

High- T_c 2nd-order SQUID Gradiometer for Use in Unshielded Environments

Seungmoon Park^{a,b}, Chan-Seok Kang^{a,b}, Soon-Gul Lee^{a,b,*},
Kwon-Kyu Yu^b, In-Seon Kim^b, Yong Ki Park^b

^aKorea University, Jochiwon Chungnam 339-800, Korea

^bKorea Research Institute of Standards and Science, Taedok Science Town, Taejon 305-600, Korea

비차폐 환경에서의 고온초전도 SQUID 2차 미분기의 특성연구

박승문^{a,b}, 강찬석^{a,b}, 이순걸^{a,b,*}, 유권규^b, 김인선^b, 박용기^b

Abstract

We have fabricated $\partial^2 B_z / \partial x^2$ type planar gradiometers and studied their properties in operation under various field conditions. $YBa_2Cu_3O_7$ film was deposited on $SrTiO_3$ (100) substrate by a pulsed laser deposition (PLD) system and patterned into a device by the photolithography with ion milling technique. The device consists of 3 pickup loops designed symmetrically. Inner dimension and the width of the square side loops are 3.6 mm and 1.2 mm, respectively, and the corresponding dimensions of the center loop are 2.0 mm and 1.13 mm. The length of baseline gradiometer is 5.8 mm. Step-edge junction width is 3.0 μm and the hole size of the SQUID loop is 3 $\mu\text{m} \times 52 \mu\text{m}$. The SQUID inductance is estimated to be 35 pH. The device was formed on a 20 mm \times 10 mm substrate. We have tested the behavior of the device in various field conditions. The unshielded gradiometer was stable under extremely hostile conditions on a laboratory bench. Noise level 0.45 pT/cm²/√Hz and 0.84 pT/cm²/√Hz at 1 Hz for the shielded and the unshielded cases, which correspond to equivalent field noises of 150 fT/√Hz and 280 fT/√Hz, respectively. In spite of the short baseline of 5.8 mm, the high common-mode-rejection-ratio of the gradiometer, 10^3 , allowed us to successfully record magnetocardiogram of a human subject, which demonstrates the feasibility of the design in biomagnetic studies.

Keywords : $YBa_2Cu_3O_7$, 2nd-order SQUID gradiometer, noise

I. 서론

초전도 양자 간섭장치 (SQUID)는 초전도체에서 일어나는 거시적 양자현상을 이용한 자기

장감지 센서로서 10^{-15} T 크기의 매우 미세한 자장을 측정할 수 있는 자장 감도를 가질 뿐 아니라 자장의 기울기, 전류, 전압 등 자기장으로 변환 가능한 어떤 물리량도 측정이 가능한 센서이다. 그러나 SQUID를 이용하여 측정하고자 하는 자기 신호는 그 크기가 매우 미약할 뿐더러 주변에 존재하는 환경 자기 잡음에 의

*Corresponding author : +82 41 865 0939

e-mail : sglee@korea.ac.kr

한 영향을 받기 때문에, 이런 주위의 환경 잡음을 제거하고 원하는 신호만을 검출해내는 제반 기술이 필요하게 된다. 일반적으로 이러한 목적을 위하여 자기 차폐실과 같은 특수한 환경을 만들어 주는데 이 경우 전체적인 SQUID 시스템의 규모를 크게 만들 뿐더러 비파괴 검사[1]와 같이 근본적으로 자기 차폐실을 적용할 수 없는 경우도 있어 비차폐 환경에서도 우수한 동작특성을 가지는 센서가 필요하게 된다.

이러한 목적으로 고안된 SQUID 미분기 센서는 자체적으로 주변의 자기 잡음을 상쇄시키는 구조로 설계되어 있어 비차폐 환경에서도 우수한 동작특성 및 잡음 특성을 갖는다.

미분기는 검출하는 자장의 형태에 따라 1st-order gradiometer, 2nd-order gradiometer 등으로 구분한다[2].

