

## Characterization of YBCO dc SQUID fabricated on sapphire substrate for biomagnetic applications

### 생체자기 응용을 위한 사파이어 기판 위에 제작된 YBCO dc SQUID 의 특성

Hae-Ryong Lim<sup>1,2</sup>, In-Seon Kim<sup>1</sup>, Dong Ho Kim<sup>2</sup>,  
Yong Ki Park<sup>1</sup>, and Jong-Chul Park<sup>1</sup>

임해용<sup>1,2</sup>, 김인선<sup>1</sup>, 김동호<sup>2</sup>, 박용기<sup>1</sup>, 박종철<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Research Institute of Standards and Science, P.O. Box 102, Yusong, Taejeon 305-606, Korea.

<sup>2</sup>Department of physics, Yeungnam University, Kyungsan 712-749, Korea.

<sup>1</sup> 대전광역시 유성우체국 사서함 102, 한국표준과학연구원, 초전도그룹.

<sup>2</sup> 경북 경산시, 영남대학교, 물리학과.

#### Abstract

YBCO step-edge dc SQUID magnetometers on sapphire substrates have been fabricated. CeO<sub>2</sub> buffer layer and YBCO films were deposited *in situ* on the low angle ( $\sim 35^\circ$ ) steps formed on the sapphire substrates. Typical 5- $\mu\text{m}$ -wide junction has  $R_N$  of 5  $\Omega$  and  $I_C$  of 50  $\mu\text{A}$  with large  $I_C R_N$  product of 250  $\mu\text{V}$  at 77 K. According to applied bias current, depth of voltage modulation was changed and maximum voltage was measured 16  $\mu\text{V}$ . Field noise of dc SQUID was measured 100~300 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  in the 1 kHz, and about 1.5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  in the 1/f region. For ac bias reversal method, field noise was decreased in the 1/f region. The QRS peak of magnetocardiogram was measured 50 pT in the magnetically shielded room.

**Keywords** : SQUID, Step-edge 접합, YBCO, 사파이어 기판.

#### I. 서론

초전도 양자간섭장치 (Superconducting Quantum Interference devices :SQUID) 는 인체의 심장에서 나오는 자기장이나, 물질의 결함부분에서 나타나는 와전류에 의한 국소 자기장 등, 여러 가지 미세한 자기 신호를 측정할 수 있는 자기 센서이다. 이는 인간이 개발한 센서 중에서 가장 감도가 우수한 소자로서 양자자속 ( $\Phi_0 = 2.07$

$\times 10^{-15}$  T-m<sup>2</sup>)보다 10 배 이상 작은 신호를 감지할 수 있는 능력이 있다. 고온 초전도 SQUID 는 현재 접합의 재현성 면에서 가장 우수하고, 신호 대 잡음비가 다른 접합 형태 (step-edge 접합, ramp-edge 접합)보다 작은 bicrystal 기판을 이용하여 많이 연구하고 있으나 [1~5], 상용품 bicrystal 기판은 가격이 고가이며, 접합의 위치를 임의로 선택할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 이러한 단점을 극복하기 위해서 다른 접합

형태 즉, step-edge [6~9], ramp-edge [10] 접합 등을 이용한 소자의 특성 평가도 활발하게 연구가 이루어지고 있다. Step-edge 접합은 SrTiO<sub>3</sub>, LaAlO<sub>3</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등 여러 가지 단결정 기판을 이용하여 연구하고 있다. 이 중에서 사파이어 기판은 다른 단결정 산화물 기판과 비교하여 가격이 저렴하고 5 inch 이상 대면적 기판을 얻을 수 있는 장점이 있어, 최근에 많이 연구되고 있는 기판 재료이다. 본 연구에서 사용된 사파이어 기판은 고온 초전도가 발견된 초기에 Yuan 과 Berezin [11,12] 등에 의해 step-edge SQUID 의 연구가 이루어졌으나, 소자의 특성과 재현성에 문제가 있어 그 동안 연구가 그의 중단되었다. 최근에 사파이어 기판 위에 YBCO 박막을 증착할 때, 적당한 buffer 층을 사용함으로써 양질의 박막을 얻을 수 있었다.

