

New fabrication methods of step-edge Josephson junctions on SrTiO₃, MgO, LaAlO₃ single crystal substrates for YBa₂Cu₃O₇ thin films by using ion milling technique

Sunkyung Moon^{a,b}, Jong Rok Ahn^{a,b}, Yunseok Hwang^{a,b},
Soon-Gul Lee^b, Heeseok Choi^a, Jin-Tae Kim^a

^a Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

^b Korea University, Seoul, Korea

Received 22 July 2000

Abstract

Two methods have been investigated to fabricate good quality step-edge Josephson junctions on STO, MgO, and LAO single crystal substrates. One is the annealing of substrates at 1050 °C in 1 atmospheric oxygen after Ar-ion milling. The other is the cleaning of step-edge by using Ar ion milling. The step-edge is characterized with atomic force microscope (AFM) images. And YBCO thin films are deposited by using pulsed laser. The I-V properties of step-edge junctions are characterized. The yield rate of step-edge junction is increased by new fabrication methods.

Keywords : Step-edge junction, ar ion milling, YBCO

I. 서론

고온초전도 조셉슨 접합을 이용한 전자 소자의 개발과 그 응용범위가 확대 되어 감에 따라 여러 형태의 조셉슨 접합에 관한 연구가 진행되어 왔다. 이 중에서 일반적으로 많이 쓰이는 조셉슨 접합에는 bicrystal 접합[1], step-edge 접합[2], ramp-edge 접합[3] 등이 있다. Bicrystal 접합의 가장 큰 장점은 접합의 재현성이다. 한 기판 위에 제작된 접합은 거의 같은 특성을 보인다. 한편, step-edge 접합은 bicrystal 접합에 비해 가격 면에서 유리하고, 접합 위치 선정에 있어서 상당히 자유로운 편이다. 그러나, 같은 기판 위에 제작된 접합이라 하더라도 특성이 균일하지 않고 재현성도 상당히 떨어진다. 전자 소자로의 응용을 위해서는 접합의 위치 선정에 대해 제약이 없어야 하므로, step-edge 접합은 소자 개발에 있어서 중요한 위치를 차지하고 있다. 또, 제대로 만들어진 step-edge 접합

은 잡음 특성 면에서도 bicrystal 접합에 비해 훨씬 우수하다. 일반적으로 접합의 재현성 문제는 step의 형성과정에 근본적인 문제가 있을 것으로 추측된다. 기판 위에 입혀지는 박막은 기판의 상태에 따라서 특성이 좌우된다. 따라서, step이 균일하지 않게 제작되면 그 위에 입혀지는 박막의 특성, 즉 조셉슨 접합의 특성이 균일하지 않게 되는 것이다.

본 실험에서는 step-edge 접합의 단점인 균일성과 재현성 문제를 해결하기 위해 기판 위에 step-edge를 제작하는 기술 개발에 대한 연구를 하였다. 실험은 크게 다음과 같이 두가지 방법으로 시도하였다. Step의 균일성을 유도하기 위해 Ar ion milling 후, 기판을 열처리 하는 방법과 step 제작 step 면에 남아 있을 불순물 제거를 위해 step 면을 다시 Ar ion milling으로 세척하였다.

II. 실험 방법 및 결과

(1) 박막의 임계 전류

2 개의 5 mm × 5 mm의 SrTiO₃(STO) 단결정 기판을 Ar ion milling으로 200 nm 정도 깎아낸 후, 기판 하나만 1050 °C 산소 분위기에서 1 시간 열처리를 거친 후, 두 기판 위에 pulsed laser deposition(PLD)으로 200 nm 두께의 YBa₂Cu₃O₇(YBCO) 박막을 입혔다. 접촉 저항을 좋게 하기 위하여 박막 위에 바로 rf-sputtering으로 Au pad를 80 nm 정도 입힌 후[4], PR mask와 Ar ion milling으로 patterning을 하였다. 제작한 시료를 500 °C 산소분위기에서 1 시간 열처리한 후 박막의 임계 전류 밀도(J_c)를 측정하였다. LaAlO₃(LAO) 기판에 대해서도 같은 과정으로 박막을 제작하여 특성 조사를 하였다.

