

논문 97-6-4-02

심자도 측정용 고온초전도 SQUID magnetometer의 제작

김인선*, 이상길*, 김진목*, 권혁찬*, 이용호*, 박용기*, 박종철*

Fabrication of a HTS SQUID Magnetometer for Magnetocardiogram

In-Seon Kim*, Sang-Kil Lee*, Jin-Mok Kim*, Hyukchan Kwon*, Yong-Ho Lee*,
Yon Ki Park*, and Jong-Chul Park*

요 약

YBa₂Cu₃O₇ 단일층 박막으로 된 직접결합형 직류 SQUID magnetometer를 설계하여 SrTiO₃기판위에 제작하였다. 검출코일은 외변 8.5 mm, 선폭은 2.6 mm로 하였으며, 조셉슨 접합의 선폭은 3 μm, SQUID 인덕턴스는 50 pH로 하였다. 제작된 소자의 외부 자속에 대한 전압 변조신호의 크기는 최대 65 μV, 자장잡음은 1 Hz에서 약 0.6 pT/√Hz 이었다. 이 SQUID magnetometer를 사용하여 자기차폐실 내에서 심자도 파형을 측정하여 가산평균하였을 때 매우 양호한 심자도 파형을 얻을 수 있었다.

Abstract

YBa₂Cu₃O₇ single layer dc SQUID magnetometers, prepared on 1 cm² SrTiO₃ substrates, have been fabricated and characterized. Based on the analytical description, a SQUID magnetometer design having a 8.5 mm pickup coil with 2.6 mm linewidth, and a SQUID inductance $L_S = 50$ pH with 3 μm Josephson junctions is presented. The devices showed a maximum modulation voltage depth of 65 μV and a magnetic field noise of 0.6 pT/√Hz at 1 Hz. Clear traces of human magnetocardiogram could be obtained with the SQUID magnetometer operating at 77 K.

1. 서 론

초전도 박막소자의 응용 중에 대표적인 것으로 SQUID (Superconducting QUantum Interference Device)를 들 수 있는데 고온초전도체가 발견된 이후 많은 연구 그룹들이 고온초전도 SQUID를 개발하기 위한 연구를 수행해 오고 있다. SQUID magnetometer는 현존하는 센서 중에서 가장 감도가 높은 자기센서인데 지난 수년간 액체질소 온도에서 작동하는 고온초전도체 YBa₂Cu₃O₇

(YBCO)로 만든 SQUID제작 기술이 급속도로 발달하여 왔다. 성능 면에서 현재에는 액체헬륨온도에서 작동하는 금속초전도체 SQUID와 거의 비교할 만한 수준까지 접근하여 심자도 측정 등에 충분히 활용할 수 있게 되었다. SQUID magnetometer는 자장을 검출하는 검출 코일(pickup coil)과 자장을 전압으로 변환하는 SQUID 부분으로 이루어 지는데 이들 둘을 직접 연결하여 결합한 구조가 직접결합형이다. SQUID magnetometer에 있어서 무엇보다 중요한 것은 자장분해능, 즉 측정할 수 있는 최소 자장값이다. 분해능을 높이는 손쉬운 방법은 검출코일의 유효면적을 크게 하여 얻을 수 있다. 그러나 YBCO박막 성장에 필요한 기판에 대한 경제성, 그

* 한국표준과학연구원, 초전도연구그룹
(Superconductivity Group, Korea Research Institute
of Standards and Science)

<접수일자 : 1997년 5월 19일>

리고 생체자기 측정 시에 필수적인 다중채널의 집적화 등을 고려하면 무작정 크게 만들 수만은 없다. 또 다른 방법은 flux transformer로써 검출코일과 SQUID를 결합하여 감도를 증가시키는 방법인데 검출코일과 SQUID를 각각 다른 기판에 제작하여 자기적으로 결합시키는 flip-chip방식^[1-3], 그리고 이들을 집적회로화한 flux transformer 결합방식^[4-6] 등이 있다. 또 다른 방법은 검출코일을 여러 개의 등면적 coil로 나누어 병렬 연결하는 구조인 multi-loop(Drung-type) 방식^[7,8]이 있다. 이들 소자는 다층박막구조로 제작되는데 고온초전도 박막에서는 일반 금속박막 등과는 달리 다층구조로 제작하는 것이 현재까지 기술적으로 어려운 점이 있다. 직접결합형(directly-coupled) dc SQUID magnetometer는 검출코일이 SQUID washer에 직접 연결되는 간단한 구조이므로 단일층 박막으로 제작할 수 있으나 상대적으로 분해능이 좋지 않다. 그러나 그 자체를 flip-chip구조로 응용하여 사용할 수 있으며 제작공정상의 기술확보가 쉽고 수율이 높으므로 특히 다중채널 시스템 제작 시에 많은 수량을 필요로 하므로 이에 적합하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 직접결합형 SQUID magnetometer를 설계하고 SrTiO₃(STO) 복결정 기판위에 성장된 YBCO박막으로 제작하여 그 특성을 평가하였으며 제작된 SQUID 센서를 이용하여 심자도 파형을 측정한 결과에 대해 기술한다.

