막의 특성에 미치는 영향이 체계적으로 연구되었다. YBCO 박막은 YSZ 비퍼층이 YBCO 박막의 증착온도보다 높은 온도에서 증착되어진 경우 c축 방향으로 잘 배향되었고 전기적 특성도 향상되었다. 이런 결과는 YSZ 비퍼층이 높은 온도에서 증착되었기 때문에 더욱 좋은 결정성을 갖으며 이로 인해 YSZ 비퍼층위에 증착되어진 YBCO 박막의 적층성장이 가능하게 되었기 때문이다.

참 고 문 헌

[1] T. Nabatame, S. Koike, O.B. Hyun, I. Hirabayashi, H. Suhara, and K. Nakamura, Appl. Phys. Lett. 65, p.776, 1994
[2] 이 상 렬, 제6회 레이저 가공기술 심포지움,

p.169, 1995

[3] N. Tomita, Y. Takahashi, and Y. Ishida, Jpn. J. Appl. Phys. 29, p.L30, 1990
[4] A. Goyal, D.P. Norton, J.D. Budal, M. Paranthaman, E.D. Speccht, D.M. Kroeger, D.K. Christen, Q. He, B. Saffian, F.A. List, D.F. Lee, P.M. Martin, C.E. Klabunde, E. Hartifield, and V.K. Sikka, Appl. Phys. Lett. 69, p.1795, 1996
[5] R.E. Russo, R.P. Reade, J.M. McMillan, and B.L. Olsen, J. Appl. Phys. 68, p.1354, 1990
[6] E. Narumi, L.W. Song, F. Yang, S. Patel, Y.H. Kao, and D.T. Shaw, Appl. Phys. Lett. 58, p.1202, 1991
[7] R.P. Reade, X.L. Mao, and R.E. Russo, Appl. Phys. Lett. 59, p.739, 1991
[8] A. Kumar, L. Ganapathi, S.M. Kanetkar, and J. Narayan, Appl. Phys. Lett. 57, p.2594, 1990