

SQUID 磁束計の研究

長向近 岡後藤 史雅昭 郎則夫

All NbN Nanobridge dc SQUID Prepared by Field Emission: Fabrication and Operation

Shiro NAGAOKA
Masanori KHOGO
Akio KONDO

We describe the fabrication, operation and performance of a nanobridge dc SQUID having an $L_s I_0 / \phi_0$ ratio adjustable to the optimum value at liquid helium temperature (4.2 K). An epitaxial NbN film manufactured using the reactive DC magnetron sputtering method was used as the electrode material for the Josephson nanobridge devices, while a thermally stable MgO film was used as an insulator. The Josephson nanobridge can be formed in MgO film of an NbN/MgO (5–10 nm)/NbN junction having an area of about $4 \times 4 \mu\text{m}^2$, using the field emission in liquid helium. The critical current was readily adjustable to the object value by changing applied voltage. The manufactured device remained extremely stable over dozens of thermal cycles (300 K–4.2 K) for about two years. The dc SQUID is current-biased at a nonzero voltage and modulated with a 20 kHz flux. The 20 kHz voltage developed across the dc SQUID is amplified by a cooled, resonant LC circuit that optimally couples the dc SQUID impedance to the input of a room temperature preamplifier. The dc SQUID is operated in a flux-locked loop using an optimally tuned oscillator, lock-in amplifier and preamplifier which are driven by battery. Above 1×10^{-2} Hz, the spectrum spectrum is white and has an rms value of $3 \times 10^{-5} \phi_0 \text{Hz}^{-1/2}$.

1. 緒 言

超伝導量子干渉素子 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) とは、地磁気 ($\sim 0.5 \times 10^{-4}$ T) の一万分の一以下の非常に小さい磁界を検出することができる磁気センサーである。この SQUID を用いた磁束計 (SQUID 磁束計) は、素子雑音が非常に小さいという特徴を有し、微小磁気計測分野、特に ME (医用機器) や科学計測の分野での応用が期待されている¹⁾。

SQUID 磁束計は、rf SQUID 磁束計と dc SQUID 磁束計に分類できそれぞれ SQUID を含むセンサ部と駆動回路のエレクトロニクス部に分けることができる。センサに用いられる SQUID は、超伝導リングと極低

温 (at 4.2 K) で動作する 1 個以上のジョセフソン素子とから構成される。SQUID は、従来製作の容易さからジョセフソン素子を 1 個有する rf SQUID がおもに検討されてきた。これは、ジョセフソン素子のブリッジや絶縁障壁の寸法が数十 Å であり、これを制御することは技術上困難であったからに他ならない。この数十 Å を制御でき、素子特性が安定なジョセフソン素子の構造や作製方法はそれ自体重要な課題である。

また、SQUID の駆動回路は、磁束計の磁束分解能を左右する。それは、駆動回路の熱雑音が、SQUID の熱雑音に較べ約 2 衍高いことによる。駆動回路の雑音の低減も重要な課題でありプリアンプ等の検討がなされている。

我々は長岡技術科学大学電気系、山下、濱崎研究室と共同でこの数十Aのブリッジ寸法を制御可能な素子を提案した。本稿では、このブリッジ素子の作製方法と素子特性について述べると共に、低雑音化対策を施した駆動回路を試作し磁束計の磁束分解能を測定したので、その結果についても述べる。

2. 素子の構造

ジョセフソン素子は経時、熱サイクル耐性が良いことが不可欠である。この点から現在の素子は Nb 系の薄膜を電極材に用いた All hard 素子が主流になっている。なかでも Nb, NbN を電極材に用いた検討が多くなされており、Nb を電極材に用いたトンネル型素子では絶縁障壁に Al_2O_3 を用いることで、また、NbN では MgO や a-Si を用いることで良好な特性の素子が作製可能になってきている²⁾⁻⁴⁾。

