

Low Frequency Noise Properties of YBCO SQUID Gradiometers

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

YBCO SQUID gradiometers의 저주파 잡음 특성 연구

황태종^{a,b}, 김인선^a, 김동호^b, 박용기^a

Abstract

We have fabricated YBCO SQUID 1st order gradiometers on 30° STO bicrystal substrate. The pickup coil size was 3.8 mm × 3.8 mm and baseline was 5 mm. Three types of SQUID gradiometer were designed and tested for unshielded operation; solid pickup coil, pickup coil consisting of 4 parallel 50μm-wide loops, and solid pickup coil with flux dam. We have investigated external magnetic field dependence of the SQUID gradiometers on the magnetic field noise properties. Significant increase of low frequency noise with the application of static field has been observed in the case of parallel and flux dam type pickup coil above threshold field of 1.3 μT. Magnetic field noise at 1 Hz measured in the magnetically shielding room was 30, 165, 480 fTcm⁻¹Hz^{-1/2} for solid type and slot type and parallel loops type, respectively.

Keywords : Gradiometer, Low-frequency Noise, flux dam

1. 서론

Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)는 지구 자기장의 1/10억 수준의 낮은 자기장을 측정할 수 있는 가장 뛰어난 자기 검출 센서이다. 이러한 고분해능 특성을 상대적으로 매우 큰 지자기장 또는 주변 환경 자기장에서 사용하고자 할 때 SQUID에 자속(flux)이 포획됨으로써 SQUID의 자속 잡음의 증가로 인한 소자 작동에 방해 요인이 되고 있다. 외부 자기장 하에서 SQUID의 임계온도(T_c) 이하로 냉각 되어지면 자속이 초전도 박막 안에 포획되어지며, SQUID가 임계온도 이하로 냉각되어진 상태에서 외부자장이 변화하면 차폐전류

에 의해서 자속이 SQUID loop 안으로 침투한다. 포획된 자속 또는 침투한 자속은 열적 거동에 의해서 저주파 잡음이 크게 되는 요인이 된다. 그리고 만약 차폐전류가 임계전류를 초과하였을 때에도 SQUID loop 안으로 자속이 들어오는데 이러한 요인들이 소자의 작동을 방해한다. 자속 잡음을 줄이는 방법으로는 pickup coil에 가늘고 긴 구멍(slot or slit)을 넣거나 [1] - [4] 또는 자속 댐(flux dam) [5] - [6]을 넣어서 자속 잡음을 줄이는 방법들 등이 제안되고있다.

SQUID를 field cooling (FC) 할 때에 유발되는 자속 포획은 초전도 박막의 선 폭을 줄임으로서 감쇄시킬 수 있으며, 차폐전류에 의한 자속의 침투는 SQUID loop 안에 약한 결합(weak link) 즉 자속 댐을 넣으므로 차폐전류의 크기를 조절하여 자속 침투를 줄일 수 있다.

^{ab} Corresponding author. e-mail : rjonadan@hanmail.net

차폐전류가 자속 댐의 임계전류보다 커지면 자속 댐이 열려지고 자속이 침투하여서 차폐전류의 크기를 줄여서 자속의 움직임을 둔화시키므로 자속 잡음의 크기를 줄여주는 역할을 한다. 그러나 자속 댐이 안정화되려면 일정 시간이 필요하며 그 동안은 저주파 잡음이 증가한다 [8].

본 연구에서는 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 단일층 박막 SQUID 일차 미분계(first-order gradiometer)를 제작하고 자기 차폐환경에서 SQUID 일차 미분계의 pickup coil의 형태 변형에 따른 저주파 자장 잡음 특성을 조사하였다.