Figure 1은 milling과 열처리 유무에 따른 J_c 특성 변화를 보여주는 도표이다. 이 데이터를 보면 STO 기판의 경우에는 milling으로 인한 기판의 손상을 확실히 볼 수 있으나, LAO 기판의 경우에는 milling 유무에 관계없이 J_c 값이 비슷함을 알 수 있다. 또한, milling된 STO 기판의 열처리를 통해 기판 위에 제작한 박막의 J_c가 milling되지 않은 기판 위에 제작한 박막의 J_c와 비슷하게 나오는 결과를 통해 STO 기판의 경우에는 milling 후 열처리를 하는 것이 박막 제작에 유리한 것으로 보여진다. 반면, LAO의 실험 결과들은 milling에 의한 손상이나, 열처리를 통한 효과가 거의 나타나지 않고 있다. 그 이유는 LAO의 경우, 기판의 twinning 현상으로 인해 고온에서 기판의 재배열이 생기기 때문인 것으로 추측된다.

(2) 접합의 I-V 특성

2 개의 5 mm × 5 mm 단결정 STO 기판에 포토리소그래피와 Ar ion milling을 이용하여 180 nm 높이의 step-edge를 제작하였다. 그 중 하나의 기판은 1050 °C 산소분위기에서 열처리하였다. Step-edge 제작시 원하는 step 각을 얻기 위하여 회전각은 20°로 하였고, 입사각은 30°로 하였다[5]. 제작된 step 각은 약 60°로 나

	Microbridge	Non-milled	Milled
전	3 μm	3.7	1.7
	5 μm	4	2.1
	10 μm	3.5	2
후	3 μm	3.3	3.7
	5 μm	3.4	
	10 μm	3.2	3

(a)

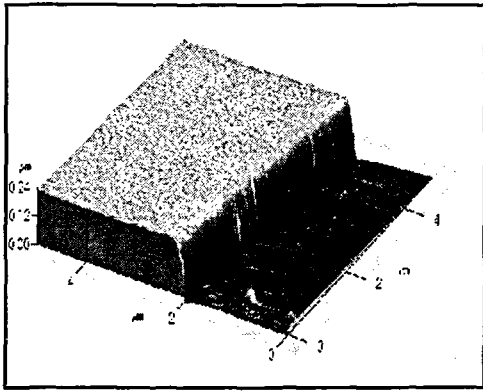
	Microbridge	Non-milled	milled
전	3 μm	6	5.3
	5 μm	5.6	5.2
	10 μm	>4.5	>4.5
후	3 μm	5.7	4.8
	5 μm	5.6	4.6
	10 μm	>4.5	4.3

(b) × 10⁶ A/cm²

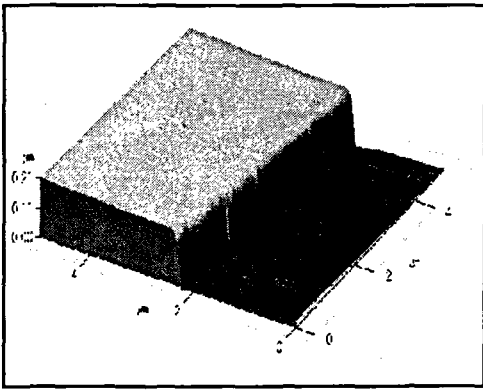
Fig. 1. Critical current of YBa₂Cu₃O₇ thin films (a) on SrTiO₃, and (b) on LaAlO₃ substrates.

왔다. Figure 2는 제작한 step-edge의 AFM(Atomic Force Microscopy) 사진이다. 제작한 step-edge 위에 박막을 입히고 patterning을 하여 접합을 제작하였다. I-V 특성 곡선을 측정하여 접합의 특성을 관찰하였다. MgO 기판에 대해서도 동일한 과정으로 조셉슨 접합을 제작하여 접합 특성을 조사하였다.

STO step-edge의 AFM 사진(Fig. 2)을 보면, 열처리 전과 후에 차이가 있음을 알 수 있다. 열처리 전에는 step 면이나 기판 면이 울퉁불퉁한 것을 볼 수 있는데, 열처리를 거친 step 면이나 기판 면은 상당히 매끄러워진 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 milling으로 인해 손상된 기판의 결정들이 고온에서 열처리 과정을 거치면서 재결정 현상이 일어난 것으로 추정된다. MgO 기판의 경우에도 마찬가지로 결과를 얻을 수 있는데(Fig. 3), 이를 통해 MgO 기판도



