

Fabrication of interface-controlled Josephson Junctions by Ion beam damage

Sang Hyeob Kim*, JunHo Kim and Gun Yong Sung

Electronics & Telecommunications Research Institute

161 Kajong-Dong, Yusong-Gu, Taejon, 305-350, Rep. of Korea

Received 20 August 2001

이온빔 충격에 의한 계면 조절형 조셉슨 접합의 제작

김상협*, 김준호, 성건용

Abstract

We have demonstrated ramp-edge Josephson junctions using high temperature superconductors without depositing artificial barriers. We fabricated a surface barrier formed naturally during an ion beam etching process and the annealing under the oxygen atmosphere. The experimental results imply that the barrier natures such as the resistivity are varied by the annealing conditions and the ion milling conditions including the beam voltages. Thus, the annealing and etching conditions should be optimized to obtain excellent junction properties. In optimizing the fabricating factors, the interface-controlled junctions showed resistively shunted junctions like current-voltage characteristics and an excellent uniformity. These junctions exhibited a spread (1σ) of I_c is 10 % for chips containing 7 junctions at 50K.

Keywords : Josephson junctions, interface -controlled junctions, ion beam etching, annealing

I. 서 론

고온 초전도체를 기반으로 하는 경사형 모서리 조셉슨 접합은 디지털 소자의 발전과 함께, 활발하게 연구가 진행되어 왔다. 그러나 대부분의 연구 결과가 디지털 소자에서 사용되는 경사형 모서리 접합 계면을 인공적으로 증착하여 제작하고 있으며, 전극 재료는 $YBa_2Cu_3O_x$ 와 다른 재료를 사용하고 있다. [1, 2] 이 접합은

회로 제작에 사용하기 어려운데, 그 원인은 접합 계면이 가지는 불일치한 격자상수와 접합 계면의 불균일한 두께 때문이었다. 이 때문에 100개 이상의 접합을 가지는 집적 소자에서 작동하는 경우 많은 문제점을 나타내었다.

최근, 접합 계면을 인위적으로 제작하였을 때 발생하는 문제점을 해결하기 위한 여러 가지 방법이 발표되었다. Moeckly와 Char[3]는 균일한 특성을 가지는 IEJs (Interface - engineered Junctions)을 처음으로 발표하였다. Satoh등[4]은 Moeckly와 유사한 제작 방법을 이용하여 대용량 집적회로에 사용 가능한 접합을 제작 하였

*Corresponding author. Fax : +82 42 860 6836

e-mail : shk1028@etri.re.kr

다. 그러나 IEJs를 제작하고 있는 그룹들이 제작 과정에 있어서 각각의 그룹마다 서로 다른 제작 과정을 제안하고 있으며, 여전히 주전극 물질인 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 와 접합 계면 물질 사이의 불균일성은 접합의 재현성을 저하시키고, I_c 퍼짐 값을 개선시키지 못하는 원인이 되고 있다.

Sung등[5]은 접합의 재현성 및 I_c 퍼짐 값을 개선시키기 위해서 IEJs의 공정을 ICJs (Interface - controlled junctions) 공정으로 개선하였다. 이 공정은 이온 밀링 공정에서 발생하는 열에너지를 줄이고, 균일한 경사형 모서리 표면의 제작 및 화학 원소들과의 반응을 일으키지 않도록 하기 위해서 저온에서 두 단계로 이온 밀링 공정을 수행하는 것이다. 접합의 장벽층은 상부 전극층의 YBCO박막을 증착하기 전에 공정을 진행하는 이온 밀링과 어닐링 과정에서 형성되며, 이 과정은 접합 계면의 구조적, 화학양론적 변화를 일으키고, 재현성 및 균일성에 큰 영향을 준다. 그러므로 이온 밀링과 어닐링 과정에 영향을 주는 변수를 조사하는 것은 우수한 ICJs를 제작하는데 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 우수한 ICJs를 제작하기 위해서 상부 전극을 증착하기 전 공정에서 다양한 이온 밀링과 어닐링 조건을 조사하여 ICJs의 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 실험 방법

