

Angle-dependent modulation of the critical current of YBa₂Cu₃O₇ step-edge Josephson junctions on SrTiO₃ substrate

SrTiO₃ 기판 위에 제작된 YBa₂Cu₃O₇ 계단형 모서리 조셉슨 접합의 각도에 따른 임계전류 특성

Yunseok Hwang^{(a),(c)}, Sunkyung Moon^(b), Soon-Gul Lee^{(b)*} and Jin-Tae Kim^(c)

황유석^{(a),(c)}, 문선경^(b), 이순걸^(b), 김진태^(c)

^(a)Department of Physics, Korea University, Sungbuk-ku, Seoul 136-701, Korea

^(b)Department of Physics, Korea University, Jochiwon, Chungnam 339-800, Korea

^(c)Korea Research Institute of Standards and Science

^(a)고려대학교 이과대학 물리학과

^(b)고려대학교 자연과학대학 자연과학부 물리학과

^(c)한국표준과학연구원 초전도연구그룹

We have fabricated YBa₂Cu₃O₇ step-edge junctions with different step orientations and studied their transition properties. Steps with different orientations were prepared on the substrate. Josephson junctions were made on a single substrate with step orientations ranging from 0° to 165° at 15° interval. We measured current-voltage characteristics, the critical current, and the superconducting transition temperature as a function of the angle. The critical current showed a modulation that has a maximum near 0° or 90° and a minimum near 45° and 135°. We believe that the critical current modulation with the step orientation could be associated with the symmetry of high T_c superconductor.

1. 서론

두 개의 초전도체가 매우 가까이 인접해 있다면, 이 두 초전도체 사이에는 터널링 전류가 흐른다. 이때, 두 초전도체 양단에 전압이 걸리지 않아도 터널링 전류가 존재하는데 이 현상을 조셉슨 효과라 하고 이러한 계를 조셉슨 접합이라고 한다^[1]. 고온초전도체를 이용하여 조셉슨 접합을 만들기 위해서는 두 초전도체를 결맞음 길이 10 Å 이하로 가까이 인접시켜야 한다. 고온초전도 박막을 이용한 결정경계면 접합은 박막을 입히기 위한 기판의 특성에 따라 bicrystal 접합^[2], biepitaxial 접합^[3], 그리고, step-edge 접합^[4]등으

로 크게 나눈다. Bicrystal 접합은 다른 조셉슨 접합보다 비교적 접합 특성이 좋고, 재현성 있게 제작이 가능하나, 접합의 위치 선택에 제약성이 있어 원하는 위치에 접합을 만들 수가 없다. 반면, biepitaxial 접합은 원하는 위치에 접합을 만들 수 있어서 bicrystal 접합보다 유리하다. 그러나, 접합 제작이 매우 어렵기 때문에 그리 널리 쓰이지는 않는다. 한편, step-edge 접합은 bicrystal 접합에 비해 접합의 재현성이 상당히 떨어지나 원하는 위치에 접합을 만들 수 있고, biepitaxial 접합보다 제작이 수월하며, 잘만 만들면 접합 특성도 다른 접합들보다 우수하다. Step-edge 접합은 기판을 계단 모양으로 만듭

로써 그 위에 입히는 초전도 박막의 결정축이 step-edge에서 바뀔으로써 접합이 형성된다. 고온 초전도 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 만드는데 많이 쓰이는 기판으로는 YBCO와 격자상수가 비슷한 $SrTiO_3$ (STO), MgO , $LaAlO_3$ 등이 있는데, 이들은 모두 cubic 구조로 되어있다. 이러한 기판 위에 perovskite 구조로 되어있는 YBCO 박막의 상태는 기판의 결정 상태에 상당히 영향을 받는다^[5].

본 연구에서는 step-edge를 이용하여 고온초전도 박막의 a-축(또는 b-축)과 접합면이 이루는 각도에 따른 조셉슨 접합의 특성에 대한 연구를 하였다. 기판은 STO 단결정을 사용하였고, 기판의 a-축(또는 b-축)과 step 면이 이루는 각도를 조절하여 step을 제작한 후, 그 위에 YBCO 박막을 입힘으로써 고온초전도 조셉슨 접합을 제작하였다. 각 접합의 특성은 온도에 따른 전류-전압 곡선을 통해 분석하였다.

