

## Direct-coupled First-order SQUID gradiometer for Nondestructive Evaluations

### 비파괴 평가용 직접결합형 1차 미분형 SQUID gradiometer

Yunseok Hwang<sup>\*\*\*</sup>, Heeseok Choi<sup>\*\*\*\*</sup>, Jin-Tae Kim\*, Soon-Gul Lee<sup>\*\*</sup>,  
Donghoon Lee<sup>\*\*\*</sup>, Yong Ki Park\* and Jong-Chul Park\*

황윤석<sup>\*\*\*</sup>, 최희석<sup>\*\*\*\*</sup>, 김진태\*, 이순걸<sup>\*\*</sup>, 이동훈<sup>\*\*\*</sup>, 박용기\*, 박종철\*

P.O. Box 102, Yusong, Taejon, Korea 305-600,  
<sup>\*</sup>Korea Research Institute of Standards and Science  
<sup>\*\*</sup>Korea University  
<sup>\*\*\*</sup>Paichai University

<sup>\*</sup>한국표준과학연구원  
<sup>\*\*</sup>고려대학교  
<sup>\*\*\*</sup>배재대학교

We have fabricated the direct-coupled planar type 1st-order SQUID gradiometers. The gradiometer consists of moats or slots in SQUID loop. It is made by  $YBa_2Cu_3O_7$  thin films using pulsed laser deposition method on  $SrTiO_3$  single crystal and bi-crystal substrates. We have studied the effects of slots and moats in SQUID loop by measuring the voltage modulation signals under uniform field and 1st-order gradient, and the noise properties under non-shielded environment.

### 1. 서론

초전도체가 발견된 이후 초전도체를 이용한 소자를 개발하기 위해 많은 연구가 수행되어왔다. 이 중에서 SQUID는 현존하는 자기 센서 중 가장 민감한 소자로서, 특히 white noise나  $1/f$  noise가 나타나는 저주파 영역에서 높은 분해능을 가지고 있다<sup>[1,2]</sup>. SQUID magnetometer는 시료의 자기 신호를 크게 받아들일 수 있으나, 시료의 자기 신호뿐만 아니라 측정 공간의 자기적 잡음까지 모두 측정하기 때문에 실제 측정하려는 시료의 자기 신호만을 구별해 낼 수가 없다. 따라서 측정 시료만의 자기 신호를 측정하기 위해서는 자기 차폐실 내에서 측정을 해야 하는 단점이 있다. 이에 비해, SQUID gradiometer는 외부의 균일한 자장에 의한 자기적 잡음을 줄일 수

있다는 이점으로 인해 많은 연구가 수행되었다<sup>[3]</sup>. SQUID를 비파괴 평가에 응용하기 위해서는 비자기차폐 환경에서 작동하는 SQUID 센서가 필요하다. 기존에 있는 magnetometer는 감도는 좋으나, 지자기 환경에서는 노이즈 영향으로 인해 측정에 충분하지 않을 수도 있다. 따라서, 신호대-잡음 비가 magnetometer보다 높은 1st-order gradiometer이 필요하다. 이러한 이유로 단일층 박막을 이용한 direct-coupling 방식의 1st-order SQUID gradiometer가 개발되었다<sup>[4]</sup>.

본 연구는 비파괴 평가에 응용하기 위해 vortex 요동에 의한 잡음을 줄이기 위해 SQUID loop에 moat 또는 slot을 첨가한 단일층 박막 형태의 직접결합형 1st-order dc SQUID gradiometer를 설계 및 제작하여 그 특성을 분석, 조사하였다.

## 2. 실험 방법

10 × 5 mm 크기의 단결정 SrTiO<sub>3</sub> (100) 기판 위에 포토리소그래피법을 이용하여 Ar ion milling법으로 200 nm 높이의 step을 제작하였다. 원하는 step 각을 얻기 위해서 ion gun과 기판의 법선 사이 각은 30°로 하였으며, 회전각은 15°로 하였다<sup>[5]</sup>. 제작된 step 각은 약 65°로 그 위에 중심 파장이 248 nm인 엑시머(excimer) 레이저를 사용하여 pulsed laser deposition(PLD)으로 YBCO 박막을 160 nm 정도 입혔다. 증착시 산소압력과 기판의 온도는 각각 400 mTorr와 810 °C로 유지시켰고, 증착 후 시료를 500 °C, 산소 1기압 하에서 한 시간동안 열처리하였다. 측정을 위한 전극용 단자로는 Au를 80 nm 정도 입혔다. 이때 Au는 Au와 YBCO 박막 사이의 접촉 저항을 줄이기 위해서 YBCO 박막을 입힌 후 바로 rf 스퍼터링법으로 입혔다<sup>[6]</sup>. 여기에 다시 포토리소그래피법을 사용하여 패턴을 만든 후 Ar ion milling법으로 식각하였다.