アナログデバイスとしての SQUID 用ジョセフソン素子は、一般的には電流-電圧特性が一価でヒステリシスを持たないために、次式を満足することが要求される⁵⁾。

$$\beta c = 2\pi I_0 C R_n^2 / \phi_0 < 1 \quad (1)$$

ここで、C はジョセフソン素子の接合容量、 I_0 は臨界電流、 R_n は常伝導抵抗、 ϕ_0 は一磁束量子である。C は素子構造で決定され、一般にはブリッジ型素子の方がトンネル型より小さくエネルギー感度 ε ⁶⁾

$$\varepsilon = 8k_B T (\pi L_s C)^{1/2} \quad (2)$$

の向上には有利となる。ここで、 k_B はボルツマン定数、T は絶対温度、 L_s は SQUID ループインダクタンスである。また、 R_n は SQUID の磁束-電圧変換利得を決定し、 R_n が大きいほど利得は大きくなる。C が小さいほど R_n を大きく取れるため、従来ブリッジ型素子を用いた dc SQUID の研究が多くなされてきた⁷⁾⁻⁸⁾。

ところで、ブリッジ型のジョセフソン素子を dc SQUID に用いる場合、素子の電流-位相関係が正弦関数的でなければ大きな磁束変調深さは得られず、従って磁束-電圧変換利得も大きく取ることはできない。また、絶縁層の膜厚がコヒーレンス長 ξ 程度で、ブリッジ長さ l も ξ 程度でなければならぬ。コヒーレンス長 ξ は Nb では約 10 nm (at 4.2 K)¹²⁾、NbN は約 4 nm (at 4.2 K)⁴⁾ 程度と短いため、ブリッジ長を平面的にこのように短くすることは、現在の電子線描画技術をもってしても作製は困難である¹³⁾⁻¹⁴⁾。そのため 3 次元構造の素子で検討がなされてきており、薄膜ポイントコンタクト型や準平面型、ステップエッジ型素子で良好な結果が得

られている⁷⁾⁻¹¹⁾。また、臨界電流値を望む値に調整する目的での液体 He 中での in-situ 的トリミング法多くの研究者により試みられている¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。

この数十Aのブリッジ寸法を制御可能な素子として電極材に熱的に安定で機械的強度にも優れた窒化ニオブ (NbN) を用い、絶縁層に熱的に安定で NbO_x より生成エネルギーの低い MgO を用い接合作製後、上下電極間に液体 He 中で電圧パルスを加えることでナノブリッジを形成しジョセフソン素子を作製する方法を提案している。この方法により液体 He 中で in-situ 的にジョセフソン素子の臨界電流 I_0 を希望する値に調整することができた。以下、ジョセフソン素子の作製方法について述べる。

