

# Demonstration of rapid single-flux-quantum RS flip-flop using YBCO/Co-YBCO/YBCO ramp-edge Josephson junction with and without ground plane

## YBCO/Co-YBCO/YBCO ramp-edge 접합을 이용한 RS flip-flop 회로 제작과 동작

J. H. Kim<sup>a</sup>, G. Y. Sung<sup>a</sup>, J. H. Park<sup>b</sup>, C. H. Kim<sup>b</sup>, K. R. Jung<sup>b</sup>, T. S. Hahn<sup>b</sup>, and J. H. Kang<sup>c</sup>

김준호<sup>a</sup>, 성건용<sup>a</sup>, 박종혁<sup>b</sup>, 김창훈<sup>b</sup>, 정구락<sup>b</sup>, 한택상<sup>b</sup>, 강준희<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Electronics and Telecommunications Research Institute, P.O. Box 106, Yusong, Taejeon 305-350, Korea

<sup>b</sup> Korea Institute of Science and Technology, P.O. Box 131, CheongRyang, Seoul 130-650, Korea

<sup>c</sup> Department of Physics, University of Incheon 402-749, Korea

<sup>a</sup>한국전자통신연구원, <sup>b</sup>한국과학기술연구원, <sup>c</sup>인천대학교 물리학과

### Abstract

We fabricated rapid single-flux-quantum RS flip-flop circuits with and without  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) ground plane. The circuit consists of SNS-type ramp-edge Josephson junctions that have cobalt-doped YBCO and  $Sr_2AlTaO_6$ (SAT) for barrier layer and insulator layer, respectively. The fabricated Josephson junction showed a typical RSJ-like current-voltage(I-V) characteristics above 50K. We successfully demonstrated RS flip-flop at temperatures around 50K. The RS flip-flop fabricated on ground plane showed more definite set and reset state in voltage-flux(V- $\phi$ ) modulation curve for read SQUID, which may be attributed to a shielding effect of the YBCO ground plane

**Keywords:** Rapid single-flux-quantum circuit, ramp-edge junction, RS flip-flop

### 1. 서론

고온 초전도체 single-flux-quantum(SFQ) 소자는, 소요 전력이 작고 빠른 스위칭 속도를 갖는 장점으로 최근 활발한 연구가 이루어지고 있다[1]. 실용적인 digital 소자로의 응용을 위해서는 ramp-edge 형태의 조셉슨 접합이 요구되며, 다층 박막의 재현성 있는 epitaxial 성장 기술이 필요하다. Ramp-edge 접합은 multilayer 성장 기술과 lithography 과정을 통해서 flexible하게 접합을 디자인할 수 있는 장점이 있다 [2-4].

현재, 초전도/계면처리층/초전도 형태의 계면 처리된 ramp-edge 접합이(interface engineered

junction(IEJ))  $I_c$  편차가 작아서 현실적으로 유망한 것으로 여겨지고 있다. 다른 형태인, 초전도/장벽층/초전도 형태의 ramp-edge 접합은 장벽층의 두께와 물질에 따라  $I_c R_n$  값을 조절할 수 있으며, 그에 따른 다양한 물리적 현상을 연구할 수 있는 장점이 있다. 반면, 초전도/장벽층/초전도 접합의 기본 구조는 IEJ와는 달리 인위적인 장벽층이 도입되어  $I_c$ 의  $1\sigma$  값이 커질 수 있는 단점을 안고 있다. 초전도/장벽층/초전도 접합에서 장벽층은 Co- $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO)[5], Co- $Pr_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (PBCO)[6], Ga-PBCO[7], Pr-YBCO[8] 등이 이용된다. Co-YBCO를 이용한 접합은 재현성이 우수하지만,  $R_n$  값이 작은 것으로 알려져 있다[5]. 하지만, Co-YBCO를 이용한

