

## Fabrication of High- $T_c$ Superconducting Josephson Junctions by Ar Ion Milling and E-Beam Lithography

### Ar 이온빔 식각과 전자선리소그래피 방법으로 제작한 고온초전도 조셉슨 접합

Moon-Chul Lee, In-Seon Kim, Jeong-O Lee\*, Kyung-Hwa Yoo,  
Yong Ki Park and Jong-Chul Park

이문철, 김인선, 이정오\*, 유경화, 박용기, 박종철

P.O. Box 102, YuSong, Taejon, Korea 305-600,  
Korea Research Institute of Standards and Science  
\*Dept. of Physics, Chonbuk National University, Chonju, Chonbuk

대전광역시 유성우체국 사서함 102, 한국표준과학연구원  
\*전라북도 전주시 전북대학교 물리학과

A new type of high- $T_c$  superconducting Josephson junctions has been prepared by Ar ion beam etching and electron beam lithography.  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) films deposited on (001)  $SrTiO_3$  single crystal substrate by pulsed laser deposition were patterned by Ar ion milling with photolithography. The narrow slit with a electroresist mask, about 1000 Å wide, was constructed over a 3~5  $\mu m$  bridge of a 1200-Å-thick YBCO film by electron beam lithography. The slit was then etched by the Ar ion beam to form a damaged 600-Å-thick YBCO. Thus prepared structure forms an S-N-S (YBCO - damaged YBCO - YBCO) type Josephson junctions. Those junctions exhibit RSJ-like I-V characteristics at 77 K. The properties of the Josephson junctions such as  $I_c$ ,  $R_N$ , and  $J_c$  were characterized.

#### 1. 서론

고온초전도 조셉슨 접합은 마이크로파 통신 소자와 SQUID (superconducting quantum interference device)<sup>[1]</sup> 및 SFQ (single flux quantum) 등의 응용에 이용되면서 제조방법의 다양성 및 빠른 질적 향상을 보였다. 대표적인 조셉슨 접합으로는 고가의 기판을 사용하는 복결정 (bicrystal) 접합<sup>[2]</sup>, 재현성 문제를 가진 계단형 모서리 (step-edge) 접합<sup>[3]</sup>, 복잡한 공정을 가진 경사형 모서리 (ramp-edge) 접합<sup>[4]</sup> 그리고 접합의 안정성, 특성의 재현성 문제를 가진 FIB (focused ion beam)를 이용하는 손상된 (damaged) 접합<sup>[5]</sup> 등이 있다. 그 중에서 손상된 접합은 비교적 간

단한 제조과정으로 인해 최근에 많은 연구가 이루어져 오고 있다. 그러나 손상을 주기 위해서는 고가의 FIB장비가 필요하며 많은 변수로 인해 재현성 문제 및 특성문제를 가지게 된다. 또한, 조셉슨 접합 중에 가장 안정된 접합특성을 나타내는 복결정 접합, 그리고 경체성이 가장 좋은 계단형 모서리 접합은 복수개의 접합을 임의의 위치에 제작하지 못하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 전자선리소그래피 (electron beam lithography)를 이용하여 폭이 수백 nm인 스트립 (strip)을 만든 후 적절한 손상을 줌으로써 제작하는 조셉슨 접합 제작방법이 제안되었으나, 구체적인 연구결과는 잘 알려져 있지 않다.<sup>[6]</sup> 이러한 방법은 저렴한 기판 사용 외에 기판 선택에 폭을 넓혀주며, 일반적인 이온밀링

(ion milling) 장비와 전자선리소그래피를 이용하여 접합을 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 기판의 어느 위치에서도 접합 제작이 가능하여 기존의 포토리소그래피 마스크를 이용할 수 있어 저렴한 접합 제작을 할 수 있다. 간단한 제작과정과 이온빔 조절을 통한 임계전류값과 정상저항값의 조절은 기존의 접합제작 과정이 가지는 재현성 문제를 해결할 수 있다.