II. 실험방법

A. YBCO SQUID 일차 미분계의 제작

직접 결합형 SQUID 일차 미분계를 접합각도 30° 인 STO (100) 복결정 기판을 사용하여 결정경계 조셉슨 접합이 형성되도록 제작하였다. 기판은 클리닝 후 은접착제로 히터에 붙여 펄스 레이저 증착법으로 YBCO 박막을 증착하였다. 엑시머 레이저는 파장 248 nm 인 KrF 레이저를 사용하였으며 렌즈로 적절히 집속 시켜 에너지 밀도를 $1.3 J/cm^2$ 로 하였다. 진공챔버는 10^{-5} Torr 이하까지 터보펌프로 공기를 뽑은 후 고순도 산소가스를 유입하여 산소분압을 400 mTorr로 유지하였으며, 이때 기판온도는 $800^\circ C$ 로 유지하였다. 이러한 조건에서 약 4분간 증착하였을 때 두께 약 1200 Å의 YBCO 박막을 성장시켰다. YBCO 박막은 photolithography 및 Ar ion milling 을 거쳐서 그림 1과 같은 패턴을 만들었다. 전극부분은 고주파 스퍼터링으로 Au 박막을 증착하였으며 그후 $500^\circ C$ 에서 산소 열처리를 하였으며 측정용 리드선은 전극부분에 Al 선을 초음파로 bonding하여 사용하였다. 제작된 SQUID 일차 미분계의 검출코일 외경의 크기는 $38 mm \times 38 mm$ 이며 baseline의 길이는 5 mm이다. 조셉슨 접합의 선폭은 $2 \mu m$ 로 제작하였으며 SQUID inductance는 약 35 pH로 설계하였다.

SQUID 일차 미분계는 SQUID washer에 두개의 검출코일이 직접 연결된 형태이며 그림 1에 보여지는 것과 같이 SQUID 일차 미분계는

검출코일의 형태를 변형시켜서 3가지 종류로 제작하였다. Solid type은 일반적인 pickup coil의 형태이며, parallel type은 pickup coil을 선 폭 $50 \mu m$ 의 4개의 선으로 나누어 병렬 연결하였다. 초전도 박막의 선 폭을 줄임으로써 자속 포획을 줄일 수 있으며 또한 이 선들은 결정경계와 교차함으로써 자속 댐의 역할을 한다. 자속 유입은 초전도 박막의 가장자리에서 쉽게 일어나는 영향을 살펴보기 위해 그림 1 (b)와 같이 pickup coil은 solid type과 같은 형태로 설계하고 PL type과 동일하게 자속 댐을 배치하여 slot type을 제작하였다. 자속 댐은 미분계의 양쪽 pickup coil에 동일한 개수 만큼 형성되도록 그림 1 (c)와 같은 구조로 설계하였다.

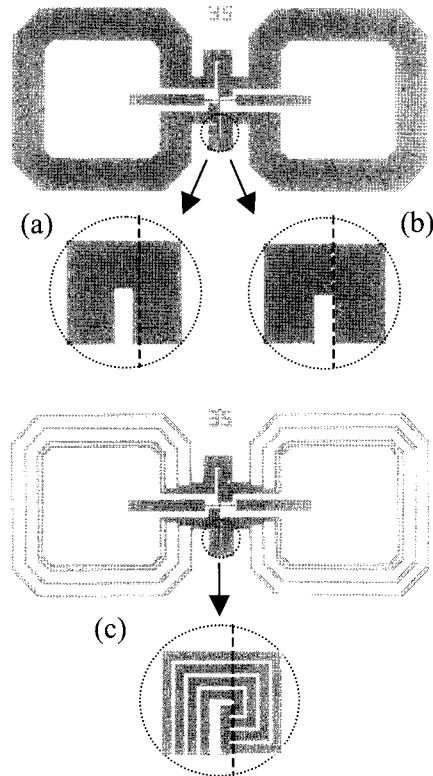


그림 1. SQUID 일차 미분계의 구조 (a) Solid type (b) Slot type (c) PL (parallel loops) type. 자속 댐의 선 폭은 $50 \mu m$ 이다. 그림에서 수직 점선은 복결정 기판의 결정경계이다.

B. 측정

제작된 SQUID 일차 미분계는 feedback coil이 있는 PCB 기판 위에 부착하여 flux-locked-loop (FLL) SQUID 제어기(NKT model SE105C)를 이용하여 작동하였으며, 센서의 감도 교정은 선형성이 좋은 1st gradient field 를 인가하여 측정하였다. 외부자장은 직경 40 cm의 Helmholtz coil을 이용하여 인가하였으며 spectrum analyzer 를 이용하여서 자장 잡음 특성을 측정하였다. 저주파 잡음 측정과 전기적 특성은 자기 차폐실 안에서 이루어졌다.

III. 결과 및 논의

표 1은 제작된 SQUID 일차 미분계의 전기적 특성을 나타내었다. YBCO 박막의 임계온도와 임계전류밀도는 각각 89 K, 1×10^6 A/cm² (77 K) 이상이였다.