본 연구에서는 균일한 자장에는 둔감하고 거리에 민감한, 1차 미분기보다 신호대 잡음비가 높은 YBCO 박막을 이용한 직접 결합형 단일층 2nd-order gradiometer로 제작하였다[3],[4]. 제작된 2nd-order gradiometer를 이용해 자기 차폐 환경과 비자기 차폐 환경에서의 자기 잡음 특성에 대해 조사하였고, 자기 차폐실 내, 외부에서 정상인의 심자도 (MCG)를 측정하였다.

II. 실험방법

실험은 계단형 모서리 접합을 이용하였다. 세척을 한 20 mm × 10 mm 크기의 단결정 SrTiO₃ (100) 기판 위에 rf sputter를 이용하여 Au를 220 nm 입혔다. 포토리소그래피법을 이용하여 계단형 모서리 모양의 포토레지스트를 입힌 후, UV exposure와 develop를 통해서 계단형 모서리 모양의 패턴을 제작하였고, 아르곤 이온 식각법으로 200 nm 높이의 계단 모서리를 제작하였다.

SrTiO₃ (100) 기판 계단 모서리 제작은 이온 gun과 기판의 법선 사이 각은 30°로 하였으며, 회전각은 30°로 놓았다[5]. Beam current를 약 28 mA로 주고 작업 압력이 3.4×10^{-4} torr하에서 20분간 식각하여 계단 모서리를 제작하였다. 접합의 수율을 향상시키기 위해서 이온 식각으

로 만든 계단 모서리를 전기로를 이용 1050°C 산소 분위기에서 8시간동안 열처리를 하였다 [6].

제작된 계단 각은 약 60°로 그 위에 단일층 YBa₂Cu₃O₇ 박막을 기판온도가 800°C 작업 환경에서 PLD법으로 6분 40초, 약 200 nm 정도 두께로 입혔다. 여기에 다시 포토리소그래피법을 사용하여 포토레지스트를 입힌 후, UV exposure와 develop를 통해서 Fig. 1과 같은 모양으로 패턴을 제작하였고, 아르곤 이온 식각법으로 미세 형상화하였다. 측정을 위한 전극용 단자로는 rf-sputtering법으로 Au 박막을 80nm 정도 입혀 SQUID를 제작하였다. 제작과정 중 산소의 결핍을 보충하고, 박막의 안정화를 위해서 전기로를 이용 500°C의 산소 분위기에서 5시간 동안 열처리를 하였다.

제작된 SQUID 2nd-order gradiometer는 크게 pickup loop 부분과 SQUID 부분으로 구성되어 있다. 전체 크기는 18.0 mm × 6.0 mm로 각각의 pickup-loop의 크기는 3.6 mm × 3.6 mm × 1.2 mm 이고 선 폭은 0.6 mm, baseline은 5.8 mm이다. 중심에 모서리 접합을 포함하는 SQUID loop이

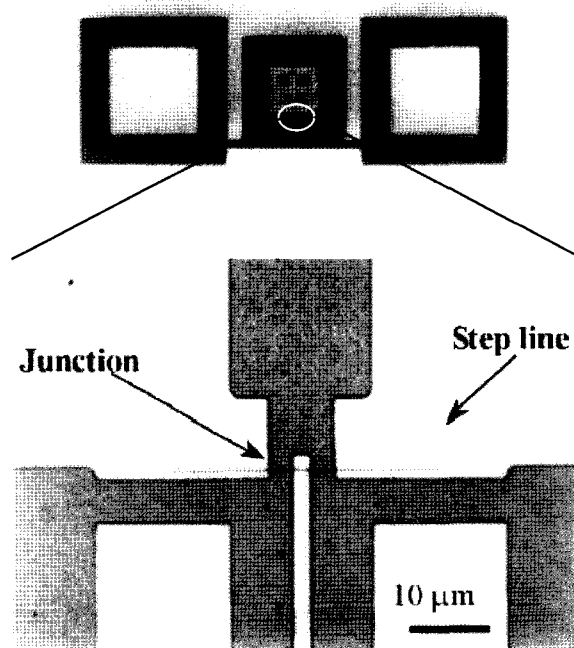


Fig. 1. Photograph of the $d^2B/dx dy$ SQUID gradiometer.

