

## Fabrication and Characterization of Step-Edge Josephson Junctions on R-plane Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Substrates

### R-면 사파이어 기판 위에 제작된 계단형 모서리 조셉슨 접합의 특성

Hae-Ryong Lim<sup>\*\*\*</sup>, In-Seon Kim<sup>\*</sup>, Dong Ho Kim<sup>\*\*</sup>,  
Yong Ki Park<sup>\*</sup> and Jong-Chul Park<sup>\*</sup>

임혜용<sup>\*\*\*</sup>, 김인선<sup>\*</sup>, 김동호<sup>\*\*</sup>, 박용기<sup>\*</sup>, 박종철<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Korea Research Institute of Standards and Science,  
P.O. Box 102, YuSong, Taejon 305-600, Korea

<sup>\*\*</sup>Department of Physics, Yeungnam University, Kyungsan 712-749, Korea

<sup>\*\*\*</sup>대전광역시 유성우체국 사서함 102, 한국표준과학연구원, 초전도그룹  
<sup>\*\*</sup>영남대학교, 물리학과

YBCO step-edge Josephson junction were fabricated on sapphire substrates. The steps were formed on R-plane sapphire substrates by using Ar ion milling with PR masks. The step angle was controlled in the wide range from 25° to 50° by adjusting both the Ar ion incident angle and the photoresist mask rotation angle relative to the incident Ar ion beam. CeO<sub>2</sub> buffer layer and in-situ YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO) thin films was deposited on the stepped R-plane sapphire substrates by pulsed laser deposition method. The YBCO film thickness was varied to obtain the ratio of film thickness to step height in the range from 0.5 to 1. The step edge junction exhibited RSJ-like behaviors with I<sub>c</sub>R<sub>n</sub> product of 100~300 μV, critical current density of 10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup> A/cm<sup>2</sup> at 77 K.

## 1. 서론

미세한 자기장을 감지할 수 있는 양자간섭장치(SQUID)나, 초전도체를 이용한 전자소자에는 제형성 있는 조셉슨 접합의 제작이 필수적이다. 고온 초전도 박막을 이용한 조셉슨 접합형태는 여러 가지가 있으며, grain boundary를 이용한 bicrystal[1,2], step-edge[3], biepitaxial[4] 접합과 인위적으로 전위장벽을 삽입한 ramp-edge[5], SNS[6] 접합 등을 많은 연구그룹에서 주로 연구하고 있다. 이 중에서 계단형 모서리 접합(Step-Edge Junction : SEJ)은 간단한 제작과정, 접합 위치를 자유롭게 조절할 수 있는 융통성,

낮은 제작단가, 낮은 1/f 잡음 등의 장점이 있어 많이 연구하고 있으나, 계단 모서리 부분에서 미세구조의 변화가 커서 재현성이 떨어지는 단점이 있어 체계적이고 세심한 연구가 요구된다.

계단형 모서리 접합은 SrTiO<sub>3</sub>, LaAlO<sub>3</sub>의 기판을 이용하여 많이 연구하고 있는데, 높은 계단 모서리각(70° 이상)에서 비교적 우수한 접합특성이 나타내고 있다. 다른 단결정 산화물 기판과 비교하여 가격이 저렴하고, 대면적 기판을 얻을 수 있는 사파이어 기판은 낮은 임계전류밀도로 인하여 전자소자 제작에 많은 제약을 받았다. 그러나, 최근 본 연구그룹에서 임계전류밀도가 높은 고품질 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (YBCO)박막을 제작하였는데, 임계전류밀도는 3×10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>으로 높게 나

타났다[7].

본 연구는 R-면 사파이어 기판을 이용하여, 계통적으로 계단형 모서리각을 조절하여 조셉슨 접합을 제작하였고, 접합의 기본적인 특성을 조사하였다.

