

## Noise Properties of Directly -coupled Single-layer High-Tc 2nd-order SQUID Gradiometer

Y. Hwang<sup>\*,a,c</sup>, J. R. Ahn<sup>b</sup>, C. S. Kang<sup>b</sup>, S. G. Lee<sup>b</sup>, J.-T. Kim<sup>c</sup>, H. Kwon<sup>c</sup>, Y. K. Park<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Korea University, Seoul, Korea

<sup>b</sup> Korea University, Jochiwon, Chungnam, Korea

<sup>c</sup> Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon, Korea

Received 20 August 2001

## 직접결합형 단일층 고온초전도 2nd-order SQUID Gradiometer의 잡음 특성

황윤석<sup>\*,a,c</sup>, 안종록<sup>b</sup>, 강찬석<sup>b</sup>, 이순걸<sup>b</sup>, 김진태<sup>c</sup>, 권혁찬<sup>c</sup>, 박용기<sup>c</sup>

### Abstract

We have fabricated planar-type single-layer second-order high-Tc SQUID gradiometers. The devices consisted of symmetrically designed three parallel-connected square pickup loops that were directly coupled to the SQUID. YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> film was deposited on SrTiO<sub>3</sub> substrate by a PLD system and patterned into a device by the photolithography with ion milling technique. Junctions of the SQUID were either step-edge or bicrystal type. All the structures were formed on a 10 mm x 5 mm substrate. Balancing of the gradiometer was achieved by adjusting the width of the central pickup loop. The gradiometer noise was measured both inside and outside a magnetically shielded room. Details of the results will be discussed.

*Keywords* : 2nd-order SQUID gradiometer, YBCO

### I. 서 론

초전도 양자 간섭장치(SQUID)는 ~ 10<sup>-15</sup> Tesla 정도의 아주 작은 자기 신호를 검출할 수 있는 자기 센서이다. 그러나, 주변의 자기 잡음의 크기가 실제로 검출하려는 자기 신호보다 훨씬 큰 일반 환경에서는 원하는 자기 신호만을 검출하기가 매우 어렵다. 따라서, SQUID는 자기 차폐실과 같은 제한적인 환경에서 주로 사용되

고 있다. 한편, 비파괴 평가 같은 분야에 SQUID를 응용하기 위해서는 주변 자기 잡음에 영향을 받지 않는 센서가 필요하다. 이러한 목적으로 고안된 것이 SQUID gradiometer이다. 일반적인 형태의 SQUID gradiometer는 지구자기장과 같은 균일 자장에 의한 영향만을 상쇄시키는 1st-order gradiometer이다.

저온 초전도 다층 박막을 이용한 SQUID gradiometer는 이미 이십 여년 전에 개발되었다 [1], [2]. 또한, 고온초전도의 경우에도 십년 전에 SQUID gradiometer가 보고 되었으나, 이 경우에도 다층 박막을 이용한 것이었다 [3]. 그러

\*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5475

e-mail : yshwang@kriss.re.kr

나, 다층 박막 기술은 산화물 초전도를 사용하는 고온 초전도의 경우에는 재현성 문제로 인해 제작상의 어려움이 있다. 따라서, 대부분의 고온 초전도 소자는 단일층으로 제작하고 있다. 이후,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (YBCO)를 이용한 1st-order gradiometer [4]-[6]가 제작되었다. 또한, 2nd-order gradiometer의 경우에도 magnetometer를 이용한 electronic gradiometer [7]와 flip-chip을 이용한 평면형 2nd-order gradiometer [8], 그리고, 단일층 직접 결합형 2nd-order gradiometer [9], [10]가 보고되었다.

본 연구에서는 YBCO 박막을 이용한 직접 결합형 단일층 2nd-order gradiometer에 대한 자기 차폐 환경과 비자기 차폐 환경에서의 자기 잡음 특성에 대해 조사하였고, gradiometer의 balancing과의 관계에 대해 살펴 보았다.

## II. 이론 및 제작

2nd-order gradiometer에 대한 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 이 경우 균일 자장에 대한 balancing 조건은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{A_c L}{A L_c} = \frac{\alpha_L + \alpha_R}{\alpha_c} = \frac{2\alpha}{\alpha_c} \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_L$ 과  $\alpha_R$ 은 양쪽 pick-up loop에서의 coupling coefficient이다. 중간 pick-up loop에 대해 대칭적으로 설계된 gradiometer에서는  $\alpha_L = \alpha_R = \alpha$ 이고,  $\alpha_c \cong 2\alpha$ 이므로 위 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{A_c}{L_c} \cong \frac{A}{L} \quad (2)$$

한편, 1차 미분형 자장의 경우에는  $\alpha_L = \alpha_R$ 이고 양쪽 pick-up loop에 걸리는 자속의 크기가 같고 부호가 서로 반대이므로 자동적으로 상쇄된다.