2. 실험 방법

10 × 10 mm 크기의 단결정 STO (100) 기판 위에 포토리소그래피법을 이용하여 아르곤 이온 밀

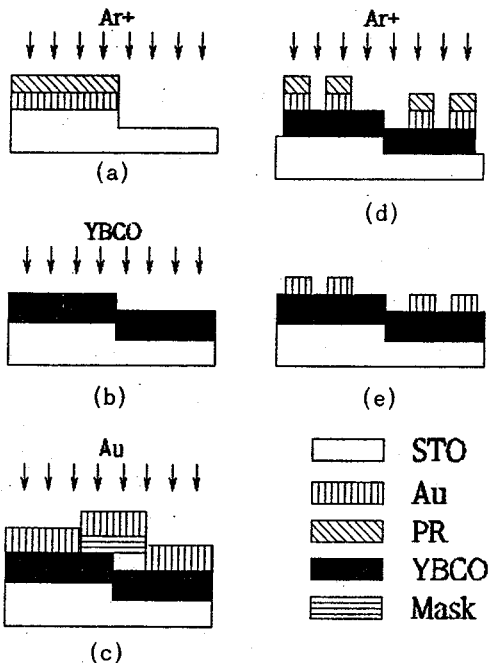


Fig. 1. Fabrication process((a) → (e)) of the step-edge junctions.

링법으로 200 nm 높이의 step을 제작하였다. Step은 기판의 a-축(또는 b-축)과 이루는 각도가 0°부터 165°까지 각 15°씩 증가하도록 제작하였다. 이때, 각 step을 동일한 조건으로 균일하게 깎기 위해서 아르곤 이온 밀링시 기판을 일정한 속도로 회전시켰으며, 이온 gun과 기판의 법선 사이 각은 15°로 하였다. 제작된 step의 각은 약 60°였다. 그 위에 중심 파장이 248 nm인 엑시머 레이저를 사용하여 펄스레이저 증착법으로 YBCO 박막을 입혔으며 박막의 두께는 160 nm였다. 증착시 산소압력과 기판의 온도는 각각 400 mTorr와 810 °C로 유지시켰고, 증착 후 시료를 500 °C, 산소 1기압 하에서 한 시간동안 열처리하였다. 측정을 위한 전극용 단자로 금을 80 nm 정도 입혔다. 이때 금과 YBCO 박막 사이의 접촉 저항을 줄이기 위해서 YBCO 박막을 입힌 후 바로 rf 스퍼터링법으로 입혔다^[6]. 여기에 다시 포토리소그래피법을 사용하여 패턴을 만든 후 아르곤 이온 밀링법으로 식각하였다. 제작 공정에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 2는 제작된 step-edge 접합의 접합 부분 SEM 사진이다. 밝은 부분이 YBCO가 덮여있는 부분이고, 어두운 부분이 STO 기판이다. 사진에서 기판의 a-축은 수평 또는 수직 방향이다. 가장 왼쪽부터 시계 방향으로 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, 165° 접합이다. 실험은 10 K 부터 70 K 까지 10 K씩 측정온도를 변화시키면서 각 온도에서의 전류-전압 곡선을 측정하였다.

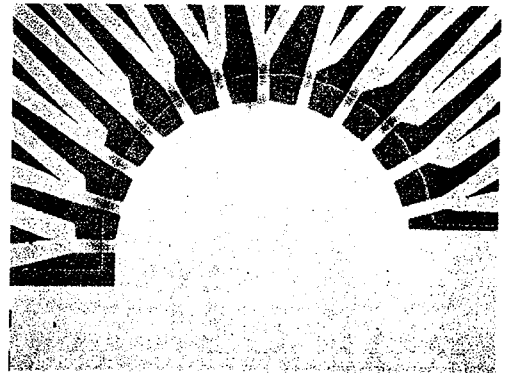


Fig. 2. SEM image of the step-edge junctions on $SrTiO_3$ (100) substrate. (100) orientation is parallel to the horizon.