3. 素子の作製

NbN/MgO (5-10 nm)/NbN 接合中に電界放出法にてジョセフソンナノブリッジ素子を作製する場合、

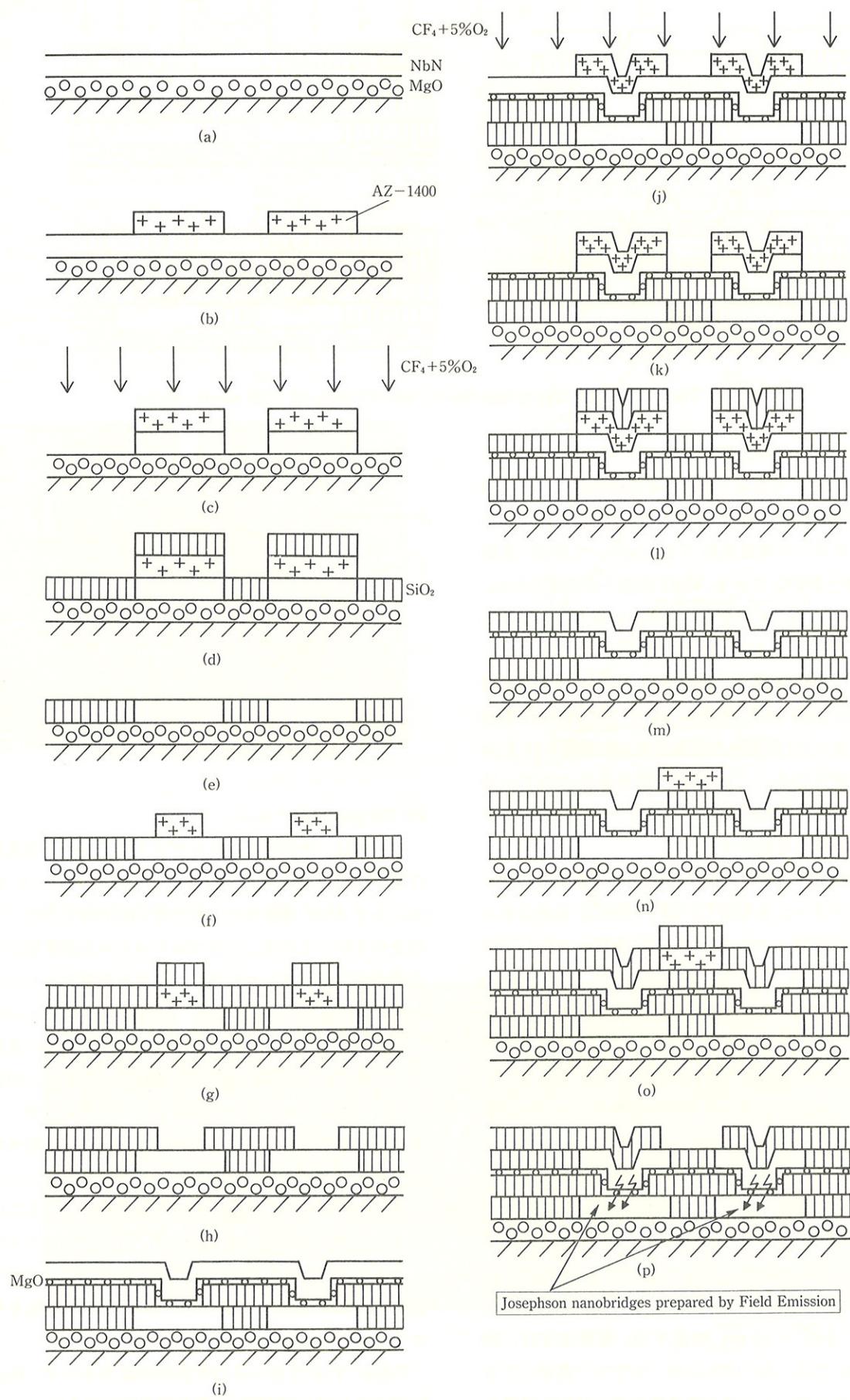
- 1) カウンタ電極の初期成長膜の臨界温度 T_c が高いこと及び抵抗率 ρ_0 の低減
- 2) ナノブリッジの寸法が ξ_{NbN} 程度であり、 T_c が高いこと
- 3) 経時特性が優れていること

等が要求される。また、SQUID ループを形成する NbN 膜についても ρ_0 は低く、 T_c は高い方がよい。なぜなら ρ_0 の増加、 T_c の低下は、次式¹⁸⁾

$$\lambda_{(0)}^{\text{BCS}} = 6.42 \times 10^{-6} (\rho_0 / T_c)^{1/2} \quad (3)$$

を増加させ、薄膜のカイネティックなインダクタンス分を大きくするため、SQUID 応答を悪化させるからである。本研究では、これらの点を改善しうるものとして著者らが先に開発した (200) 配向の NbN 薄膜を電極材として用いた。

Fig. 1 に NbN/MgO/NbN 接合を利用したナノブリッジ素子による dc SQUID の作製工程を示す。基板には、Si(100) を用いた。シリコン基板表面の酸化膜は、緩衝フッ酸によって除去している。まず、RF マグネットロニンスパッタ法を用いて基板を Ar スパッタクリーニングする。その後、下地材となる MgO を RF マグネットロニンスパッタ法により約 150 nm 成膜し、さらに同一真空中で連続的に下部電極となる NbN 膜を DC マグネットロニンスパッタ法により約 150 nm 成膜する(a)。NbN 膜は RF, DC いずれの方法でも T_c が 16 K 以上の薄膜を得ることができるが、ここでは、作製条件の許容範囲の広い DC マグネットロニンスパッタを選んでいる。NbN 膜の成膜条件は、 $P_{\text{N}2} = 2.1 \text{ mTorr}$ (分圧 10%),



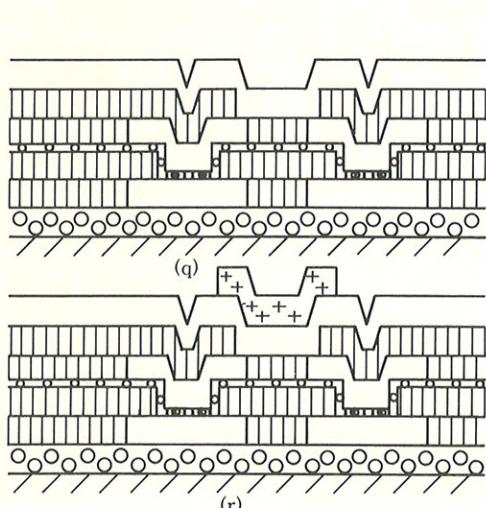


Fig. 1 The process of fabricating the dc SQUID with all NbN nanobridges.

