

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月17日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656093

研究課題名（和文） 超高感度センサシステムのための SQUID ピコボルトメータの開発

研究課題名（英文） SQUID pico-voltmeter for highly sensitive measurement system

研究代表者

圓福 敬二 (ENPUKU KEIJI)

九州大学・超伝導システム科学研究センター・教授

研究者番号：20150493

研究成果の概要（和文）：

本研究では、従来の半導体素子とは全く異なる原理に基づくSQUIDピコボルトメータを開発した。高温超伝導SQUID素子の高性能化と効率的な信号結合法の開発を行い、超高感度センサシステムに必要な $10 \text{ pV/Hz}^{1/2}$ 程度の雑音電圧を持つSQUIDピコボルトメータを開発した。また、SQUIDピコボルトメータと液体窒素温度に冷却した銅検出コイルを用いた磁気センサシステムを試作し、 20 kHz 以上の周波数帯で $1 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 程度の磁界雑音を持つ高感度センサの開発が可能なことを示した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a SQUID pico-voltmeter for highly sensitive measurement system. Using a low noise high- T_c SQUID sensor and tight coupling circuit for the transfer of the signal voltage, we demonstrated the voltage noise of about $10 \text{ pV/Hz}^{1/2}$. We also developed a magnetic sensor system using the SQUID pico-voltmeter coupled to a pickup coil cooled at 77 K . The sensor showed the field noise of $1 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ for the frequency $f > 20 \text{ kHz}$.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	0	2,000,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	360,000	3,560,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：SQUID、高温超伝導、ピコボルトメータ、磁気センサ、冷却銅検出コイル、リッツ線、センサシステム

1. 研究開始当初の背景

センサは種々の物理量を検出するものであるが、その出力信号は一般に電圧信号となり、微小信号を検出する場合にはセンサの出力電圧は極めて小さくなる。現在、センサ信号の測定にはナノボルトメータと呼ばれる

電圧計が用いられているが、その感度 ($1 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ 程度) は高感度センサには不十分であり、現状では、超高感度センサシステムの性能は電圧計の雑音によって制限されているといっても過言ではない。このため、センサからのピコボルトレベルの微小電圧を検

出でき、高感度センサ本来の性能を十分に引き出すことが可能な、ピコボルトメータの開発が強く望まれている。しかしながら、従来の半導体素子を用いてこの高感度性を実現することは不可能であり、新しい原理に基づいたピコボルトメータの開発が必要とされている。

2. 研究の目的

申請者は、従来の半導体とは全く異なる原理に基づく、超伝導量子干渉素子 (SQUID) を用いたこれまでに無い新しいピコボルトメータを考案した。本研究ではこれまでの研究成果を進展させ、SQUID 素子構造や信号結合法を最適化することにより、 $10 \text{ pV/Hz}^{1/2}$ 程度の感度を持つ SQUID ピコボルトメータを開発することを目的としている。またピコボルトメータを、磁界検出コイルを用いたセンサシステムに応用し、システム感度を数 10 倍改善できることを示す。これにより、SQUID ピコボルトメータの有用性を示す。

3. 研究の方法

本研究では、超高感度センサシステムに必要な SQUID ピコボルトメータを以下の方法により開発した。

(1) ピコボルトメータとしての性能は SQUID 素子の雑音とセンサからの信号を SQUID 素子へ伝達する信号結合率に大きく依存する。このため、素子を高品質化して素子雑音を低減する。また信号の結合率を大きくするため、 2 nH 程度の大きな相互インダクタンスを有する磁気結合回路を開発する。

(2) SQUID ピコボルトメータと液体窒素温度に冷却した銅検出コイルを用いた磁気センサシステムを試作する。その性能評価を通して、SQUID ピコボルトメータが超高感度センサシステムに有用であることを示す。

4. 研究成果

(1) SQUID ピコボルトメータの性能

図 1 に SQUID ピコボルトメータの構成を示す。信号源を入力コイル L_i に接続し、信号電圧 V_s を信号電流 I_s に変換する。この信号電流 I_s を、相互インダクタンス M を介して SQUID へ信号磁束 $\Phi_s = MI_s$ として伝達し、SQUID センサで検出する。