본 연구는 r-면 사파이어 기판을 이용하여 step-edge SQUID 를 제작하여 그 특성을 평가하고 응용 가능성을 알아보았다.

## 2. 실험 방법

1 cm × 1cm 크기의 r-면 사파이어 기판을 아세톤과 에탄올로 잘 세척한 후, 먼저 rf sputtering 증착법으로 20 nm 정도의 Au 박막을 증착하였다. Au 박막은 사파이어 기판이 투명하여 빛의 반사와 회절 현상에 의해서 생기는 photoresist (PR) mask 선상에 물결 무늬를 제거하기 위해서 사용하였다. 이러한 물결 무늬는 실제 계단형 모서리 접합을 제작할 때 접합의 특성을 저하시키는 원인이 되며, Au 박막을 얇게 증착함으로써 이러한 문제점을 해결하고자 하였다. Au 박막이 있는 사파이어 기판 위에 PR mask (AZ5214)를 스핀 코팅하여 입히고, Ar 이온 식각법을 이용하여 step-edge 를 제작하였다. 이 때 step 각도는 약 35°로 제어하였다. 식각 후 PR mask 와 Au 박막은 각각 아세톤과 KI+I<sub>2</sub> (15 %) 수용액을 이용하여 제거하고, 에탄올로 기판을 세척하였다. 계단 모서리가 제작된 사파이어 기판을 산소 1 기압 1050 °C에서 4 시간 이상 열처리하였다. 펄스 레이저 증착법을 이용하여 in-situ 방법으로 CeO<sub>2</sub> buffer 층과 YBCO 박막을 증착하였다. 이때, CeO<sub>2</sub> buffer

층의 두께는 약 15~20 nm 정도로 제어하였으며, YBCO 박막의 두께 ( $t$ )는 계단 높이 ( $h$ )에 대한 비로 조절하였는데, 두께비 ( $d=t/h$ )는 0.8 정도로 하였다. 전극은 Au 박막을 사용하였다. 이렇게 제작된 SQUID magnetometer 는 산소 1 기압 500 °C에서 1 시간 동안 열처리하였다. 이러한 조건에서 제작된 YBCO dc SQUID magnetometer 는 feedback coil 이 있는 PCB 기판 위에 부착하고, Al wire bounding 으로 전극을 연결하였다. 제작된 소자는 flux locked loop (FLL) 방식으로 특성을 조사하였다.

## 3. 결과 및 논의

펄스 레이저 증착법으로 사파이어 기판 위에 증착된 YBCO 박막의 임계온도와 임계전류 밀도는 각각 89 K,  $3 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> (77 K) 이상이다 [13,14]. 또한, step-edge 조셉슨 접합의 기본적인 특성은 RSJ 모델 거동에 따르며, 250  $\mu$ V의 전류-전압 특성 곡선을 보여주고 있다 [15]. 이러한 기본적인 제작조건을 바탕으로 사파이어 기판 위에 step-edge 형 dc SQUID magnetometer 를 제작하였다. 제작된 magnetometer 는 SQUID washer 에 pick-up loop 이 직접 연결된 형태이며, SQUID inductance 는 약 70 pH로 계산되었다. Magnetometer 의 실제 크기는 8 mm × 8 mm이며, 하나의 접합폭은 5  $\mu$ m이다.

그림 1은 사파이어 기판 위에 제작된 step-edge 형 YBCO SQUID magnetometer 의 전류-전압 곡선을 나타낸 것이다. 그림 1에서 # a는 resistibly shunted junction (RSJ) 모델 거동을 잘 보여주며, # b는 이중접합 구조를 하고 있으며 RSJ 모델과 flux flow 모델의 중간적인 형태이며, # c는 flux flow 모델의 거동을 보이고 있다. 표 1은 SQUID magnetometer 의 기본적인 전기적 성질을 나타낸 것이다. 이들 소자의 ICRN 은 250  $\mu$ V로 우수한 전기적 특성을 보여주고 있으나, 변조 전압의 크기는 bicrystal 기판 위에 제작된 소자보다 작게 나타났다. 이것은 두 접합의 임계전류의 차가 어느 정도 있어 나타나는 현상으로 생각된다. 또한, 전류-전압 곡선의 형태에 따라서 최대 변조 전압의 크기는 차이가 있었다. 또한, RSJ 모델에 가까운 전류-전

압 곡선 특성일수록 변조전압의 크기는 증가하였다.