접합의 제작은 2-단계 이온 밀링 공정으로 하였으며, 에칭 마스크는 PR(photo - resist)을 사용하는 대신에 YBCO 주전극 층위에 증착한 SAT($\text{Sr}_2\text{AlTaO}_6$)박막을 패터닝하여 사용하였다. YBCO와 SAT 박막은 248 nm의 파장을 가지는 KrF PLD를 사용하여 STO(100) 단결정 기판 위에 증착하였다. PR re-flowing 온도, 이온빔의 입사각과 기판의 회전 속도는 상부 전극의 경사형 모서리 표면이 균일하고 청정한 표면을 가지도록 최적화 하였다. 2-단계 이온 밀링 공정의 첫 단계는 350V/30mA의 식각 조건에서 re-flowed AZ5214 PR 마스크를 사용하여 기판을 회전시키면서 300 nm두께의 절연층을 식각하였다. 두 번째 단계는 PR을 제거한 후, 남아있는 100 nm의 SAT층과 200 nm의 YBCO층을 다양

한 조건에서 패터닝된 SAT 마스크를 이용하여 2-단계 이온 밀링을 하였다. 이온빔의 충격에 의해서 손상되어진 시료들을 상부 전극인 YBCO 박막을 증착하기 전에 다양한 온도, 산소 압력과 어닐링 유지시간을 변화시키면서 어닐링 하였다. 상부 전극은 접합의 폭을 일정하게 유지하기 위해서 2-단계 이온 밀링으로 패터닝 하였다. 마지막으로 접촉 전극으로 사용되는 Au는 스퍼터링으로 증착하고 lift-off로 패터닝 하였다.

III. 결과 및 토의

Fig. 1은 2-단계 이온 밀링 공정의 두 번째 단계에서 이온 빔 전압의 변화에 따른 소자의 저항과 온도 특성을 나타낸 것이다. 이온빔의 전압이 500 V일 때 임계 온도이하로 온도가 감소함에 따라 소자의 저항 값이 급격히 감소하다가 86 K 근처에서 장벽층의 생성에 따라 일정한 저항 값을 유지하다가 80 K 근처에서 온도가 감소함에 따라 급격히 0 저항 값을 나타내고 있다. 이것은 주 전극인 YBCO 박막의 표면에 이온빔의 충격에 따른 구조적, 화학양론적 변화가 발생하여 경사형 모서리 표면에 접합의 장벽층이 형성되었음을 나타내고 있다. 그러나 약 6 K 정도의 온도 구간에서 접합의 저항 값을 나타내고 있어 장벽층의 두께가 매우 얇고 불연속임을 나타내고 있다. 이온빔 전압이 700 V일 때 임계 온도이하로 온도가 감소함에 따라 소자의 저항 값이 급격히 감소하다가 88 K 근처에서 장벽층의 생성에 따라 일정한 저항 값을 유지하다가 80 K 근처에서부터 온도가 감소함에 따라 급격히 0 저항 값을 나타내고 있다. 이것은 이온빔 전압이 500 V일 때와 마찬가지로 장벽층이 형성되었음을 나타내고 있다. 또한, 이온빔 전압이 500 V일 때와 비교하였을 때 약 8 K 정도의 구간에서 접합의 저항 값을 나타내고 있어 500 V일 때에 비해서 장벽층이 적절한 두께를 유지하며 안정된 구조와 화학양론비를 가지고 있다고 사료된다. 이온빔 전압이 900 V일 때 임계 온도 이하로 온도가 감소함에 따라 저항 값이 서서히 감소하다가 약 79 K 근처에서부터 0 저항 값을 나타내고 있다.

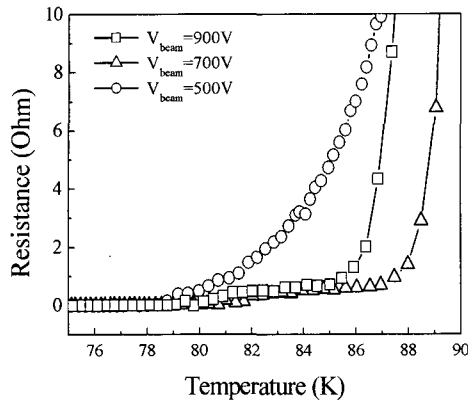


Fig. 1. The resistance vs. temperature for several interface-controlled junctions with different values of ion beam voltages.

