SQUID 応 用

(SQUID 技術の進展と応用分野の展望)

円 福 敬 二

九州大学大学院システム情報科学研究科 福岡市東区箱崎6丁目10番1号

(1996年7月15日受理)

SQUID Application

(Development of SQUID Technology and System Application)

Keiji ENPUKU

Graduate School of System and Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812

(Received July 15, 1996)

Synopsis :

Recent developments of SQUID technology are reviewed. First, key elements for the development of high T_c SQUID are briefly shown. Due to these developments, performance of high T_c SQUID has been much improved, and system application is now becoming possible. Second, development of an electronic circuit which makes SQUID robust against environmental noise, is shown. With this circuit, the requirement for magnetic shielding can be reduced. As a result of these developments, constraints in using SQUID, i.e., cooling and shielding, can be relaxed, which is helpful for the extension of the application-field of the SQUID system. Requirements for the SQUID system are briefly mentioned in the application to biomagnetic measurement, nondestructive testing of materials, SQUID microscope and precise measurement. It is emphasized that the requirement for the system is different according to the types of applications. Therefore, it is necessary to develop the system in order to optimize the requirements, including the choice of high T_c or low T_c SQUID. As an example, a nondestructive test of materials using SQUID is shown.

Keywords : SQUID sensor, high T_c superconductor, FLL circuit, system application, high slew rate

1. はじめに

超伝導状態における磁束の量子化を利用した SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) は、超高感度な磁気センサとして知られている。Nb 系超伝導 (Low T_c Superconductor: LTS) を用いた LTS-SQUID については多チャンネルセンサシステムが既に市販されており、生体磁気計測を初めとして多くの分野に応用されている¹⁻³⁾。一方高温超伝導体 (High T_c Superconductor: HTS) を用い

た HTS-SQUID については、この数年の技術的進展は著しく高性能なセンサが多くの研究機関から報告されている⁴⁻¹¹⁾。現在センサの高性能化は達成されつつあり、HTS-SQUID においても応用を念頭においたセンサシステムの開発へと研究の主眼は移りつつある。

ところで、SQUID センサを用いる場合にはセンサの冷却と測定環境における環境磁気雑音が常に問題となる。高温超伝導を用いる利点は液体窒素温度での動作が可能であるという点にあり、これによりセンサ冷却のための液体ヘリウムの取扱いの困難さがなくな

程度の磁界感度が達成されている。以下に高性能化の鍵となるいくつかの技術的進展について概観し、今後の課題について述べる。

2.1 プロセス技術

SQUID センサを製作するためには、i)高品質超伝導薄膜、ii)ジョセフソン接合、及びiii)磁気結合回路を実現するための超伝導/絶縁体/超伝導多層薄膜、超伝導コンタクト技術が必要となる。Table 1 に Nb 系 (LTS) と HTS-SQUID の作製プロセスの比較を示す。LTS-SQUID ではこれらの技術は既に完成している。HTS-SQUID では超伝導薄膜としては YBaCuO 薄膜が、ジョセフソン接合としては結晶粒界を利用した Grain-boundary 接合 (バイクリスタル接合やステップエッジ接合) が用いられている。また、超伝導/絶縁体の多層構造としては YBaCuO/SrTiO₃ が用いられている。HTS-SQUID ではそのプロセス技術の進展は著しいが、改善の余地はまだ多い。同表に示すように、プロセス技術の不完全さは SQUID の性能に大きな影響を及ぼす。現状では SQUID の性能がプロセス技術により決められているといっても過言でなく、その完成が望まれる。

なお、Table 1 に示す wire とは磁界検出コイルを作製するための細い線材のことである。直径 1 cm 程度のコイルで YBaCuO 薄膜と超伝導コンタクトが必要があるが、現状ではこの要求を満たすものはない。このようなコイルは SQUID を磁気雑音の大きな環境下で用いる際に必要となる (後述するグラジオメータ) ため、その開発が望まれる。

2.2 SQUID の最適設計

液体窒素温度 ($T=77\text{ K}$) で動作する SQUID は液体ヘリウム温度 ($T=4.2\text{ K}$) に比べて熱雑音の影響を 20 倍程大きく受ける。この熱雑音の影響をいかに最小限に留めるかが設計の重要なポイントである^{14,15)}。このためには SQUID パラメータの臨界電流 I_0 、抵抗 R_s 、及びインダクタンス L_s の最適化が重要となる。Fig. 2 に磁気結合回路として後述する磁束トランスを用いた場合の設計例を示す。磁界検出の検出コイルとしては、 $A_p=10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ を仮定し、ジョセフソン接合としては $I_0R_s=100\text{ }\mu\text{V}$ の値を持つものを仮定している。

