

사파이어 기판 위에 제작된 step-edge dc SQUID magnetometer의 특성

임 해용, 박 종혁, 정 구락, 한 택상, 김 인선*, 박 용기*
한국광기술원, 한국표준과학연구원*

Characterization of step-edge dc SQUID magnetometer fabricated on sapphire substrate

Hae-Ryong Lim, Jong Hyeok Park, Ku-Rak Jung, and Tak-Sang Hahn, In-Seon Kim*, Yong Ki Park*
Korea Photonics Technology Institute, Korea Research Institute of Standards and Science*

hrlim@kopti.re.kr

Abstract - Step-edge dc SQUID magnetometers have been fabricated on sapphire substrate. CeO₂ buffer layer and YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) films were deposited in-situ on the low angle (~35°) steps formed on the substrates. Typical 5- μ m-wide junction has R_N of 4 Ω and I_C of 60 μ A with $I_C R_N$ product of 240 μ V at 77 K. According to applied bias current, depth of voltage modulation was changed and maximum voltage was measured 100~300 fT/ \sqrt Hz at 100 Hz, and about 1.5 pT/ \sqrt Hz at 1 Hz. For ac bias reversal method, field noise was decreased in the 1/f region. The QRS peak of magneto-cardiogram was measured 50 pT in the magnetically shielded room.

1. 서 론

초전도 양자간섭장치 (Superconducting Quantum Interference Devices : SQUID)는 인간이 개발한 센서 중 가장 감도가 우수한 전자소자이다. 이는 양자자속 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ T-m²)보다 10 배 이상 작은 신호를 감지할 수 있는 능력이 있기 때문에 인체의 특정부위에서 발생하는 자기신호등과 같은 아주 미세한 자기장의 감지할뿐만 아니라, pico-voltmeter, pico-ammeter 등의 정밀측정을 요하는 계측기로도 응용이 가능하다. 고온 초전도 SQUID는 접합의 재현성 면에서 가장 우수하고, 신호 대 잡음비가 다른 접합 형태보다 적은 복결정 기판을 이용하여 많이 연구하고 있다^[1,2]. 그러나, 복결정 기판은 가격이 고가이며, 접합 위치의 유동성이 적은 단점이 있어, 다른 접합 형태 즉, step-edge^[3], ramp-edge^[4] 접합 등을 이용한 소자의 특성 평가도 활발하게 연구가 이루어지고 있다. 이 중에서 step-edge 접합은 접합 위치의 자유성, 간단한 제작 공정, 낮은 잡음 특성 등의 장점이 있고, 생산성이 낮은 것이 단점으로 지적되고 있다. 지금까지 여러 가지 단결정 기판 즉, SrTiO₃, LaAlO₃, MgO 등의

기판을 이용하여 step-edge 조셉슨 접합을 많이 연구하고 있으며, 본 연구에서는 사파이어 (Al₂O₃) 기판을 이용하였다. 사파이어 기판은 고온 초전도가 발견된 초기에 Yuan과 Berezin^[5,6] 등에 의해 step-edge SQUID의 연구가 이루어졌다. 최근에 사파이어 기판 위에 CeO₂ buffer층을 사용하여 우수한 초전도 특성을 나타내는 YBa₂Cu₃O₇ (YBCO)박막을 성장한 연구보고가 있다.

본 연구는 R-면 사파이어 기판을 이용하여 step-edge SQUID를 제작하여 그 특성을 평가하고 심자도 신호를 관찰하여 응용 가능성을 알아 보았다.

2. 본 론

2.1 dc SQUID magnetometer의 제작방법 및 설계

R-면 사파이어 기판 위에 step을 제작하기 위하여 스파터링 증착법으로 Au 박막을 200 Å의 두께로 증착하였다. Au 박막은 photolithography 작업시 빛의 회절과 반사현상에 의해 photoresist (PR) 모서리 부분에서 나타나는 wave형상을 막기 위해 사용하였다. 일반적인 PR 마스크를 이용하여 Ar 이온 식각법으로 기판 위에 step을 제작하였으며, 식각시 Ar ion 빔의 입사각과 PR 마스크 회전각을 조절하여 낮은 각도로 step을 제작하였다. Step이 제작된 기판은 튜브형 전기로에서 고순도 산소를 흘려주면서 1050 °C에서 4 시간동안 열처리하였다. 열처리된 기판은 원자층 단위로 제어되었으며, step 제작시 Ar ion으로 손상 받은 기판의 표면도 회복되었다. Pulsed laser 증착법을 이용하여 CeO₂ buffer층과 YBCO 박막을 증착한 후, 일반적인 photo-lithography 방법과 Ar ion 식각법으로 패터닝하였다. Au 박막으로 전극을 만들고, 산소 분위기에서 500 °C로 열처리하여 본 소자를 제작하였다.