있는데 SQUID loop의 크기는 $2.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm} \times 1.13 \text{ mm}$ 이고 hole size는 $3 \mu\text{m} \times 52 \mu\text{m}$, 접합 폭은 $3.5 \mu\text{m}$, 인덕턴스는 약 35 pH 이다.

III. 결과 및 논의

1. 센서의 동작특성

제작된 2차 미분기의 동작특성 및 잡음특성을 평가하였다.

2차 미분기를 비차폐 환경에서 동작시켰을 때 임계전류 값(I_c)은 약 $10 \mu\text{A}$ 이고, R_n 은 약 8Ω 정도가 나왔다. Fig. 2는 제작된 센서의 전류-전압 곡선이다. 또한 실제로 비차폐 환경에서 2차 미분기의 동작특성 및 자장 감도를 확인하기 위하여 자기 차폐실 내·외부에서의 잡음 특성을 조사하였다. Fig. 3이 차폐실 내·외부에서의 잡음의 spectrum을 보여준다. 차폐실 내부와 외부에서의 200 Hz 대역의 화이트 노이즈 값은 그림과 같이 약 2배 정도의 차이를 보였고 교정코일을 이용하여 자장의 2차 미분값으로 환산하면 약 $0.45 \text{ pT/cm}^2/\text{Hz}^{1/2}$, $0.84 \text{ pT/cm}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 로 나타났다.(그림에 보이는 27 Hz 피크는 교정코일을 통해 걸어준 자장의 크기이다.) 그러므로 2차 미분기를 비차폐 환경에서 동작시켰을 때 약 수 ~ 십 pT 크기의 심자도 신호뿐 아니라 수 pT 정도인 2차 Gradient를 측정하기에도 충분한 감도를 갖는 것으로 나타났다.

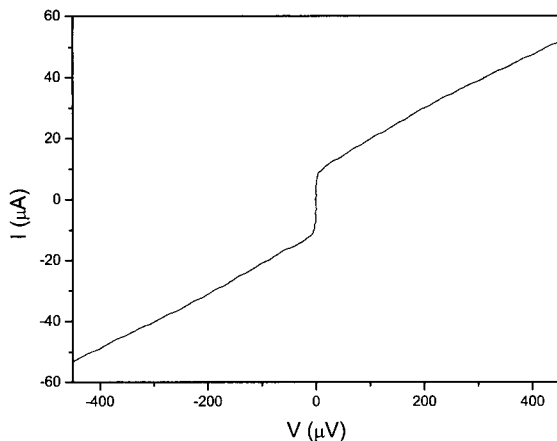
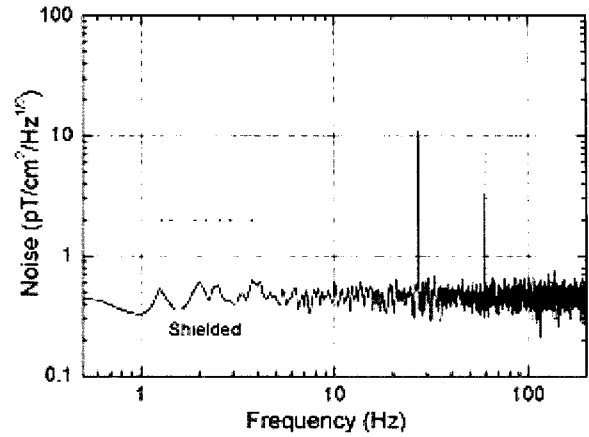
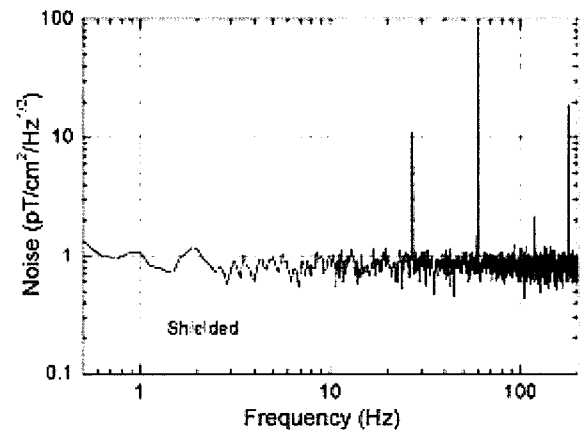


Fig. 2. I characteristics of the d^2B/dx^2 SQUID gradiometer.