## 2. 실험방법

6 mm×6 mm 크기의 R-면 사파이어 기판을 이용하여 계단형 모서리를 제작하기 위해, 먼저 rf sputtering 증착법으로 20 nm 정도의 Au 박막을

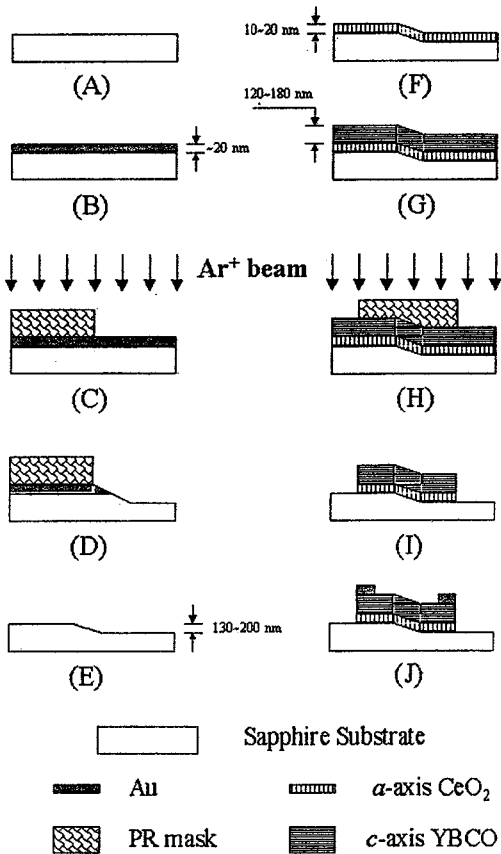


그림 1. R-면 사파이어 기판을 이용한 SEJ의 제작과정. (A) R-면 사파이어 기판 준비, (B) Au 박막 증착, (C) PR 코팅 및 PR 마스크 제작과 Ar 이온을 이용한 식각, (D) 식각 후 단면도, (E) PR 마스크 및 Au 박막 제거 후 기판 열처리, (F) CeO<sub>2</sub> 박막 증착, (G) YBCO 박막 증착, (H) PR 코팅 및 패터닝, (I) 패터닝 후의 단면도, (J) Au 전극 제작 및 열처리.

증착하였다. Au 박막은 사파이어 기판이 투명하여 빛의 반사와 회절 현상에 의해서 생기는 Photoresist (PR) 마스크 선상에 물결 무늬를 제거하기 위해서 사용하였다. 이러한 물결 무늬는 실제 계단형 모서리 접합을 제작할 때 접합의 특성을 저하시키는 원인이 되며, Au 박막을 얇게 증착함으로써 이를 해결하고자 하였다. Au 박막이 있는 사파이어 기판 위에 PR 마스크 (AZ5214)를 스펀 코팅하여 입히고, Ar 이온 식각법을 이용하여 계단형 모서리를 제작할 때 기판에 대한 Ar 이온의 입사각 ( $\theta$ )과 PR 마스크 회전각 ( $\phi$ )을 조절하여 적절한 계단 모서리각을 제어하였다. 식각 후 PR 마스크와 Au 박막은 각각 아세톤과 KI+I (15%) 수용액을 이용하여 제거하고, 에탄올로 기판을 세척하였다. 계단 모서리가 제작된 사파이어 기판을 산소 1기압 1050 °C에서 4시간 이상 열처리하였다. 펄스레이저 증착법을 이용하여 in-situ 방법으로 CeO<sub>2</sub> 완충층과 YBCO 박막을 증착하였다. R-면 사파이어 기판 위에 제작된 YBCO 박막의 임계온도는 89.5 K 이상이었으며, 임계전류밀도는 액체질소 온도에서  $3 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> 이상으로 측정되었다[7]. CeO<sub>2</sub> 박막의 두께

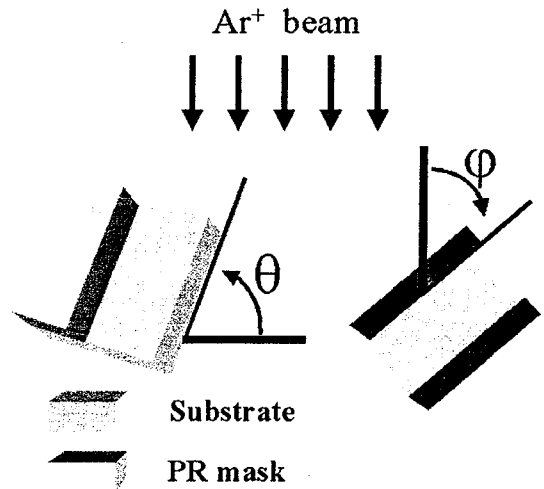


그림 2. 기판에 대한 Ar 이온의 입사각 ( $\theta$ ), PR 마스크 회전각 ( $\phi$ ), 계단 모서리각을 나타낸 개략도.