2. 실험 및 결과

2-1. SQUID magnetometer의 설계 및 제작

SQUID magnetometer는 자장잡음을 최소화하여 자장 분해능을 높여야 한다. 자장 잡음 또는 자장 분해능 B_N 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$B_N = S_{\phi}^{1/2} / A_{eff} \quad (1)$$

위식에서 $S_{\phi}^{1/2}$ 는 SQUID의 자속잡음이고 A_{eff} 는 유효 면적으로서 직접결합형 SQUID의 경우 다음과 같이 주어진다.

$$A_{eff} = \alpha A_p \frac{L_s}{L_p} \quad (2)$$

여기서 A_p 는 검출코일의 기하학적 면적, L_s 및 L_p 는

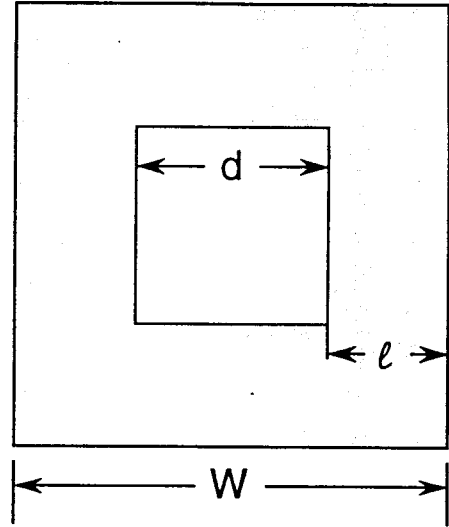


그림 1. 정사각형 직류 SQUID의 설계.

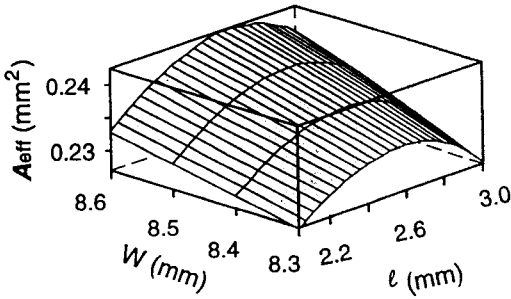
Fig. 1. Square washer dc SQUID design.

각각 SQUID 및 검출코일의 인덕턴스를 나타낸다. Fig. 1. 과 같이 매우 간단한 정사각형 코일의 경우에도 인덕턴스를 실제로 계산하는 것은 매우 복잡한데 선평이 매우 가늘거나 또는 매우 두꺼운 극단적인 경우에는 간단한 근사식^[9]으로 구할 수 있다. 일반적인 경우 즉 선평 값의 변화가 넓은 범위에 있어서는 다음 식을 적용할 수 있다.^[7]

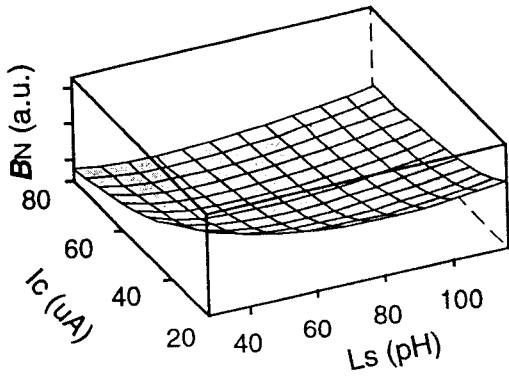
$$L = \frac{2}{\pi} \mu_0 \tan\left(\frac{\pi}{4}\right) (W-l) \left[\ln\left(\frac{32 \tan\left(\frac{\pi}{4}\right) (W-l)}{\pi l}\right) - 2 \right] \quad (3)$$