접합 제작은 IEJ 와 다른 SNS 형태의 접합 제작에 필요한 정보를 줄 수 있다. 우리는 Co-YBCO가 장벽층으로 삽입된 ramp-edge junction을 이용하여, RS flip-flop을 제작하고 그 특성을 조사하였다. 그리고, YBCO를 ground plane으로 도입하여, 똑같은 형태의 RS flip-flop을 제작하여 그 동작 특성을 조사하였다

## 2. 실험

### 2-1. RS flip-flop circuit 제작

Ground plane이 없는 RS flip-flop 제작을 위하여,  $\text{LaAlO}_3$ (LAO)을 기판으로 이용하였다. 우선 LAO 기판 위에 200nm 두께의 YBCO와 ion milling mask로 쓰이는 300nm 두께의  $\text{Sr}_2\text{AlTaO}_6$ (SAT)를 pulse laser deposition(PLD) 방법으로 증착하였다. Ar ion milling 중에는 시료를 시료 평면의 수직축을 중심으로 회전시키고, sample holder 후면을 액체 질소 flow로 냉각시켰다. 특히, Ar ion milling 중의 시료의 회전은 균일한 ramp-edge 면을 재현성 있게 만드는데 필수적이다[9]. 장벽층인 Co-YBCO( $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_{0.79}\text{Co}_{0.21}\text{O}_{7.3}$ )는 20nm 두께로 증착하였고, counter electrode인 YBCO와 capping layer인 30nm 두께의 SAT를 in situ로 증착하였다. RS flip-flop patterning이 끝난 후에 electrode pad로 Au를 증착하여 전기적 특성을 조사했다. Ground plane이 있는 RS flip-flop 제작을 위해서 300nm의 YBCO와 200nm의  $\text{SrTiO}_3$ (STO)를 증착한 후 앞의 과정과 똑같은 공정을 거쳐서 RS flip-flop을 제작하였다.

### 2-2. RS flip-flop circuit 특성 측정

Ramp-edge 접합의 저항-온도 특성을 four probe 방법으로 측정하였다. contact lead 선으로는 50  $\mu\text{m}$ 의 gold wire를 사용하였다. Ramp-edge 접합의

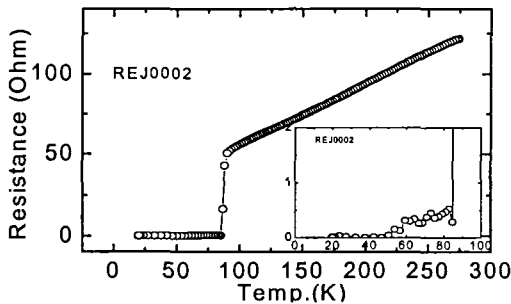


그림 1. Co-YBCO를 이용한 ramp-edge 접합의 저항-온도(R-T) 특성 곡선.

전류-전압(I-V) 특성과 RS flip-flop 특성 측정은 KIST에서 이루어졌다[10]. 모든 특성 측정은 액체 helium dewar에  $\mu$ -metal로 shielding한 probe를 직접 집어넣어서 하였다. Read SQUID의 control line은 Keithley 220/224 current source로 바이어스하였고, set과 reset은 HP E1328A D/A converter의 펄스를 인가하였다. Read SQUID의 전압은 Keithley 181 nanometer로 측정하였다.

Read SQUID의 bias 전류는( $I_{\text{bias}}$ ) I-V curve 상에서 normal 저항이 발생하는 지점의 전류값으로 결정되고, set과 reset pulse는 control current를 고정시킨 후 전류 크기를 변화시켜가면서, read SQUID의 전압값이 일정하게 보이는 두 state를 고른 후에 적당한 set과 reset pulse의 크기를 정한다.