(a)



(b)

Fig. 3. Noise spectrum of a) shielded and b) unshielded.

2. 심자도 신호측정

미분기는 그 특성상 신호원으로부터의 거리와 방향성에 크게 의존하게 되는데 심자도 신호의 경우 그 크기가 매우 작기 때문에 센서 자체가 심자도 신호를 측정하기에 충분한 감도를 갖는다 해도 센서를 어떻게 배치 하느냐에 따라 신호-대-잡음 비에 있어서 큰 차이를 나타낼 수도 있다. 그러므로 우선 심자도 신호에 비하여 그 크기가 매우 큰 아날로그 손목시계의 펄스신호를 거리는 일정하게 유지한 채 센서와의 방향만을 바꿔가며 측정하여 가장 큰 신호-대 잡음비를 얻어낼 수 있는 센서의 배치를 결정하였다. Fig. 4는 비차폐 환경에서 아날로그 손목시계를 센서로부터 약 10 cm 떨어뜨

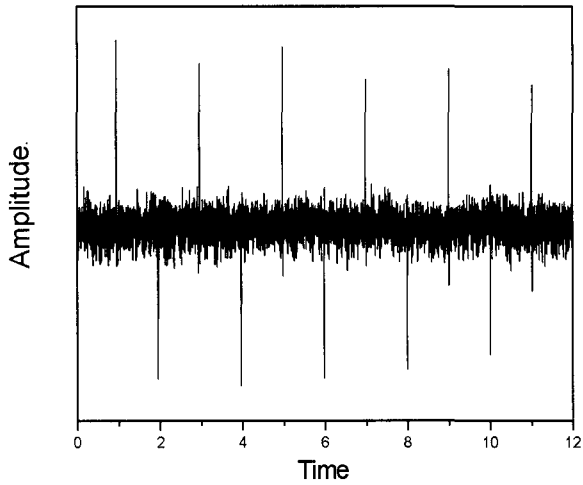


Fig. 4. Watch signal in unshielded environment.

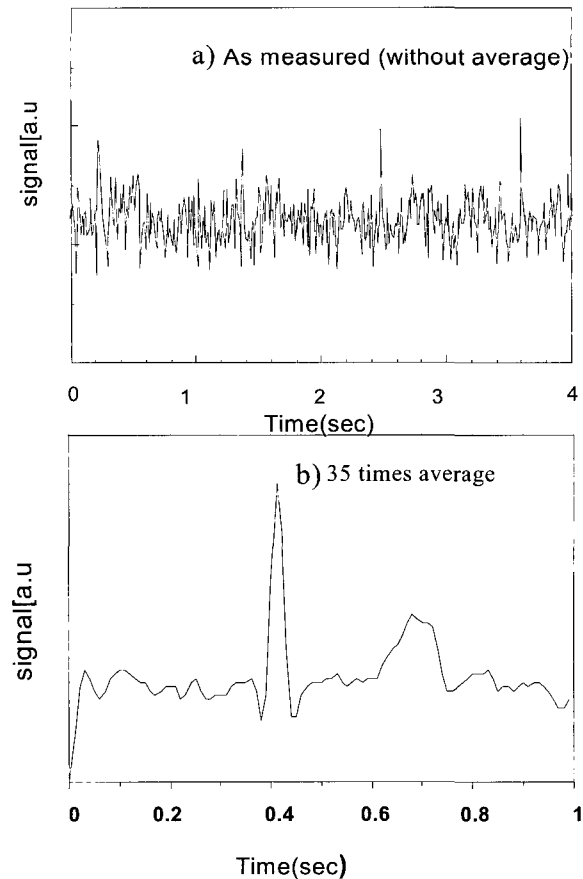


Fig. 5. MCG signal generated from the human heart, a) real time MCG signal b) MCG signal with 35 times average