SQUID の磁束雑音スペクトルを $S_\Phi^{1/2}$ とすれば、これと等価な入力電流雑音は $I_n = S_\Phi^{1/2}/M$ と与えられる。従って、信号源の抵抗を R_s とすれば、SQUID の検出出来る最小電圧は

$$\sqrt{S_v} = R_s \sqrt{S_\Phi} / M \quad (1)$$

と与えられる。

上式から分かるように、SQUID ピコボルトメータの高性能化のためには、SQUID の磁束

雑音を減少させるとともに、相互インダクタンス M を大きくする信号伝達回路を開発する必要がある。

一例として、 $S_\Phi^{1/2} = 10^{-5} \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$, $M = 1 \text{ nH}$, $R_s = 1 \Omega$ の場合を考える。ただし、 $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ は磁束量子である。この場合には、(1)式から電圧雑音の値は $S_v^{1/2} = 2 \times 10^{-11} = 20 \text{ pV/Hz}^{1/2}$ となり、ピコボルトレベルの微小電圧の測定が可能であることが分かる。

図 1 で入力コイルは高温超伝導薄膜を用いた 59 ターンの薄膜コイルで作製されており、SQUID とフリップチップ構造により結合している。入力コイルと SQUID の間の相互インダクタンスは $M = 1.7 \text{ nH}$ である。

図 2 には SQUID ピコボルトメータの雑音スペクトルを示す。図の左側の縦軸は SQUID センサの磁束雑音 $S_\Phi^{1/2}$ を示している。図に示すように SQUID センサの磁束雑音は $f > 1 \text{ kHz}$ では周波数に依存しない白色雑音となり、 $S_\Phi^{1/2} = 4.7 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ の値が得られた。一方、 $f < 1 \text{ kHz}$ の低周波では周波数の低下とともに雑音が増加する $1/f$ ノイズ特性を示し、 $f = 100 \text{ Hz}$ では $S_\Phi^{1/2} = 22 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ となった。

また、図 2 の右側の縦軸は信号源の抵抗が $R_s = 1 \Omega$ の場合の SQUID ピコボルトメータの入力雑音電圧 $S_v^{1/2}$ を示している。同図に示すように、 $f > 1 \text{ kHz}$ では $S_v^{1/2} = 5.7 \text{ pV/Hz}^{1/2}$ の値が得られた。一方、 $f = 100 \text{ Hz}$ では $S_v^{1/2} = 27 \text{ pV/Hz}^{1/2}$ となった。

図 2 に示すように、当初の目的であった $10 \text{ pV/Hz}^{1/2}$ 程度の感度を持つ SQUID ピコボルトメータを開発することに成功した。ただし、低周波領域での性能についてはまだ改善の余地が残されている。このためには SQUID センサの $1/f$ ノイズを低減する必要がある。

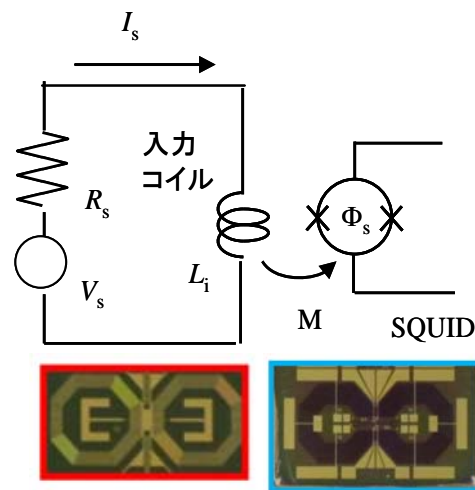


図 1. SQUID ピコボルトメータの構成。

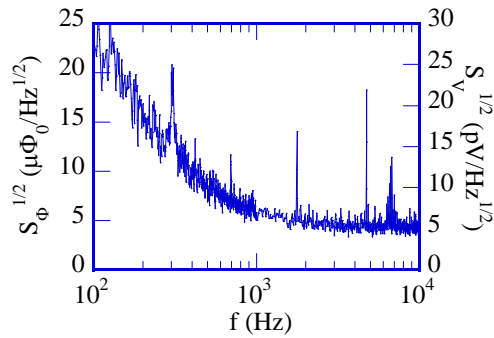


図2. SQUID ピコボルトメーターの性能

(2) 磁気センサへの応用

周波数が 1~100 kHz の交流磁界は非破壊検査やバイオセンサなどの種々の分野で用いられている。この周波数帯での高感度な磁気センサを開発するため、検出コイルと SQUID ピコボルトメータを結合したセンサシステムを試作した。

① 検出コイルの特性

検出コイルを磁気センサとして用いる場合の磁界雑音 S_B は熱雑音によって決まり、次式で与えられる。

$$\sqrt{S_B} = \frac{\sqrt{4k_B T R_p}}{(\pi/4) D^2 2\pi f N} \quad (2)$$

ここで、 N は巻数、 D はコイルの平均半径、 R_p はコイル抵抗である。上式に示すように、検出コイルの性能はコイル抵抗 R_p と動作温度 T に大きく依存し、高性能化のためにはコイルを低温に冷却するとともに抵抗 R_p を減少させることが有効である。