RS flip-flop 동작시 control current의 크기는 read SQUID의  $V-\Phi$  특성 곡선상에서 전송 상수(transfer coefficient)  $V(=|\partial V/\partial \Phi|)$ 가 최대가 되는 지점으로 맞추어서, 미세한 외부 자기장의 반응에 민감하게 반응하도록 한다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1은 제작된 ramp-edge 접합의 전형적인 저항-온도(R-T) curve이다. 90K 근처와 58K 근처에서

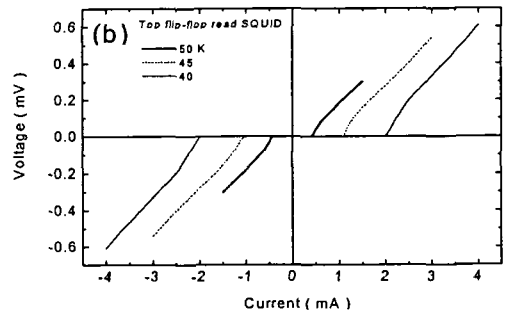
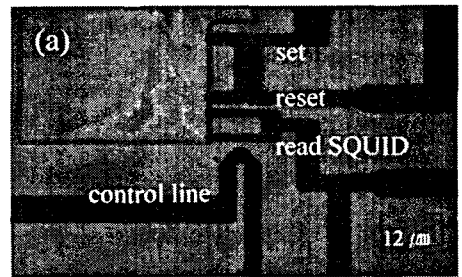


그림 2. Ground plane 없이 제작된 RS flip-flop의 광학 현미경 사진(a)과 read SQUID의 전류-전

압 특성 곡선(b)

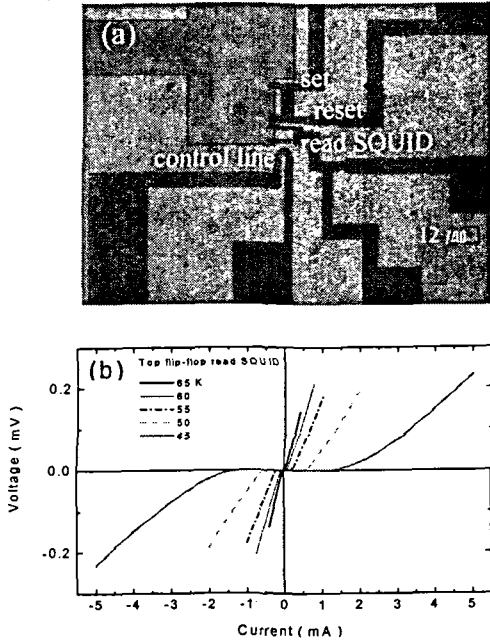


그림 2. Ground plane 없이 제작된 RS flip-flop의 광학 현미경 사진(a)과 read SQUID의 전류-전압 특성 곡선(b).

두 번의 초전도 전이가 나타나는데, 90K 부근에서의 초전도 전이는 상부와 하부의 YBCO의 초전도 전이이고, 57K 근처의 초전도 전이는 장벽층인 Co-YBCO의 초전도 전이로 해석된다. 잔여 저항인 장벽층 저항값은 1Ω 이하의 값으로 작았다.

그림 2는 ground plane 없이 제작된 RS flip-flop의 광학 현미경 사진과 read SQUID의 I-V 특성 곡선이다. I-V curve는 40, 45, 50K 에서 측정하였는데, RSJ-like 한 I-V 특성을 보여준다

그림 3은 ground plane 위에 제작된 RS flip-flop의 광학 현미경 사진과 read SQUID의 I-V 특성 곡선이다. 50K 이상의 온도에서 뚜렷한 RSJ-like한 I-V 특성을 보여준다. 하지만 45K 에서 측정된 I-V curve는 flux-flow 형태의 I-V 특성을 보인다. 이는 온도가 낮아질수록 장벽층인 Co-YBCO의 초전도 특성이 좋아지면서 weak link로서의 역할이 약화되는 것에 기인하는 것으로 생각된다.

