

## Fabrication of single layer $d^2B_z/dxdy$ second-order SQUID gradiometer

Yunseok Hwang\*,<sup>a</sup>, Seungmoon Park<sup>a, b</sup>, Soon-Gul Lee<sup>b</sup>, In-Seon Kim<sup>a</sup>, Yong Ki Park<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

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

Received 20 August 2002

### 단일층 $d^2B_z/dxdy$ SQUID 2차 미분기 설계 및 제작

황윤석\*,<sup>a</sup>, 박승문<sup>a, b</sup>, 이순걸<sup>b</sup>, 김인선<sup>a</sup>, 박용기<sup>a</sup>

#### Abstract

We have developed a planar-type single layer second-order high- $T_c$  SQUID gradiometer, which can detect the  $d^2B_z/dxdy$  of the second-order field gradient. This SQUID gradiometer consists of four-way 'clover-leaf' pick-up loops and is coupled directly to a 4-junction dc SQUID in such a way that the coupling polarity of the two diagonal loops is opposite to that of the other two loops. The pickup loops are intrinsically balanced for both uniform field and the 1st-order field gradient. The  $YBa_2Cu_3O_7$  thin film was made by pulsed laser deposition method on  $SrTiO_3$  single crystal substrate and patterned by photolithography with Ar ion milling technique. Response of this gradiometer was tested for both uniform field and the 2nd-order field gradient. Details of the design, fabrication, and results will be discussed.

*Keywords* :  $d^2B_z/dxdy$ , second-order SQUID gradiometer, step-edge junction,  $YBa_2Cu_3O_7$

#### I. 서론

초전도 양자 간섭 장치(SQUID)는  $10^{-15}$  Tesla 정도의 아주 미세한 자기장까지 검출할 수 있는 일종의 자기 센서로, 현존하는 센서 중 가장 높은 감도를 가지고 있다. 그러나, 주변의 자기 잡음의 크기가 실제로 검출하려는 자기 신호에 비해 일반적으로 현저히 크기 때문에 미세 자기 신호 측정이 거의 불가능하다. 따라서, SQUID를 이용하여 미세 자기를 측정하기

위해서는 자기 차폐실과 같이 주변의 자기 잡음을 차단하는 특수한 환경이 필요하다. 한편, 비파괴 평가 등은 자기 차폐 환경이 아닌 일반적인 환경에서 미세 자기 신호를 검출해야 한다. 이러한 목적으로 고안된 SQUID 미분기는 주변의 자기 잡음을 상쇄시키는 구조로 설계되어 있고 검출하는 자장의 형태에 따라 일차, 이차 미분기 등으로 구분한다[1].

일반적으로 저온초전도 SQUID 미분기는 다층 박막 형태로 제작한다[2], [3]. 그러나, 고온초전도 박막을 이용한 SQUID 소자는 박막의 특성상 다층 박막 제작이 용이하지 않고 노이즈 특성도 좋지 않다. 따라서, 제작 과정이 단

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

e-mail : yshwang@kriss.re.kr

순한 직접 결합형 SQUID 미분기에 대한 연구가 많이 진행되어왔다[4], [5]. 또한, 신호-대-잡음 비가 SQUID 일차 미분기보다 높은 단일층 직접 결합형  $d^2B_z/dx^2$  SQUID 이차 미분기도 개발되었다[6], [7].

본 연구에서는 고온초전도 박막을 이용한 단일층 직접 결합형 SQUID 이차 미분기 중에서 본 연구팀에서 개발한  $d^2B_z/dx^2$  형태와 다른 새로운 형태의  $d^2B_z/dxdy$  SQUID 이차 미분기를 설계·제작하여 그 특성 조사를 하였다.

