

Properties of YBCO Step-edge Junction Fabricated on Different Crystal Orientation of Sapphire Substrate

H.-R. Lim, I-S Kim, Y. K. Park, and J.-C. Park

*Korea Research Institute of Standards and Sciences, Superconductivity Group,
P. O. Box 102, Yusong, Taejeon, Korea, 305-600.*

Received 20 August 2001

사파이어 기판의 다른 결정방향 위에 제작된 YBCO step-edge 접합의 특성

임해용, 김인선, 박용기, 박종철
한국표준과학연구원 초전도그룹

Abstract

We have studied properties of step-edge junction prepared with crystal orientation of sapphire substrate. The Step on sapphire substrates fabricated by conventional photolithography method and Ar ion milling method. CeO₂ buffer layer and in-situ YBCO thin film were deposited on the stepped sapphire substrates by a pulsed laser deposition method with the predetermined optimized condition. The step angle was controlled low angle of about 25°. The YBCO film thickness was varied to obtain various thickness ratios of the film to the step height in a range from 0.7 to 1.2. I-V curves of junction were showed RSJ-behavior, double junction structure, and hysteresis due to the crystal orientation of substrate.

Keywords : step-edge junction, YBCO, sapphire substrates.

I. 서론

조셉슨 접합은 초전도, 양자간섭장치 (Superconducting Quantum Interference Device ; SQUID)나 단자속 소자 (Single Flux Quantum ; SFQ)를 제작하기 위한 기본적인 소자이다. 고온 초전도 박막을 이용한 조셉슨 접합은 여러 가지 형태가 있는데, 고온 초전도 박막의 grain

boundary를 이용한 bicrystal, step-edge, bi-epitaxial 접합과 인위적으로 절연장벽을 삽입한 ramp-edge, step-edge SNS 접합 등이 있다. 이러한 조셉슨 접합 중에서 step-edge 접합은 접합 위치의 자유성, 간단한 제작과정, 낮은 1/f 잡음특성[1] 등의 장점이 있어 많이 연구되고 있으나, 아직까지 step-edge에서 생성되는 고온 초전도 박막이 미세구조의 변화가 커서 제작과정에서 재현성이 떨어지는 것이 단점이다. 또한, step-edge 접합은 SrTiO₃, MgO, LaAlO₃ 등의 기판을 주로 이용하여 접합의 특성을 연구하고 있는데, step 각이 70° 이상에서 우수한 접합의

*Corresponding author. Fax: +82 42 868 5475

e-mail: hrlim@kopti.re.kr

+On leave from Superconductivity group of KRISS.

특성을 보이고 있다 [2-3]. 이 들 단결정 산화물 기판에 비교하면, 5 inch 이상의 대면적 기판을 얻을 수 있고, 상대적으로 저가인 사파이어 기판은 최근에 와서 많은 그룹에서 연구하고 있는 고온 초전도 기판 재료이다. 또한, SrTiO₃, MgO, LaAlO₃ 기판 등은 cubic 구조인데, 사파이어 기판은 hexagonal 구조이다. 사파이어 기판은 기판의 방향에 대해서 step을 만들 경우, step의 결정면은 다른 산화물 기판과 비교하여 기판의 방향에 따라 많은 차이가 나타난다.

본 연구는 R-면 사파이어 기판의 방향에 따라 다른 step의 결정면을 이용하여, 고온 초전도 step-edge 접합의 특성을 조사하였다.

II. 실험 방법

사파이어 기판을 이용하여 step-edge 조셉슨 접합을 제작하였다. 일반적인 photo-resist (PR) 방법과 Ar 이온 식각법을 이용하여, 사파이어 기판 위에 step을 제작하였다. Step은 30° 정도의 낮은 각도와 150 nm~200 nm의 높이로 제어하였다. Step이 제작된 사파이어 기판은 관형 전기로를 이용하여, 산소를 흘리며 1050 °C에서 4시간 동안 열처리하였다. 펄스 레이저 증착법으로 CeO₂ buffer층과 YBCO 박막을 in-situ 방법으로 성장시켰다. CeO₂ 박막의 두께는 약 20 nm이었으며, YBCO 박막은 step의 높이에 따라서 140 nm~180 nm의 두께로 제어하였다. Step이 있는 YBCO 박막을 5 μm의 접합폭으로 패터닝하여, 산소 1기압, 500 °C에서 열처리하였다. Step-edge 접합은 사파이어 기판의 [1120]축에서 45°, 90°, 135°, 180°로 결정방향을 변화시켜 제작하였다. 제작된 step-edge 접합은 전기 4 단자법으로 전류-전압 특성을 온도를 변화시키면서 조사하였다.

