

YBCO step-edge junction dc SQUID magnetometers with multi-loop pickup coil fabricated on sapphire substrates

Tae Jong Hwang^{a,b}, In Seon Kim^{a*}, D. H. Kim^b, Yong Ki Park^a

^a Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Korea

^b Yeungnam University, Kyongsan, Korea

사파이어 기판을 사용한 병렬 검출코일 구조의 계단형 모서리 접합 SQUID 자력계

황태종^{a,b}, 김인선^{a*}, 김동호^b, 박용기^a

Abstract

Step-edge Josephson junctions (SEJ) have been fabricated on sapphire substrates with *in situ* deposited films of CeO₂ buffer layer and YBa₂Cu₃O₇ films on the low angle steps. Direct coupled SQUID magnetometers with the SEJ were formed on 1 cm x 1 cm *R*-plane sapphire substrates. Typical 5- μ m-wide Josephson junctions have R_N of 3 Ω and I_C of 50 μ A at 77 K. The direct coupled SQUID magnetometers were designed to have pickup coils of 50- μ m-wide 16 parallel loops on the 1 cm x 1 cm substrates with outer dimension of 8.8 mm x 8.8 mm. The SEJ SQUID magnetometers exhibit relatively low $1/f$ noise even with dc bias control, and could be stably controlled by flux-locked loops in the magnetically disturbed environment. Field noise of the dc SQUID was measured to be 200~300 fT/Hz^{1/2} in the white noise region and about 2 pT/Hz^{1/2} at 1 Hz when measured with dc bias method.

Keywords : Step-edge junction, Magnetometer, Low-frequency Noise.

I. 서론

극 미세 자장을 측정할 수 있는 SQUID 자력계를 제작하는데 있어서 다른 산화물 기판에 비해 *R*-면 사파이어 기판은 저가이며 유전손실이 적고, 공기 중에서 안정적이며 대면적 박막을 만들 수 있어서 고온초전도 전자소자의 개발에 경제적이다. 이러한 장점이 있는 사파이어 기판에 Y₁Ba₂Cu₃O₇ (YBCO) 박막을 증착할 때 박막 안으로 Al이 interdiffusion 되는 것을

막기 위해서는 완충층 (buffer layer)이 필요하다 [1]. 완충층은 격자결합이 좋으며, 기판과 증착되는 박막과의 반응을 줄이고 고품질의 박막 성장을 가능하도록 해야 하는데 CeO₂는 조건을 잘 만족한다. 따라서 CeO₂ 박막의 결정성은 YBCO 박막의 *in-plane orientation* 성장, 임계전류밀도 그리고 YBCO 박막에서의 vortex pinning에 관한 중요 요인으로 작용한다[2].

계단형 모서리 접합[3]은 *c*-axis YBCO 박막의 축을 변화시켜 주는 방법으로 널리 이용되어진다. 이러한 접합의 특성은 식각된 step과

*Corresponding author. e-mail : inskim@kriss.re.kr

증착된 박막의 조건에 영향을 받는데, 복결정 기판을 사용한 grain-boundary 접합보다 복잡한 변수들을 가지고 있다. 그러나 photolithography 및 Ar ion milling을 이용하여 접합의 위치와 방향을 임의로 조절 할 수 있다. 이러한 장점은 좀더 복잡한 회로의 제작을 가능케 한다.

본 연구에서는 R-면 사파이어 기판을 이용하여, 계단형 모서리 접합을 형성한 후 CeO₂ 완충층과 YBCO 박막을 증착하여, 직접 결합형 병렬 검출코일이 있는 단일층의 계단형 모서리 접합 SQUID 자력계를 제작하여 특성을 평가하고, 심자도(magnetocardiograph, MCG)[4]를 자기 차폐환경에서 측정하였다.

II. 실험

R-면 사파이어 기판을 photolithography 및 Ar ion milling을 이용하여 step 각 30~35° 정도 되게 한 step을 제작하였다. 이때 step 각의 조절은 기판에 대해 Ar ion 입사각과 PR 마스크의 회전각을 조절해서 제작하였으며[5], step 제작 후 손상된 기판은 1050°C에서 6시간 열처리하였다. 기판은 은접착제로 히터에 붙였으며 펄스 레이저 증착법으로 step 높이(h)와 YBCO 박막 두께(t) 사이의 비(t/h)가 0.8이 되게 Y₁Ba₂Cu₃O₇/CeO₂ 박막을 *in situ* 방법으로 증착하였다. 엑시머 레이저는 파장 248 nm 인 KrF 레이저를 사용하였으며 렌즈로 적절히 집속시켜 에너지 밀도를 1.3 J/cm²로 하였다. 기본 진공도는 10⁻⁵ Torr 이하까지 공기를 뽑은 후 산소분압을 20 mTorr로 유지하며 460 mJ의 레이저 에너지로 CeO₂박막을 200 Å 되게 증착한 후 산소분압을 400 mTorr로 유지하며 440 mJ의 레이저 에너지로 YBCO를 증착하였다. 이때 기판온도는 820°C로 유지하였다. 증착된 YBCO 박막은 고주파 스퍼터링으로 동판 마스크를 이용하여 Au 박막을 증착한 후 photolithography 및 Ar ion milling을 거쳐서 Fig. 1과 같은 패턴을 만들었다. 제작된 시료를 500°C에서 산소 열처리를 하였으며 측정용 리드선은 전극부분에 Al 선을 초음파로 bonding하여 사용하였다.