## II. 이론

$d^2B_z/dxdy$  형태의 SQUID 이차 미분기에 대한 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 네 개의 pick-up loop이 ×자의 각 끝단에 위치해 있고 각 pick-up loop이 교차하는 지점에 SQUID loop이 위치한다. 균일 자장이 걸려있는 경우, SQUID loop에 걸리는 자속  $\Phi_s$ 는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Phi_s &= MI_1 + MI_2 + MI_3 + MI_4 \\ &= \frac{MBA_1}{L_1} - \frac{MBA_2}{L_2} + \frac{MBA_3}{L_3} - \frac{MBA_4}{L_4}\end{aligned}\quad (1)$$

또한, 일차 미분형 자장이 걸릴 경우에는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Phi_s &= MI_1 + MI_2 + MI_3 + MI_4 \\ &= \frac{M\Delta B_1 A_1}{L_1} \pm \frac{M\Delta B_2 A_2}{L_2} - \frac{M\Delta B_3 A_3}{L_3} \mp \frac{M\Delta B_4 A_4}{L_4}\end{aligned}\quad (2)$$

각 pick-up loop이 SQUID loop에 대해 대칭적으로 설계되어 있으므로  $A_1=A_3$ ,  $A_2=A_4$ ,  $L_1=L_3$ ,  $L_2=L_4$ 가 된다. 그러므로, Eq. (1)과 Eq. (2)는 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$\Phi_s = 2MB \left( \frac{A_1}{L_1} - \frac{A_2}{L_2} \right)\quad (3)$$

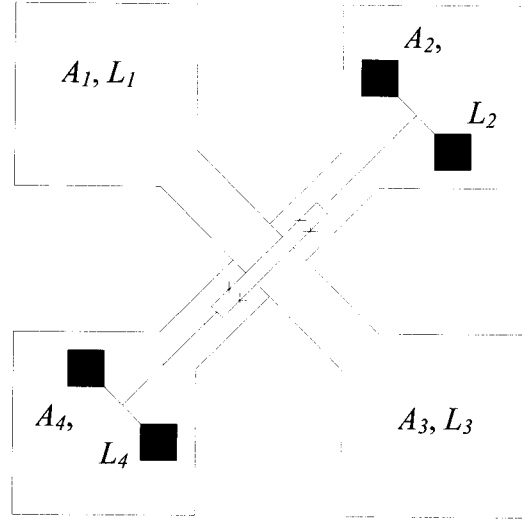


Fig. 1. Schematic diagram of the  $d^2B_z/dxdy$  SQUID gradiometer.

$$\Phi_s = \frac{(\Delta B_1 - \Delta B_3)MA_1}{L_1} \pm \frac{(\Delta B_2 - \Delta B_4)MA_2}{L_2}\quad (4)$$

Eq. (3)으로부터 균일 자장이 걸렸을 경우의 balancing 조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{A_1}{L_1} = \frac{A_2}{L_2}\quad (5)$$

즉, pick-up loop의 면적  $A_1$ 과  $A_2$ ,  $L_1$ 과  $L_2$ 가 같도록 설계되어 있다면 균일 자장에 의한 효과는 상쇄되어 balancing이 맞게 된다.

한편, 일차 미분형 자장을 인가한 경우, field gradient의 기하학적인 구조에 관계없이  $\Delta B_1 = \Delta B_3$ ,  $\Delta B_2 = \Delta B_4$ 가 성립하므로 SQUID에 걸리는 자속은 자연스럽게 0이 된다.

네 개의 pick-up loop을 가지는  $d^2B_z/dxdy$  형태의 SQUID 이차 미분기는 각각의 pick-up loop의 면적과 인덕턴스가 동일하기 때문에 기존의 직접 결합형 이차 미분기와 달리 balancing을 개선하기 위한 별도의 노력이 필요 없다는 점이 장점이다.

### III. 설계 및 제작 방법

실험은 계단형 모서리 접합을 이용하였다. 10 mm × 10 mm 크기의 SrTiO<sub>3</sub> (100) 단결정 기판 위에 포토리소그래피법을 이용하여 아르곤 이온 식각법으로 200 nm 높이의 계단 모서리를 제작하였다.

$d^2B_z/dx dy$  SQUID 이차 미분기는 두 개의 접합이 병렬로 연결된 기존의 SQUID와 달리 네 개의 접합이 각각 직렬 두 개와 병렬 두 개로 연결되어 있다. 따라서, 네 개의 계단 모서리를 균일하게 제작하기 위해서 이온 gun과 기판의 법선 사이 각은 30°로 하였으며, 회전각은 0°로 놓았다[8]. 접합의 수율을 향상시키기 위해서 이온 식각으로 만든 계단 모서리를 1050 °C 산소 분위기에서 1 시간동안 열처리 하였다[9].