그림 4는 ground plane 없이 제작된 RS flip-flop의 voltage-flux(V-Φ) 특성 곡선이다. 측정은 50K 에서 이루어졌고, bias 전류는( $I_{bias}$ ) 0.455mA로 가해졌다. flux는 control line을 통한 전류로 생성되고 그 크기가 조정된다. 그림 4-(a)에서 set

state와 reset state의 modulation curve가 voltage 축으로 shift 되지 않고 control current( $I_{control}$ ) 축으로 shift 되었다. 전송 상수는 0.7mA에서 가장 큰 값을 보였다. 그래서,  $I_{bias}=0.455mA$ ,  $I_{control}=0.7mA$ , set pulse=0.286mA, reset pulse=0.381mA로 두고 RS flip-flop의 동작 특성을 50K에서 관찰했는데, 그 결과는 그림 4-(b)에 나타나 있다. set 과 reset의 안정된 두 state 가 보이고, error 없이 flip-flop 이 동작함을 볼 수 있다. set 과 reset state의 전압 차이는  $\sim 2\mu V$  정도이다.

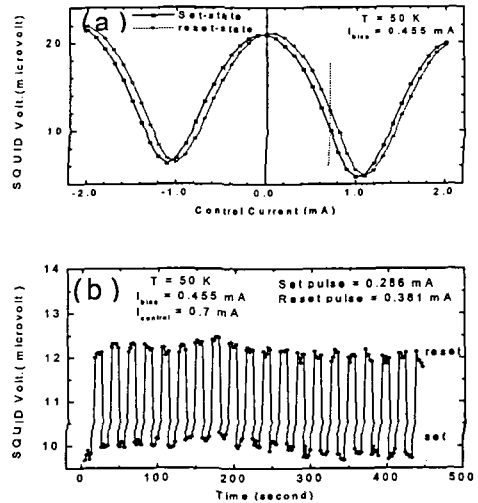


그림 4. Ground plane 없이 제작된 RS flip-flop의 read SQUID의 V-Φ 곡선(a)과 flip-flop 동작 특성 곡선(b).

그림 5-(a)는 ground plane 위에 제작된 RS flip-flop에 대해서 57K에서 측정한 voltage-flux(V-Φ) 특성 곡선이다. 이때,  $I_{bias}$ 로 0.165mA 두었다. Set과 reset의 각 modulation 곡선은 서로 SQUID voltage 축을 따라서 shift 되어서 정상적인 동작 특성을 보인다. Ground plane이 없는 RS flip-flop 회로가 control current 축으로 shift가 일어난 것과 달리 ground plane이 있는 RS flip-flop이 voltage 축으로 정상적인 shift를 보인 것은 YBCO ground plane이 flip-flop 동작 중에 생기는 임의의 flux를 shielding시킨 효과로 추측된다. 전송 상수는  $I_{control}$ 가 1mA 일때, 최대 값을 가진다.

그림 5-(b)는,  $I_{bias}=0.165mA$ ,  $I_{control}=1mA$ , set pulse=0.214mA, reset pulse=0.475mA로 두고 57K 측정한 RS flip-flop 특성 곡선이다. 400sec 근처에서 reset이 일어나지 않는 error가 발생하였다. 이는 thermal noise로 인해서 reset state로 옮겨 가

지 않은 것으로 보인다. 55K 에서 flip-flop 동작을 실시한 결과 error 가 없는 동작 특성을 보였다. 그림 5-(C)에 그 결과가 나타나 있다. set 과 reset 은 대략 1 $\mu$ V의 전압 차이를 보이면서 동작 되었다.