Fig. 1과 같은 형태의 SQUID 자력계의 검출 코일 바깥 둘레의 크기는 8.8 mm × 8.8 mm,

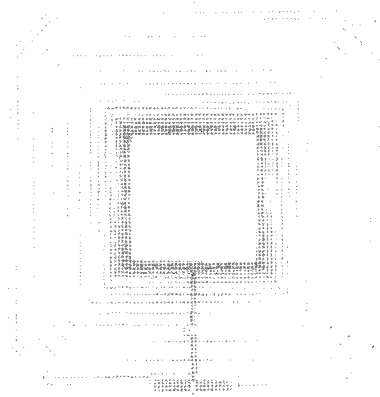


Fig. 1. SQUID 자력계의 구조. 검출 코일은 50 μ m 선 폭을 가진 16개의 병렬 고리로 되어 있다.

조셉슨 접합의 선 폭은 5 μ m로 제작 하였으며, SQUID inductance는 약 100 pH로 설계 하였다.

Field cooling 할 때 SQUID에 포획되는 자속은 검출 코일의 선 폭을 줄임으로써 감소 시킬 수 있다. 따라서 검출 코일은 인덕턴스를 변화시키지 않으면서 50 μ m 선 폭의 16개 병렬 고리로 설계하였다[6]. 제작된 SQUID 자력계는 feedback coil이 있는 PCB 기판 위에 부착하여 flux-locked-loop (FLL) SQUID 제어기(NKT model SE105C)를 이용하여 특성을 측정하였다.

III. 결과 및 논의

Fig. 2는 photolithography 및 Ar ion milling 공정을 거쳐서 step각이 30° 되게 제작된 R-면 기판의 AFM 사진이다. Step의 높이는 1500 Å 되게 식각 하였다.

Fig. 3는 CeO₂ 완충층을 입힌 사파이어 기판에 증착된 YBCO 박막을 4단자법으로 측정한 R-T 곡선이다. 임계온도는 87.6 K을 나타냈으며, 전이 폭 ΔT_c 는 0.5 K 이하였다. 같은 조건으로 증착한 박막의 77 K에서의 임계전류밀도는 1×10^6 A/cm² 이상이였다. Step 각이 약 30° 되게 Ar ion milling으로 식각하여 계단형 모서리 접합을 형성시켰을 때의 I-V 특성은 Fig. 4와 같다. Thermal fluctuation 효과에 의해서 grain boundary 접합 보다 임계전류 근처에서

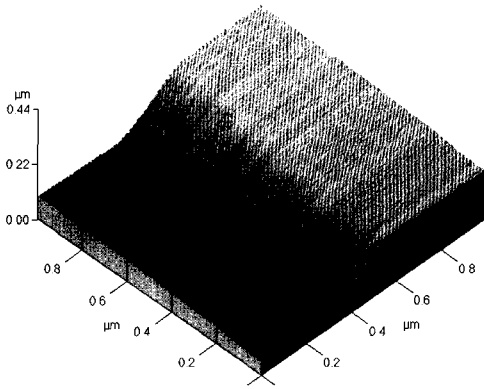


Fig. 2. AFM으로 측정된 사파이어 기판에 형성된 step의 형상.

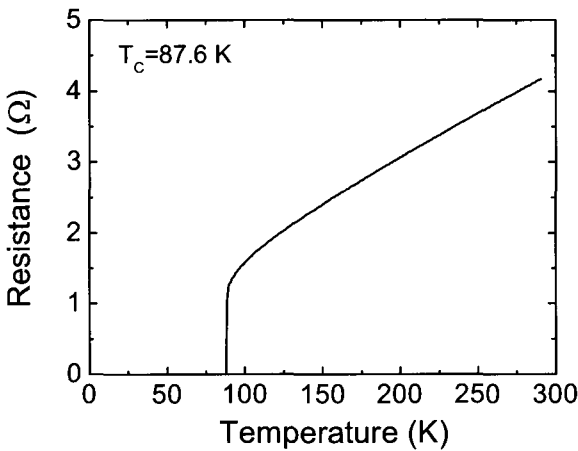


Fig. 3. CeO₂-buffered 사파이어 기판에 증착된 YBCO 박막의 온도에 따른 저항.