SQUID magnetometer의 검출코일에 있어서의 유효 면적을 고찰하여 보면 주로 사용하는 정사각형 1 cm 크기의 STO기판에 있어서 테두리부분을 고려하면 최대 사용가능 크기는 약 8.5 mm가 된다. 이것에 대해 식(2)와 식(3)을 이용하여 선평을 변화 시켜 계산한 유효면적의 결과를 Fig.2(a)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 유효면적은 pickup coil의 선평이 약 2.6 mm일 때 최대 값을 갖는다. 따라서 이 경우에 자장잡음이 최소로 되므로 검출코일의 설계치수는 외변을 8.5 mm로 할 때 선평은 2.6 mm로 정해진다.

식(1)에서의 S_{ϕ} 는 자속잡음의 spectral density를 나타내는데 다음식으로 나타낼 수 있다.



(a)



(b)

그림 2. (a)검출코일의 크기 및 선폭을 함수로 계산한 유효면적. (b) 임계전류 및 인덕턴스를 함수로 계산한 자장잡음.

Fig. 2. Calculated effective area as a function of outer dimension and linewidth of pickup coil(a). Calculated magnetic field noise as a function of critical current and SQUID inductance(b).

$$S_{\phi} = S_V / \left(\frac{\partial V}{\partial \Phi} \right)^2 \quad (4)$$

위 식의 S_V 는 실효전압잡음으로 $S_V = 16 k_B TR$ 로 나타낼 수 있으며^[10], $\partial V / \partial \Phi$ 는 flux-to-voltage transfer function을 나타내는데, 다음 식으로 표현된다^[11].

$$\frac{\partial V}{\partial \Phi} = \frac{7}{\pi^2} \frac{I_C R_N}{\Phi_0 (1 + \beta)} \left(1 - 3.57 \frac{k_B T L_S}{\Phi_0} \right) \quad (5)$$

여기서 I_C 는 SQUID에 구성되는 조셉슨 접합의 임계전류, R_N 은 접합의 상전도 상태에서의 저항을 나타

내며 $\beta = 2I_C L_S / \Phi_0$ 는 이상적으로 1에 가까운 값을 가져야 한다. $\partial V / \partial \Phi$ 는 I_C , R_N 의 증가 및 L_S 의 감소에 따라 단순 증가하는 경향을 보인다. 그러나 식(1)에서의 자장잡음 B_N 은 최소가 되는 영역이 존재하는데, Fig.2(b)에 나타내었듯이 $L_S = 50 - 60$ pH 범위에서 최소값을 나타내고 이 영역을 벗어나면 자장잡음은 계속 증가하게 된다. 또한 β 를 L_S 및 I_C 를 변수로 하여 계산하여 보면 위의 영역에서 1 내외의 값을 가지는 것은 임계전류가 약 $50 \mu A$ 내외의 일 패임을 알 수 있다. 이와 같이 직접결합형 SQUID magnetometer에서의 자장잡음이 최소가 되도록 하는 방법으로 해석하였을 때 각 설계변수를 구할 수 있으며 이들 최적화된 변수를 Table 1.에 나타내었다.

표 1. 직접결합형 SQUID magnetometer의 설계치수.

Table 1. Designed parameters for direct coupled dc SQUID magnetometer.

W (outer dimension of pickup coil)	8.5 mm
l (linewidth of pickup coil)	2.6 mm
L_P (inductance of pickup coil)	5.4 nH
L_S (inductance of SQUID)	50 pH
β ($= 2L_S I_C / \Phi_0$)	1.2 ($I_C = 45 \mu A$)
A_{eff} (effective area)	0.24 mm^2
linewidth of junction	$3 \mu m$
width of slit	$4 \mu m$

Table 1.에 나타낸 각 변수 값을 갖도록 directly coupled dc SQUID를 설계하였는데 그 형태를 Fig.3에 나타내었다. 그림에서 검출코일 및 SQUID washer부분의 기본 형태는 사각형으로 되어 있으나 초전도박막에서의 screening current가 흐르는 통로에서의 각진 부분은 자장을 집중시키고 또한 자속침투를 쉽게 하므로 사각모서리 부분은 되도록 부드러운 곡선형태에 가깝게 만들었다.