실험은 step-edge 접합과 bicrystal 접합 두 가지로 제작하여 진행하였다. 포토리소그래피법

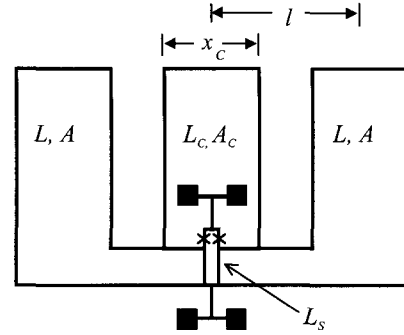


Fig. 1. Schematic design of the direct-coupled second-order SQUID gradiometer.  $L$ ,  $L_c$  are the loop inductances.  $A$ ,  $A_c$  are the effective areas.

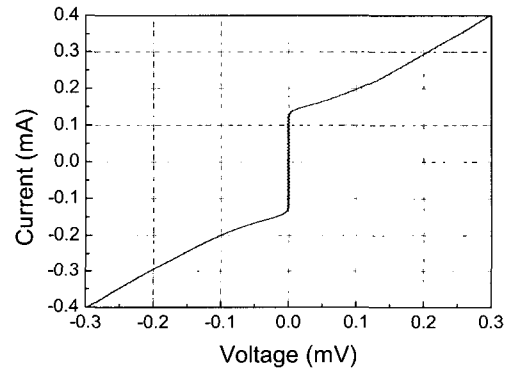


Fig. 2. Typical current-voltage curve of the SQUID gradiometer at 77 K.

과 이온 밀링을 이용하여  $\text{SrTiO}_3$  단결정 위에 180 - 200 nm 정도의 step-edge를 제작하였고 그 위에 펄스 레이저 증착법으로 YBCO 박막을 입혔다. 이때, 박막 증착 조건은 기판 온도 810 °C, 산소 분압 400 mTorr, 레이저 에너지 1.2 J/cm<sup>2</sup>이고, 증착 후 *in-situ*로 500 °C, 1 기압 산소 분위기에서 1 시간 동안 열처리하였다. Bicrystal의 경우에도 증착 조건은 동일하였다. Fig. 2는 이렇게 제작된 SQUID gradiometer의 전류-전압 곡선이다. 식 (2)에서 pick-up loop의 면적인  $A$ 와  $A_c$ 는 고정시키고 중간 pick-up loop의 선 폭을 변화시킴으로써 balancing을 조절하였다. 이때, 균일 자장은 자체 제작한 코일관을 사용하였으며, 이에 대한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 실험 결과, 중심 pick-up loop의 선 폭

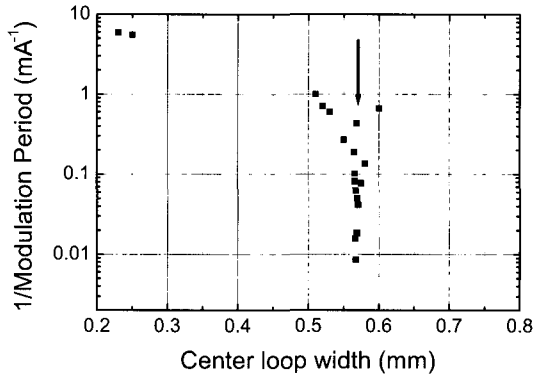


Fig. 3. 1/modulation period vs. center loop line width. The meaning of the modulation period is such that the gradiometer with longer period is less sensitive to the applied magnetic field.

이 0.567 mm였을때 balancing이 가장 잘 된 것으로 나타났으나, 같은 조건으로 여러 개의 센서를 만들어서 측정해본 결과 균일 자장에서의 전압 변조 주기에서 수 배의 차이가 남을 알 수 있었다. 이에 대한 이유로는  $A$ 와  $A_c$ 가 제작 시마다 약간의 차이가 날 수 있으며 균일 자장 측정시 센서와 자장 코일간의 정렬 문제를 생각해 볼 수 있다. 잡음 특성에 대한 실험은 step-edge의 경우, 선 폭 0.567 mm(이하 센서 ①라 함)와 0.568 mm(이하 센서 ②라 함)에 대해 진행하였으며 bicrystal의 경우에는 0.567 mm(이하 센서 ③라 함)로 제작하였다.

### III. 실험 결과

전압 변조 신호 주기는 걸어진 자장에 대한 SQUID 센서의 민감도와 관계가 있다. 즉, 전압 변조 주기가 길어질수록 걸어진 자장에 대해 SQUID 센서가 잘 반응하지 않게 된다.