그림 1 (a)는 사파이어 기판 위에 제작된 SQUID magnetometer의 모양을 나타낸 것이다. Magnetometer는 step-edge junction 형태로 제작

할 수 있게 설계되었으며, 기본적인 direct coupled 방식의 magnetometer이다. 1 cm×1 cm 기판 위에 제작이 가능하게 설계되었으며, magnetometer의 크기는 8 mm×8 mm이며, 하나의 조셉슨 접합의 접합 폭은 5 μm로 하였다. Pick-up loop의 inductance (LP)와 면적 (AP)은 각각 LP~6.8 nH, AP~8 mm²로 계산되었다. 그림 1 (b)는 제작된 SQUID washer를 나타낸 광학 현미경 사진이다. Input coil의 선폭은 10 μm이며, hole의 폭은 4 μm, 길이는 70~120 μm로 slit형태로 설계되었다. 실제 설계된 SQUID inductance (LS)는 40~120 pH로 설계하였다. 이는 washer부분의 총 inductance를 계산한 것이다. 이를 바탕으로 계산한 유효면적은 $A_{eff} = A_s + \alpha A_p \frac{L_s}{L_p}$ 을 사용하여 계산하였는데, 70 pH인 경우, $A_{eff} \sim 82 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ 이었다.

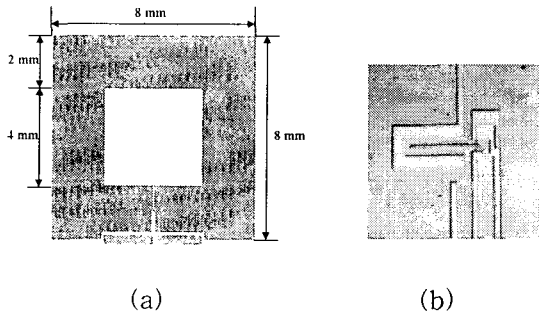


Fig. 1. (a) Layout and size of dc SQUID magnetometer, (b) Photo micro-scope image of SQUID washer.

2.2 실험 결과

사파이어 기판 위에 direct coupled SQUID magnetometer는 step-edge junction 형태로 제작되었는데, 이 때 step 각은 $\alpha \sim 35^\circ$ 로 제어하였으며, step 높이는 1300~1500 Å사이로 제어하였다 [7]. 펄스 레이저 증착법으로 CeO₂ buffer층과 YBCO 박막을 in-situ로 성장시켰다. CeO₂ buffer층은 a-축 방향으로 성장시켜 YBCO 박막과 격자상수 차이를 최소로 하였으며, 두께는 약 150 Å로 제어하였다. CeO₂ buffer 층이 있는 R-면 사파이어 기판 위에 증착된 YBCO 박막은 임계온도 $T_C \sim 89.5 \text{ K}$, 임계전류밀도 $J_C \sim 3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$, 초전도 전이폭 $\Delta T \sim 0.5 \text{ K}$ 의 전기적 특성을 보였다[8].

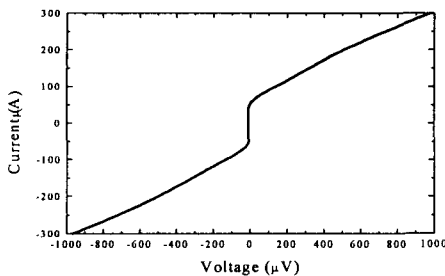


Fig. 2. I-V curve of step-edge dc SQUID magnetometer.

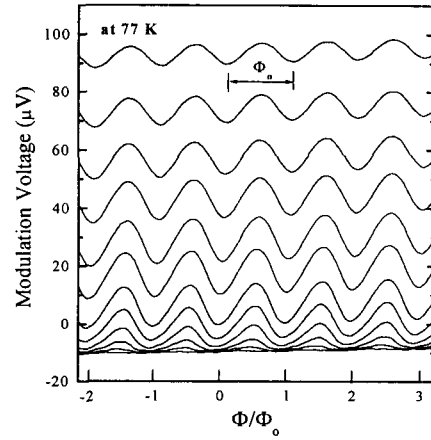


Fig. 3. Modulation voltage of the dc SQUID magnetometer in response to applied fields for various bias current at 77 K.