2-2. SQUID magnetometer의 제작

Fig.3에 나타낸 것과 같이 bicrystal line에서 grain

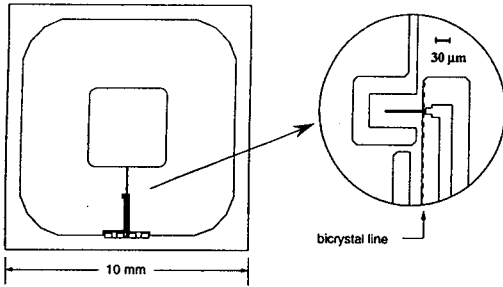


그림 3. 1 cm² 크기의 기판에 설계한 직접결합형 직류 SQUID magnetometer 및 SQUID washer 부분을 확대한 모양(오른쪽 원 내부).
Fig. 3. Schematic view of a directly coupled dc SQUID magnetometer integrated on the 1 cm² substrate. An enlarged view of the vicinity of the SQUID washer is shown at the right-hand side.

boundary 조셉슨 접합이 형성되는 직접결합형 SQUID magnetometer를 제작하였는데, bicrystal은 접합각도가 24° 인 STO(100) bicrystal 기판(10 mm×10 mm×0.5 mm)을 사용하였다. 기판은 클리닝 후 은접착제로 히터에 붙여 펄스 레이저 증착법(pulsed laser deposition)으로 YBCO박막을 증착하였다. 엑시머 레이저는 파장 248 nm인 KrF 레이저를 사용하였는데 렌즈로 적절히 집속시켜 에너지 밀도를 1.3 J/cm²로 하였으며 진공챔버는 10⁻⁵ Torr이하까지 터보펌프로 공기를 뽑은 후 고순도 산소가스를 유입하여 산소분압을 400 mTorr로 유지하였으며, 이때 기판온도는 780°C로 유지하였다. 이러한 조건에서 약 3분간 증착하였을 때 두께 약 1200 Å의 YBCO박막을 얻을 수 있었다. YBCO박막은 photolithography 및 Ar ion milling을 거쳐 Fig.3과 같은 패턴을 만들었다. 최종적으로 전극부분은 금박막을 고주파 스퍼터링으로 증착하고 산소열처리를 하였으며 측정용 리드선으로는 전극부분에 Al선을 초음파로 본딩하여 사용하였다.

2-3. Magnetometer의 특성 측정

특성 측정에는 저잡음 소자로 구성된 SQUID 제어용 전자회로를 제작하여 사용하였는데 Fig. 4에 그 개략도를 나타내었다. SQUID magnetometer는 극 미세 자장을 검출하는 소자이므로, 모든 측정은 지하장을 포함하는 외부 자장 잡음이 차폐된 자기차폐실(KRISS MSR)

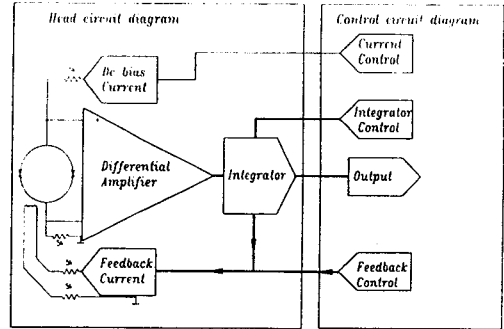
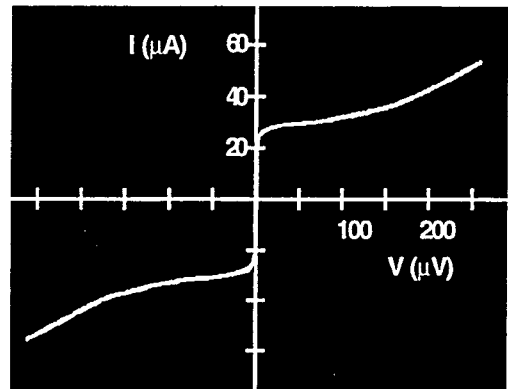
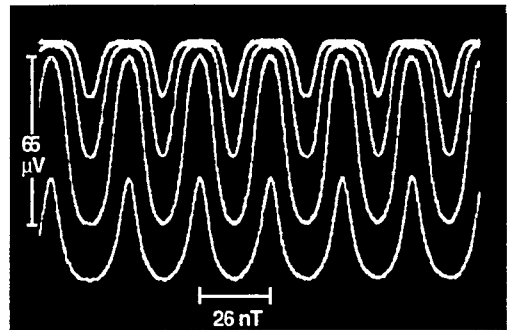


그림 4. SQUID 제어 전자회로 장치의 개략도.
Fig. 4. Schematic diagram of SQUID control electronics.