ただし、コイル抵抗は周波数依存性を示すため一定値ではなく、周波数とともに増加する。高周波帯でのコイル抵抗の増加を抑制するため、直径の小さな素線を多数本撚りあわせた、いわゆるリッツ線を用いてコイルを作製した。

図3にリッツ線の素線径 d_f を 0.023 mm から 0.2 mm まで変化させた場合のコイル抵抗 R_p の周波数依存性の測定結果を示す。コイルの内径は $D_i=40$ mm、高さは $h=12$ mm であり、コイル巻数は $N=150$ と一定にした。また、図の縦軸は直流抵抗 R_{dc} で規格化したコイル抵抗 R_p を示している。同図に示すように、コイル抵抗は低周波では直流抵抗 R_{dc} と等しいが、周波数が 10 kHz を超えると周波数とともに急激に増加していく。また、高周波領域でのコイル抵抗は素線径 d_f に強く依存し、素線径 d_f が小さいほどその増加は小さいことが分かる。従って、高周波帯で検出コイルを用いる場合には素線径の小さなリッツ線を用いることが有効である。

なお、コイル抵抗の周波数依存性は次式で与えられる。

$$R_p = R_{dc} (1 + f^2 / f_m^2) \quad (3)$$

上式に示すように、コイル抵抗は高周波領域では周波数 f の 2 乗で増加することになる。ここで、周波数 f_m はコイル抵抗が直流抵抗 R_{dc} の 2 倍となる場合の周波数を表す。この周波数 f_m は巻数 N と素線径 d_f に反比例し、抵抗率 ρ に比例する。このため、高周波領域でのコイル抵抗は巻数 N の 2 乗に比例し、素線径 d_f の 2 乗に反比例することになる。

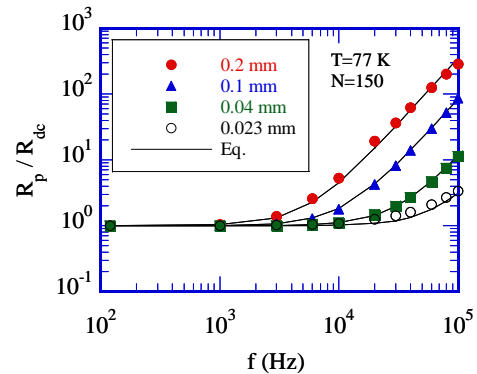


図3. 検出コイルの抵抗の周波数依存性

② 磁気センサの性能

検出コイルと高温超伝導 SQUID を結合した磁気センサを図4に示す。検出コイルは熱雑音を低減するため液体窒素温度に冷却している。また、検出コイルは共振用のコンデンサ C を介して入力コイル L_i に結合されている。

この共振型結合を用いた場合の磁気センサの磁界雑音を測定した。実験では、素線径 $d_f=0.1$ mm、本数 $n_f=60$ のリッツ線を用いて検出コイルを作製した。コイルの巻数は $N=150$ 、平均直径は $D=50$ mm である。また、このコイルのインダクタンスと液体窒素温度での直流抵抗は $L_p = 1.05$ mH と $R_p = 132$ m Ω である。

図5は磁界雑音の測定結果である。共振用のコンデンサ C を変えて、共振周波数を変化した場合の結果を示している。図に示すように共振周波数で磁界雑音が最小となった。共振点での磁界雑音は周波数とともに減少し、10~60 kHz において 1 fT/Hz^{1/2} の磁界雑音が得られた。この測定結果は、設計値とほぼ一致しており、高感度な磁気センサの開発が可能であることが示された。