SQUID 일차 미분계의 자장 감도를 측정하기 위하여 선형 기울기(1st order gradient)를 가지는 자장을 발생시키는 코일을 제작하였다. 이 코일은 길이 120 cm인 도선을 거리 20 cm로 평행하게 하여 같은 방향으로 전류를 흘렸다. 전류 I 가 흐르는 길이 l 인 긴 도선에서 도선으로부터 거리를 r 이라고 하면, $l \gg r$ 일 때 발생하는 자기장은 $B = 8l^2\mu_0 I / 4\pi(1+4l^2/r^2)r^3$ 이다 [9]. 두 도선간의 거리가 20 cm, 도선의 길이는 120 cm일 때 20 mA의 전류를 흘려주었을 때에 도선 내부에서 거리에 따른 자기장을 계산하여 보면 그림 2와 같은 자장 분포가 발생된다. 중간지점을 중심으로 ± 2 cm의 범위 안에서 선형적으로 매우 균일한 자장 즉 0.403 nT/cm의 1st gradient field가 발생됨을 알 수 있다.

표 1. YBCO 단일층 박막 SQUID 일차 미분계의 전기적인 특성.

Sample type	I_c (μ A)	R_N (Ω)	ΔV (μ V)	자장 감도 (nT/cm/V)	White noise fT/Hz ^{1/2}
Solid	14	5	40	0.1	6.2
Slot	20	10	20	5	50
PL	26	5	90	5	169

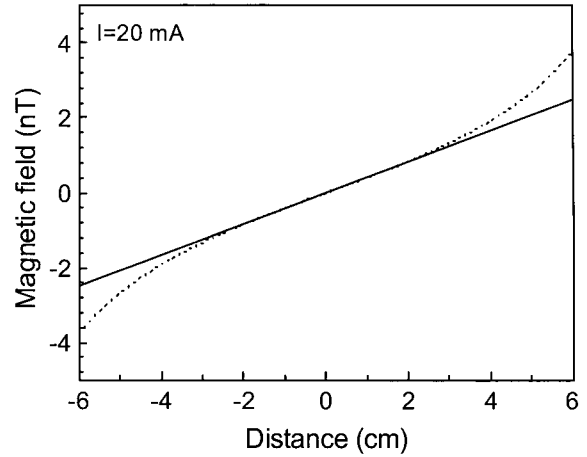


그림 2. 미분계 감도 측정용 코일의 중앙 부분의 자장 분포.

그림 3은 solid type의 SQUID 일차 미분계의 자장 잡음을 측정하는 것이다. 1 Hz에서 약 30 fTcm⁻¹Hz^{-1/2}의 자장 분해능을 나타내었다. 그림 3의 (a)는 solid type을 FC (field cooling)한 후 자기장을 계속 유지했을 때에 자장 잡음을 측정하는 것이다. 0 - 1.3 μ T의 자기장에서 FC하였을 때에는 자장 잡음의 크기 증가가 보이지 않으나 2.5 μ T에서는 자장 잡음의 큰 증가가 나타났다. 그리고 2.5 μ T 자기장에서는 FLL 작동에서 flux jump 현상이 두드러지게 나타났으며 그보다 큰 자기장에서는 flux lock이 되지 않았다. 그림 3의 (b)는 ZFC (zero field cooling)한 후 자기장을 계속 유지했을 때에 자장 잡음을 측정하는 것이다. 0 - 0.9 μ T의 자기장에서 ZFC하였을 때에는 자장 잡음 크기의 증가가 보이지 않았으며 1.3 μ T 이상 자기장에서는 자장 잡음의 큰 증가를 볼 수 있었다. 그리고 FC에서와 같이 1.3 μ T에서는 flux jump 현상이 두드러지게 나타났으며 그 이상의 자기장에서는 flux lock이 되지 않았다. FC에서는 외부자기장이 2.5 μ T, ZFC에서는 1.3 μ T 이상에서 저주파 영역에서 1/f 잡음이 급격하게 증가하는 형태를 보였다.

그림 4는 slot type의 SQUID 일차 미분계의 자장 잡음을 측정하는 것이다. Slot type은 1 Hz에서 약 165 fTcm⁻¹Hz^{-1/2}의 자장 분해능을 나타냈으며 0 - 3 μ T의 FC하였을 때에는 자장 잡음의 증가가 보이지 않으며 4 μ T 이상에서 자장 잡음의 큰 증가를 볼 수 있었다. 그리고 solid