Fig. 2 に示すようにセンサの磁界検出感度 B_n はパラメータの値により大きく変化し、 $T=77\text{ K}$ 動作での最適値は $I_0=10\sim 25\text{ }\mu\text{A}$ 、 $R_s=4\sim 10\text{ }\Omega$ 、 $L_s=50\sim 150\text{ pH}$ となる。この場合にはセンサの性能として $B_n=3$

Fig. 2 Theoretical results on the parameter dependencies of the magnetic field noise of the SQUID sensor. Magnetic coupling using thin film transformer is assumed. Solid and broken lines are obtained for high T_c and low T_c SQUID, respectively.

$\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ (white noise) の値が期待できる。なお、同図には $T=4.2\text{ K}$ で動作する Nb 系 SQUID の代表的パラメータである $I_0=10\text{ }\mu\text{A}$ 、 $R_s=5\text{ }\Omega$ の場合も示している。同図に示すようにパラメータを最適化することにより $T=77\text{ K}$ の場合の性能の劣化は、 $T=4.2\text{ K}$ の場合に比べて動作温度の差、すなわち $(77/4.2)^{1/2}=4$ 倍程度に抑えることが可能である。

Fig. 2 から明らかなように、センサの高性能化には抵抗 R_s の大きなジョセフソン接合の開発が重要となる。現在 $R_s=10\text{ }\Omega$ 程度の接合が開発されているが、そのプロセス技術はまだ十分には確立されておらず今後の課題となっている。また高抵抗接合においては接合の浮遊容量の影響が大きくなるが、その定量的評価もなされておらず、これらの点が高性能化のための今後の課題である。

なお、Fig. 2 の結果は熱雑音の影響のみを考えた理想的な場合の結果であることを注意しておく。実際のセンサでは後述するように、ジョセフソン接合や磁気結合回路の不完全さ、及び電子回路の雑音等によりその性能は数倍から 10 倍程度劣化する。これらの影響をいかに小さくするかがシステム開発の重要な点である。LTS では Fig. 2 の結果に近い値が得られているが、HTS ではプロセス技術の問題により実際に得られている性能は Fig. 2 に比べて 5 倍程度大きいのが現状である。

Table 2 Performance of high T_c SQUID magnetometer reported for different magnetic coupling scheme.

Coupling scheme	Pickup coil: A_p (mm ²)	Induct. L_s (pH)	Effective area: A_{eff} (mm ²)	Flux noise Φ_n ($\mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$) (1 Hz) (white)		Field noise B_n (fT/Hz ^{1/2}) (1 Hz) (white)		Ref.
Direct couple	100	55	0.21	6.5	3.5	65	35	6
Flux trans. ($N=10$)	71	130	1.72	43	8	53	9.7	9
Multiloop ($N=16$)	49	145	1.89	34	16	37	18	11
Flux trans. ($N=25$)	100	200	6	<10		<5		Low T_c

2.3 磁気結合回路

SQUID を構成する インダクタンスは $L_s=100$ pH 程度であり, その面積は $A_s=0.1\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}$ と非常に小さい。このため, SQUID 単体で磁界を検出する場合にはその感度はそれほど高くない。磁束分解能を $\Phi_n=10^{-5}\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ ($\Phi_0=2.07\times 10^{-15}\text{ Wb}$: 磁束量子) とすると, 磁界分解能は $B_n=\Phi_n/A_s=2\text{ pT/Hz}^{1/2}$ 程度となる。後述するように, センサとしての空間分解能を重視する SQUID 顕微鏡への応用では, SQUID 単体が用いられる場合がある。しかしながら通常では, Fig. 1 に示すように磁界を $A_p=1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 程度の面積を持つ磁界検出コイルで検出し, その磁束を磁気結合回路を介して SQUID へ伝達する方法がとられる。