3. 결과 및 논의

Fig. 3은 측정온도를 10 K 부터 70 K 까지 매 10 K씩 증가시키면서 각 접합에서 측정한 임계 전류값을 그래프로 표시한 것이다. 이 그림을 보면 45° 방향과 135° 방향의 접합에서 임계전류값이 다른 방향의 접합에 비해 상대적으로 작게 나왔음을 알 수 있다. 또한, 측정온도가 높아짐에 따라 임계전류값이 다른 각도의 접합에 비해 급격하게 감소했음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 접합이 기관의 축에 평행할수록 임계전류값이 좋아진다는 것을 보여주고 있다. 그러나, 임계전류값은 초전도 박막의 상태에 따라 달라질 수 있으므로 박막의 상태를 살펴 볼 필요가 있다. Fig. 4(a), (b)는 0°와 135° 방향의 접합 SEM 사진이다. 이 사진을 보면 두 사진이 거의 같은 것을

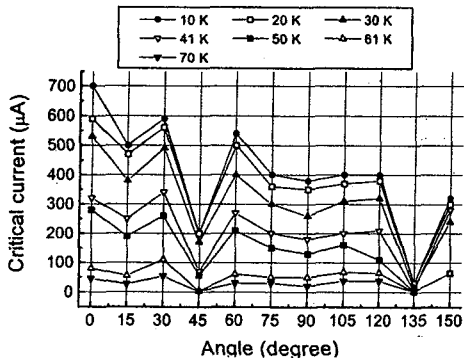
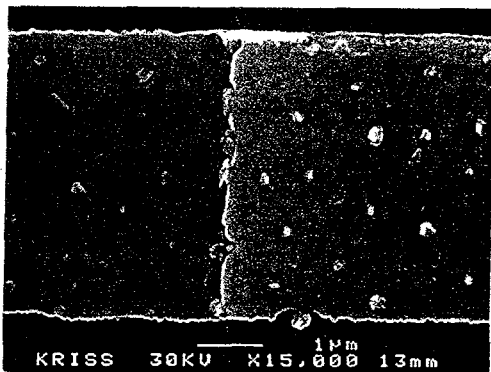
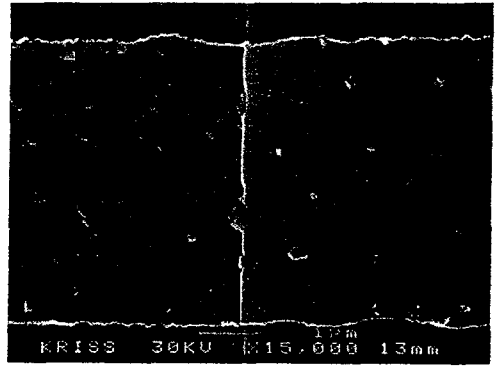


Fig. 3. I_c values of junctions for each measuring temperature.

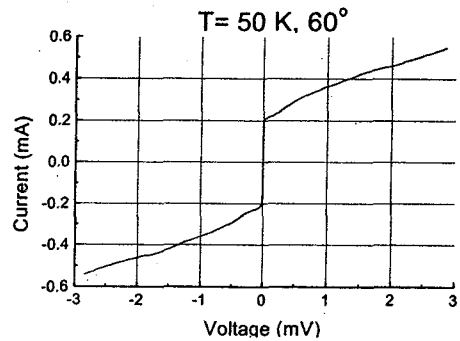


(a)

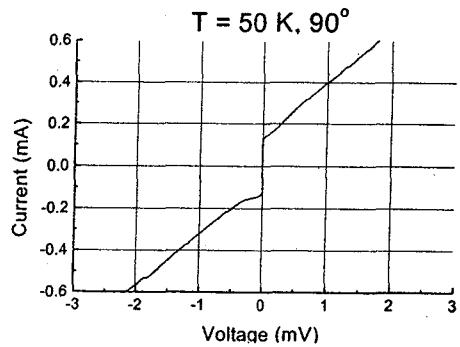


(b)

Fig. 4. SEM images of the step-edge parts of (a) 0°, (b) 135° junctions.



(a)



(b)

Fig. 5. I-V curves of (a) 60°, (b) 90° junctions.