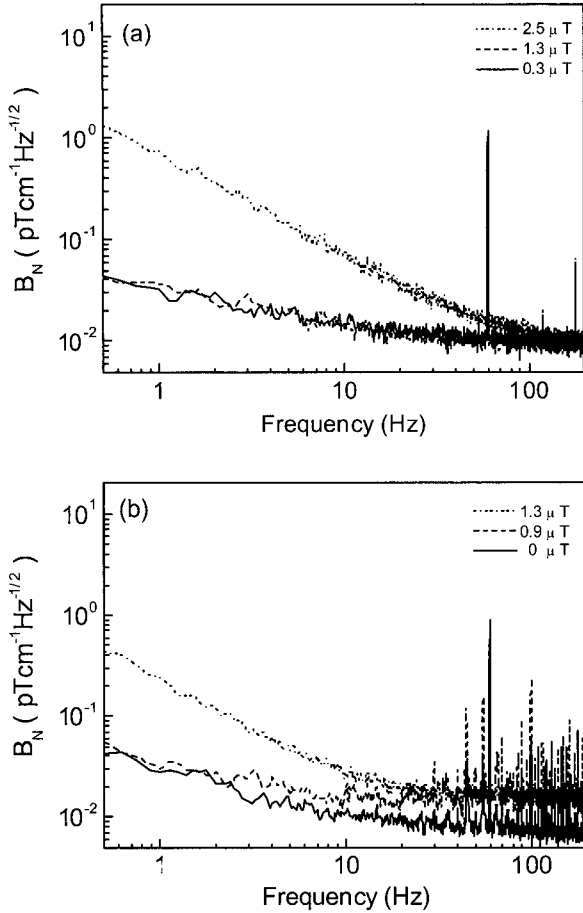


그림 3. Solid type의 SQUID 일차 미분계의 저주파 자장 잡음 특성. (a) FC일 때의 자장 잡음 (b) ZFC일 때의 자장 잡음.

type과 유사하게 4 μT 이상의 자기장에서는 flux jump의 현상이 두드러지게 나타났으며 11.5 μT 보다 큰 자기장에서는 flux lock이 되지 않았다. ZFC 자장 잡음은 0 - 0.45 μT 사이에서는 자장 잡음의 크기의 증가가 보이지 않으며 0.9 - 1.3 μT 사이에서는 자장 잡음의 큰 증가를 볼 수 있었다. 1.3 μT 이상의 자기장에서는 flux jump의 현상이 두드러지게 나타났으며 22 μT 보다 큰 자기장에서는 flux lock이 걸리지 않았다. FC에서는 4 μT , ZFC에서는 1.3 μT 이상에서 solid type과 유사하게 저주파 영역에서 $1/f$ 잡음이 급격하게 증가하는 형태를 보였다.

그림 5는 PL type의 SQUID 일차 미분계의

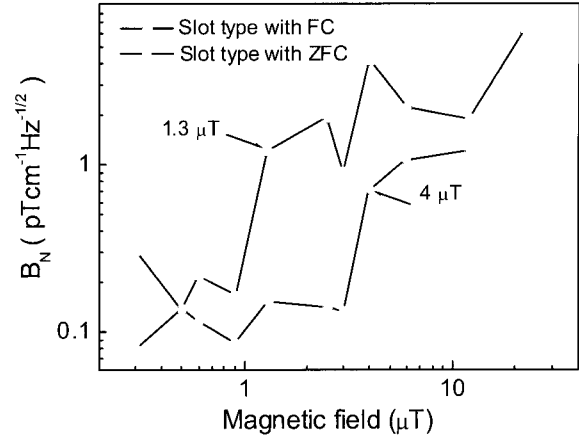


그림 4. Slot type SQUID 미분계의 1 Hz 자장 잡음의 자장 의존성.

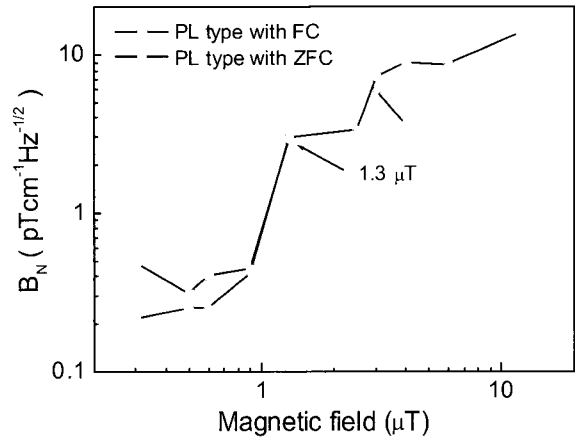


그림 5. PL type SQUID 미분계의 1 Hz 자장 잡음의 자장 의존성.