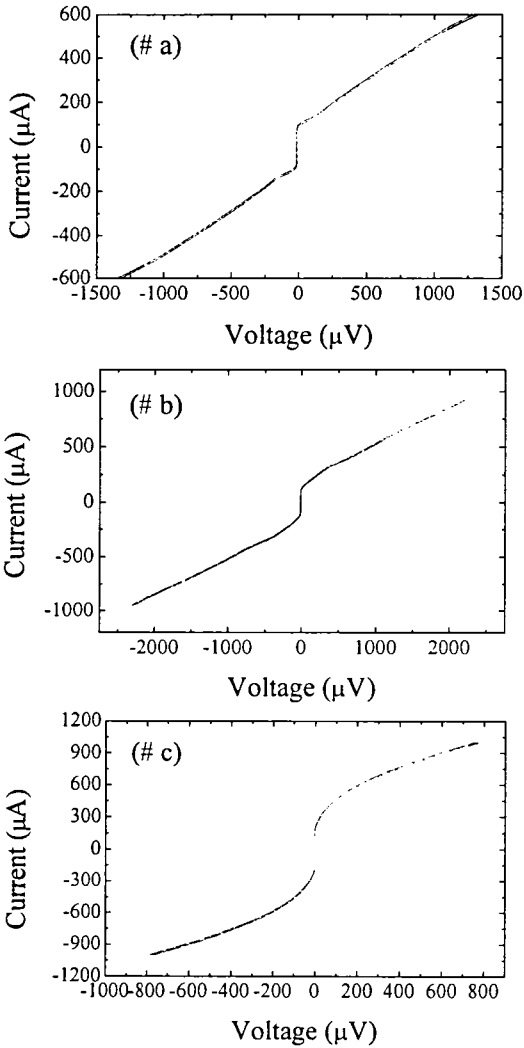


그림 1. YBCO SQUID magnetometer의 전류전압 특성 곡선, # a는 RSJ 모델거동, # b는 이중 접합구조로 유사한 RJS 모델거동, # c는 flux flow 거동.

표 1. 사파이어 기판 위에 제작된 step-edge형 dc SQUID magnetometer의 기본적인 전기적 특성.

Sample #	$2I_C$ ( $\mu A$ )	$R_N/2$ ( $\Omega$ )	$I_C R_N$ ( $\mu V$ )	$MV_{max}$ ( $\mu V$ )
# a	95	2.6	247	16
# b	110	2.3	250	4
# c	200	0.8	160	1