$P_{Ar+N_2}=11$ mTorr, DC 電力は約 400 W, スパッタ速度は約 80 nm/min. である。MgO の成膜条件は、ここでは $P_{N_2}=20$ mTorr, MgO 薄膜スパッタ時の RF 電力 = 200 W, スパッタ速度は約 7 nm/min. である。基板温度は 200(± 10)°C である。MgO 薄膜の結晶配向性は、スパッタガスに N_2 ガスを用いることにより強められることを見いだしている¹⁹⁾。MgO 薄膜上にエピタキシャル成長した NbN 薄膜は、膜厚が約 10 nm でも超伝導遷移温度 T_c が約 14 K, 抵抗率 ρ_0 は 200 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 程度であった。従って(3)式から計算される磁場侵入長 λ は 240 nm 程度となる。この値は、従来報告されている値²⁰⁾より小さく、NbN 薄膜のカイネティックなインダクタンスの低減を可能にする。

次に、(b)に示すように NbN 薄膜上に下部電極のフォトレジストパターンを形成し、 $CF_4+5\%O_2$ の混合ガスを用いて、反応性イオンエッ칭 (RIE) を行い下部電極を作製する(c)。その後、(d), (e)に示すように、 SiO_2 薄膜を約 150 nm スパッタ成膜した後リフトオフし、下部電極の段差の平坦化をおこなう。 SiO_2 薄膜の堆積速度は、約 30 nm/min. であった。

(f)–(h)は、接合面積を決めるためのウインドウの作製プロセスである。接合面積は、 $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ とした。ウインドウは、(b)と同様に、まずウインドウ用のレジストパターンを作製した後(f), SiO_2 薄膜を約 150 nm スパッタ蒸着により堆積し(g), リフトオフすることにより作製する(h)。(i)は、接合の作製である。下部電極の表面を Ar ガスを用いてスパッタクリーニングした後、絶縁障壁として MgO を約 5–10 nm 堆積する。堆積速度は、約 0.7 nm/min. であった。さらに同一真空中で連続して上部電極及びインプットコイル下部電極用の NbN 薄膜を

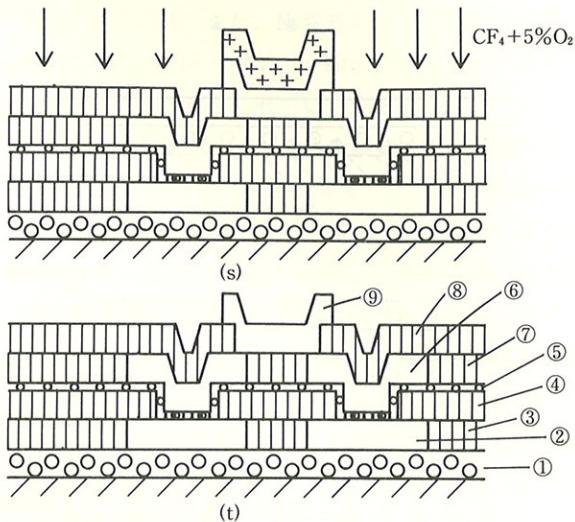


Fig. 1 The process of fabricating the dc SQUID with all NbN nanobridges.

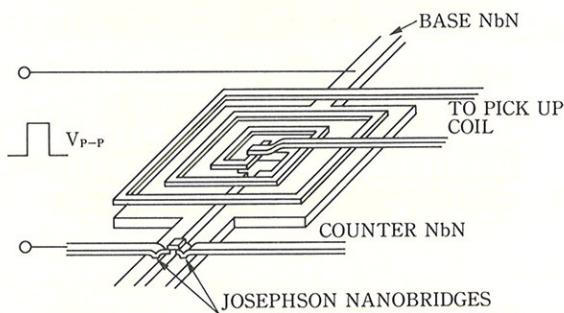


Fig. 2 The schematic of the process fabricating nanobridges by field emission.

