

Fabrication of the interface-treated ramp-edge Josephson junctions using $\text{Sr}_2\text{AlTaO}_6$ insulating layers

$\text{Sr}_2\text{AlTaO}_6$ 절연막을 이용한 계면처리된 경사형 모서리 조셉슨 접합의 제작

Chi Hong Choi, Gun Yong Sung, Seok Kil Han, Jeong-Dae Suh, and
Kwang-Yong Kang

최치홍, 성건용, 한석길, 서정대, 강광용

P.O. Box 106, Yusong, Taejeon, Korea 305-600,
Telecommunications Basic Research Lab.,
Electronics and Telecommunications Research Institute

대전광역시 유성우체국 사서함 106,
한국전자통신연구원, 원천기술연구본부

We fabricated ramp-edge Josephson junctions with barriers formed by interface treatments instead of epitaxially grown barrier layers. Low-dielectric $\text{Sr}_2\text{AlTaO}_6$ (SAT) layer was used as an ion-milling mask as well as an insulating layer for the ramp-edge junctions. An ion-milled $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)-edge surface was not exposed to solvent through all fabrication procedures. The barriers were produced by structural modification at the bottom YBCO edge using plasma treatment prior to deposition of the top YBCO electrode. We investigated the effects of pre-annealing and post-annealing on the characteristics of the interface-treated Josephson junctions. The junction parameters were improved by using in-situ RF plasma cleaning treatment.

1. 서론

고온 초전도체의 전자 공학적인 응용은 낮은 표면저항을 이용한 마이크로파 통신 부품, 조셉슨 효과를 이용한 DC, RF SQUID (Superconducting Quantum Interface Device)[1-3], 단일 자속 양자의 스위칭을 이용한 디지털 회로 등이 있다. 이러한 응용을 위해서는 양질의 고온초전도 박막을 이용한 조셉슨 접합 제작 기술이 개발되어야 한다.

경사형 모서리 접합을 제작하기 위해서는 초전도체와의 접촉저항이 매우 작고, 화학반응이 일어나지 않아야 하며 초전도체가 에피택셜(epitaxial)하게 성장 가능한 장벽물질을 사용하여야 한다. 뿐만 아니라 장벽(barrier) 두께, 모서리(edge) 각, 접합 모서리 면의 계면 구조, 균일성, 이온 밀링 [4] 등의 접합 제작의 중요한 변수를 제어하기가 상당한 어려움이 있으며 이것으로 인해 그 동안의 많은 연구에도 불구하고 제작의 복잡함과 균일성, 재현성이 떨어진다.

이러한 장벽물질을 사용함에 따라 발생하는 위와 같은 많은 문제점, 초전도체/장벽층 계면의 제어, 장벽층의 전기적, 구조적 특성의 제어와 같은 해결해야 할 문제점들이 존재한다. 특히 고온에서의 박막 성장이 균일하지 못하기 때문에 증착 공정은 고온초전도 접합을 위한 균일한 얇은 장벽의 제작에 적합하지 않다. 고온초전도 조셉슨 접합의 균일화를 향상시키기 위해서 새로운 형태의 장벽 제조 기술이 요구되고 있다. 이러한 관점에서 최근 몇몇 연구 그룹에서는 장벽물질을 사용하지 않고 구조적, 전기적 특성이 다른 인위적 장벽을 이용한 경사형 모서리 접합에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 인위적인 장벽을 만드는 방법으로는 장벽층 증착 공정 대신 진공 열처리와 RF plasma 처리공정을 이용한 interface-engineered junction (IEJ)[5], 승온 후 이온빔 손상을 이용한 Hot Ion Damage (HID) 공정과 하층 전극 모서리를 화학적으로 처리하는 Controlled Interfacial Disorder (CID) 공정[6], YBCO와 격자상수, 열팽창 계수가 비슷하고 상대적으로 낮은 유전률을 가지는 절연 물질인 LaSrAlTaO (LSAT)를 절연층과 기판으로 사용하여 이온빔으로 인위적인 장벽층을 만드는 공정[7] 등이 있다.