제작된 계단 각은 약 60°로 그 위에 펄스 레이저 증착법으로 기판 온도 810 °C, 산소 분압 400 mTorr, 레이저 에너지 1.2 J/cm<sup>2</sup>의 조건으로 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 박막을 180 nm 정도 두께로 입혔다. 증착 후 *in-situ*로 500 °C, 1 기압 산소 분위기에서 1 시간동안 열처리하였다. 여기에 다시 포토리소그래피법을 사용하여 Fig. 2와 같은 모양으로 미세 형상화하였다.

SQUID 이차 미분기는 크게 pick-up loop 부분과 SQUID 부분으로 구성되어 있다. 전체 크

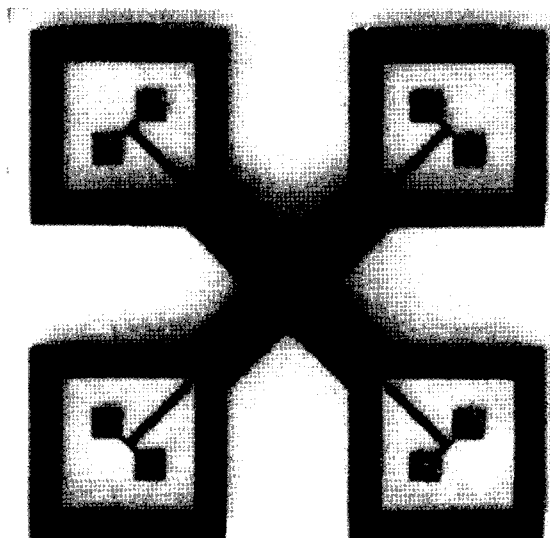


Fig. 2. Photograph of the  $d^2B_z/dx dy$  SQUID gradiometer.

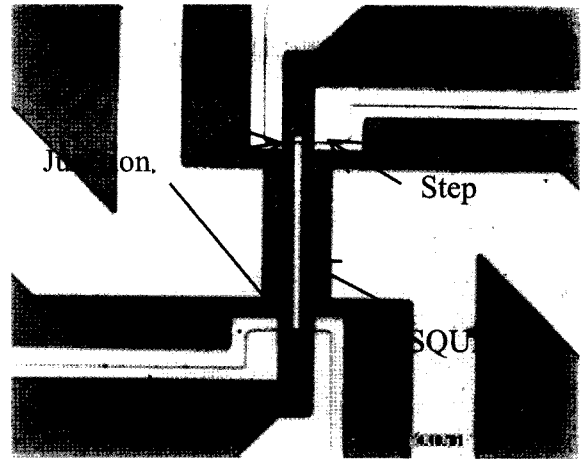


Fig. 3. Optical micrograph of the SQUID area of the gradiometer.

Table 1. Parameters of the  $d^2B_z/dx dy$  SQUID gradiometer.

Loop area : $A_1, A_2$	2.3 mm × 2.3 mm
Loop inductance : $L$	5.3 nH
SQUID : Hole size	3 μm × 65 μm
Inductance $L_s$	47 pH
Junction width	3 μm

기는 8.4 mm × 8.4 mm로 각각의 pick-up loop의 크기는 2.3 mm × 2.3 mm이고 선 폭은 0.5 mm, 인덕턴스 값은 대략 5.3 nH이다.

중심에 네 개의 계단형 모서리 접합을 포함하는 SQUID loop이 있고 접합 폭은 3 μm, SQUID loop의 크기는 3 μm × 65 μm, 인덕턴스 값은 약 47 pH로, Fig. 3은 SQUID loop 부분만을 확대한 광학 사진이고 센서에 대한 변수들은 Table 1에 제시하였다.