자장 잡음을 측정하는 것이다. PL type은 1 Hz에서 약 $480 \text{ fTcm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 의 자장 분해능을 나타내었으며 FC 자장 잡음에서 0 - 0.9 μT 의 자기장에서는 자장 잡음의 크기의 증가가 보이지 않으나 1.3 μT 이상의 자기장에서는 자장 잡음의 큰 증가를 볼 수 있었다. 1.3 μT 이상의 자기장에서는 solid, slot type과 같은 flux jump 현상이 보이기 시작했으며 4 μT 보다 큰 자기장에서는 flux lock이 걸리지 않았다. ZFC 자장 잡음에서는 0 - 0.9 μT 사이의 자기장에서 자장 잡음의 크기의 증가가 뚜렷이 보이지 않으나 1.3 μT 이상에서 자장 잡음의 증가를 볼 수 있었

다. FC에서와 같이 1.3 μT 이상의 자기장부터 flux jump의 현상이 두드러지게 나타났으며 11.5 μT 보다 큰 자기장에서는 flux lock이 걸리지 않았다.

FC에서 자속 포획에 의한 자장 잡음이 증가하는 포획 자장 [7]의 크기는 식 $B_t = \pi\Phi_0/4w^2$ 를 이용해서 계산되어지는 수치보다 측정되어진 값이 세가지 형태의 SQUID 모두 더 큰 수치를 보였다. 여기서 w 는 박막의 선폭이며 pickup coil의 선폭이 680 μm , 250 μm , 50 μm 일 때 포획 자장은 3.5 nT, 30 nT, 0.65 μT 이다. 그리고 ZFC하에서 자속이 박막 안으로 침투하게 하는 임계 차폐전류 [5]는 임계전류 밀도 $J_C \approx 1 \times 10^{10}$ A/m², 박막의 두께 $d \approx 10^{-7}$ m, 박막의 선폭이 50 μm 일 때 $I_T = (J_C d w)[2.46(\Phi_0/w^2/6.28 \times 10^{-7} J_C d)^{1/4}]$ 식으로부터 구할 수 있다. Pickup coil의 면적 A_P 를 14.44 mm²로 두었을 때에 식 $A_P = \pi r_P^2$ 으로부터 계산되어지는 반지름 r_P 는 0.214 mm의 값을 가진다. 외부 자기장에 의해서 생기는 차폐전류는 식 $I_{cir} \sim 4Br_P/\pi\mu_0$ 에 임계 차폐 전류 값과 반지름 값을 대입하면 임계 침투 자장 B_T 를 구할 수 있다. 계산되어진 값은 약 1.4 μT 를 가지며 측정된 1.3 μT 와 비슷한 값을 가졌다. 침투 자장은 $B_T \sim 1/w$ 의 관계를 가지므로 자속은 pickup coil의 선 폭이 좁은 쪽으로 먼저 자속이 침투 할 것이며 slot, parallel type의 SQUID 일차 미분계에서는 자속 댐을 포함하는 pickup coil의 선 폭이 50 μm 되는 부분에서 침투되는 것으로 추측된다. Solid type의 침투 자장을 선 폭 250 μm 로 두고 계산하였을 때의 계산치 20 μT 보다 훨씬 작은 측정치 1.3 μT 로 큰 차이를 보였다.

그림 6는 자기 비차폐 환경에서 세가지 형태의 SQUID 일차 미분계를 FC하였을 때 장시간 FLL의 안정성을 보기위해 시간 경과에 따른 출력 신호의 변화를 나타낸다. Pickup loop의 선 폭이 가장 넓은 solid type의 형태를 가지면서 flux dam을 포함 하고 있는 slot type이 시간에 따른 drift에 의해서 가장 큰 출력 신호의 변화를 보였다. 이러한 출력 신호의 drift는 자속이 초전도박막 안으로 침투하여 SQUID loop 안에서 flux creep에 의한 flux distribution의 재분포로 인한 것으로 추정된다 [10]. Pickup coil의 effective area는 유지하면서 선 폭을 50 μm 로 줄

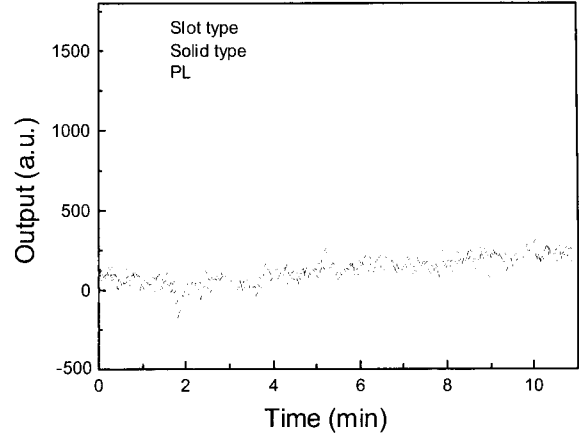


그림 6. 자기 비차폐 환경에서 FC에서의 SQUID 일차 미분계의 시간에 따른 FLL의 출력 신호.