III. 결과 및 논의

CeO₂ buffer층이 있는 사파이어 기판 위에 제작된 YBCO 박막의 임계온도는 89.5 K이었고, 액체질소온도에서 임계전류밀도는 3×10^6 A/cm² 이상 이었다 [4-5]. Step의 높이는 150 nm~200 nm였으며, step 높이에 대한 YBCO 박막의 두

께비는 0.8~0.9 정도로 제어하였다 [6]. Step 각은 25°~35°로 제어하였고, step-edge 조셉슨 접합의 폭은 5 μm이었다.

Fig. 1은 R-면 사파이어 기판의 [1120] 방향을 고정 시켜 놓고, 45°, 90°, 135°, 180°의 기판 방향에서 제작된 step-edge 접합을 액체질소 온도에서 측정한 전류-전압 특성 곡선이다. 기판 방향에 따라서, 다양한 전류-전압 특성을 보이고 있다. 45° 방향에서 제작된 step-edge 접합은 히스테리시스 현상을 보이고 있고, 임계전류 (I_C)는 100 μA이며, 정상저항 (R_N)은 3.5 Ω으로 나타났다. 조셉슨 접합의 임계전류밀도는 1.2×10^4 A/cm²이며, $I_C R_N$ 은 350 μV로 비교적 높은 값을 보였다. 90° 방향에서는 flux flow 모델 거동을 나타내고 있고, I_C 은 180 μA이며, R_N 이 19 Ω으로 아주 높게 나타났다. 임계전류밀도는 2×10^4 A/cm² 이었다. 135° 방향에서는 resistively shunted junction (RSJ) 거동을 보이고 있으며, I_C 은 200 μA이며, R_N 이 2 Ω이며, 임계전류밀도는 2.4×10^4 A/cm² 다. 또한, 180° 방향에서는 약간의 히스테리시스 현상과 이중 접합구조를 나타내고 있으며, I_C 은 10 μA이며, 전류-전압 곡선에서 정상저항의 변화가 있으며 R_N 은 각각 12.5 Ω과 17 Ω으로 나타났다.

다양한 특성을 보이는 step-edge 접합을 온도에 따라서 전류-전압을 특성 곡선이 변화를 조사하였다. Fig. 2는 히스테리시스 현상을 보이

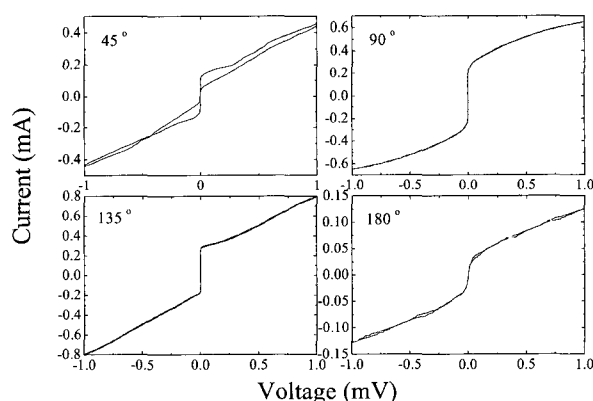


Fig. 1. Current-voltage characteristics of step-edge junction on sapphire substrates measured 77 K, 45°, 90°, 135°, and 180° orientation to the [1120] direction.

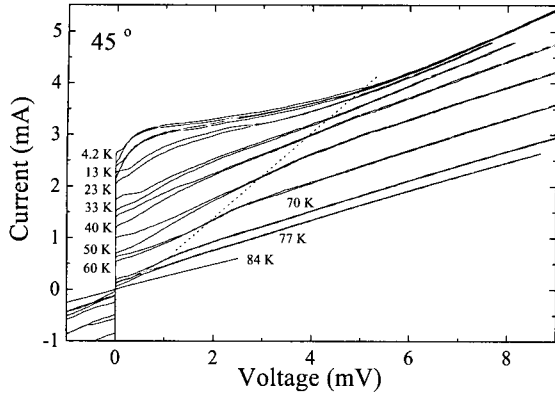


Fig. 2. Current-voltage curves of step-edge junction on 45° orientation to the $[1120]$ direction at various temperature ranging from 4.2 to 84 K.