### IV. 결과 및 논의

Fig. 4는 제작한 SQUID 이차 미분기의 전류-전압 곡선이다. 임계전류( $I_c$ )는 약 9 μA이고  $R_N$ 은 약 3.7 Ω 정도가 나왔다. 또한, 균일 자장을 걸어준 후 측정된 전압 변조 신호 주기는 Fig. 5에서와 같이 약 13.5 mA가 나왔다. 앞 절에서 보인 이론에 의하면 균일 자장 효과가 완전히 상쇄 되어야 하나, 실제로는 그렇지 않게 나왔

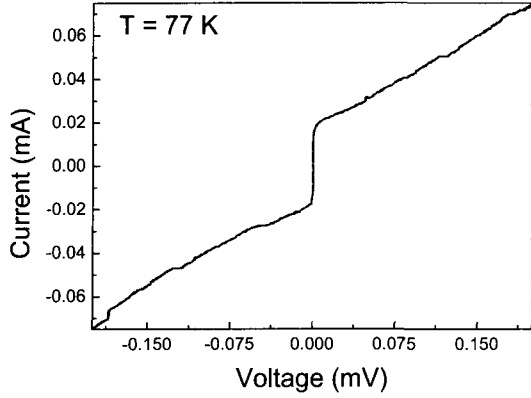


Fig. 4.  $I$ - $V$  characteristics of the  $d^2B_z/dx^2dy$  SQUID gradiometer.

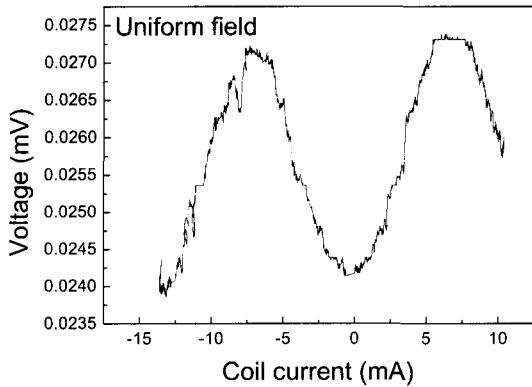
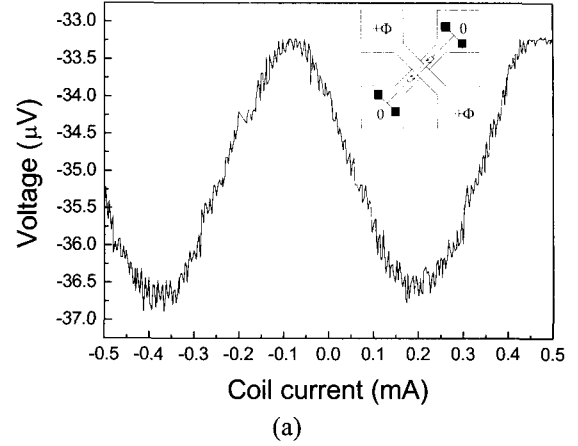


Fig. 5. SQUID modulation signal for the flux distribution corresponding to the uniform field.

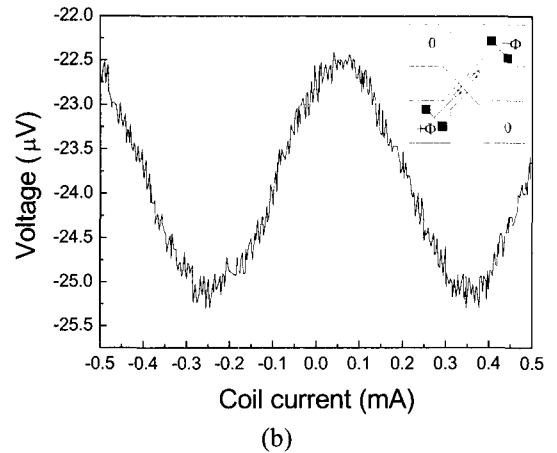
다. 이에 대한 이유로는 균일 자장 인가용 코일과 SQUID 센서와의 정렬상의 문제로 보여진다.