Step-edge로 제작한 센서의 균일 자장에 대한 전압 변조 주기는 센서 ①와 ②가 각각 13 mA, 3 mA로 가 나왔다. 이차 미분형 자장에 대한 전압 변조 주기가 대략 0.1 mA인 점을 감안하면 off-balancing factor가 각각  $7.7 \times 10^{-3}$ 과  $3.3 \times 10^{-2}$ 이 나왔다. 또한, bicrystal로 제작한 센서 ③의 경우에는 코일에 1 mA 이상의 전류를 가했을 때, SQUID 접합에 자속이 trap되어

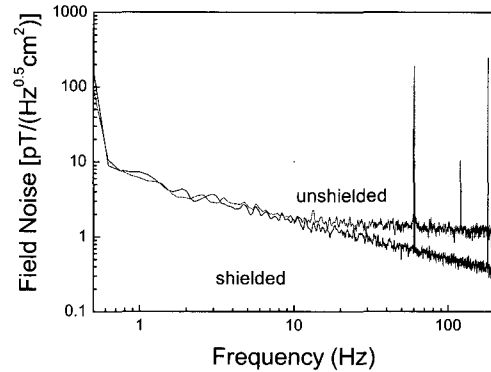


Fig. 4. Field noise spectra for 2nd-order gradiometer at 77 K(sample ①). Junction of the SQUID was step-edge type.

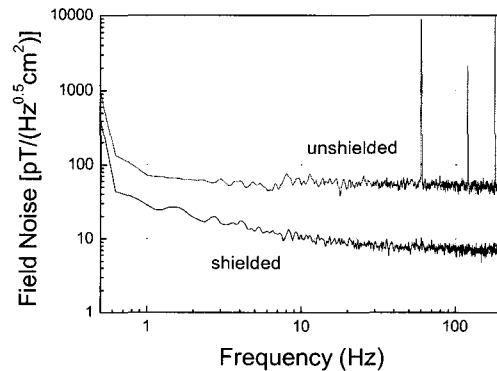


Fig. 5. Field noise spectra for 2nd-order gradiometer at 77 K(sample ②). Junction of the SQUID was step-edge type.

정확한 전압 변조 주기를 측정 할 수는 없었으나, 코일 전류 1 mA 이내의 데이터를 추정해보면 전압 변조 주기가 대략 수 mA로 센서 ②와 비슷한 값이 나올 것으로 추측되어진다.

Fig. 4는 센서 ①에 대한 잡음 특성 곡선으로 10 Hz의 주파수에서 잡음 값이  $1.5 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{ cm}^2)$ 로 차폐 환경과 비차폐 환경에서의 값이 거의 같게 나왔다. 반면, 100 Hz에서는 비차폐 환경에서는  $1.5 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{ cm}^2)$ 로 10 Hz에서의 잡음 값과 거의 같았으나, 차폐 환경에서의 잡음 값이  $0.4 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{ cm}^2)$ 로 상당히 작게 나왔다. 한편, 센서 ②에서는 10 Hz에서 차폐 환경과 비차폐 환경에서의 잡음 값이 각각  $11 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{ cm}^2)$ 와  $53 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{ cm}^2)$ 로 나왔다. 또한, 100 Hz

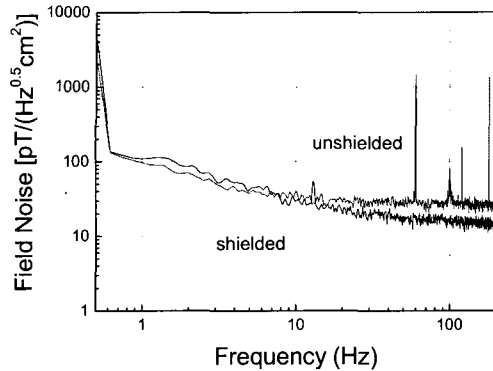


Fig. 6. Field noise spectra for 2nd-order gradiometer at 77 K (sample ©). Junction of the SQUID was bicrystal type.

에서도  $7.3 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 와  $53 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 로 비차폐 환경에서는 잡음 특성이 거의 차이가 없게 나왔다(Fig. 5). 이러한 결과는 센서 ©에서도 비슷하게 나왔는데 차폐 환경에서의 잡음 값이 10 Hz와 100 Hz에서 각각  $30 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 와  $17.8 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 가 나온 반면, figure 6에서 볼 수 있듯이 비차폐 환경에서는  $39.8 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 와  $38.4 \text{ pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 로 거의 차이가 없었다.