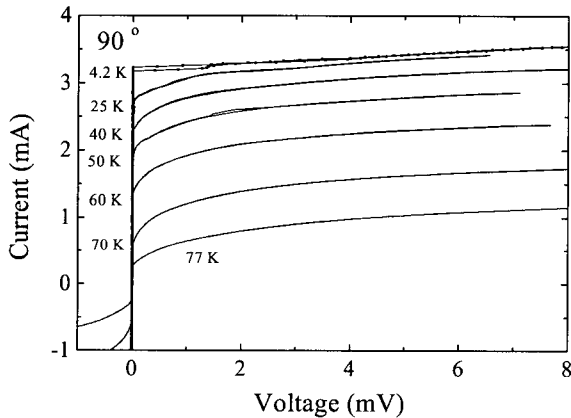


Fig. 3. Current-voltage curves of step-edge junction on 90° orientation to the $[1120]$ direction at various temperature ranging from 4.2 to 77 K.

는 step-edge 조셉슨 접합의 온도에 따른 전류-전압 곡선이다. 온도가 내려감에 따라서 전류-전압 곡선상에 이중 접합구조의 현상이 나타나고 있으며, 점선으로 표시된 부분이 만곡 지점이다. 특히, 20 K이하의 온도영역에서 thermal rounding 효과가 나타나고 있으며, 온도가 감소함에 따라서 이러한 효과는 점점 더 크게 나타나고 있다. 그러나, 모든 온도영역에서 히스테리시스 현상을 보이고 있는데, 일반적으로 조셉슨 접합에서 SNS, SNIS 구조에서 나타난다고 보고하고 있다 [7-8].

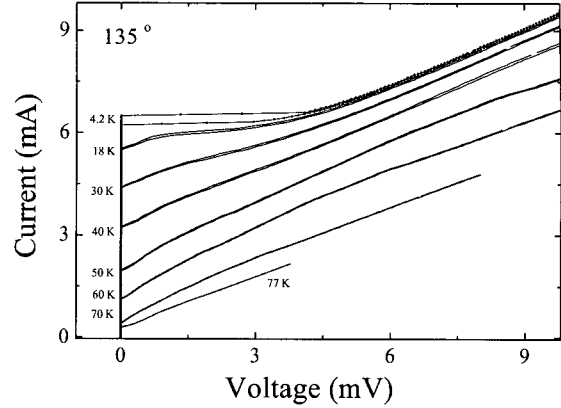


Fig. 4. Current-voltage curves of step-edge junction on 135° orientation to the $[1120]$ direction at various temperature ranging from 4.2 to 77 K.

Fig. 3은 사파이어 기판이 $[1120]$ 축을 기준으로 90° 방향으로 제작된 step-edge 접합의 전류-전압 곡선으로 다양한 온도 영역에서 측정된 것이다. 전류-전압 곡선은 flux flow 거동으로 보이고 있으나, 40 K이하의 온도에서부터 그 이하의 온도 영역에서는 히스테리시스 현상이 나타나고 있다. 15 K 부근에서 전류-전압 곡선이 flux flow 모델의 거동에서 RSJ 모델의 거동으로 변화하였다. 정상저항 (R_N)값은 19Ω 으로 온도의 변화에 따라서 그의 변화가 없었다.

Fig. 4는 사파이어 기판의 $[1120]$ 축에서 135° 방향에서 제작된 step-edge 접합의 전류-전압 곡선이다. 다양한 온도영역에서 측정된 전류-전압 곡선은 온도의 변화에 따라서 많은 변화를 보였다. 77 K에서 RSJ 모델 거동을 보였는데, 온도가 감소함에 따라 이중 접합구조가 나타났고, 20 K이하의 온도에서 히스테리시스 현상을 보였다. 그러나, 전 온도 영역에서 excess current 현상은 나타나지 않았다.