Fig. 1은 제작된 SQUID gradiometer의 개략도이다. SQUID gradiometer의 전체 크기는 8 mm × 4 mm이다. Loop의 중심에 3 μm × 57 μm 크기의 SQUID loop이 있고 이 SQUID loop의 인덕턴스는 약 50 pH이다. 그리고, SQUID의 접합 폭은 3.5 μm이다. 양쪽에 있는 각 pick-up loop의 크기는 3.5 mm × 4.0 mm이고 loop 인덕턴스는 6.8 nH이다. 실험은 SQUID loop 내에 삽입한 slot과 moat에 대한 각각의 노이즈 특성을 조사하여 slot과 moat에 대한 노이즈 영향을 조사하는 것으로 진행하였다.

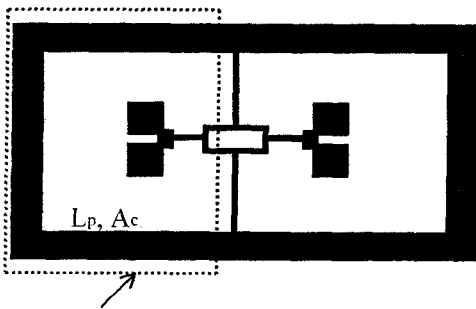


Fig. 1. Schematic design of SQUID gradiometer.

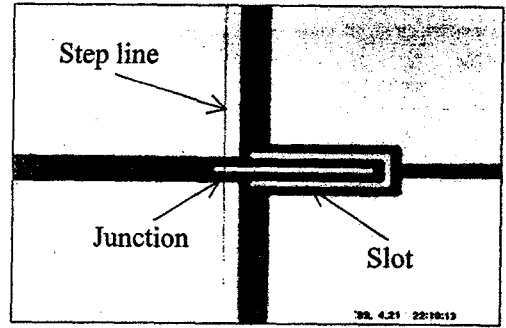
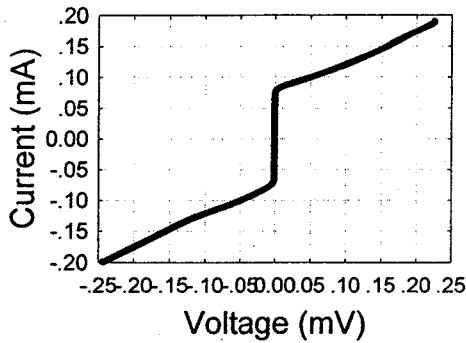


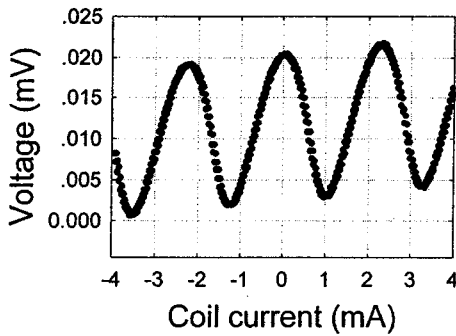
Fig. 2. Optical micrograph of the SQUID portion of gradiometer.