(a)



(b)

그림 5. SQUID magnetometer의 (a)전류-전압 특성 및 (b)전압 변조신호.
Fig. 5. *I-V* curve(a) and modulation voltage(b) of the SQUID magnetometer.

내부에서 이루어졌다. SQUID는 그림의 좌측에 조셉슨 접합을 가위표 두 개로 하여 둥근 원으로 나타내었다. 이곳과 직접 연결되는 차동 전단증폭기, 바이어스 전류원, 되먹임회로는 밀폐형 금속상자에 수납하여 센서와 최단거리에 배치하고 이들을 제어하는 전자회로는 자기차폐실 외부에 배치하여 배터리로 작동시켰으며 전자회로를 통한 외부 잡음 유입을 최소화하였다. 제작한 차동증폭기의 잡음특성을 측정해 본 결과 10 Hz에서 $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 내외였다.

Fig.5(a)에 제작된 SQUID의 조셉슨접합의 $I-V$ 곡선을 액체질소온도인 77 K에서 측정한 결과를 나타내었다. 이 소자의 경우 $2I_c$ 는 $30 \mu\text{A}$, R_N 은 10Ω 을 나타내었다. Bicrystal grain boundary 접합으로 제작한 SQUID의 경우에 있어서 많은 시편을 제작하였을 때 제작 조건에 따라 $2I_c$ 는 $30\sim 500 \mu\text{A}$, R_N 은 $0.5\sim 10 \Omega$, 전압변조 신호는 $20\sim 60 \mu\text{V}$ 의 매우 넓은 범위의 값을 나타내었다. 이렇게 넓은 범위의 특성을 나타내는 것은 주로 bicrystal 접합에 형성된 YBCO박막의 두께 및 bicrystal 접합부분의 선폭에 크게 좌우되기 때문이다. 즉 이들을 적절히 조절하면 I_c 및 R_N 등 직류 특성을 원하는 값에 근사하게 할 수 있었다. Fig.5(b)는 SQUID magnetometer에 외부자장을 인가하고 이를 변화시켰을 때 발생하는 전압변조 신호를 측정한 결과이다. 이 전압변조신호의 크기는 식(5)에 나타난 $\partial V/\partial \Phi$ 를

적분한 값을 나타낸다. 그림의 신호에서 외부자장의 변화에 따른 전압 변조신호의 크기는 최대 약 $65 \mu\text{V}$ 였으며, 주기는 하나의 flux quantum($\Phi_0=2.07\times 10^{-15} \text{ Tm}^2$)을 나타낸다. 이러한 전압 변조 신호를 앞에서 설명한 SQUID제어 전자회로의 적분기를 이용한 되먹임 회로로써 Flux Lock Loop작동을 하게 되어 미세 자기장을 전압신호로써 검출·변환하게 되는 것이다.

제작한 SQUID magnetometer의 주파수 잡음 특성을 측정하였는데 그 결과를 Fig.6에 나타내었다. 직류 바이어스를 가하였을 때는 10 Hz에서 약 $4 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 자장 잡음을 나타내었다. 여기에 flux modulation을 가하였을 때는 약 $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 감소하였음을 알 수 있다. 이것은 YBCO박막 성장 시에 형성된 미세 불순물 입자로 인한 flux noise에 의한 것으로 생각되어 지는데 YBCO박막의 품질을 향상시키면 이러한 잡음은 더욱 줄어 들것으로 추정할 수 있다. 한편 교류바이어스를 가하였을 때는 그림에 나타나 있듯이 0.5 Hz까지 거의 평탄하게 백색잡음의 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 경우 SQUID magnetometer의 자장잡음 즉 자장 감도는 1 Hz에서 약 $0.6 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이었다.