곡선의 rounding이 크게 나타났다[7]. 액체질소 온도에서 접합의 임계전류 I_C 는 50 μ A였으며 정상저항 R_N 은 3 Ω 을 보였다.

Fig. 5는 자기 차폐환경에서 SQUID 자력계의 자장 잡음을 측정된 것이다. 자력계의 변조폭 ΔV 는 4 μ V이며, dc bias로 측정된 백색 잡음의 크기는 200~300 fT/Hz^{1/2} 이며 1 Hz의 주파수에서는 약 2 pT/Hz^{1/2} 로 측정되었다. 계단형 모서리 접합을 이용한 자력계는 백색 잡음의 크기가 grain boundary 접합 자력계보다 4~5배 크게 측정되었다. Grain boundary 접합의 I-V 특성은 전형적인 resistively-shunted-junction (RSJ) 형태를 보이나 계단형 모서리 접합의 경우는

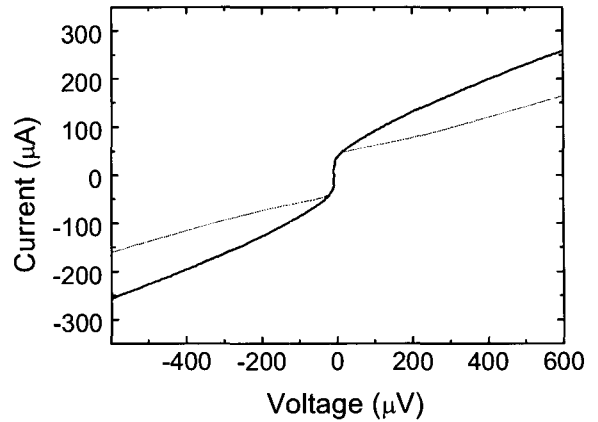


Fig. 4. 조셉슨 접합의 I-V 특성. Step-edge 접합 (실선) $I_C = 50 \mu$ A, $R_N = 3 \Omega$ at $T = 77$ K. Grain boundary 접합 (점선) $I_C = 50 \mu$ A, $R_N = 5 \Omega$ at $T = 77$ K.

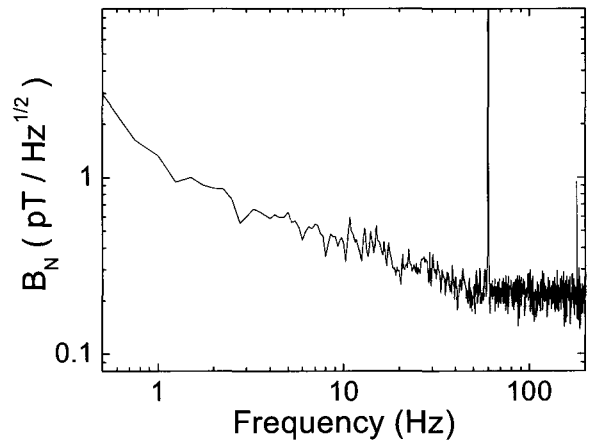


Fig. 5. 계단형 모서리 접합 자력계의 자장 잡음. Dc bias (gray), ac bias (black).

Fig. 4에서와 같이 비 RSJ 형태를 보인다. 즉, 접합의 임계전류 근처에서 rounding이 크게 나타나므로 자력계가 작동되는 flux-lock 상태에서는 thermal fluctuation에 의해서 백색 잡음의 크기가 증가되는 요인으로 작용한 것으로 보인다. 그리고 계단형 모서리 접합 자력계는 grain boundary 접합 자력계에 비해서 저주파 영역의 1/f 형태의 잡음을 낮추기 위한 ac bias 방식의 효과를 거의 볼 수 없었다. 따라서 계단형 모서리 자력계의 주요 잡음의 원천이 조셉슨 접합에 있다기보다는 초전도 박막 층에 존재하는

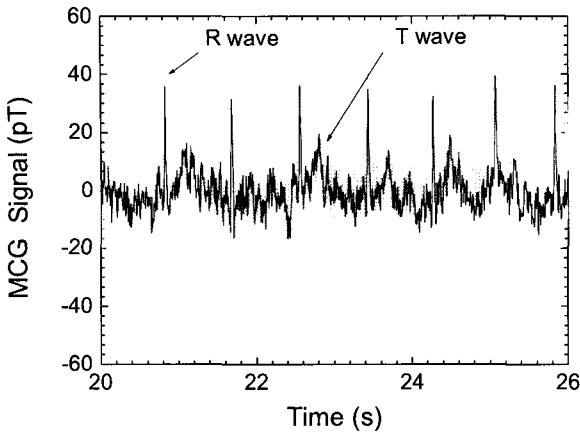


Fig. 6. 자기차폐환경에서 심자도. 잡음 여과 전의 심자도(gray)와 여과 후의 심자도(black).