는 약 15~20 nm 정도로 제어하였으며, YBCO 박막의 두께 ( $t$ )는 계단높이 ( $h$ )에 대한 비로 조절하였는데, 두께비 ( $d=t/h$ )는 0.5~1사이로 하였다. PR 마스크와 Ar 이온 식각법으로 다양한 접합폭 (3~15  $\mu\text{m}$ )으로 패터닝 하였으며, 전극은 Au 박막을 사용하였다. 이렇게 제작된 계단형 모서리 접합을 최종적으로 산소 1기압 500  $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 동안 열처리하여 완성하였다. 그림 1은 사파이어 기판을 이용한 계단형 모서리 조셉슨 접합의 제작과정을 나타낸 개략도이다. 계단 모서리부분은 SEM과 Atomic Force Microscopy (AFM)를 이용하여 모서리각과 기판의 표면상태를 관찰하였고, 계단 모서리 접합의 전기적 특성은 4전자법을 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 논의

Ar 이온 식각법을 이용하여 기판에 대한 Ar 이온 입사각( $\theta$ )과 PR 마스크의 회전각( $\phi$ )을 조절하여 계단 모서리각을 제어하였다. 그림 2는 기판에 대한 Ar 이온의 입사각( $\theta$ ), PR 마스크 회전각( $\phi$ ), 계단 모서리각을 단면으로 나타낸 그림이다. Ar 이온의 입사각은 30~60 $^{\circ}$  사이로 조절하였고, PR 마스크 회전각을 0~90 $^{\circ}$  로 조절한 결과, 계단 모서리각은 20~75 $^{\circ}$  로 다양하게 나

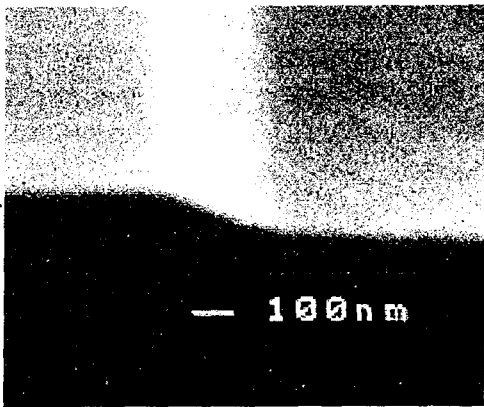


그림 3. Ar 이온의 입사각 60 $^{\circ}$ , PR 마스크의 회전각 60 $^{\circ}$  에서 식각한 후 1050  $^{\circ}\text{C}$  산소 1기압에서 열처리된 계단 모서리 단면을 나타낸 SEM 사진.

타났다. 특히, Ar 이온의 입사각이 60 $^{\circ}$  일 때 PR 마스크 회전각에 따른 계단 모서리각은 20~50 $^{\circ}$  사이로 변화하였는데, PR 마스크 회전각이 45 $^{\circ}$  이상에서 계단 모서리각은 25~35 $^{\circ}$  사이로 거의 일정한 것을 알 수 있었다.