2-4. 심자도 측정 응용

이와 같이 제작된 SQUID magnetometer를 이용하여 심자도를 측정하여 보았다. 측정 대상은 건강한 남자였으며 금속 소지품을 전부 제거한 후 자기차폐실에서 누워 있는 자세에서 SQUID 센서가 놓여져 있는 액체질소 dewar의 밑바닥 부분을 심장부위 부근에 고정시킨 상태로 하여 측정하였다. Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 여기서 나타낸 심자도 파형은 0.8 초 동안 512회의 샘플링으로 측정하였으며 나타난 그림은 신호 대 잡음 비를 높이기 위해 64회의 가산 평균을 실시한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 진폭 110 pT 크기의 R-wave 신호가 크게 나타나고 있으며, T-wave, P-wave 및 QRS complex도 명확히 구별할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 자기선세인 SQUID magnetometer는 심자도 측정에 충분히 응용 될 수 있음을 알 수 있다. 앞에서 고찰 하였듯이 고온초전도체 YBCO 박막의 특성을 더욱 향상시키면 자장 검출 분해능을 높일 수 있을 것으로 생각된다. 실시간 심자도 측정이 가능하도록 자장 검출 분해능을 더욱 높이는 연구가 현재 진행중이다.

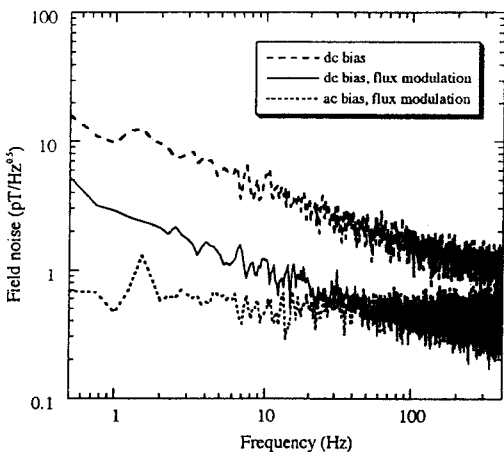


그림 6. SQUID magnetometer의 자장 잡음 특성.
Fig. 6. Magnetic field noise of the SQUID magnetometer measured at various operating conditions.

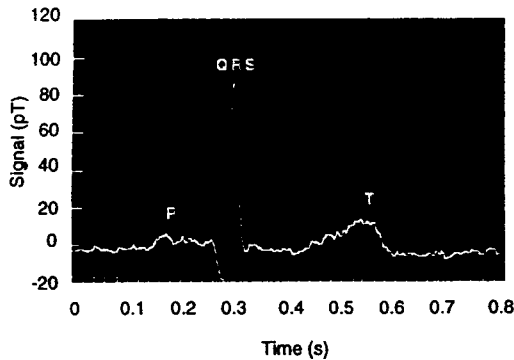


그림 7. 자기차폐실에서 측정된 신호를 64회 가산 평균한 심자도 파형.

Fig. 7. 64 time-averaged human magnetocardiogram measured inside the magnetically shielded room

3. 결론

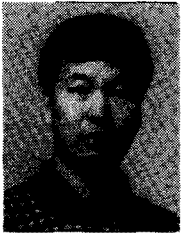
YBCO 단일층 박막으로 된 직접결합형 직류 SQUID magnetometer를 설계하여 제작하여 보았다. 검출코일은 외변은 8.5 mm, 선폭은 2.6 mm로 하였으며, 조셉슨 접합의 선폭은 3 μm , SQUID 인덕턴스를 50 pH로 하여 설계하였다. 제작된 소자의 조셉슨접합에서의 전류-전압 특성인 R_N 값은 10 Ω , I_c 값은 30 μA 의 값을 가졌으며, magnetometer에서의 전압변조 신호의 크기는 최대 65 μV 를 나타내었다. 이 소자는 1 Hz에서 0.6 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 의 자장검출 분해능을 나타내었다. 이러한 SQUID magnetometer를 이용하여 자기차폐실 내에서 심자도를 측정하였을 때 양호한 신호 파형을 얻을 수 있었다.