磁気結合回路の性能は検出コイルで検出した磁界 B がどれくらい SQUID に信号磁束 Φ_{sig} として伝達されるかを示す有効面積 $A_{eff}=\Phi_{sig}/B$ で表される。その構成法としては, i) 直接結合形, ii) 薄膜トランス形, 及び iii) マルチループ形が主として用いられている。Table 2 にこれらの磁気結合回路を用いた SQUID センサの性能を示す。磁気結合回路と組み合わせることにより, センサの磁界分解能としては周波数 $f=1\text{ Hz}$ で $B_n=40\sim 60\text{ fT/Hz}^{1/2}$ が, white noise レベルで $B_n=10\sim 30\text{ fT/Hz}^{1/2}$ が達成されている。

直接結合型⁶⁾ は Fig. 1 で磁界検出コイルを入力コイルを介さずに SQUID コイルに直接結合したものである。この結合方法は単層の成膜プロセスで SQUID と磁気結合回路を同時に製作できるため, プロセスが容

易であり信頼性が高い。しかしながら検出コイルから SQUID への磁束の伝達効率を示す有効面積 A_{eff} は小さい。Table 2 の例では検出コイルの面積を $A_p=10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, SQUID インダクタンスを $L_s=55\text{ pH}$ とした時の有効面積として $A_{eff}=0.21\text{ mm}^2$ が得られている。直接結合形では有効面積を大きくするためには検出コイルの面積を大きくしなければならず, 有効面積をこれ以上大幅に大きくすることは困難である。

薄膜トランス形の結合方式は, Fig. 1 に示す検出コイルと SQUID との磁気結合を入力コイルを用いて行うものであり, 入力コイルは薄膜プロセスを用いて製作される^{7~10)}。この結合方式では磁束の伝達効率を大幅に改善することが可能であり, 同じ検出コイルに対して有効面積は直接結合形に比べて 1 桁大きくなる¹⁶⁾。Fig. 3(a)に開発された薄膜トランスの例を示す。この例では, 15 ターンの薄膜コイルが $0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ の領域に集積化されている。この薄膜コイルを介して面積 $A_p=15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ の検出コイルと $L_s=75\text{ pH}$ の SQUID インダクタンスを磁気結合することにより有効面積として $A_{eff}=3.2\text{ mm}^2$ と大きな値が得られている。Fig. 3(b)にはこの SQUID センサの磁界分解能を示す。White noise レベルで $13\text{ fT/Hz}^{1/2}$, $f=1\text{ Hz}$ で $100\text{ fT/Hz}^{1/2}$ と高性能なセンサが実現されている。ただし, 薄膜トランスの製作のためには超伝導/絶縁体/超伝導の多層構造及び超伝導コンタクトのプロセス技術が必要となる。この技術はまだ十分には確立しておらず, 今後の重要な課題となっている。

Fig. 3 High T_c SQUID magnetometer using thin film transformer. (a) Photograph of 15-turn thin film input coil. (b) Spectrum of magnetic field noise measured at $T=77$ K. (Courtesy of H. Itozaki of Sumitomo Electric Ind.)

マルチループ形の結合方式は SQUID インダクタンスをそのまま検出コイルとして用いるものである^{11,17)}。前述したように単純な構造では磁束を検出する SQUID インダクタンスの面積は非常に小さい。検出面積を大きくし、かつインダクタンスの値を $L_s=100$ pH 程度に抑えるため、多数のインダクタンスを並列に接続した方法がマルチループ形である。Table 2 の例では、 $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ の領域を 16 分割し、16 個のコイルを並列に接続することにより有効面積として $A_{\text{eff}}=1.89\text{ mm}^2$ を、インダクタンスの値として $L_s=145\text{ pH}$ を得ている。ただし、この場合にも多層成膜プロセスが必要となる。

2.4 電子回路

SQUID の出力電圧は入力磁束に対して線形ではなく、量子磁束 Φ_0 を周期として周期的に変化する。センサとしての直線性を確保するため、Fig. 1 に示すような負帰還回路 (Flux Locked Loop: FLL 回路) が用いられている。出力電圧に比例した磁束 (フィードバック磁束 Φ_f) を SQUID へ帰還させ、入力磁束 Φ_{sig} を打ち消す ($\Phi_{\text{sig}} + \Phi_f = 0$) ような回路構成となっている。