알 수 있다. 이 논문에는 실지 않았지만 다른 각도의 접합 SEM 사진들도 Fig. 4와 거의 같은 모양을 하고 있다. 따라서, YBCO 박막은 균일하게 입혀졌다고 할 수 있다. 즉, 기판 측에 45°로 기울어진 방향에서는 접합의 임계전류값이 작아짐을 알 수 있다. 또한, Fig. 3에서 각도가 커질수록 임계전류값이 서서히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 접합의 제작 공정상의 오류로 판단된다. 포토리소그래피 작업에서 PR이 균일하게 벗겨지지 않았거나 박막 증착시 기판의 온도가 균일하지 않아서 접합의 상태가 조금씩 차이가 난 것으로 추측할 수 있다. Fig. 5(a), (b)는 50 K에서 측정된 60°와 90° 방향의 접합에 대한 전류-전압 곡선이다. 그래프를 보면 60° 방향의 접합의 임계전류값이 210 μ A로 90° 방향의 접합의 임계전류값 130 μ A 보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 그러나, 전류-전압 곡선의 모양은 60° 방향보다 90° 방향의 접합이 더 RSJ 모델에 가깝다. 이런 현상은 다른 접합의 전류-전압 곡선에서도 비슷하게 나타나고 있다. 즉, 전류-전압 곡선의 모양에서 보면 90° 방향이 60° 방향보다 접합이 잘 형성된다고 볼 수 있다. 이상과 같은 결과에 대한 이유는 다음과 같이 두 가지로 분석된다. 첫째, step 조건이 동일하고 박막이 균일하게 입혀졌다면 임계전류값의 차이는 YBCO 격자 구조 문제로 생각해 볼 수 있다. 즉, YBCO의 구조상 초전도체 내부에서 흐르는 전자들이 격자의 a-축(또는 b-축)을 따라 이동하는 것이 훨씬 수월하다는 것이다. 둘째, 기판 위에 step을 제작할 때, 깎인 step 면이 기판의 a-축(또는 b-축)과 평행한 것이 그 위에 입히는 YBCO 박막에 유리한 것으로 보인다. 즉, 기판의 a-축(또는 b-축)을 따라서 step을 제작하는 것이 접합 형성에 유리하다는 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 step-edge 접합을 이용하여 접합면이 기판의 주축과 이루는 각도에 따른 조셉

슨 접합의 특성에 대해 조사하였다. 접합 특성은 전류-전압 곡선을 통해 임계전류값으로 분석하였으며, 여러 온도에서 측정하였다. 측정된 임계전류값은 45° 방향과 135° 방향의 접합에서 가장 낮은 값을 나타냈으며, 거의 모든 측정 온도에서 공통적인 결과를 보이고 있다. 이러한 결과의 원인은 접합의 제작 과정에서 생기는 결함에 의한 것으로 분석할 수도 있고, 고온초전도의 구조에 의한 고유한 특성으로 볼 수도 있다. 현재까지는 원인을 명확하게 설명할 수는 없으나, 접합의 특성이 기판의 주축에 평행할수록 좋아진다고 말할 수 있다. 이 결과는 step-edge를 이용한 조셉슨 접합의 제작시 유용하게 사용될 것으로 여겨진다.

참고문헌

* Corresponding author

- [1] B. D. Josephson, Phys. Lett., 1, 251 (1962)
- [2] D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart, and F. K. LeGoues, Phys. Rev. Lett., 61, 219 (1988).
- [3] K. Char, M. S. Coclough, S. M. Garrison, N. Newman, and G. Zaharchuk, Appl. Phys. Lett., 59, 733 (1991).
- [4] R. W. Simon, J. F. Burgh, K. P. Daly, W. D. Dozier, R. Hu, A. E. Lee, J. A. Luine, H. M. Manasevit, C. E. Platt, S. M. Schwarzbeck, D. St. John, M. S. Wire, and M. J. Zani, Science and Technology of thin film superconductors 2, 549, edited by R. D. McConnel and R. Noufi, Plenum Press, New York (1990).
- [5] C. B. Eom, A. F. Marshall, Y. Suzuki, T. H. Geballe, B. Boyer, R. F. W. Pease, R. B. van Dover, and Julia M. Phillips, Phy. Rev. B, 46, 902 (1992).
- [6] Yunsung Huh, Jin-Tae Kim, Yunseok Hwang, Yongsup Park, Youngjin So, In-Seon Kim, Soon-Gul Lee, Gwangseo Park, Yong Ki Park, and Jong-Chul Park, Jpn. J. Appl. Phys., 37, 2478 (1998).