본 연구에서는  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) 박막을 전자선리소그래피와 Ar 이온밀링을 이용하여 접합을 제작하였다. 또한, 이온빔의 강도 및 시간 조절로 접합특성을 제어하고 특성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

고온초전도체를 이용한 접합의 제작은 그림 1과 같은 공정으로 제작하였다. 그림 1 (a)는  $SrTiO_3$  (001) 단결정 기판에 YBCO 박막을 KrF (248 nm) 엑시머 레이저를 이용하여 약 1200 Å 정도의 두께로 증착한다.<sup>[7]</sup> 그림 1 (b)는 Au를 rf 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 약 550 Å 정도의 두께로 증착한다. 그림 1 (c)는 증착된 박막층을 포토레지스트 (PR: AZ 5214E)를 사용하여 스

핀 코팅한다. 오븐에서 90 °C 상태로 20 분간 soft-baking을 해준 후 contact-aligner와 현상액 (developer: AZ 350)을 사용하여 패터닝한다. 그런 다음 Ar 이온밀링을 이용해 패턴의 브리지 (bridge) 폭이 3~5 μm 되도록 하여준다. 그림 1 (d)는 일렉트로레지스트 (ER: electroresist)인 PMMA (polymethylmethacrylate) 4 %를 4000 Å가 되도록 스핀 코팅한 후 hot-plate에서 150 °C 상태로 20 분간 baking을 해준다. 그림 1 (e)는 전자선리소그래피를 통해 손상 받을 접합 폭이 약 1000~2000 Å의 극히 가는 부분이 되도록 현상액 [MIBK (methylisobutylketone) : IPA (isopropylalcohol) = 1 : 1]으로 레지스트를 노출시킨 후 이 부분을 Ar 이온밀링으로 식각하여 YBCO 박막의 두께를 약 500 Å 정도로 줄인다. 그런 후 이온밀링에서 전류밀도의 강도 및 시간 조절을 통해 적절한 손상을 입혀 폭이 매우 작은 damaged YBCO의 채널을 형성한다. 이렇게 제작된 YBCO/damaged YBCO/YBCO 형태의 조셉슨 접합의 특성은 액체질소 온도에서 직류 4단자법을 이용하여 조사하였다.

## 3. 실험 결과 및 논의

그림 2는 박막위에 일렉트로레지스트를 코팅한 후 JEOL 6400 전자선리소그래피 장비(가속 전압: 30 kV, 전류: 10 pA, dose: 2000 μC/cm<sup>2</sup>)를 이용하여 expose 한 다음 현상액으로 손상 받을 부위만 노출시킨 AFM (atomic force microscope) 사진이다. 폭은 약 2000 Å를 나타내고 있다. 그림 3은 일렉트로레지스트를 현상시킨 후 이온밀

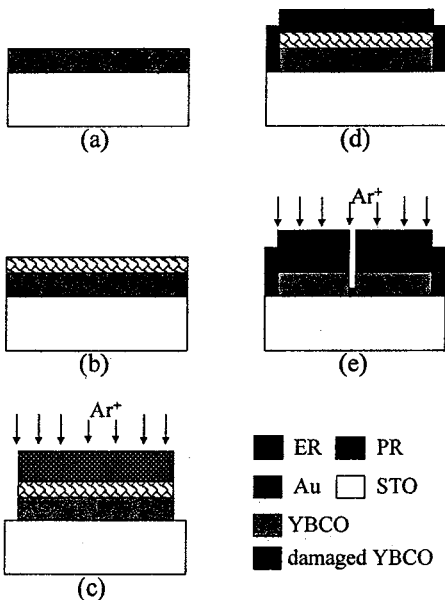


그림 1. Ar 이온 식각과 전자선리소그래피를 이용한 조셉슨 접합의 제조 방법.

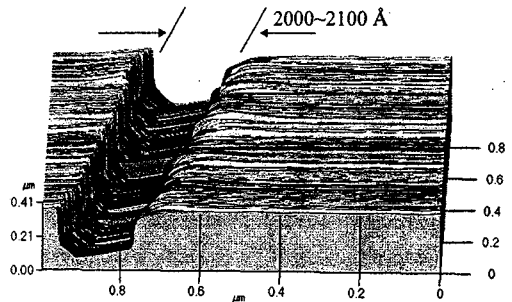


그림 2. 전자선리소그래피로 현상된 일렉트로레지스트의 AFM사진.

링 장비 (이온빔 전압: 480 V, 이온빔 전류밀도:  $0.23\sim 0.63 \text{ mA/cm}^2$ , 압력:  $3.0 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ )를 이용하여 식각 및 손상을 입힌 후의 AFM 사진이다. 이온밀링에 의한 레지스트의 식각으로 폭은  $3500\sim 5000 \text{ \AA}$ 를 나타내고 있다. 일렉트로레지스트를 제거한 후의 Au가 코팅된 접합부위의 AFM 사진 및 SEM (scanning electron microscope) 사진이 그림 4 (a), (b)를 나타낸다. 접합부위의 폭은 약  $1000\sim 2000 \text{ \AA}$  정도를 나타내고 있다. 폭이 극히 가는 부분을  $500 \text{ \AA}$  정도의 두께로 식각하

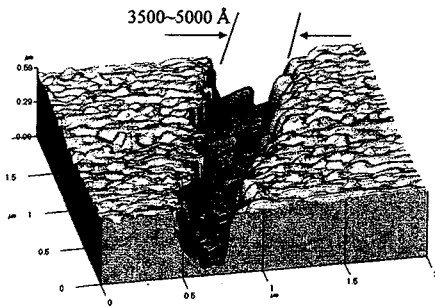


그림 3. Ar 이온밀링에 의해 손상 받은 일렉트로레지스트의 AFM 사진.