Fig. 5는 사파이어 기판의 정축에서 180° 회전한 방향에서 제작된 step-edge 접합이 전류-전압 곡선을 온도에 따라서 나타낸 것이다. 온도가 감소함에 따라서 thermal rounding 효과가 점점 더 많이 나타났으며, 저항의 변화는 거의 없었다. 40 K이하의 온도에서 히스테리시스 현상을 보였다. 10 K이하의 온도영역에서는 45° 의 방향에서 제작된 접합과 비슷한 현상을

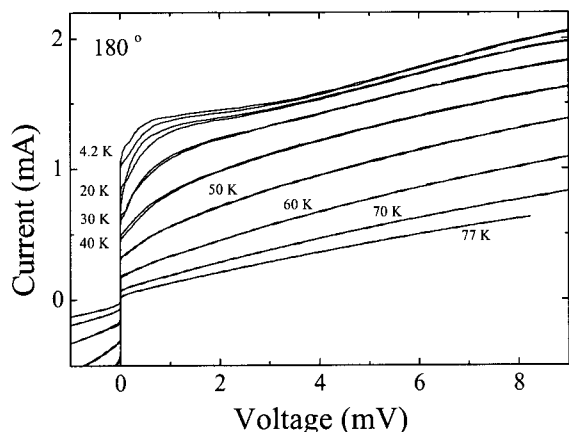


Fig. 5. Current-voltage curves of step-edge junction on 180° orientation to the [1120] direction at various temperature ranging from 4.2 to 77 K.

보이고 있다.

Fig. 6은 45° 방향에서 제작된 step-edge 접합의 임계전류(I_C), 정상저항(R_N), $I_C R_N$ 의 온도의존성을 나타낸 것이다. 임계전류는 온도가 감소함에 따라서 선형적으로 증가하였다. 정상저항은 77 K에서 3.5 Ω, 4.2 K에서 2 Ω으로 온도가 감소함에 따라 서서히 감소하였다. $I_C R_N$ 은 온도의 감소에 따라 급격히 증가하였는데, 4.2 K에서는 6 mV로 아주 높은 값을 보였다. 다른 결정 방향에서 제작된 step-edge 접합의 임계전류도 45°의 경우와 비슷하게 온도에 따라서 선형적으로 증가하였다.

사파이어 기판을 이용하여 다양한 결정방향으로 제작된 step-edge 조셉슨 접합은 히스테리시스 현상, 이중 접합구조, RSJ 모델의 거동과 flux flow 모델의 거동을 보였다. 특히, 히스테리시스 현상은 40 K이하의 저온 영역에서 모든 결정방향으로 제작된 step-edge 접합에서 나타났다. 히스테리시스 현상은 ramp-edge 접합인 SNS 구조 [9-10]와 trilayer SIS 접합 [11-12]에서 나타나고 있는 현상이다. 그러나, step-edge 접합에서는 히스테리시스 현상은 잘 나타나지 않지만, step 면에서 YBCO 박막이 성장방향에 따라서 이러한 현상이 나타나기도 한다.

Fig. 7은 step 면에서 YBCO 박막의 성장방향을 나타낸 것으로 (a)은 step 면에 수직인 방향으로 YBCO 박막이 (001) 방향으로 성장한

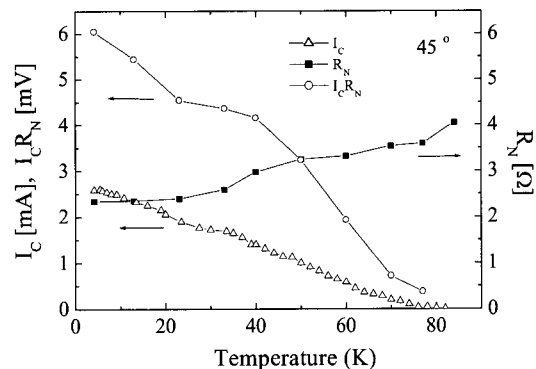


Fig. 6. Temperature dependence of critical current, normal resistance, and $I_C R_N$ of step-edge junction fabricated at 45° orientation to the [1120] of sapphire substrate.

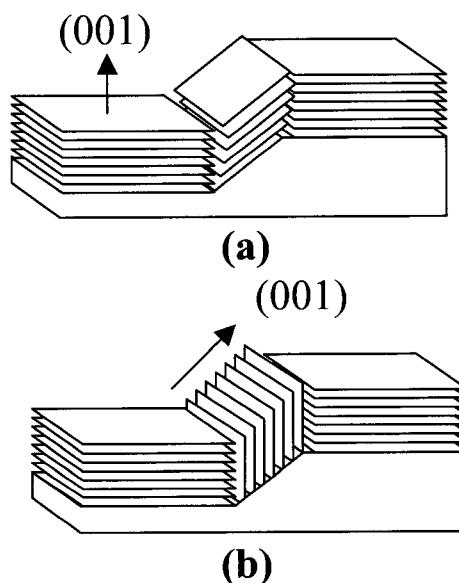


Fig. 7. Configuration of YBCO thin film on stepped sapphire substrates.