## 3. 결과 및 논의

Fig. 3(a)는 제작한 SQUID gradiometer의 전류-전압 곡선이다. 이 gradiometer는 SQUID loop에 한 개의 slot을 포함하고 있고, 액체 질소에서 측정된 gradiometer의 임계전류( $2I_c$ )는 약 80 μA가 나왔고 상저항( $R_N/2$ )은 약 1.7 Ω이 나왔다. 이 그래프에 의하면 이 gradiometer의 특성전압 ( $V_c = I_c R_N$ )은 136 μV가 됨을 알 수 있다. SQUID의 잡음 중 열적 잡음을 추적해 보면, 열적 잡음 요소( $\gamma$ )가 25 정도가 나온다. 이것은 Fig. 3(a)의 모양과 잘 맞아 떨어진다. 그런데, Fig. 3(b)를 보면 SQUID의 전압변조신호( $\Delta V$ )가 20 μV 정도 나오는데, 이 값은 SQUID loop의 인덕턴스와 상당히 관련이 있다. 여기서는 구체적인 계산은 생략하고 대략적으로 SQUID loop의 인덕턴스 값을 구해보면 약 67 pH 정도가 나온다. 즉, 이 gradiometer는 임계전류값과 SQUID loop 인덕턴스가 적절하게 조절된 것으로 보인다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 SQUID loop에 여러 개의 slot과 moat를 삽입한 gradiometer의 잡음 특성 곡선이다. SQUID loop에 여러 개의 slot을 삽입한 gradiometer의 경우,  $2I_c$  값은 50 μA, 전압변조신호는 110 μV 정도가 나왔고, 여러 개의 moat를 삽입한 경우는  $2I_c$ 가 75 μA, 전압변조신호가 100 μV 정도가 나왔다. Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)를 비교해보면 ac로 측정된 경우, 잡음 수준이 각각 2 pT/Hz<sup>0.5</sup>와 1.5 pT/Hz<sup>0.5</sup>, 저주파 영역에서는 3.5 pT/Hz<sup>0.5</sup>와 3 pT/Hz<sup>0.5</sup>으로 나왔다. 또한, dc로 측정된 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)의 경우도 각각 2 pT/Hz<sup>0.5</sup>와 1.7 pT/Hz<sup>0.5</sup>로, 저주파 영역에서는 7.4 pT/Hz<sup>0.5</sup>와



(a)

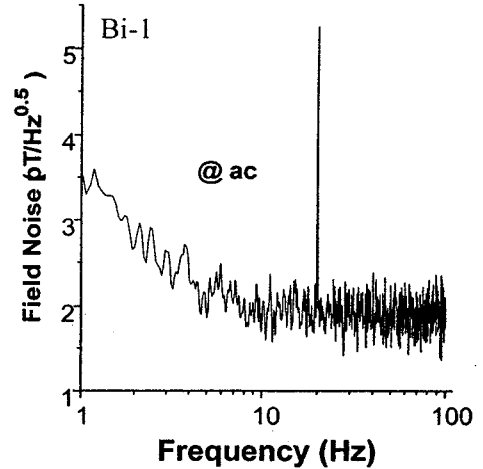


(b)

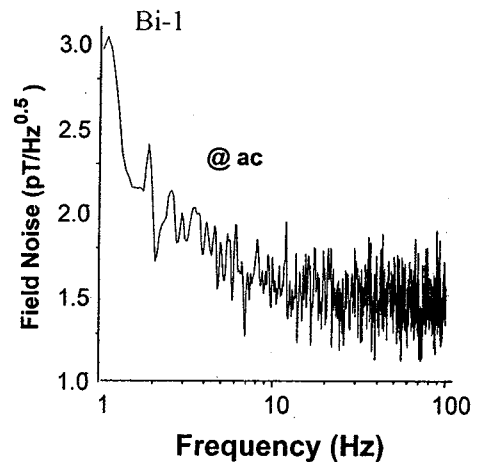
Fig. 3. (a) I-V curve and (b) voltage modulation signal of SQUID gradiometer.

8  $\text{pT}/\text{Hz}^{0.5}$ 로 나왔다. 즉, 이 두 gradiometer의 잡음 수준은 거의 같다. 따라서, slot과 moat는 별로 차이가 없는 것으로 판단된다. Fig. 6은 SQUID loop에 slot을 한 개 삽입한 경우와 하나도 삽입하지 않은 경우의 잡음특성 곡선이다. 이 그림을 보면, slot을 포함한 경우의 잡음 수준이 1  $\text{pT}/\text{Hz}^{0.5}$ 로 그렇지 않은 경우의 잡음 수준 2  $\text{pT}/\text{Hz}^{0.5}$  보다 두 배 정도 크음을 볼 수 있다. 반면, 저주파 영역에서는 slot이 있는 경우와 없는 경우가 각각 2  $\text{pT}/\text{Hz}^{0.5}$ 와 10  $\text{pT}/\text{Hz}^{0.5}$ 로 현저한 차이를 보이고 있다.