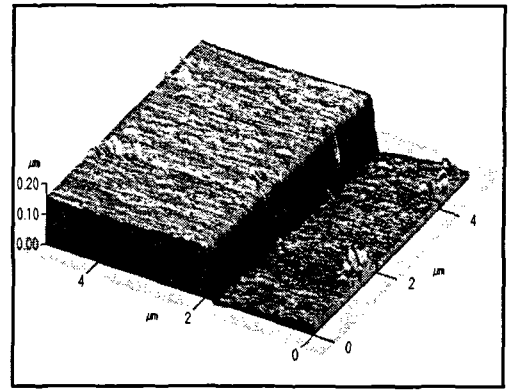
(a)



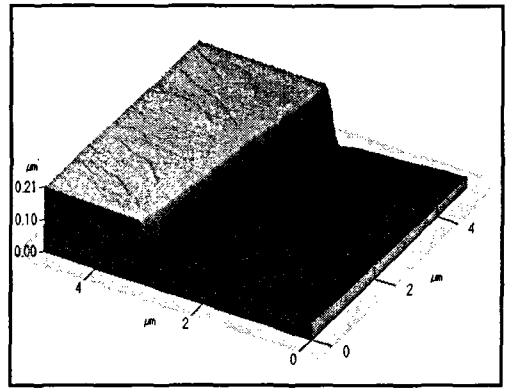
(b)

Fig. 2. AFM images of SrTiO₃ step-edge, (a) before annealing and (b) after annealing.

milling으로 인해 손상을 입고 열처리를 통해 손상된 기판이 회복되는 것으로 보인다. Figure 4은 접합의 I-V 특성 곡선이다. I-V 곡선에서도 볼 수 있듯이 열처리를 거치지 않은 접합은 접합 자체가 형성이 안 되거나, 이중 접합이 형성되었다. STO step-edge 접합의 경우에는 step 각이 45° 이상이 되어야 접합이 형성되나, MgO 기판의 경우에는 각이 45° 이하가 되더라도 접합이 형성되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 열처리를 거치지 않은 step은 국부적으로 그 각이 45° 이하가 되고, 그 위에는 접합이 아닌 박막이 형성된 것으로 해석된다. MgO step의 경우에도 마찬가지로 step의 국부적인 편차로



(a)



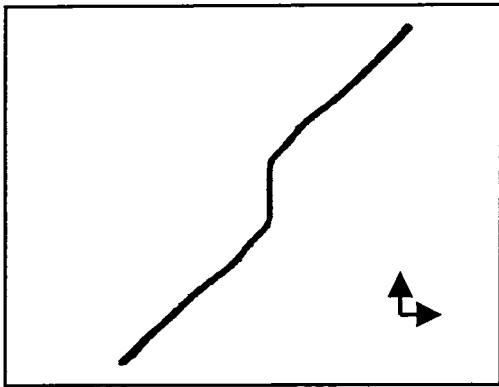
(b)

Fig. 3. AFM images of MgO step-edge, (a) before annealing and (b) after annealing.

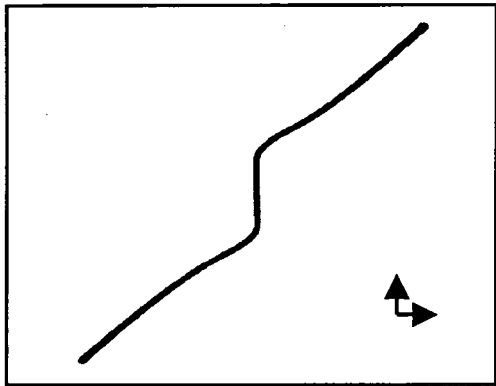
인해 서로 다른 두 개의 접합이 형성된 것으로 보인다. 결론적으로 열처리를 통한 step은 그렇지 않은 step 보다 균일해지는 것으로 보인다.

(3) Step-cleaning

STO 기판 위에 PR mask와 Ar ion milling으로 step-edge를 제작하였다. Ion milling 후, ion gun과 기판의 법선 사이 각이 직각이 되게 하여 step-cleaning을 하였다. 이것은 step 면에 남아있는 입자들을 milling으로 한번 더 제거하기 위해서이다. Figure 5는 step-cleaning 전과 5분 cleaning 후의 AFM 사진이다. 사진을 보면 step-cleaning



(a)



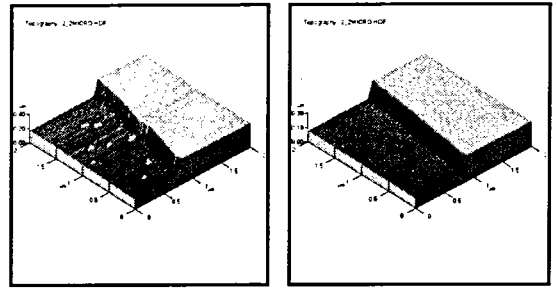
(b)

Fig. 4. I-V curves of MgO step-edge Josephson junctions, (a) before annealing and (b) after annealing.