것이고, (b)는 평행한 방향으로 성장한 것이다. 사파이어 기판 위에 성장된 YBCO 박막은 CeO₂ buffer층의 변수가 있기 때문에 YBCO 박막의 grain boundary에서 나타나는 현상의 해석은 쉽지 않다. 사파이어 기판 위에 제작된 step-edge 접합은 step 각이 25°에서 35° 사이의 낮은 각도에서 제작되어 figure 7 (b)와 같이 step 면에서 YBCO 박막이 a-축으로 성장된 결

과로 히스테리시스 현상이 나타나는 것으로 보인다. 또한, 전반적으로 다른 산화물 기판을 사용한 step-edge 접합보다 정상저항 값의 크기가 높게 나타났으며, 77 K에서 $I_C R_N$ 값이 300 μV 이상 이었으며, 4.2 K에서는 수 mV로 아주 크게 나타났다.

IV. 결론

낮은 step 각도 (30°)로 사파이어 기판 위에 step-edge 접합을 제작하였다. 사파이어 기판의 $[11\bar{2}0]$ 방향을 기준으로 45° 방향씩 변화시켜 step-edge 접합을 제작하였다. Step-edge 접합은 사파이어 기판의 결정방향에 따라서 히스테리시스 현상, 이중접합 구조, RSJ 모델의 거동, flux flow 거동을 보였다. 낮은 step 각도에서 제작된 step-edge 접합은 40° 이하의 낮은 온도 영역에서 히스테리시스 현상이 나타났다. 전반적으로 사파이어 기판 위에 제작된 step-edge 접합의 정상저항 값은 높았으며, $I_C R_N$ 값은 300 μV 이상 이었다. 또한, 임계전류밀도는 액체질소 온도에서 $1\sim 2.4 \times 10^4$ A/cm²이었다.

참고문헌

- [1] H. R. Yi, M. Gustafsson, D. Winkler, E. Olsson, and T. Claeson, *J. Appl. Phys.* 79, 2177 (1996).
- [2] J. Z. Sun, W. J. Gallagher, A. C. Callegari, V. Foglietti, and R. H. Koch, *Appl. Phys. Lett.* 63, 1561 (1993).
- [3] K. Herrmann, G. Kunkel, M. Siegel, J. Schubert, W. Zander, and A. I. Braginski, *J. Appl. Phys.* 78, 1131 (1995).
- [4] In-Seon Kim, Hae-Ryong Lim, Dong Ho Kim, and Yong Ki Park, *IEEE Trans. Magn.* 35, 4073 (1999).
- [5] Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim, Dong Ho Kim, and Yong Ki Park, *New Physics.* 40, 124 (2000).
- [6] Hae-Ryong Lim, Dong Ho Kim, In-Seon Kim, Yong Ki Park, Jong-Chul Park, *Supercon. Sci. Technol.* 13, 1046 (2000).
- [7] C. D. Rosenthal, R. H. Ono, G. Barnes, L. Borchardt, and P. A. Rosenthal, *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 5, 3405 (1995).
- [8] M. Bode, M. Grove, M. Siegel, and A. I. Braginski, *J. Appl. Phys.* 80, 8378 (1996).
- [9] A. H. Sonnenberg, I. Oomen, H. Hilgenkamp, G. J. Gerritsma, and H. Rogalla, *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 11, 200 (2001).
- [10] Hendrik J. H. Smilde, Hans Hilgenkamp, Gerrit J. Gerritsma, Dave H. A. Blank, and Horst Rogalla, *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 11, 501 (2001).
- [11] You-Song Jiang, Masataka Moriya, Tadayuki Kobayashi, and Toshinari Goto, *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 11, 505 (2001).
- [12] M. Miruyama, K. Yoshida, T. Kito, T. Furutani, Y. Yoshinaga, M. Horibe, M. Inoue, A. Fujimaki, and H. Hayakawa, *IEEE Trans. Appl. Supercon.* 11, 788 (2001).