Fig. 6 (a)는 Fig. 1처럼 1번과 3번 pick-up loop인  $A_1$ 과  $A_3$ 에 자장을 건 후 측정된 전압 변조 신호이다. 이렇게 자장을 걸면 네 개의 pick-up loop에 대해 이차 미분형 자장이 걸리는 형상이 되고 이에 대한 전압 변조 주기는 대략 0.57 mA가 나왔다. 한편, Fig. 6 (b)는 2번과 4번 pick-up loop인  $A_2$ 와  $A_4$ 에 자장을 건 경우로, 전압 변조 신호 주기가 0.6 mA로 위의 경우와 비슷한 결과가 나왔다.

이에 대한 결과를 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 6. Modulation signal for the flux distribution corresponding to the second-order field gradient.

Fig. 6 (a)처럼 자장이 걸릴 경우에는 SQUID loop에 걸리는 자속은 Eq. (1)로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \Phi_s &= MI_1 + MI_2 + MI_3 + MI_4 \\ &= -\frac{M\Delta BA_2}{L_2} - \frac{M\Delta BA_4}{L_4} \\ &= -\frac{2M\Delta BA_2}{L_2} \end{aligned} \quad (6)$$

또한, Fig. 6 (b)처럼 자장이 걸릴 경우에는 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 \Phi_s &= MI_1 + MI_2 + MI_3 + MI_4 \\
 &= \frac{M\Delta BA_1}{L_1} + \frac{M\Delta BA_3}{L_3} \\
 &= \frac{2M\Delta BA_1}{L_1}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

즉, 위의 두 식 Eq. (6)과 (7)로부터 SQUID loop에 걸리는 자속이 크기는 같고 부호만 반대인 대가 됨을 알 수 있다. 이런 결과는 자장을 만드는 코일관에 걸어준 전류를 서로 반대 방향으로 걸어주는 효과와 같으므로 전압 변조 곡선이 전류가 0인 지점을 기준으로 좌우가 서로 대칭이 된다.

실험 결과인 Fig. 6 (a)와 (b)로부터 코일관의 전류가 0인 지점을 기준으로 좌우 대칭이 됨을 확인할 수 있었고, 이는 Eq. (6)과 (7)로부터 얻은 이론적인 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

본 연구에서는 직접 결합형 단일층  $d^2B_z/dx dy$  SQUID 이차 미분기를 설계 및 제작하였다. 이론적인 기술을 통해  $d^2B_z/dx dy$  이차 미분기에 대한 이해를 하였고, 제작한 이차 미분기의 실험 결과와 이론값을 비교함으로써 제작한 이차 미분기가 제대로 작동하고 있음을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술처(프로젝트 코드 01-A18-00-002-11)와 한국학술진흥재단(KRF-2001-041-D00073)의 지원을 받아 수행하였습니다.

## References

- [1] Harold Weinstock, "SQUID sensors: Fundamentals, fabrication and applications", vol. 329, Kluwer Academic Publishers (1996).
- [2] W. Eidelloth, B. Oh, R. P. Robertazzi, W. J. Gallagher, and R. H. Koch, Appl. Phys. Lett., 59, 3473 (1991).
- [3] M. B. Ketchen, W. M. Goubau, J. Clarke, and G. B. Donaldson, J. Appl. Phys., 44, 4111 (1978).
- [4] G. M. Daalmans, L. Bär, M. Kühnl, D. Uhl, M. Selent, and J. Ramos, IEEE Trans. on Appl. Supercond., 5, 3109 (1995).
- [5] V. Zakosarenko, F. Schmidl, H. Schneidewind, L. Dorrer, and P. Seidel, Appl. Phys. Lett., 65, 779 (1994).
- [6] S. -G. Lee, Y. Hwang, B. -C. Nam, J. -T. Kim, and I. -S. Kim, Appl. Phys. Lett., 73, 2345 (1998).
- [7] Y. Hwang, J. R. Ahn, S. -G. Lee, J. -T. Kim, I. -S. Kim, and Y. K. Park, IEEE Trans. on Appl. Supercond., 11, 1343 (2001).
- [8] B. -C. Nam, I. -S. Kim, S. -G. Lee, J. -C. Park, and Y. K. Park, Kor. J. Mat. Res., 8, 950 (1998).
- [9] Y. Hwang, J. -T. Kim, and S. -G. Lee, IEEE Tran. on Appl. Supercond., 11, 4136 (2001).