따라서 본 연구에서는 인위적인 장벽물질을 이용한 경사형 조셉슨 접합을 제조하기 위해서 상대적으로 낮은 유전률을 갖는 Sr₂AlTaO₆ (SAT)를 절연층 뿐만 아니라 이온 밀링 마스크로 사용하였다. 이 방법을 사용할 경우 이온 식각된 YBCO 경사면은 모든 제작 공정 동안 솔벤트에 노출되지 않아 보다 양질의 접합을 얻을 수 있으며 재현성을 향상시킬 수 있다. 인위적인 장벽은 상층 YBCO 전극을 증착하기 전에 RF plasma 처리에 의해 형성되는 하층 YBCO 경사면 표면의 구조적 변형층을 이용하였다. 또한 RF plasma 조건에 따른 cleaning 효과를 연구하였다.

2. 실험방법

고온 초전도체를 이용한 경사형 모서리 조셉슨 접합의 제작은 LAO 단결정 기판 위에 YBCO와 SAT는 KrF 엑시머 레이저 (파장 : 248 nm)를 이용한 펄스 레이저 증착법 (pulsed laser deposition)을 사용하였다. 증착된 하층 초전도 전

극층을 포토리소그래피 (photolithography) 공정을 이용하여 PR을 패터하였다. Ar 이온 밀링 장치에서 이온빔 전압과 전류밀도는 350 V, 1.5 mA/cm²로 하고, 이온빔 입사각 (α)은 30 ~ 65°, PR 마스크 각 (θ)은 90°로 하여 1차 이온 밀링시 YBCO/SAT 층 중 SAT 층만을 식각하여 2차 밀링시 SAT 층을 이온 밀링 마스크로 사용하고자 한다. 2차 이온 밀링은 PR 제거 후, 패터된 SAT를 이온 밀링 마스크로 이용하여 YBCO를 식각하였다. 이렇게 최종적으로 제작된 모서리각은 입계면의 생성을 억제하기 위한 20° 이하의 작은 각을 갖는다. 470 °C, 진공에서 1시간 동안 열처리 과정을 거친 후 RF plasma 처리를 실행하였다. 상층 초전도 전극층과 절연층을 최적화 조건에서 연속 증착하였다. 하층 초전도 전극층의 식각과 같은 조건으로 포토리소그래피와 Ar 이온 밀링을 통해 상층 초전도 전극층을 식각하였다. 측정단자와의 전기적 접촉을 위해 포토리소그래피를 거쳐 1 % HF 수용액으로 전극 pad 부분을 노출시켰다. 전극 pad에 Au를 증착하고 lift-off 방법으로 Au pad를 완성하였다. 최종적으로 경사형 모서리 조셉슨 접합을 후열처리를 통하여 이온 밀링에 의한 손상을 회복하고자 하였다.[8-9]

3. 결과 및 고찰

SAT는 STO와 비교하여 상대적으로 낮은 유전률을 갖으며 격자상수, 열팽창계수가 YBCO와 상당히 비슷하여 절연물질로써 새롭게 사용되고 있다. SAT 증착 조건은 최적화된 YBCO 증착 조건을 기초로 하여 최적화를 시도하였다. 기판 온도를 변화시킨 결과, SAT 박막의 표면 상태는 750 °C를 기준으로 온도가 변함에 따라 boulder가 증가함을 알 수 있었다. 또한 레이저 에너지 밀도를 1.2 ~ 2.0 J/cm² 범위에서 변화시켰을 경우 레이저 에너지 밀도가 낮아질 수록 표면 거칠기가 증가하였다. 그러나 타겟과 기판과의 거리의 변화에 의한 박막 표면 변화는 거의 관찰되지 않았으나 공정상 요구되는 SAT 두께를 만족시키기 위하여 5.5 cm로 최적화 하였다. 이렇게 최적화된 조건에서 증착된 YBCO/SAT 다층박막은 비교적 평탄한 표면 상태를 얻을 수 있었다 (그림 1). 본 실험의 YBCO 및 SAT 박막의 최적화된 증착 조건을 표 1에 나타내었다.