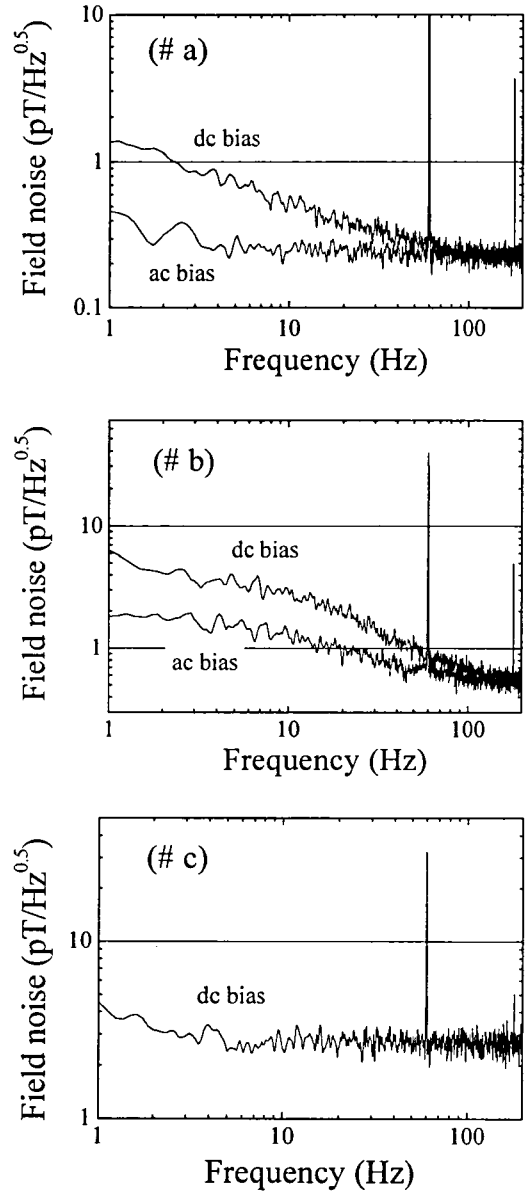


그림 2. YBCO SQUID magnetometer의 field noise 특성, (그림 1에 대한 각각의 #와 동일).

그림 2는 각 소자의 전류-전압 특성에 따른 잡음 수준을 나타낸 것이다. RSJ 모델 거동을 보이는 SQUID # a의 잡음 수준은 100 Hz에서

200 fT/√Hz 정도였으며, 주파수가 감소될수록 잡음 수준은 점점 증가하여 1 Hz에서는 1.5 pT/√Hz 정도였다. 그러나, 이 소자에 ac bias reversal 방법을 사용하였을 경우, 1 Hz에서 450 fT/√Hz로 많이 감소하였다. 초전도 내부에서 vortex들의 움직임에 의해 1/f 주파수 영역에서 잡음 수준이 증가되는데, 100 kHz의 ac bias를 이용하여 이들의 초전도 내부에서 vortex들이 움직임을 제한하여 나타난 것으로 보인다. 또한, RSJ 모델과 flux flow 모델의 중간적인 거동을 보인 # b는 전반적으로 # a보다 잡음 수준이 증가하였으며, ac bias reversal 방법에서 잡음 수준이 약간 감소하였다. 그러나, # c는 완전한 flux flow 모델 거동을 보이는 소자로서 잡음 수준이 전반적으로 높게 나타났다. 각 소자를 상대적으로 비교하였을 경우, RSJ 모델 거동에 따르는 소자는 잡음 수준이 낮게 나타났으며, thermal rounding 효과가 큰 접합 형태일수록 잡음 수준이 증가되는 것을 알 수 있다.

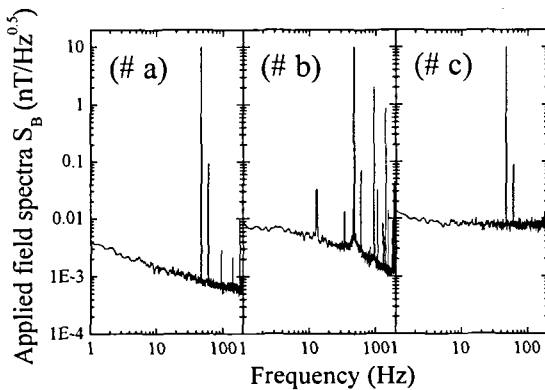


그림 3. 각각의 # magnetometer 에 47 Hz 의 10 nT 의 자기장을 인가한 경우에 대한 noise spectra.

그림 3은 각각의 SQUID 소자에 외부에서 47 Hz, 10 nT의 자기장을 인가하였을 때 나타나는 잡음 특성을 나타낸 것이다. 전반적인 잡음 수준은 SQUID 자체의 잡음 수준보다 약간 증가하였다. 각 소자에 대한 잡음 수준은 thermal rounding이 적은 접합 특성을 보이는 소자일수록 잡음 수준이 낮은 것을 알 수 있다. 또한,

이러한 기본적인 잡음 수준을 조사함으로써 실제 제작된 SQUID의 측정 범위를 정할 수 있다. 위의 그림들은 센서를 제작한 후 전류-전압 특성에 대한 비교와 안정성을 조사하기 위해, 센서 제작하고 10 개월 후에 측정된 자료이다. 따라서, 사파이어 기판으로 SQUID 센서를 제작해도 안정성이 우수한 것으로 보인다.