그림 3은 Ar 이온의 입사각 60 $^{\circ}$ , PR 마스크 회전각 60 $^{\circ}$  에서 Ar 이온으로 식각한 후 산소 1기압, 1050  $^{\circ}\text{C}$ 에서 5시간 열처리된 계단 모서리가 있는 사파이어 기판의 단면을 나타낸 SEM 사진이다. 이러한 조건에서 제작된 계단 모서리각은 약 30 $^{\circ}$  로 식각되었으며, 재증착 효과나 계단 아래 부분의 이중식각 효과는 나타나지 않았으며, 계단 모서리에서 식각으로 인하여 나타나는 굴곡이나 찌꺼기 등의 이 물질을 열처리를 통하여 제거할 수 있었다. 또한 AFM을 이용하여 Ar 이온으로 식각된 부분과 식각되지 않은 부분, 열처리한 효과에 대한 표면 roughness를 각각 조사하였다. Ar 이온으로 식각된 부분의 표면 roughness는 20~30  $\text{\AA}$  정도였고, Au 박막과 PR 마스크가 있어 식각되지 않은 부분은 상용품 사파이어 기판과 비슷한 5~6  $\text{\AA}$ 으로 조사되었다. 그리고, 식각 후 열처리된 기판의 표면 roughness는 2~4  $\text{\AA}$ 으로 원자층 단위로 제어되었고, 특히 계단 형태의 테라스가 관찰되었다. 따라서, 식각 후 사파이어 기판은 많은 손상을 받은 것으로 보이며, 기판 표면에 있는 원자층이 열처리하는 과정에서 재배열하여 상용품 기판보다 표면상태가 더 양호한 것을 알 수 있었다.

그림 3과 같은 조건에서 제작된 계단 모서리의 높이는 1500~2000  $\text{\AA}$ 사이로 제어하였으며, 계단 높이에 대한 YBCO 박막의 두께는 두께비가 0.5~1 사이가 되도록 하였다. 표 1은 30 $^{\circ}$  의 계단 모서리각, 0.78의 YBCO 박막의 두께비로 3~15  $\mu\text{m}$ 로 접합폭으로 제작한 계단 모서리 접합의 특성을 나타낸 것으로 77 K에서 측정하였다. 같은 계단 모서리선상에서 제작된 계단 모서리 접합의 특성을 나타낸 것으로  $I_{cR_N}$ 은 160~210  $\mu\text{V}$ 로 나타났으며, 임계전류밀도는  $1.3\sim 2.3 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 으로 측정되었다. 표 1에서 접합폭이 증가할수록 임계전류 ( $I_c$ )는 증가하는 경향성을 보였으며, 정상저항 ( $R_N$ )은 이에 반비례하였다. 그림 4는 5  $\mu\text{m}$ 의 접합폭을 가진 계단모서리 접합의 전류-전압 곡선을 나타낸 것으로 전형적인 RSJ 모델거동을 하고 있다. R-면 사파이어 위에 제작된 계단

표 1. R-면 사파이어 기판 위에 30° 의 step 각에서 제작된 step-edge 접합을 77 K에서 측정된 전기적 특성.

Junction width	$I_c$ ( $\mu A$ )	$R_N$ ( $\Omega$ )	$I_c R_N$ ( $\mu V$ )	$J_c$ ( $10^4 A/cm^2$ )
3 $\mu m$	80	2	160	2.05
5 $\mu m$	85	2.5	210	1.34
10 $\mu m$	295	0.6	177	2.32
15 $\mu m$	420	0.4	168	2.21

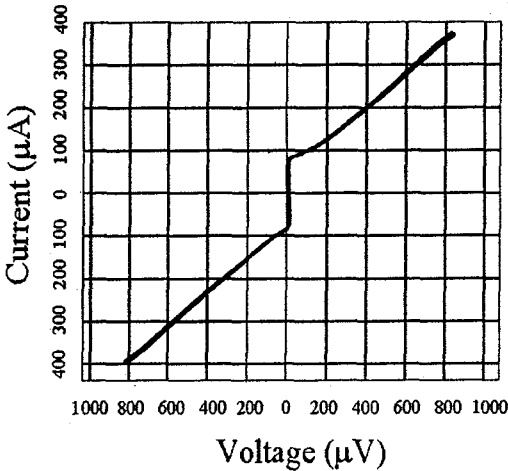


그림 4. 사파이어 기판 위에 낮은 각도에서 제작된 계단 모서리 조셉슨 접합의 전형적인 I-V 곡선.

모서리 접합은 낮은 계단 모서리각 (50° 이하)에서 우수한 접합 특성을 보였는데, YBCO 박막의 두께비에 따라서 접합의 특성이 다양하게 변하였다. 두께비가 증가될수록 (0.9 이상) 임계전류 값은 300  $\mu A$  이상으로 높게 나타났으며, 전류-전압 곡선은 flux flow 거동에 가깝게 나타났다. 두께비가 낮은 (0.6 이하) 경우 접합의 연결이 불안정하여 정상 저항만 측정된 경우가 많았다. 그러나, 두께비를 0.7~0.85에서 제어하였을 경우 표 1과 그림 4에 보인 우수한 접합특성을 얻을 수 있었다.