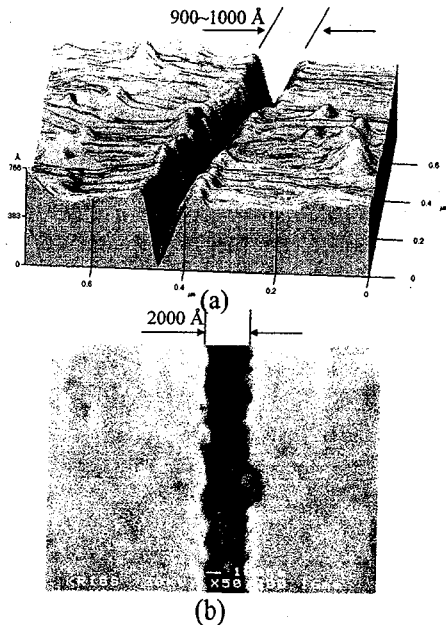


그림 4. Ar 이온밀링에 의해 식각 및 손상 받은 접합의 (a) AFM 사진과 (b) SEM 사진.

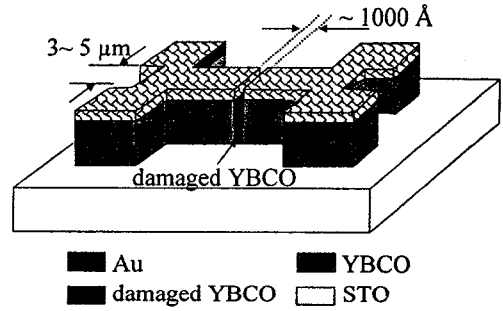


그림 5. Ar 이온 식각과 전자선리소그래피를 이용하여 제작된 조셉슨 접합.

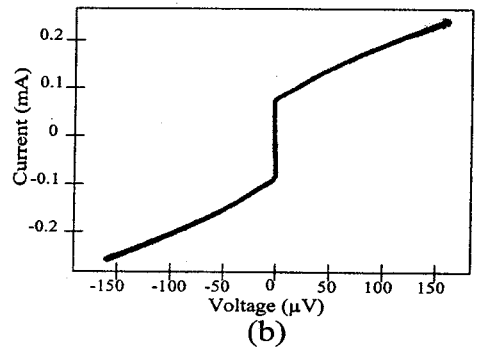
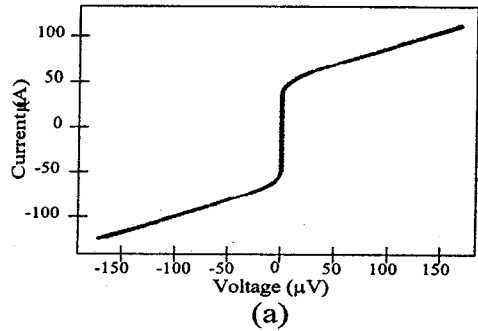


그림 6. Ar 이온 식각과 전자선리소그래피를 이용하여 제작한 접합의 전형적인 전류-전압 특성 곡선.

고, 밀링의 강도 조절로 적절한 손상을 입혀 damaged YBCO가 되게 한다. 이러한 공정을 통해 폭이 매우 얇은 damaged YBCO를 사이에 두고 YBCO - damaged YBCO - YBCO의 형상으로 조셉슨 접합이 제작된다. 그림 5는 최종적인 접합의 입체적인 그림을 나타내고 있다. 그림 6 (a), (b)는 제작된 전형적인 조셉슨 접합의 전류-전압 곡선을 보인다. 77 K에서, 접합폭  $3 \mu\text{m}$ 인 접합