여 병렬로 4개의 선으로 연결한 PL type이 가장 작은 drift를 보였으며 flux jump로 인한 펄스 형태의 잡음이 매우 크게 나타났다.

V. 결론

YBCO SQUID 일차 미분계의 pickup coil의 형태를 변화시켜서 FC, ZFC일 때의 저주파 자장 잡음 특성을 비교해 보았다. 자기 차폐 환경에서 측정한 solid, slot, PL type의 1 Hz 자기 잡음은 각각 30, 165, 480 fTcm⁻¹Hz^{-1/2}이며 white noise는 각각 6.2, 50, 169 fT/Hz^{1/2}였다. Solid type은 외부 자장이 없을 때의 잡음 특성은 좋으나 FC, ZFC 조건 하에서는 slot type이 가장 큰 자기장에서 자장 잡음의 큰 변화를 나타내었다. 이로부터 자속 댐이 자장 잡음의 증가를 줄이는 역할을 하였음을 볼 수 있었다. ZFC일 때 측정한 침투자장의 크기 1.3 μT 는 pickup coil의 선 폭을 50 μm 로 두었을 때의 계산치 1.4 μT 로 slot, PL type의 측정치와 비슷한 값을 가졌다. Slot type이 외부 자기장에 대해 가장 큰 1/f 잡음의 변화를 보여주었으며 비자기 차폐 환경에서 측정된 FLL 안정성 실험에서는 slot type이 FLL 출력신호의 가장 큰 drift를 나타내었으며 PL type은 비교적 낮은 drift를 나타내었으나 빈번한 펄스 형태의 flux jump를 나타내었다.

References

- [1] E. Dantsker, S. Tanaka, and J. Clarke, "High- T_c superconducting quantum interference devices with slots or holes: Low $1/f$ noise in ambient magnetic fields," *Appl. Phys. Lett.* 70, 2037 (1997).
- [2] H.-M. Cho, R. McDermott, B. Oh, K. A. Kouznetsov, A. Kittel, J. H. Miller Jr., and J. Clarke, "Low-frequency noise in field-cooled, directly coupled magnetometers," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 9, 3294 (1999).
- [3] M. S. DiIorio et al., "Sensitive High- T_c SQUID magnetometers for unshielded operation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 9, 4428 (1999).
- [4] F. Ludwig and D. Drung, "Low-frequency noise of improved direct-coupled High- T_c superconducting quantum interference device magnetometers in ac and dc magnetic field," *Appl. Phys. Lett.* 75, 2821 (1998).
- [5] R. H. Koch, J. Z. Sun, V. Foglietta, and W. J. Gallagher, "Flux dam, a method to reduce extra low frequency noise when a superconducting magnetometer is exposed to a magnetic field," *Appl. Phys. Lett.* 67, 709 (1995).
- [6] F. P. Milliken, S. L. Brown, and R. H. Koch, "Magnetic field-induced noise in directly coupled High- T_c superconducting quantum interference device magnetometers," *Appl. Phys. Lett.* 71, 1857 (1997).
- [7] J. R. Clem, Presented at the APS March Meeting, Los Angeles, CA, March 17, 1998, paper K36.06.
- [8] Keiji Enpuku, Atsushi Nakahodo, Masahiro Hotta, Shinataro Hijiya, Daishi Tokimizu and Daisuke Kuroda, "Properties of flux dam inserted in the pickup coil of a High- T_c superconducting quantum interference device magnetometers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.40, no. 6A, 4013 (2001).
- [9] In-Seon Kim, Jin-Mok Kim, Hae-Ryong Lim and Yong Ki Park, "Development of a High- T_c first-order gradiometer system," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, Vol. 11, 1359 (2001).
- [10] Koishi Yokosawa et al., "Mechanisms of noise increase in direct-coupled high T_c superconducting quantum interference device magnetometers exposed to magnetic fields," *J. Appl. Phys.*, Vol. 90, No. 8, 4049 (2001).