また、入力コイルと SQUID の間の相互インダクタンス M が磁気センサの雑音特性にどのような影響を与えるかを調べた結果を図6

に示す。図に示すように M の値が大きくなるにつれて、低雑音の周波数範囲が広がること分かる。従って、 M の値を大きくすることが低雑音化に重要である。

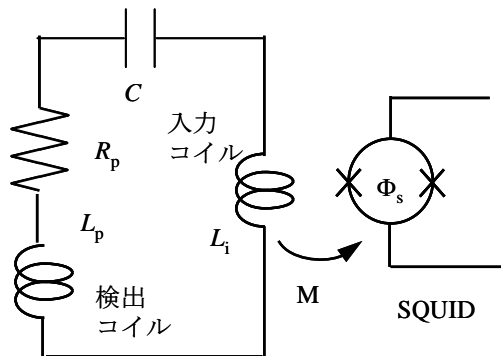


図4. 磁気センサの構成。磁界検出コイルと SQUID ピコボルトメータを共振回路で結合。

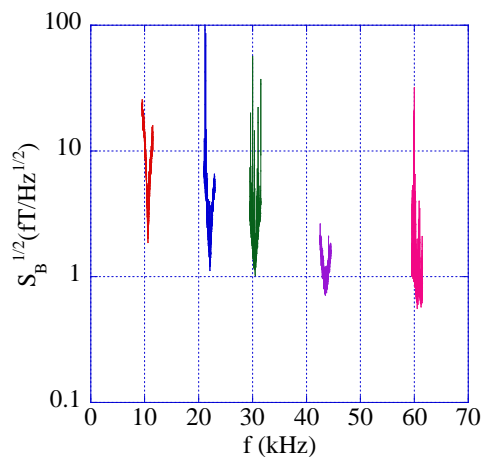


図5. 磁気センサの磁界雑音特性。

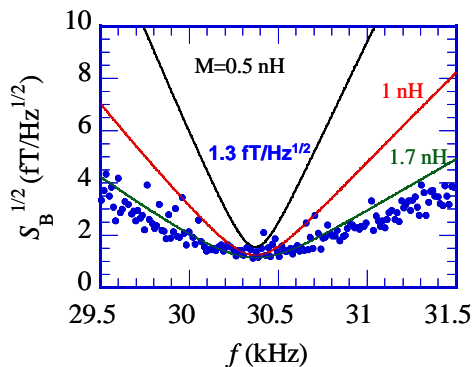


図6. 磁気センサの雑音特性に及ぼす相互インダクタンス M の影響。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① K. Enpuku, S. Hirakawa, R. Momotomi, M. Matsuo, T. Yoshida and A. Kandori, “Design of pickup coil made of Litz wire and cooled at 77 K for high sensitivity measurement of AC magnetic fields”, Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2012) 076602 査読有り。
- ② K. Enpuku, S. Hirakawa, R. Momotomi, M. Matsuo and T. Yoshida, “Performance of HTS SQUID using resonant coupling of cooled pickup coil”, Physica C, 471 (2011) 1234, 査読有り。
- ③ K. Enpuku, S. Hirakawa, T. Tsuji, R. Momotomi, M. Matsuo and A. Kandori, “HTS SQUID Magnetometer using resonant coupling of cooled Cu pickup coil”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 514, 査読有り。
- ④ K. Enpuku, Y. Tsuji, S. Hirakawa, M. Matsuo and T. Yoshida, “Performance of HTS SQUID coupled to cooled-Cu/superconductor pickup coil”, Physica C, 470 (2010) 1511, 査読有り。

[学会発表] (計 10 件)

- ① R. Momotomi, K. Enpuku, T. Mihaya, T. Yoshida, A. Kandori, K. Tanabe, S. Adachi and A. Tsukamoto, “Highly sensitive magnetometer composed of HTS SQUID and pickup coil made of Litz wire”, Int. Symp. Supercond. (ISS2011), 2011.10. 25, Tokyo (Japan).
- ② K. Enpuku, R. Momotomi, M. Matsuo, T. Yoshida, A. Kandori, T. Tanabe, S. Adachi and A. Tsukamoto, “Performance of pickup coil made of Litz wire and coupled to HTS SQUID”, Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC2011) 2011. 9. 22 Haag (Netherlands).
- ③ K. Enpuku, S. Hirakawa, R. Momotomi, M. Matsuo and T. Yoshida, “Performance of HTS SQUID using resonant coupling of cooled Cu pickup coil”, Int. Symposium on Superconductivity (ISS2010), 2010. 11. 2, Tsukuba (Japan)
- ④ K. Enpuku, S. Hirakawa, T. Tsuji, R.

Momotomi, M. Matsuo and A. Kandori,
“HTS SQUID magnetometer using
resonant coupling of cooled Cu pickup
coil”, Applied Superconductivity Conf.
(ASC2010), 2010, 8. 6, Washington DC,
USA.

[その他]

ホームページ等

<http://www.sc.kyushu-u.ac.jp/~enlab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

圓福 敬二 (ENPUKU KEIJI)

九州大学・超伝導システム科学研究セン
ター・教授

研究者番号：20150493

(2) 研究分担者

吉田 敬 (YOSHISA TAKASHI)

九州大学・システム情報科学研究院・助教

研究者番号：30380588