그림 5는 계단 모서리 접합의  $I_c R_N$  대  $J_c$ 의 관

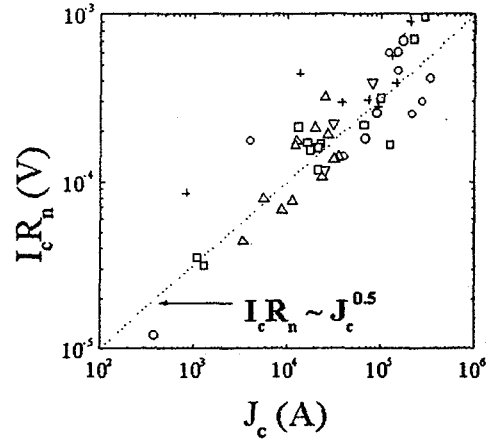


그림 5. 사파이어 기판 위에 제작된 계단 모서리 조셉슨 접합의  $I_c R_N$  대  $J_c$ 의 관계를 나타낸 scaling 거동.

계를 나타낸 것이다. 사파이어 기판 위에 제작된 계단 모서리 접합의 경향성을 보기 위해 총 70개의 sample에 대한 scaling 거동을 계산하였다. 다양한 접합폭과 두께비에 대한  $I_c R_N$ 은  $J_c^{0.5}$ 에 비례하였는데, 이는 다른 단결정 기판 (SrTiO<sub>3</sub>, LaAlO<sub>3</sub>. 등)위에 제작된 계단 모서리 접합, bicrystal 접합과 biepitaxial 접합과 비슷한 scaling 거동을 보였다[8].

#### 4. 결론

R-면 사파이어 기판 위에 제작된 계단 모서리각은 기판에 대한 Ar 이온 입사각과 PR 마스크 회전각을 변화시켜 제어하였는데, 낮은 계단 모서리각에서 우수한 접합 특성을 보였다. 접합은 두께비가 0.78일 때 적절한  $I_c R_N$  값을 나타내었으며, 5  $\mu m$ 의 접합폭에서  $I_c$ 는 85  $\mu A$ ,  $R_N$ 은 2.5  $\Omega$ 으로  $I_c R_N$  값이 210  $\mu V$ 이었으며, 전형적인 RSJ 모델 거동을 나타내었고, 접합의 전반적인 임계전류밀도는  $1\sim 3 \times 10^4 A/cm^2$ 로 나타났다. 다양한 두께비에서 제작된 접합의  $I_c R_N$ 은  $J_c^{0.5}$ 에 비례하는 scaling 거동을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정과제연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] P. Chaudhari, J. Mannhart, D. Dimos, C. C. Tauei, C. C. Chi, M. M. Oprysko, and M. Scheuermann, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 1653 (1988).
- [2] D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart, and F. K. LeGoues, *Phys. Rev. Lett.*, **61**, 219 (1988).
- [3] R. Simon, J. B. Bulman, J. F. Burch, S. B. Coons, K. P. Daly, W. D. Dozier, R. Hu, A. E. Lee, J. A. Luine, C. E. Platt, and M. J. Zani, *IEEE Trans. Magn. MAG-27*, 3209 (1991).
- [4] K. Char, M. S. Colclough, L. P. Lee, and G. Zaharchuk, *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2177 (1991).
- [5] J. Gao, W. A. M. Aarnink, G. J. Gerritsma, and H. Rogalla, *Physica C* **171**, 126 (1990).
- [6] M. S. DiIorio, S. Yoshizumi, K.-Y. Yang, J. Zhang, and M. Maung, *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 2552 (1991).
- [7] 임 해용, 김 인선, 김 동호, 박 용기, 박 종철, *센서학회지*, **8**, 195 (1999).
- [8] D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker, and John Clarke, *Reviews of Modern Physics*, **71**, 631 (1999)