60 Hz 잡음 특성을 보면 비차폐 환경에서는 모든 센서에서 잡음이 관측되었으나, 차폐 환경에서 센서 ①에서만 잡음이 관측되었다. 이는 센서 ①의 경우에 잡음 특성 수준이 수백  $\text{fT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 로 상당히 낮아서 60 Hz 잡음이 관측된 반면, 센서 ②와 ©에서는 잡음 특성 수준이 수  $\text{pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2) \sim$  수십  $\text{pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 로 60 Hz 잡음 값에 비해 상대적으로 높아서 잡음 특성이 묻힌 것으로 보인다. 비차폐 환경과 차폐 환경에서의 전체 적인 잡음 특성 곡선을 비교해 보면, 잡음 수준 차이가 수배인 것을 알 수 있다. 이는 비차폐 환경과 차폐 환경의 잡음 수준 차이가 수십 배인 1st-order gradiometer와 수백 배인 magnetometer와는 다른 양상으로 2nd-order gradiometer의 특성이 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

단일층 YBCO 박막을 이용한 2nd-order

gradiometer를 제작하여 그 잡음 특성을 조사하였다. 10 Hz 이상의 주파수 영역에서 잡음 수준은 대략 수십  $\text{pT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 이고, 특히 step-edge 접합으로 제작한 센서에서는 수백  $\text{fT}/(\text{Hz}^{0.5} \text{cm}^2)$ 의 잡음 수준이 나오기도 하였다. 이 값은 SQUID 센서의 baseline 0.27 cm를 대입하면 수  $\text{pT}/\text{Hz}^{0.5} \sim$  수십  $\text{fT}/\text{Hz}^{0.5}$ 에 해당한다. 또한, 비차폐 환경과 차폐 환경의 잡음 수준 차이가 수백 배인 magnetometer나 수십 배인 1st-order gradiometer와는 달리 수 배가 되었다. 이는 2nd-order gradiometer의 특징으로서 집합의 특성과 balancing을 좀 더 개선할 경우 비차폐 환경에서 잘 작동하는 센서를 제작할 수 있을 것으로 기대하며 이 센서를 비파괴 평가와 같은 비차폐 환경이 요구되는 응용분야에 활용할 경우 좋은 결과를 얻을 것으로 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 중점연구사업의 지원을 받았습니다.

#### References

- [1] M. B. Ketchen, W. M. Goubau, J. Clarke, and G. B. Donaldson, "Superconducting thin-film gradiometer," *J. Appl. Phys.*, 49, 4111-4116 (1978).
- [2] M. B. Ketchen, "Design of improved integrated thin-film planar dc SQUID gradiometer," *J. Appl. Phys.*, 58, 4322-4325 (1985).
- [3] W. Eidelloth, B. Oh, R. P. Robertazzi, W. J. Gallagher, and R. H. Koch, "YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> thin-film gradiometers: Fabrication and performance," *Appl. Phys. Lett.*, 59, 3473-3475 (1991).
- [4] S. Knappe, D. Drung, T. Schurig, H. Koch, M. Klinger, and J. Hinken, "A planar YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> gradiometer at 77 K," *Cryogenics.*, 32, 881-884 (1992).
- [5] V. Zakosarenko, F. Schmidl, H. Schneidewind, L. Dörner, and P. Seidel, "Thin-film dc SQUID gradiometer using a single YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> layer," *Appl. Phys. Lett.*, 65, 779-780 (1994).
- [6] R. H. Koch, J. R. Rozen, J. Z. Sun, and W. J. Gallagher, "Three SQUID gradiometer," *Appl. Phys. Lett.*, 63, 403-405 (1993).

- [7] arvin, Y. Zhang, W. Wolf and A. I. Braginski, "A second-order SQUID gradiometer operating at 77 K," *Supercond. Sci. Technol.*, 7, 265-268 (1994).
- [8] A. Kittel, K. A. Kouznetsov, R. McDermott, B. Oh, and John Clarke, "High T<sub>c</sub> Superconducting second-order gradiometer," *Appl. Phys. Lett.* 73, 2197-2199 (1998).
- [9] S. G. Lee, Y. Hwang, and B. C. Nam, "Direct-coupled second-order superconducting quantum interference device gradiometer from single layer of high temperature superconductor," *Appl. Phys. Lett.*, 73, 2345-2347 (1998).
- [10] Soon-Gul Lee, Yunseok Hwang, Jin-Tae Kim, In-Seon Kim, and Yong Ki Park, "Characteristics of the planar second-order high-T<sub>c</sub> SQUID gradiometer," *Extended Abstracts of ISEC'99*, 1, 378-380 (1999).