그림 2는 사파이어 기판 위에 step-edge 형태로 제작된 dc SQUID magnetometer의 전형적인 전류-전압 특성 곡선이다. 접합의 임계전류 (2IC)는 60 μA이고, 정상저항 (RN/2)은 4 Ω으로 ICRN은 240 μV로 우수한 접합 특성을 나타내며, RSJ 모델 거동을 보여주고 있다. 그림 3은 각각의 인가전류에 대한 변조전압의 변화를 나타낸 것으로, 양자자속의 주기로 변화하는 것을 보여주고 있다. 최대 변조전압 (ΔV_{max})은 16 μV이며, flux-to-voltage 변환함수는 $\Delta V/\Delta\Phi_0 \sim 140 \mu\text{V}/\Phi_0$ 로 나타났다. 전반적으로 SQUID는 높은 ICRN 특성을 보이고 있으나, 변조전압의 진폭 (ΔV)은 작게 나타났다.

고온 초전도 SQUID에서 변조전압은 thermal noise에 의해 많은 영향을 받는다. Thermal noise의 효과는 전류-전압 곡선에서 임계전류 근처의 rounding 효과에 의해 나타난다고, Ambegaokar-Halperin (AH)[9]모델에서 설명하고 있다. AH 모델에서 thermal noise는 과도 전압을 발생시키며, ICRN은 $v(=I_c\Phi_0/\pi k_B T)$ 의 함수에 영향을 받는다. 여기서, v 는 thermal noise 변수이며, Φ_0 는 양자자속이다. 다른 이유는 SQUID loop으로 연결된 자속 잡음의 영향으로 볼 수 있는데, 이러한 접합에서 자속 잡음은 noise 전류에 의해서 발생한다. 변조전압은 다음 식으로 해석할 수 있다.

$$\Delta V = \frac{4I_c R_N}{\pi(1+\beta)} \exp\left(\frac{-3.5\pi^2 k_B T L}{\Phi_0^2}\right)$$

(1)

여기서, $\beta = 2LI_c/\Phi_0$ 로 screening 변수이고, k_B 는 Boltzmann 상수이다. 식 (1)에서 ΔV 는 SQUID inductance 값에 의존한다고 하나, 실험적으로 절대치와는 0.6 배 정도의 차이가 있는 것으로 나타났다. 변조전압의 이론 값 (ΔV_{cal})에

flux noise의 효과를 제거하면 $\Delta V_{cal}-\Delta V_{mes}$ 로 나타낼 수 있으며, 이를 규격화시키면 $(\Delta V_{cal}-\Delta V_{mes})/ICRN$ 으로 표현 가능하다. 그림 4는 thermal noise 변수에 대한 규격화된 변조전압 $(\Delta V_{cal}-\Delta V_{mes})/ICRN$ 의 의존성을 나타낸 것이다. 이는 수치적으로 해석한 모델에서 flux noise의 효과를 제거한 규격화된 변조전압은 thermal noise 변수 (γ)에 반비례하며, γ 는 임계전류에 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 실험 data는 이 범주에 속하나, 전반적으로 bicrystal grain boundary 접합보다 낮은 변조전압을 보였다. 이는 크게 두 가지 요인으로 생각할 수 있다. 하나는 낮은 step 각에서 step-edge 접합을 제작하였기 때문에 접합이 multiple grain boundary 접합 구조를 형성하고 있기 때문인 것으로 보인다. 다른 하나는 평행한 두 step-edge 접합의 임계전류 (IC) 차이가 크기 때문에 나타난 현상으로 생각된다. 일반적으로 bicrystal 기판 위에 제작된 접합은 그 재현성이 80 %에 접근하여 두 접합의 임계전류 차이가 적어 변조전압이 크게 나타나는데, step-edge 접합구조는 접합의 제작변수가 많아 비슷한 크기의 임계전류를 만드는 것이 사실상 어려운 것으로 보인다.