그림 4는 사파이어 기판 위에 제작된 step-edge형 dc SQUID magnetometer를 이용하여 측정된 심자도 신호이다. 심자도 파형은 잡음 수준이 낮은 # a로 측정된 파형이며, 자기 차폐실 내에서 측정하였다. SQUID magnetometer와 인체의 가슴표면 사이의 거리는 약 2 cm이었으며, 측정시 외부 잡음을 최소화하기 위하여 60 Hz notch filter를 사용하였다. 심자도 파형은 센서와 인체와의 거리, 가슴 위 부분의 위치에 대한 크기의 차이가 있는데, 본 측정에서 나타난 QRS peak의 크기는 50 pT 정도로 나타났다. 사파이어 기판으로 제작된 SQUID 센서를 이용하여, 심자도 파형을 훌륭하게 측정할 수 있었다.

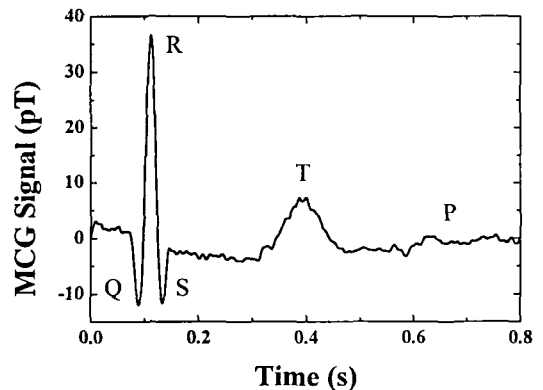


그림 4. 사파이어 기판 위에 제작된 YBCO dc SQUID magnetometer를 이용하여 측정된 심자도 파형.

#### 4. 결론

사파이어 기판을 이용하여 step-edge형 YBCO dc SQUID magnetometer를 제작하였다. 제작된 SQUID 중에 각각의 전류-전압 곡선에

따라 잡음 특성을 조사한 결과, RSJ 모델의 거동을 잘 따르는 소자가 전반적으로 잡음 수준이 낮게 나타났다. SQUID magnetometer의 잡음 수준은 100 Hz에서 200 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  정도였으며, 1 Hz에서 1.5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  이었다. SQUID 소자에 외부에서 자기장을 인가하였을 때, 전반적으로 잡음 수준이 증가하였다. 잡음 수준이 낮은 SQUID를 이용하여, 심자도 파형을 관찰할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. Gross, P. Chaudhari, M. Kawasaki, M. B. Ketchen, and A. Gupta, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 727 (1990).
- [2] D. Koelle, A. H. Miklich, F. Ludwig, E. Dantsker, D. T. Nemeth, and John Clarke, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2271 (1993).
- [3] A. H. Miklich, D. Koelle, E. Dantsker, D. T. Nemeth, J. J. Kingston, P.F. Kromann, and J. Clarke, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 2434 (1993).
- [4] P. A. Nilsson, T. Claeson, J. B. Hansen, and A. Kuhle, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2445 (1994).
- [5] R. Cantor, L. P. Lee, M. Teepe, V. Vinestiy, and J. Longo, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, 2927 (1995).
- [6] D. Grundler, R. Eckart, B. David, and O. Dossel, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 2134 (1993).
- [7] J. Ramos, M. Seitz, G. M. Daalmans, D. Uhl, Z. Ivanov, and T. Claeson, *Physica C* **220**, 50 (1994).
- [8] Y. Q. Shen, Z. J. Sun, R. Kromann, T. Holst, P. Vase, and T. Freltoft, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, 2505 (1995).
- [9] F. Dillmann, V. N. Glyantsev, and M. Siegel, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 1948 (1996).
- [10] R. B. Laibowitz, R. H. Koch, A. Gupta, G. Koren, W. J. Gallagher, V. Foglietti, B. Oh, and J. M. Viggiano, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 686 (1990).
- [11] C. W. Yuan, A. B. Berezin, and A. L. de Lozanne, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2552 (1992).
- [12] A. B. Berezin, C. W. Yuan, and A. L. de Lozanne, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 2457 (1993).
- [13] In-Seon Kim, Hae-Ryong Lim, and Yong Ki Park, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9**, 1649 (1999).
- [14] 임해용, 김인선, 김동호, 박용기, *새물리* **40**, 124 (2000).
- [15] Hae-Ryong Lim, Dong Ho Kim, In-Seon Kim, Yong Ki Park, and Jong-Chul Park, *Supercond. Sci. Technol.* (to be published).