#### 4. 결론



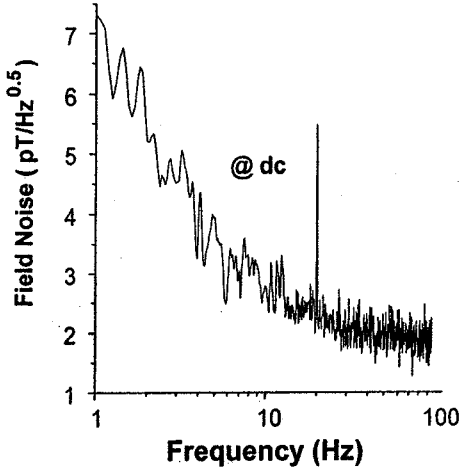
(a)



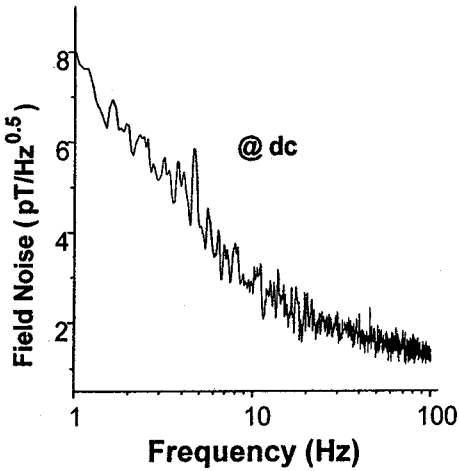
(b)

Fig. 4. Noise properties of SQUID gradiometer with (a) many slots and (b) many moats.

본 연구에서는 비자기차폐 환경에서 작동하는 SQUID gradiometer 센서를 개발하고 설계, 제작하여 그 특성에 대한 조사를 하였다. 제작된 SQUID gradiometer의 특징은 SQUID loop에 slot이나 moat를 삽입함으로써 잡음 수준을 높이고자 했다. Slot과 moat를 삽입한 경우의 잡음 특성은 이 두 경우의 차이가 별로 없는 것으로 나타났다. 그러나, slot을 삽입한 경우와 그렇지 않은 경우에는 저주파 영역에서 잡음특성이 현저한



(a)



(b)

Fig. 5. Noise properties of gradiometer with (a) many slots and (b) many moats

차이가 나타났다. 즉, slot을 삽입한 경우가 저주파 영역에서 효과를 나타낸 것으로 보인다. 저주파 영역의 잡음을  $1/f$  잡음이라고 하는데, 이  $1/f$  잡음은 박막에서 나오는 vortex 잡음이며 slot이

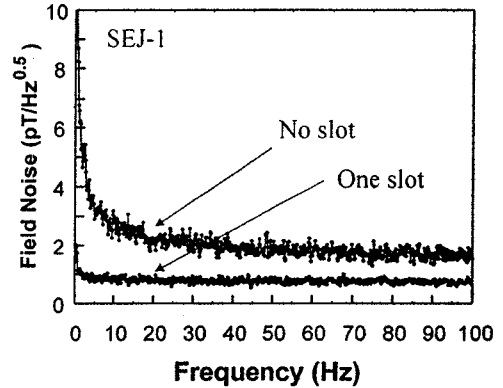


Fig. 6. Noise properties of SQUID gradiometer.

이 vortex가 움직이는 것을 방해함으로써 잡음특성이 개선된 것으로 보인다. 따라서, SQUID loop에 slot이나 moat를 삽입하는 것이 잡음특성상 유리한 것으로 보인다.

## 참고문헌

- [1] Hiroyuki Nakamura, Jian Chen, Tomoya Ogawa, and Tsutomu Yamashita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34, L1448 (1995).
- [2] J. Chen, T. Ogawa, H. Nakamura, H. Myoren, K. Nakajima, and T. Yamashita, *J. Appl. Phys.*, 76, 1895 (1994).
- [3] M. B. Ketchen, W. M. Goub며, and J. Clarke, *J. Appl. Phys.*, 49, 4111 (1978).
- [4] S. Knappe, D. Drung, T. Schurig, H. Koch, M. Klinger, and J. Hinken, *Cryogenics* 32, 881 (1992).
- [5] 남병창, 김인선, 이순걸, 박종철, 박용기, *한국재료학회지*, 8, 950 (1998).
- [6] Yunsung Huh, Jin-Tae Kim, Yunseok Hwang, Yongsup Park, Youngjin So, In-Seon Kim, Soon-Gul Lee, Gwangseo Park, Yong Ki Park, and Jong-Chul Park, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37, 2478 (1998).