4. 참고문헌

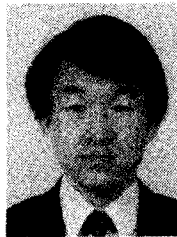
- [1] R. Grundler, B. David, R. Eckart, and O. Doessel, "Highly Sensitive $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ dc SQUID Magnetometer with Thin-Film Flux Transformer", *Appl. Phys. Lett.* vol.63, no. 19, pp. 2700-2702, 1993.
- [2] F. Ludwig, D. Koelle, E. Dantsker, D. T. Nemeth, A. H. Miklich, J. Clarke, and R. E. Thomson, "Low Noise $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ - SrTiO_3 - $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Multilayers for Improved Superconducting Magnetometers", *Appl. Phys. Lett.*, vol.66, no.3, pp.373-375, 1995.
- [3] M. N. Keene, J. S. Satchell, S. W. Goodyear, R. G. Humphreys, J. A. Edwards, N. G. Chew, and K. Lander, "Low Noise HTS Gradiometers and Magnetometers Constructed from $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ / $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 5, no.2, pp.2923-2926, 1995.
- [4] R. Kromann, J. J. Kingston, A. H. Miklich, L. T. Sagdahl, and J. Clarke, "Integrated High-Transition Temperature Magnetometer with only two Superconducting Layers", *Appl. Phys. Lett.* vol.63, no. 4, pp.559-561, 1993.
- [5] J. W. M. Hilgenkamp, G. C. S. Brons, J. G. Soldevilla, R. P. J. Ijsselstein, J. Flokstra, and H. Rogalla, "Four Layer Monolithic Integrated High T_c dc SQUID Magnetometer", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, no. 25, pp.3497-3499, 1994.
- [6] F. Ludwig, E. Dantsker, D. Koelle, R. Kleiner, A. H. Miklich, D. T. Nemeth, J. Clarke, D. Drung, S. Knappe, and H. Koch, "High- T_c Multilayer Magnetometers with Improved 1/f Noise", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.5, no.2, pp.2919-2922, 1995.
- [7] F. Ludwig, E. Dantsker, R. Kleiner, D. Koelle, J. Clarke, S. Knappe, D. Drung, and H. Koch, N. Mcn. Alford, and T. W. Button, "Integrated High- T_c Multiloop Magnetometer", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, no.11, pp.1418-1420, 1995.
- [8] D. Drung, F. Ludwig, W. Mueller, U. Steinhoff, L. Trahms, and H. Koch, "Integrated $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Magnetometer for Biomagnetic Measurements", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 10, pp.1421-1423, 1996.
- [9] J. M. Jaycox, and M. B. Ketchen, "Planar Coupling Scheme for Ultra Low Noise DC SQUIDS", *IEEE Trans Mag.*, vol. 17, no.1, pp.400-403, 1981.
- [10] K. Enpuku, Y. Yoshimura, and T. Kisu, "Effect of Thermal Noise on the Characteristics of a High- T_c Superconducting Quantum Interference Device", *J. Appl. Phys.*, vol 73, no.11, pp.7929-7934, 1993.

[11] J. Clarke, C. D. Tesche, and R. P. Gifford, "Optimization of dc SQUID Voltmeter and Magnetometer Circuits", J. Low Temp. Phys., vol.37, no.37, pp.405-420, 1979.

著 者 紹 介



김인선
1995년 4월 20일생. 1981년 경북대학교 전자공학과, 1983년 경북대학교 전자공학과(공학석사), 1993년 Tokyo Institute of Technology 재료과학(이학박사). 관심분야 : 고온초전도 및 산화물 박막의 PLD 증착 및 전자소자 제작



이용호
1962년 10월 1일생, 1984년 경북대학교 물리학과(이학사), 1986년 KAIST 물리학과(석사), 1989년 KAIST 물리학과(박사), 1989년 ~ 현재 한국표준과학연구원, 관심분야 : 초전도센서, SQUID, 생체자기 측정



이상길
1962년 5월 28일생. 1983년 2월 대전공업전문대 전자공학과, 1986년 3월 ~ 현재 한국표준과학연구원, 관심분야 : 고온초전도 박막 전자소자의 프로세스 기술



박용기
1951년 5월 19일생. 1975년 서울대학교 재료공학과(학사), 1977년 한국과학기술원 재료공학과(석사), 1985년 미국 Northwestern 대학 재료공학과(공학박사), 1986년 ~ 현재 한국표준과학연구원, 관심분야 : 고온초전도 박막응용, SQUID 응용



김진복
1962년 2월 16일생. 1984년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사), 1986년 7월 ~ 현재 한국표준과학연구원 선임연구원, 관심분야 : 저온 및 고온초전도 응용, SQUID 전자공학



박종철
1943년 12월 23일생. 1966년 서울대학교 문리대 물리학과(이학사), 1968년 서울대학교 물리학과(이학석사), 1975년 미국 Northeastern 대학교 물리학과(이학박사), 1975년 ~ 1977년 Suffolk대학교 전임강사 1977년 ~ 현재 한국표준과학연구원, 관심분야 : 온도측정, 초전도 물성, SQUID



권혁찬
1959년 3월 21일생. 1981년 서울대학교 원자핵공학과(공학석사), 1981년 10월 ~ 현재 한국표준과학연구원, 관심분야 : SQUID 생체자기 측정