의 임계전류값은 각각  $68 \mu A$ ,  $110 \mu A$ , 정상저항값은  $3.1 \Omega$ ,  $1.1 \Omega$ ,  $I_c R_N$ 값은  $211 \mu V$ ,  $121 \mu V$  등을 나타내고 있다. 그림 7 (a), (b)는 이온밀링에서 전류밀도의 강도 및 시간 조절을 통해 적절한 손상을 입혀 제작된 접합의 전류-전압 곡선의 변화를 나타낸다. 그림 7 (a)는 77 K에서 초기 손상 받은  $5 \mu m$  패턴 폭의 접합으로 임계전류값과 정상저항값이  $680 \mu A$ ,  $0.16 \Omega$ 이었으나, 이온빔을 조절하면서  $75 \mu A$ ,  $1.43 \Omega$ 으로 조절되는 것이 그림 7 (b)에 나타난다. 이것은 기존의 접합제작 과정이 가지는 재현성 문제 및 특성의 균일성문제를 Ar 이온의 입사 조건을 제어함으로써 해결 할 수 있음을 의미한다.

### 3. 결론

본 연구에서는 새로운 형태의 고온초전도체 조셉슨 접합 제작방법을 제안하였는데, 접합의 제작은 STO 기판에 YBCO와 Au를 증착한 박막을 사용하였다. 전자선리소그래피를 이용하여 일렉트로레지스트의 손상될 접합부위만을 노출시켜

이온빔을 통해 손상 및 박막두께를 얇게 만들어 YBCO - damaged YBCO - YBCO 형태의 접합을 제작하였다.  $3 \mu m$  패턴 폭의 접합은 77 K에서 임계전류값은 각각  $68 \mu A$ ,  $110 \mu A$ , 정상저항값은  $3.1 \Omega$ ,  $1.1 \Omega$ ,  $I_c R_N$ 값은  $211 \mu V$ ,  $121 \mu V$ 을 가지는 전형적인 조셉슨 접합이었다. 일렉트로레지스트와 접합의 손상 부위의 폭을 AFM과 SEM을 통해 대략  $1000 \sim 2000 \text{ \AA}$  정도임을 확인하였다. Ar 이온의 입사조건을 제어함으로써 접합특성의 변화를 확인할 수 있었고, 조절이 가능하였다. 77 K에서 접합폭  $5 \mu m$ 인 초기 접합의 임계전류값과 정상저항값은  $680 \mu A$ ,  $0.16 \Omega$ 이었고, 조절된 값은 각각  $75 \mu A$ ,  $1.43 \Omega$ 으로 향상되었다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] J. E. Mercereau, Rev. Phys. Appl. 5, 13 (1970).
- [2] D. Dimos, P. Chaudhari, and J. Mannhart, Phys. Rev. B41, 4038 (1990).
- [3] 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, Progress towards a YBCO circuit process, in R. D. McConnell and R. Noufi, Science and Technology of Thin Film Superconductors 2, Plenum Press, New York, 549 (1990).
- [4] K. Char, L. Antognazza and T. H. Geballe, Appl. Phys. Lett. 65, 904 (1994).
- [5] M. J. Zani, J. A. Luine, R. W. Simon, and R. A. Davidheiser, Appl. Phys. Lett. 59 (2), 234 (1991).
- [6] A. I. Braginski, in SQUID sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications, H. Weinstock ed; Kluwer Academic Publishers, 1996. pp 250.
- [7] 김인선, 임해용, 김동호, 박용기, 박종철, 센서학회지, 제7권 제1호 (1998).

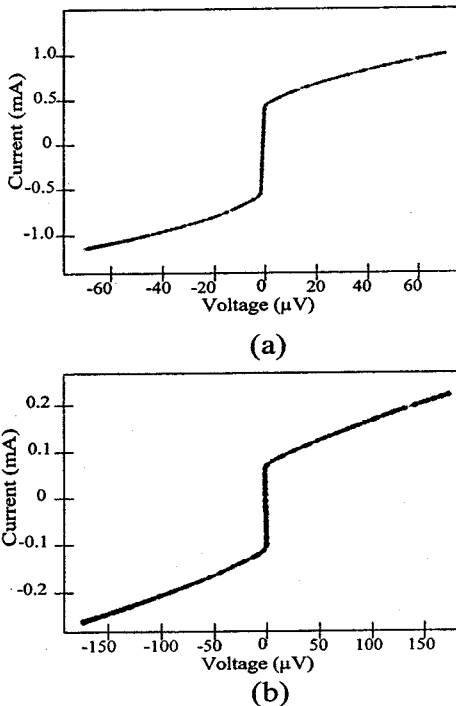


그림 7. Ar 이온밀링에 의하여 조절된 접합의 전류-전압 특성. (a) 초기 접합, (b) 조절된 접합.