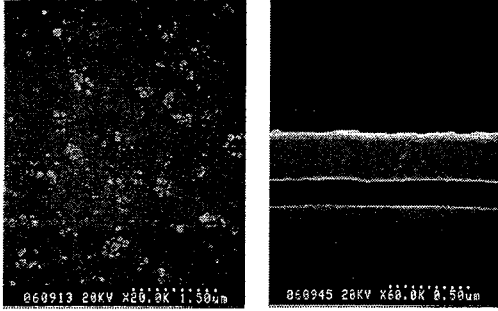


Figure 1. SEM images of SAT surface and cross-section.

본 실험에서는 식각된 YBCO 경사면이 솔벤트에 노출되어 열화되는 것을 방지하기 위하여 2-step 이온 밀링법을 채택하였다. 그리고 2-step 이온 밀링 후 최종적인 모서리각은 20° 이하로 제작하여 모서리에서의 입계면의 생성을 억제하는 등의 특성을 향상시키고자 하였다. 1차 이온 밀링시 이온빔 입사각 (α)을 $30 \sim 55^\circ$ 로 변화시켰으며 PR 마스크 각 (θ)은 90° 로 고정하여 SAT만을 식각하였다. PR을 제거한 후 SAT를 식각 마스크로 사용하는 2차 이온 밀링시에는 이온빔 입사각 (α)을 65° , PR 마스크 각 (θ)을 90° 로 고정하여 $16 \sim 18^\circ$ 의 낮은 경사각을 제작하였다 (그림 2). 이온빔 입사각이 커질수록 더 낮은 입사각을 얻을 수 있으나 최종 경사각의 제어는 1차 이온 밀링시 이온빔 입사각과는 무관하며 2차 이온 밀링시 이온빔 입사각에 의하여 전적으로 좌우된다.

	YBCO	SAT
energy density	2 J/cm ²	
temperature	820 °C	750 °C
O ₂ pressure	100 mTorr	
target-substrate distance	6.5 cm	5.5 cm
substrate	LaAlO ₃ (100)	

Table 1. Deposition condition of YBCO and SAT thin film.

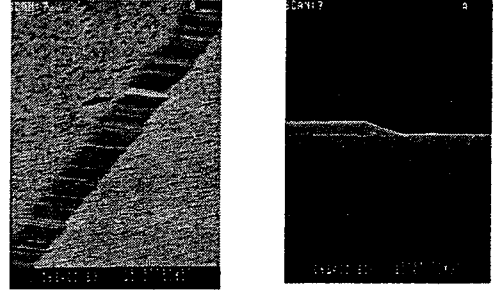


Figure 2. SEM images for the surface and cross-section of a ramp-edge using two step ion milling.

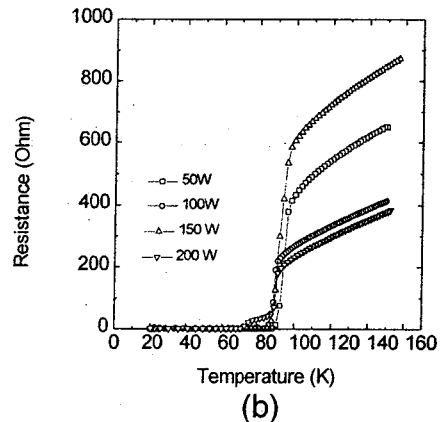
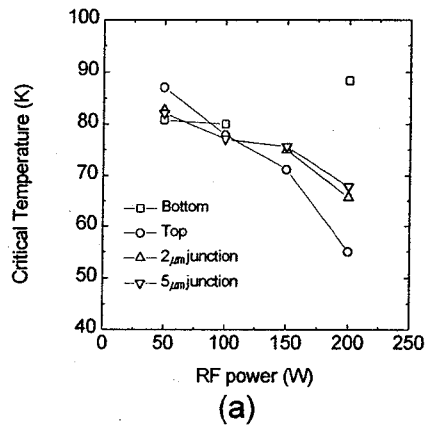


Figure 3. (a) Critical temperature vs RF power plot of bottom, top, 2 μm, and 5 μm junction, (b) resistance vs temperature of 5 μm junction plot at various RF plasma condition.