러 놓고 측정된 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 2 차 미분계임을 고려했을 때 상당한 거리임에도 시계의 주기적인 peak을 매우 큰 진폭으로 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 방향성을 가지는 심장 전류원에 대하여 가장 큰 신호를 얻을 수 있는 방향으로 하여 전류원 벡터의 법선 성분을 측정하도록 센서를 배치하였다. 이때 센서와 심장 사이의 거리는 약 10 cm 이었으며 sampling rate 를 100 Hz로 하여 약 60 초간 측정하였다. Fig. 5의 a)는 60초간 측정된 평균되지 않은 심자도 신호 중 임의의 4초간의 구간을 나타낸다. 그림에서 보듯이 잡음의 영향 때문에 비교적 낮은 수준의 신호대 잡음비를 보이지만 전형적인 심자도 신호의 특징인 QRS 피크와 T 파를 어느 정도 확인 할 수는 있었고, 또한 b)에서 보듯이 위의 심자도 신호를 35회 평균함으로써 좀더 양호한 신호를 얻어 낼 수 있음을 알 수 있었다.

IV. 결론

비차폐 환경에서 안정적으로 동작하고, 심자도 신호와 같은 극미세 자기신호를 측정할 수 있는 2nd-order gradiometer를 제작하였다. 대면적 직접 결합형 SQUID를 설계하고, 결합각이 약 60° 인 STO기판 위에 PLD법으로 단일층 YBCO박막을 증착하여 제작하였다. 차폐 환경과 비차폐 환경에서의 noise를 측정하고 비교하여 감도를 확인하였고, 아날로그 손목시계를 이용하여 비차폐 환경에서 gradiometer가 작동함을 확인하였다. 작동이 확인된 미분기로 전류원에 대하여 큰 신호를 얻을 수 있게 센서를 배치하여 심자도(MCG)를 측정하였고, 노이즈 중간에 보이는 QRS peak와 T파를 확인함으로써 심장신호를 확인하였다. 잡음 영향을 줄이기 위해서 측정을 통해 얻은 신호를 35회 평균을 함으로써 더 깨끗한 심장 신호를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 외부 자기 환경에 보다 안정적인 미분기의 개발과 신호처리 및 자장 보정을 위해 노력한다면 비차폐 환경에서의 더 깨끗한 심자도를 측정 할 수 있을 것이다.

Acknowledgements

본 연구는 과학기술부 중점국가연구사업 고온초전도물질개발사업(과제번호 01-A18-00-002-11)과 한국학술진흥재단 선도연구자 지원사업(과제번호 KRF-2001-041-D00073)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] H.J. Krause, G.I. Panaitov and Y. Zhang, "conductivity tomography for non-destructive evaluation using pulsed eddy current with HTS SQUID magnetometer", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 13, pp. 215-218, (2003).
- [2] Harold Weinstock, "SQUID sensors: Fundamentals, fabrication and application", vol. 329, Kluwer Academic Publishers (1996).
- [3] S.-G. Lee, Y. Hwang, B. -C. Nam, J. -T. Kim and I. -S. Kim, Appl. Phys. Lett., 73, 2345 (1998).
- [4] Y. Hwang, J. R. Ahn, S. -G. Lee, J.-T. Kim and I. -S. Kim, and Y. K. Park, IEEE Trans. Appl. Supercond., 11,1343 (2001).
- [5] B. -C. Nam, I. -S. Kim, S. -G. Lee, J. -T. Park and Y. K. Park, Kor. J. Mat. Res., 8, 950 (1998).
- [6] Y. Hwang, J.-T. Kim and S. -G. Lee, IEEE Tran. Appl. Supercond., 11, 4136 (2001).