SQUID의 작동시 발생하는 잡음은 외부의 자기장 잡음, SQUID의 구동시키는 전자회로 내에서의 잡음, SQUID 소자 자체 내에서의 잡음으로 나눌 수 있다. 외부 자기장의 잡음은 자기 차폐실이나 μ -metal 같은 자기 차폐관을 사용하면 어느 정도 해결할 수 있다. 구동회로의 잡음 신호처리시 noise filter 등을 이용하여 줄일 수 있다. SQUID body 자체에서 발생하는 noise는 ac 인가전류를 이용하거나, SQUID의 모양을 새롭게 함으로써 많은 잡음을 감소하려는 노력이 진행되고 있다. 그러나, SQUID가 아주 미세한 자기장을 감지하는 센서이기 때문에 신호 대 잡음비가 아주 중요한데, 현재 bicrystal 기판 위에 제작된 dc SQUID magnetometer의 경우 1/f noise 영역에서 26 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 으로 나타났고, step-edge 접합 구조에서는 잡음비가 50 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 이상으로 나타나고 있는 실정이다.

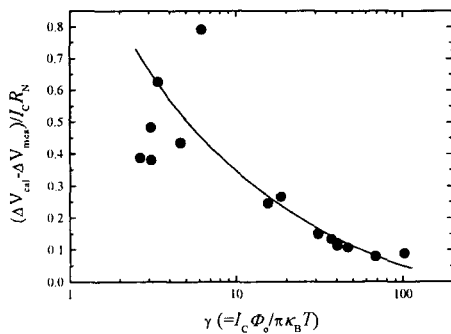


Fig. 4. Dependence of the normalized deviations, $(\Delta V_{cal}-\Delta V_{mes})/I_C R_N$ on the thermal noise parameter γ .

SQUID에서 발생하는 noise의 원인을 살펴보면, 다음과 같다. 1/f noise 영역에서 발생하는 noise의 원인은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 임계전류의 요동현상에 의한 thermal noise이고, 다른 하나는 SQUID body내에 구속되어 있던 vortices의 운동에 의해 발생한다. 임계전류의 요동현상으로 인한 잡음은 실제 SQUID 구동시 ac bias reverse 방법을 이용하여 1/f noise영역에서 noise 준위를 줄일 수 있었다[2]. 또한, pick-up loop에 flux dam을 만들어 noise를 감소시키는 연구도 하였다. Vortices의 운동에 의한 잡음은 SQUID washer의 형태를 변형시켜 noise를 감소시키려는 연구 보고가 있다. 특히, SQUID washer의 변형은 비차폐 환경에서 사용하기 위한 목적으로 연구되었으며, SQUID washer에 slot 또는 dot을 만들어 flux를 pinning시켜 잡음비를 줄이려는 연구가 대표적이다. Noise를 발생시키는 다른 원인은 SQUID 내에서 저항의 요동에 의한 원인과 YBCO 박막에서 비등방성 구조에 의한 것으로 a-b 축과 c축 방향에서 활성화 에너지 차이에 따라 flux 이동도가 변하기 때문에 나타나는 현상이 등이 있다.

그림 5은 사파이어 기판 위에 step-edge 형태로 제작한 magnetometer의 field noise를 나타낸 것이다. Noise는 자기 차폐실 내에서 FLL 방법으로 측정하였는데, SQUID를 lock시킨 상태에서 spectrum analyzer를 이용하여 측정하였다. 그림 5에서 dc 전류를 인가하였을 때, 1/f noise 영역에서 주파수가 감소할수록 noise 준위의 증가하였으나, ac bias reverse 방법을 이용하였을 때, 이 영역에서 noise 준위의 증가는 일어나지 않았다. 임계전류의 요동현상에 의한 저주파 영역에서 noise 준위의 상승을 ac bias를 통해 감소시킬 수 있었다. 전반적인 noise 준위는 1 kHz 영역에서는 약 100~300 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 정도였으며, 저주파 영역으로 갈수록 noise 준위는 증가하여 10 Hz에서는 420 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 1 Hz에서는 1100 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 이었다. 그러나, ac bias reverse 방법으로 측정 한 noise 준위는 10 Hz와 1 Hz에서 각각 300 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 정도의 크기를 나타내었다.

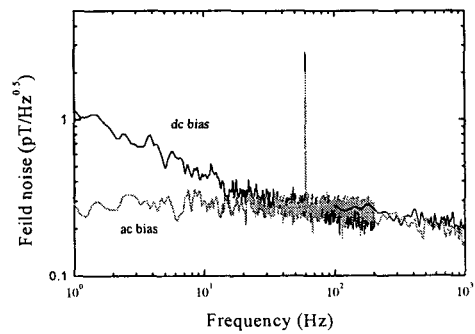


Fig. 5. Noise properties of step-edge dc SQUID magnetometer for dc bias current and ac bias reverse.