경사형 모서리 접합의 특성은 상층과 하층 YBCO 간의 계면 상태에 크게 의존한다. 특히 긴 tail이 남는 등의 현상은 공정 상에서 발생한 오염 및 이온빔 손상 등에 의한 것으로 볼 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 RF plasma cleaning을 도입하여 계면의 상태를 향상시킬 수 있다. RF plasma cleaning 실험은 100 mTorr의 Ar 분위기 하에서 50 ~ 200 W의 RF power를 걸어주어 cleaning을 수분간 실행하였다. RF power가 감소함에 따라 상층, 하층 및 접합의 임계온도 (T_c)가 증가함을 알 수 있다 (그림 3).

또한 RF power가 200 W로 증가한 경우에는 하층의 임계온도 88 K와 비교하여 상층과 접합의 임계온도가 각각 55 K, 66 K로 크게 감소함을 알 수 있는데 이것은 큰 RF power로 인하여 하층뿐만 아니라 기판까지 식각되어 계속해서 증착된 상층 YBCO의 결정성이 크게 저하되었기 때문이다. 100 mTorr의 Ar 분위기 하에서 50 W의 RF power를 걸어주어 cleaning 하었을 때 임계전류 밀도 (J_c)는 70 K에서 1×10^5 A/cm² 이상의 값을 나타내었다 (그림 4).

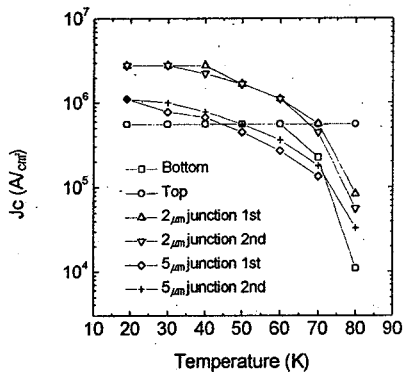


Figure 4. J_c of the Josephson junction as a function of temperature.

4. 결론

새로운 절연 물질로 사용한 SAT 박막의 증착 조건을 최적화했으며 제작된 YBCO 모서리의 슬벤트에 노출시키지 않기 위한 2-step 이온·밀링 방법으로 18° 이하의 낮은 모서리각을 얻었다.

50 W의 RF power에서 가장 좋은 cleaning 효과를 얻었으며 임계온도는 82 K, 임계전류밀도는 70 K에서 1×10^5 A/cm² 이상이었다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부와 과학기술부의 연구비 지원에 의한 것임을 밝히며, 이번 본부장님의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Jaklevic, R. C., Lambe, J., Silver, A. H., and Mercereau, J. E., Phys. Rev. Lett., 12, 159-160 (1964).
- [2] Zimmerman, J. E., Thiene, P., and Harding, J. T., J. Appl. Phys., 41, 1572-1580 (1970).
- [3] Mercereau, J.E., Rev. Phys. Appl., 5, 13-20 (1970).
- [4] C. L. Jia, M. I. Faley, U. Poppe, and K. Urban, Appl. Phys. Lett., 67, 3637 (1994).
- [5] B. H. Moeckly and K. Char, Appl. Phys. Lett., 71, 2526 (1997).
- [6] Brian D. Hunt, Martin G. Forrester, John Talvacchio, and Robert M. Young, submitted to IEEE Trans. On Appl. Supercond.
- [7] T. Satoh, M. Hidaka, and S. Tahara, submitted to IEEE Trans. On Appl. Supercond.
- [8] K. Char, L. Antognazza and T. H. Geballe, Appl. Phys. Lett. 65, 905 (1994).
- [9] D. Reagor, R. Houlton, K. Springer, M. Hawley, Q. X. Jia, C. Mombourquette, F. Garzon, and X. D. Wu, Appl. Phys. Lett., 66, 2282 (1995).