이것은 장벽층이 붕괴되어 불연속적으로 형성되어서 상/하부 전극의 YBCO박막의 저항 값이 반영된 것이다.

Fig. 2는 상부 전극인 YBCO 박막을 증착하기 전, 2-단계 이온 밀링 공정의 두 번째 단계에서 이온빔 전압을 700 V로 유지하여 공정을 진행한 후, 이온빔 충격에 따른 안정한 장벽층을 형성시키기 위해서 100 mTorr 산소 분위기에서 어닐링 했을 때, 어닐링 유지 시간의 변화에 따른 소자의 저항과 온도 특성을 나타낸 것이다. 어닐링을 하지 않고 상부 전극인 YBCO 박막을 증착 한 후, 임계 온도이하로 온도를 감소시키며 저항 값을 측정하였을 때, 접합의 저항 값이 나타나지 않고 0 저항 값이 나타난 것은 장벽층이 형성되지 않았음을 나타낸다. 그러나 어닐링 유지 시간이 증가함에 따라 접합의 저항이 나타난 후, 온도가 감소함에 따라 0 저항 값이 나타나고 있다. 이것은 장벽층이 형성되었음을 나타낸다. 어닐링 유지 시간이 30분일 때, 일정하게 접합의 저항 값이 유지된 후, 0 저항 값으로 감소하고 있어 안정한 장벽층이 형성되었음을 나타내고 있다. 그러나, 어닐링 유지 시간이 45분, 60분으로 증가 하였을 때, 접합의 저항 값이 일정하게 유지되지 않고 서서히 감소되어 0 저항 값이 나타나고 있는 것은 어닐링 유지시간이 증가함에 따라 장벽층이 구조적, 화학 양론적으로 불안정한 비정질 상태에서 안정한 상태로 변화하면서 장벽층이 상/하부 전극과 동일한 YBCO박막으로

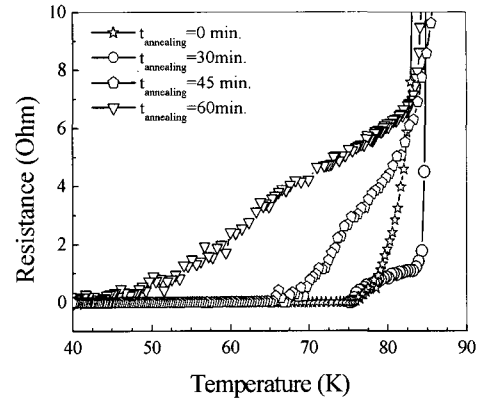


Fig. 2. The resistance vs. temperature for several interface-controlled junctions with different values of annealing holding time.

회복되어 장벽층의 붕괴가 진행되고 있다고 사료된다.

Fig. 3은 상부 전극인 YBCO 박막을 증착하기 전, 이온빔의 충격에 따른 안정한 장벽층을 형성시키기 위해서 어닐링 했을 때 산소 압력의 변화에 따른 소자의 저항과 온도 특성을 나타낸 것이다. 산소 압력이 증가함에 따라 접합의 저항이 일정하게 나타나고 있다. 그러나 진공 상태에서 어닐링을 하면 접합의 저항 값이 나타나지 않고 주전극의 저항 값이 나타나고 있다. 이것은 진공 분위기에서 어닐링은 장벽층을 형성하지 못하고 있음을 나타내고 있다.

이온빔 전압을 700 V, 어닐링 유지 시간을 30분, 어닐링 과정에서 산소압력을 400 mTorr로 유지하는 최적화 조건에서 4 μm 선폭의 ICJs를 제작하여 전류-전압 특성을 측정하였다. 그 결과, 측정 온도가 감소함에 따라 명확한 RSJ 특성이 나타나며, 50 K에서 $I_c = 0.5 \text{ mA}$, $R_n = 0.6 \Omega$, $J_c = 6.25 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 을 나타내었다.