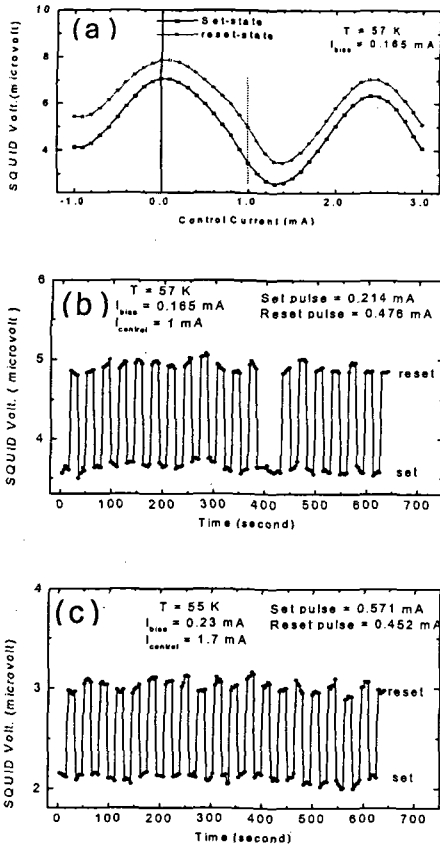


그림 5. Ground plane 없이 제작된 RS flip-flop의 read SQUID 의 V- $\Phi$  곡선(a)과 57K(b)와 55K(c)에서 낸 flip-flop 동작 특성 곡선.

#### 4. 결론

Co-YBCO가 장벽층으로 쓰인 SNS ramp-edge 접합으로, RS flip-flop을 제작하였고, YBCO ground plane을 삽입하여 똑같은 형태의 RS flip-flop을 제작하였다. 각 구성 ramp-edge 접합은 RSJ-like한 I-V 특성을 보였다. set pulse 와 reset pulse의 값을 정한 후에 set과 reset state에 대한 read SQUID 의 V- $\Phi$  특성 곡선을 측정 한 결과, ground plane이 없는 read SQUID는 control line 축으로의 modulation graph shift를 보였고, ground plane이

있는 read SQUID는 SQUID voltage 축으로의 shift를 보였다. 이는 ground plane이 있는 read SQUID의 경우, YBCO ground plane이 flip-flop 동작중에 생기는 임의의 flux를 shielding 시켜서 안정된 동작 특성을 보이는 것으로 생각된다. 또 read SQUID의 V- $\Phi$  특성 곡선에서 최대 전송 상수값을 보이는 I<sub>control</sub> 값을 찾은 후에 set 과 reset 의 연속 동작을 관찰 한 결과 ground plane 이 없는 RS flip-flop은 50K에서 안정된 flip-flop 동작을 보였다. 반면, ground plane 이 있는 RS flip-flop은 57K에서 error를 보였지만, 55K의 온도에서 측정 한 결과 안정적인 flip-flop 특성을 보여 주었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 중점연구사업과 산업 기술 연구회 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.

#### 참고 문헌

- [1] K. K. Likharev and V. K. Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond. 1,3, (1991).
- [2] J. Gao, W. A. M. Aarnink, G. J. Gerritsma and H. Rogalla, Physica C 171, 126, (1990).
- [3] B. D. Hunt, M. C. Foote and L. J. Bajuk, Appl. Phys. Lett. 59, 982, (1991).
- [4] K. Char, M. S. Colclough, T. H. Geballe and K. E. Myers, Appl. Phys. Lett. 62, 196, (1993).
- [5] K. Char, L. Antognazza and T. H. Geballe, Appl. Phys. Lett. 65, 904, (1994).
- [6] J. Yoshida, S. Inoue, T. Hashimoto and T. Nagano, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9, 3366, (1999).
- [7] M. A. J. Verhoeven, G. J. Gerritsma, H. Rogalla and A. A. Golubov, IEEE Trans. Appl. Supercond. 5, 2095, (1995).
- [8] C. Stolzel, M. Siegel, G. Adrian, C. Krimmer, J. Sollner, Wilkens, G. Schulz and H. Adrian, Appl. Phys. Lett. 63, 2970, (1993).
- [9] G. Y. Sung, C. H. Choi, K.- Y. Kang, M.- C. Lee, and S.- G. Lee, Proceedings of EUCAS 1999, 2, 217, (1999).
- [10] J. H. Park, Y. H. Kim, J. H. Kang, T. S. Hahn, C. H. Kim, J.M. Lee and S. S. Choi, Proceedings of EUCAS 1999, 2, 733, (1999).