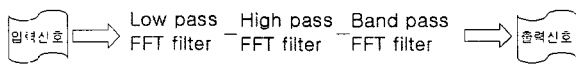


Fig. 7. 심자도 신호처리 개략도. 저역 통과 필터($90 \text{ Hz} > f$), 고역 통과 필터($0.4 \text{ Hz} < f$), 구역 차단 필터($59.5 \text{ Hz} < f < 60.3 \text{ Hz}$, $50.9 \text{ Hz} < f < 51.2 \text{ Hz}$)

vortex의 움직임에 의한 것으로 추정된다[8].

Fig. 6의 심자도는 자기 차폐환경에서 FLL SQUID 제어기(NKT model SE105C)를 사용하여 실시간 전압 신호를 AD 변환기를 거쳐 노트북으로 읽어 들었다. 측정된 신호는 Fig. 7과 같은 수학 연산적 FFT (Fast Fourier Transform) filter 방법을 사용하여 신호에 포함된 잡음 성분을 제거하였다. 잡음신호를 제거함으로써 심장에서 나오는 R파 자장신호의 크기는 40 pT에서 35 pT로 줄어들었지만 잡음신호와 구별할 수 없었던 T파의 신호가 구별되었다.

V. 결론

CeO₂ 완충층을 입힌 사파이어 기판을 사용해서 다층 검출코일을 가진 계단형 모서리 접합 SQUID 자력계를 제작하고 심자도를 측정하였다. 계단형 모서리 접합은 계단 높이(h)와 YBCO 박막 두께(t)의 비(t/h)가 0.8이었으며, 77 K에서 $I_C = 50 \mu\text{A}$, $R_N = 3 \Omega$ 이었다. 접합의 I-V

특성은 임계전류 근처에서 thermal fluctuation에 의한 rounding 효과가 크게 나타났다. 계단형 모서리 접합 자력계의 백색 잡음의 크기는 $200 \sim 300 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 이며, 1 Hz의 주파수에서는 약 $2 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ 이었다. 제작된 SQUID자력계를 이용하여 심장에서 나오는 자기장을 측정하여 신호처리 했을 때의 R-peak의 크기는 35 pT의 측정되었다.

References

- [1] M. Maul and B. Schulte, P. Haussler and G. Frank, T.Steinborn and H. Fuess, H. Adrian, "Epitaxial CeO₂ buffer layers for YBa₂Cu₃O_{7-δ} films on sapphire", J. Appl. Phys. 74. 2942 (1993).
- [2] J. C. Nie, H. Yamaski, H. Yamada, Y. Nakagawa and K. Develos-Bagarinao, "Self-assembled CeO₂ buffer layer on r-cut sapphire of high-current-density YBa₂Cu₃O₇ films", Supercond. Sci. Technol. 16. 768 (2003)
- [3] C. W. Yuan, A.B. Berezin, and A. L. de Lozanne, "Step edge YBa₂Cu₃O_{7-δ} dc SQUIDs on sapphire substrates", Appl. Phys. Lett. 60. 2552 (1992).
- [4] Koichi Yokosawa, Akihiko Kandori, Tsuyoshi Miyashita, Daisuke Suzuki, Akira Tsukamoto, "Magnetocardiograph based on a 4 x 4 array of high-temperature superconducting quantum interference device", Appl. Phys. Lett. 82. 4833 (2003).
- [5] Hae-Ryong Lim, Dong Ho Kim, In-Seon Kim, Yong Ki Park and Jong-Chul Park, "Superconducting properties of YBa₂Cu₃O₇ step-edge Josephson junctions prepared on CeO₂-buffered sapphire substrates", Supercond. Sci. Technol. 13. 1046 (2000).
- [6] K. K. Yu, I. S.Kim, Y. K. Park, "Fabrication of single layer YBCO dc-SQUID magnetometers with multi-loop pickup coil design", to be submitted progress in Superconductivity
- [7] Vinay Ambegaokar, B. I. Halperin, "Voltage due to thermal noise in the dc Josephson effect", Phys. Rev. Lett. 22. 1364 (1969).
- [8] R. Scharnweber, N. Diekmann, and M. Schilling, "Noise properties and epitaxial quality in low-noise integrated YBa₂Cu₃O₇ magnetometers", Appl. Phys. Lett. 70. 2189 (1997).