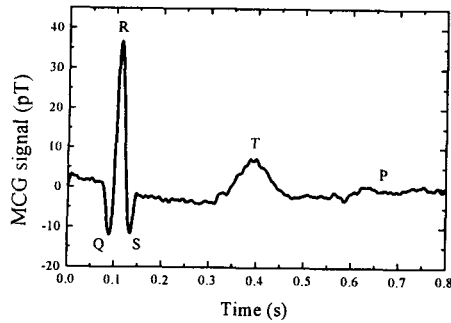


Fig. 6. Signal of magnetocardiogram (MCG) using step-edge dc SQUID magnetometer inside the magnetically shielded room.

고온 초전도 SQUID의 응용 중 하나가 의료 진단 장비로 사용되는 것인데, 대표적인 것이 심장의 질환이나 심전도의 파형과 비교 분석할 수 있는 심자도 (magnetocardiogram : MCG)의 측정이다. 본 시료로 측정한 MCG 파형은 그림 6에 나타내었다. 심자도는 자기 차폐실 (Magnetically shielded room : MSR)내부에서 측정하였으며, magnetometer와 가슴 표면과의 간격은 약 2 cm 이었다. 외부 잡음을 최소화하기 위해서 60 Hz notch filter를 사용하였다. MCG 파형의 크기는 센서와 인체와의 거리, 또는 심장의 부위에 따라서 차이가 있다. QRS peak는 약 50 pT이었다. 사파이어 기판 위에 step-edge SQUID magnetometer를 이용하여 MCG 신호를 훌륭하게 측정할 수 있었다.

3. 결 론

사파이어 기판 위에 step-edge SQUID magnetometer를 제작하였다. 여러 종류의 SQUID를 제작하였는데, 접합 특성에 따라서, RSJ 모델 거동과 flux flow 거동을 보였다. 특성이 우수한 SQUID의 ICRN은 240 μV 이상으로 나타났으며, 변조전압은 16 μV 이었다. SQUID의 noise 특성은 1 kHz 영역에서는 100~300 fT/ \sqrt{Hz} 정도였으며, 10 Hz에서 420 fT/ \sqrt{Hz} , 1 Hz에서는 1100 fT/ \sqrt{Hz} 이었다. Ac bias reverse 방법을

사용하여 1/f 영역에서 noise를 줄일 수 있었다. MCG 파형을 관찰하였으며, QRS peak의 크기는 50 pT이었다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Gross, P. Chaudhari, and A. Gupta, "Low noise YBCO grain boundary junction dc SQUIDs" Appl. Phys. Lett. 57, 727 (1990).
- [2] D. Koelle, A. H. Miklich, and John Clarke, "dc SQUID magnetometers from single layers of YBCO" Appl. Phys. Lett. 63, 2271 (1993).
- [3] D. Grundler, R. Eckart, B. David, and O. Dossel, "Origin of 1/f noise YBCO step-edge dc SQUIDs" Appl. Phys. Lett. 62, 2134 (1993).
- [4] R. B. Laibowitz, R. H. Koch, and J. M. Viggiano, "All high T_c edge junctions and SQUIDs" Appl. Phys. Lett. 56, 686 (1990).
- [5] C. W. Yuan, A. B. Berezin, and A. L. de Lozanne, "Step edge YBCO dc SQUIDs on sapphire substrates" Appl. Phys. Lett. 60, 2552 (1992).
- [6] A. B. Berezin, C. W. Yuan, and A. L. de Lozanne, "YBCO DC SQUIDs utilizing sapphire step edge junctions" IEEE Trans. Appl. Supercond. 3, 2457 (1993).
- [7] Hae-Ryong Lim, Dong Ho Kim, In-Seon Kim, Yong Ki Park, and Jong-Chul Park, "Superconducting properties of YBCO step-edge Josephson junctions prepared on CeO₂-buffered sapphire substrates" Supercon. Sci. Technol. 13, 1046 (2001).
- [8] 임 해용, 김 인선, 김 동호, 박 용기, "CeO₂ 완충층의 성장방향이 사파이어 기판 위에 증착된 YBCO 박막의 초전도 특성에 미치는 영향" Sae Mulli 40, 124 (2000).
- [9] V. Ambegaokar, and B. I. Halperin, "Voltage due to thermal noise in the dc Josephson effect" Phys. Rev. Lett. 22, 1364 (1969).