センサシステムの性能は FLL 回路の性能に強く依存する。このため、FLL 回路の i) 低雑音化、ii) 駆動方式の改良 (AC バイアス法)、及び iii) 耐雑音性を高めるための高速化が研究されている。以下にこれらの点について述べる。SQUID の出力電圧雑音は $V_n = (6 k_B T R_s)^{1/2}$ 程度であり $T=77\text{ K}$ 、 $R_s=4\Omega$ 、 $k_B=1.38 \times 10^{-23}$ では $V_n=0.16\text{ nV/Hz}^{1/2}$ となる。このため FLL 回路のプリアンプとしてはこれ以下の入力雑音をもつものが必要となる。液体ヘリウム温度では $V_n < 0.05\text{ nV/Hz}^{1/2}$ となりプリアンプに対する要求はもっと厳しい。プリアンプの性能向上により $V_n=0.3\text{ nV/Hz}^{1/2}$ 程度の入力雑音は達成できるが、まだ高価である。プリアンプに対する要求を緩和する方法として、i) Fig. 1 に示すような昇圧用のトランスを SQUID とアンプの間に挿入する方法と ii) 昇圧トランスを用いない APF (Additional Positive Feedback) 法がある。APF 法は SQUID の出力信号を入力磁束として正帰還させ、SQUID 自体に増幅機能を持たせたものである³⁾。この場合には SQUID の入出力特性を示す電圧-磁束 ($V-\Phi$) 特性は通常の場合に比べて変形する。

高温超伝導を用いたジョセフソン接合の臨界電流 I_0 は低周波揺らぎを示すことが知られている。揺らぎ δI_0 の大きさは周波数 $f=1\text{ Hz}$ で $\delta I_0/I_0=10^{-4}$ 程度であり、この値は Nb 系の接合に比べて 100 倍程度大きい¹⁵⁾。この臨界電流の揺らぎは SQUID の $1/f$ ノイズとして現われ、SQUID 応用で重要となる低周波領域での性能を劣化させる。幸いなことに Fig. 1 に示す SQUID のバイアス電流 I_B を直流から交流に変えて FLL 回路を構成することにより (AC バイアス法¹⁸⁾)、この低周波ノイズは大幅に除去できる。

FLL 回路の応答速度は Fig. 1 に示す負帰還回路の遮断周波数 f_c により決まる。この遮断周波数の設定は SQUID センサを雑音の大きな環境下で用いる場合に重要となる。前述したように FLL 回路では入力磁

束 Φ_{sig} を打ち消すように出力信号 Φ_f を負帰還させている ($\Phi_{\text{sig}} + \Phi_f = 0$)。SQUID センサで測定する信号磁界は微弱でありその周波数も通常数 kHz 以下であるので、環境磁気雑音が小さい場合には遮断周波数 f_c を 10 kHz 程度にしておけば負帰還動作は正常に行われ、SQUID センサの使用に問題は生じない。

これに対して環境磁気雑音が大きい場合には負帰還動作が正常に行われなくなる。例として商用周波数 ($f = 50/60$ Hz) の磁気雑音下で SQUID を動作させる場合を考える。磁気雑音の代表例として $B_n = 300$ nT $= 3$ mG を考え、SQUID センサの有効面積を $A_{\text{eff}} = 1$ mm² とすると、SQUID には $\Phi_n = A_{\text{eff}} B_n = 150 \Phi_0$ の大きな雑音磁束が鎖交する。この場合の単位時間当たりの雑音磁束の変化量は $d\Phi_n/dt = 5 \times 10^4 \Phi_0/s$ となる。このように速い雑音磁束の変化に負帰還動作が追従できなければ、FLL 回路は正常に動作しない。

FLL 回路がどれくらい速い磁束の変化に追従できるかを表す量としてスルーレートが用いられる^{3,12,13}。スルーレートの大きさは遮断周波数 f_c により、大まかに $f_c \Phi_0$ で与えられる。従って前述の環境雑音下で FLL 動作が正常に行われるためには、少なくとも $f_c = 50$ kHz 以上の遮断周波数を持つ回路構成としなければならない。なお、Fig. 1 に示すように FLL 回路では SQUID の出力を読み出すために通常は変調信号 Φ_m が加えられる。この変調周波数 f_m は遮断周波数 f_c に比べて十分大きくする必要があるため、 $f_c = 50$ kHz の場合には f_m は MHz 以上の高周波数となる。

現在、 $f_c = 5$ MHz の遮断周波数をもつスルーレートが $10^6 \Phi_0/s$ 程度の FLL 回路が開発されている¹³。FLL 回路の高スルーレート化は SQUID の耐雑音性を高め応用分野を拡大する上で不可欠な技術である。