Fig. 4는 최적화 조건에서 제작한 4 μm 선폭의 접합 배열의 칩 테스트 결과 얻어진 I_c 퍼짐 값의 변화를 나타내고 있다. 이들 접합은 50 K에서 I_c 평균값이 1.37 mA를 나타내고 있어 균일성이 우수하게 나타났다. 또한 최적화 조건에서 7개 접합에 대한 I_c 의 1σ (표준편차/평균값)가 10%로 나타났다. 이것은 최적화 조건에서 10개 이하의 접합을 포함하는 간단한 디지털 소자를 만들기에 충분한 값을 나타내고 있다.

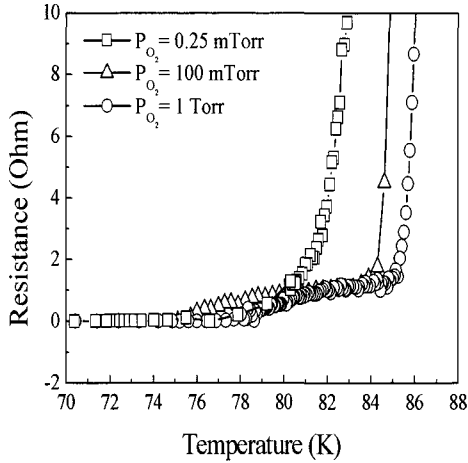


Fig. 3. The resistance vs. temperature for several interface-controlled junctions with different values of O₂ pressure during the annealing.

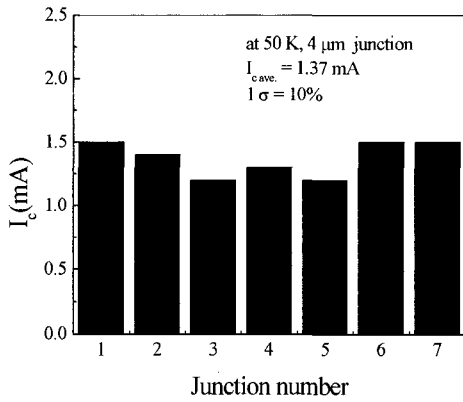


Fig. 4. The histogram of I_c values at 50 K for 7 junctions in a chip.

IV. 결 론

상부 전극을 증착하기 전, 다양한 이온 밀링과 어닐링 조건이 조셉슨 접합의 특성에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 본 실험 결과 이온빔 전압은 700 V, 어닐링 유지 시간을 30 분, 어닐링시 산소압력을 400 mTorr로 유지하여 경사형 모서리 접합을 제작하였을 때 전류-전압 특성은 RSJ형태를 나타내고 I_c = 0.5 mA, R_n = 0.6 Ω, J_c = 6.25 × 10⁵ A/cm²을 나타내었다. 이들 조건에서 4 μm 선폭의 접합의 칩 테스트 결과, 50 K에서 I_c 평균값은 1.37 mA 이었고, 7 개 접합에 대한 I_c의 1σ가 10% 이었다.

감사의 글

본 연구는 산업기술연구회와 과학기술부의 연구비 지원에 의한 것임을 밝힙니다.

참고 문헌

- [1] T. Hashimoto, S. Inoue, T. Nagano and J. Yoshida : IEEE Trans. Appl. Supercond., 9, 3821-3824 (1999).
- [2] A. G. Sun, D. J. Durand, J. M. Murduck, S. V. Rylov, M. G. Forrester and B. D. Hunt : IEEE Trans. Appl. Supercond., 9, 3825-3828(1999).
- [3] B. H. Moeckly, K. Char : Appl. Phys.Lett., 71, 2526-2528(1997).
- [4] T. Satoh, M. Hidaka and S. Tahara : IEEE Trans. Appl. Supercond., 9, 3141-3144 (1999).
- [5] G. Y. Sung and J. H. Kim : IEEE Trans. Appl. Supercond., 11, 1, 151-154(2001).