전에 기판 표면과 step 면이 지지분한 것을 관찰할 수 있는데 cleaning 후에는 그런 것들이 많이 제거된 것을 볼 수 있다. 또한, figure 6에서 보면 I-V 특성도 좋아졌음을 확인할 수 있다. 즉, step-cleaning을 함으로 해서 step 면이 좀 더 매끈해지고 그로 인해 그 위에 제작되는 조셉슨 접합의 특성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

III. 결론

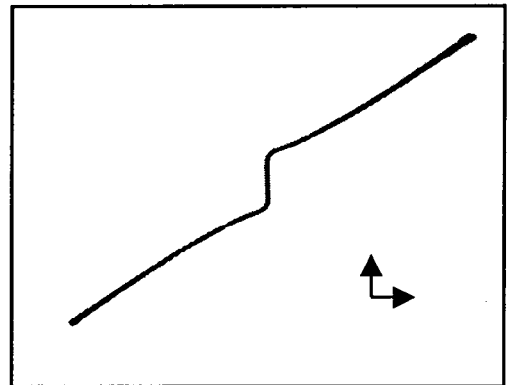
열처리 방법을 통해 STO 기판과 MgO 기판에서 Ar ion milling에 의한 박막 및 step 면의



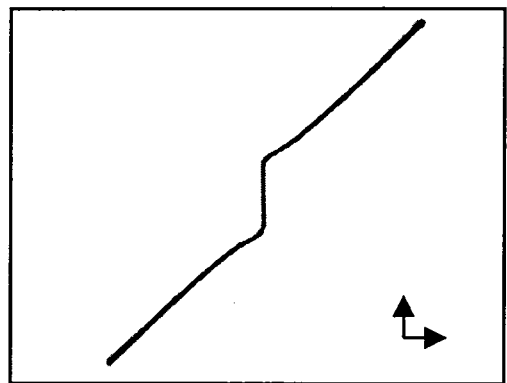
(a)

(b)

Fig. 5. AFM images of SrTiO₃ step-edge, (a) before step-cleaning and (b) after step-cleaning.



(a)



(b)

Fig. 6. I-V curves of SrTiO₃ step-edge Josephson junction, (a) before step-cleaning and (b) after step-cleaning.

손상을 회복시켰으며, step-cleaning 방법을 통해 조셉슨 접합의 특성을 향상시켰다. STO step-edge의 경우에는 접합의 제작 수율이 90 % 가까이 되었으며, MgO step-edge 조셉슨 접합은 RSJ 모델을 잘 따르는 곡선을 얻을 수 있었다. 그러나, LAO 기판의 경우에는 기판의 특성상 milling에 의한 손상이나 열처리에 의한 효과를 관찰할 수 없었다. Step-cleaning을 통해 step 면을 균일하고 매끈하게 깎음으로써 STO 조셉슨 접합의 특성이 좋아지는 것을 볼 수 있었다.

열처리 방법이나 step-cleaning 방법 등을 이용하여 균일성 있고 재현성 있는 step-edge 조셉슨 접합을 제작함으로써 고온초전도를 이용한 다접합 전자 소자로의 응용이 가능할 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart, and F. K. LeGoues, Phys. Rev. Lett., vol. 61, pp. 219-222, July (1988).
- [2] R. W. Simon, J. F. Burch, 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*, pp. 549-558, New York: Plenum Press (1990).
- [3] J. Gao, W. A. M. Aarmink, G. J. Gerritsma, and H. Rogalla, Physica C, vol. 171, pp. 126-130, September (1990)
- [4] Yunsung huh, Jin-Tae Kim, Yunseok Hwang, Yongsup Park, Younjin So, In-Seon Kim, Soon-Gul Lee, Gwangseo Park, Yong Ki Park, and Jong-Chul Park, Jpn. J. Appl. Phys., 37, 2478 (1998).
- [5] Byung-Chang Nam, In-Seon Kim, Soon-Gul Lee, Jong-Chul Park, and Yong Ki Park, Korea Journal of Materials Research, vol. 8, 960 (1998).