2.5 グラジオメータ

環境磁気雑音を除去する方法としては、磁気シールドとグラジオメータがある。磁気シールドは磁性体や高温超伝導体を用いて製作されており磁気雑音を $1/10^4 \sim 1/10^6$ 程度にまで減衰できるが、高価でありその低価格化が望まれる。グラジオメータは磁界の空間微分を測定することにより、空間的に均一な環境磁気雑音を除去する方法である。その構成法としては、i) 磁界検出コイルを差動形に配置し磁界の空間微分を SQUID への入力磁束とする方法、及び ii) SQUID を 2 個配置し、その出力を電氣的に差し引く方法（電氣的グラジオメータ）がある。Nb 系の SQUID では主として前者の方法が用いられてきたが、高温超伝導体

では差動形の検出コイルを作製する技術が確立していないため後者の方法が用いられている。後者の方法では SQUID には環境磁気雑音がそのまま入力されるため、SQUID が正常に動作するためには前述したように FLL 回路のスルーレートを高くしなければならない。

3. SQUID 応用

Fig. 4 に SQUID センサの代表的な応用分野における磁界信号の大きさと周波数領域を示す。以下にこれらの応用で要求される項目について簡単に説明する。

i) 生体磁気計測では低周波領域における磁界分解能と信号処理のための多チャンネル化が大きな要求である。空間分解能は数 mm 程度であり、磁界検出コイルの大きさは $A_p = 2$ cm $\times$ 2 cm 程度となる。ii) 材料評価応用や地球物理応用ではセンサが研究外で使用される場合が多い。この場合にはセンサの性能に加えて、センサの冷却と環境磁気雑音に対する耐雑音性が大きな要求となる。iii) SQUID 顕微鏡^{19,20})では空間分解能として $50 \mu\text{m}$ 以下が必要とされる。このため磁界検出コイルを小さくし、サンプルとの距離を $50 \mu\text{m}$ 程度にまで近づける必要がある。サンプルとセンサの温度が異なる場合には、センサの冷却が重要な課題となる。

このようにセンサシステムの i) 磁界分解能、ii) 空間分解能、iii) 周波数領域、iv) 耐雑音性、及び v) 冷却の容易さに対する要求は応用分野により異なるため、それぞれの分野に適したようにバランス良くシステムを開発しなければならない。これまでの LTS-SQUID では精密計測と生体磁気計測がセンサ開発の大きな原動力でありセンサシステムもこれの応用に最適になる

Fig. 4 Range of magnetic field and frequency used for various SQUID applications.

Fig. 5 Example of SQUID application to material diagnosis. (a) Photograph of the so-called Lüders band observed when the mechanical stress is applied to the steel sample. (b) Contour map of the magnetic field corresponding to the Lüders band. Magnetic field just above the sample is measured with the SQUID. (Courtesy of K. Chinone of Seiko Instruments Inc. and N. Ishikawa of Shimizu Corp.)

ように開発されてきた。今後多くの分野に SQUID が応用されるためには、ユーザとの交流を通してシステムに対する要求を明確化することが重要である。

以下に今後の発展が期待されている材料評価への応用例を紹介する。なお、生体磁気計測については多くの解説があるのでそれらを参照されたい¹⁾。SQUID の材料評価への応用としては欠陥検出、劣化診断、不純物検出等がある。材料の微小な欠陥検出を非破壊で検出する方法としては渦電流探傷法や磁粉探傷法が一般に用いられている。これらの方法では材料の表面付近の欠陥検出のみが可能である。SQUID センサでは低周波数の測定が可能であり、従来の方法では不可能であった材料内部の欠陥検出が可能になる。

材料劣化の大きな要因として力学的ストレスや腐食がある。これらの要因による劣化の機構は十分には解明されておらず、また劣化に対する有効な診断方法も少ない。SQUID センサはこれらの劣化の機構解明及び診断法として期待されている。測定法は以下の通りである。i) 材料に力学ストレスを加えるとその磁気的性質が変化するため、この変化を SQUID 磁気センサを用いて測定する。ii) 腐食が発生すると化学反応に伴って微小な電流が生じるため、この電流により発生する磁界を検出する。

Fig. 5 に力学的ストレスを加えたときの鋼材の磁気的変化を SQUID センサを用いて測定した例を示す。試験体としては厚さ 6 mm、幅 40 mm、長さ 600 mm の溶接構造用圧延鋼材 (SM490A) を用い、引張加重を加えた後の鋼材の磁気変化を測定している。Fig. 5 (a) は引張加重により鋼材に降伏変形が生じた場合の表

面写真を示す。矢印の場所で降伏変形に起因するいわゆるリュードス帯が明瞭に見られる。

Fig. 5(b) はこの場合に SQUID センサを試験体表面から 6 mm の位置に配置し、表面に対して鉛直方向の磁界の空間分布を 2 次元的に測定した結果である。なお、SQUID としては Nb 系のものを用い、磁界検出用のピックアップコイルとしては SQUID に集積化した同心円形 2 次微分コイルを用いて環境磁気雑音を除去している²¹⁾。同図に見られるように、リュードス帯に対応した位置で明確な磁気的变化が見られる。これらの磁気的变化と材料劣化との対応関係が明らかとなれば、材料診断への応用が可能になる。

4. 終わりに

本稿で概観したように、HTS-SQUID の性能改善の余地はまだ多いものの、応用を念頭に置いたシステム開発が可能な段階にある。また、環境磁気雑音下における SQUID の耐雑音性を高めた電子回路が開発されており、磁気シールドに対する制約が軽減されつつある。これらの進展により SQUID 使用上の制約が緩和され、多くの分野に応用することが可能になりつつある。

ただし、LTS、HTS にかかわらずシステム開発においては、ユーザとの交流によりシステムに対する要求を明確化することが重要である。これまでの LTS-SQUID センサ開発の主たる原動力は精密計測と生体磁気計測への応用であり、システム開発もその要求を満たすように進められてきた。今度他の応用分野へ発展していくためには、応用分野における要求を明確に

し SQUID の優位性を実証していくことが重要である。

本稿をまとめるにあたって茅根一夫氏（セイコー電子）、糸崎秀夫氏（住友電工）に有益な議論を頂いた。

参 考 文 献

- 1) J. P. Wikswo, Jr.: IEEE Trans. Supercond. **5** (1995) 74
- 2) T. Ryhanen, H. Seppa, R. Ilmoniemä and J. Knuutila: J. Low Temp. Phys. **76** (1989) 287
- 3) D. Drung: IEEE Trans. Appl. Supercond. **4** (1994) 121
- 4) Y. Zhang, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **3** (1993) 2465
- 5) S. Tanaka, et al.: Appl. Phys. Lett. **64** (1994) 514
- 6) L. P. Lee, J. Longo, V. Vinetskiy and R. Cantor: Appl. Phys. Lett. **66** (1995) 1539
- 7) D. Grundler, B. David, R. Eckart and O. Dossel: Appl. Phys. Lett. **63** (1993) 2700
- 8) M. S. Dilorio, K-Y. Yang and S. Yoshizumi: Appl. Phys. Lett. **67** (1995) 1926
- 9) D. Drung, et al.: Appl. Phys. Lett. **68** (1996) 1421
- 10) H. Kugai, T. Nagaishi and H. Itozaki: *Advances in Superconductivity VIII*, Springer, Tokyo (1996) 1145
- 11) F. Ludwig, et al.: Appl. Phys. Lett. **66** (1995) 1418
- 12) F. Wellstood, C. Heiden and J. Clarke: Rev. Sci. Instrum. **55** (1984) 952
- 13) D. Drung, H. Matz and H. Koch: Rev. Sci. Instrum. **66** (1995) 3008
- 14) K. Enpuku, Y. Shimomura and T. Kisu: J. Appl. Phys. **73** (1993) 7929
- 15) K. Enpuku, G. Tokita, T. Maruo and T. Minotani: J. Appl. Phys. **78** (1995) 3498
- 16) M. B. Ketchen: IEEE Trans. Magn. **27** (1991) 2916
- 17) D. Drung, S. Knappe and H. Koch: J. Appl. Phys. **77** (1995) 4088
- 18) R. H. Koch, et al.: Appl. Phys. Lett. **60** (1992) 502
- 19) J. R. Kirtley, et al.: Appl. Phys. Lett. **66** (1995) 1138
- 20) R. C. Black, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **5** (1995) 2137
- 21) 中山 哲, 諸岡利光, 小田原成計, 清水信宏, 茅根一夫: 電気学会論文誌 A **115-A** (1995) 1228