約 300 nm 堆積する(i)。

(j)–(m)は、上部電極とインプットコイルの下部電極の作製プロセスである。フォトリソグラフィー(j)と RIE(k)により NbN 薄膜を加工した後、(e)と同じ方法で平坦化を行う(m)。その後、インプットコイル上部電極と 2 つの接合を接続するためのウインドウを作製するため(f)–(h)と同じ方法でコンタクトホールを作製する(n)–(p)。

まだ、この状態では NbN/MgO/NbN 接合の抵抗値は、1 M Ω 以上あり、超伝導電流は流れない。この素子を IC ソケットに接続し、液体 He 中に浸した後、後で述べる電界放出法を用い、液体 He 中で臨界電流の調整を片側ずつ行う(q) (Fig. 2)。この方法を用いることにより 2 つのブリッジ素子の臨界電流を同じにできる。この詳細は、後で述べる。ブリッジ素子を作製した後、インプットコイル上部電極及びブリッジ素子接続用の NbN 薄膜を成膜し(r), RIE により電極を形成することで(s)作製工程は終了する(t)。

Table. 1 に各層とその代表的な膜厚を示す。Fig. 3 に完成した dc SQUID の光学顕微鏡写真を示す。

Table 1 The typical parameters of a all NbN dc SQUID

No.	Layer	Material	Thickness (nm)
1	Substrate	Si(100)	
2	Insulator	MgO	200
3	Base Electrode	NbN	150
4	Insulator	SiO ₂	150
5	Insulator	SiO ₂	100~150
6	Barrier	MgO	7~8
7	Counter & Input Coil Electrode	NbN	300
8	Insulator	SiO ₂	300
9	Insulator	SiO ₂	150
10	Input coil & Connection Electrode	NbN	300

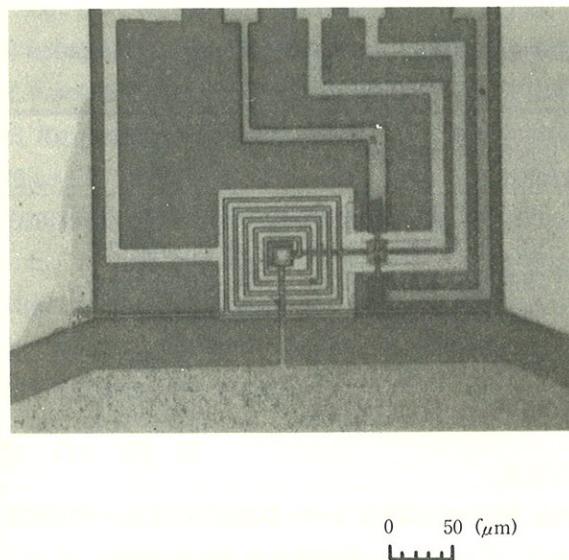
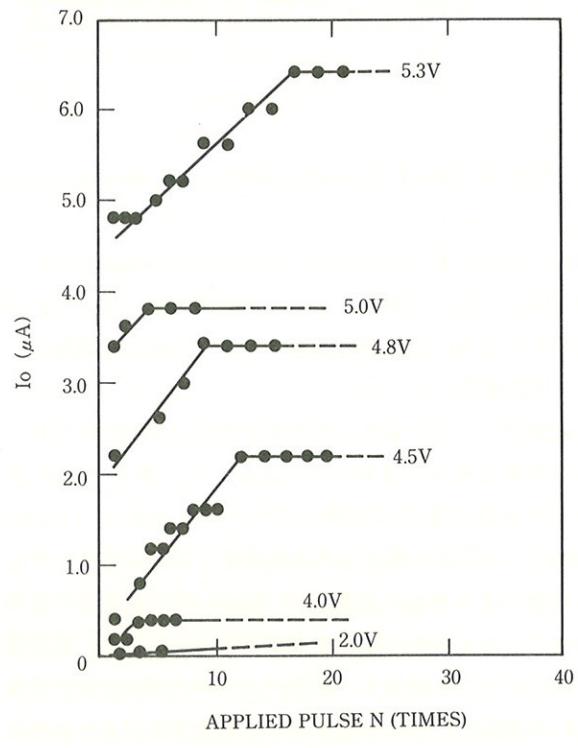


Fig. 3 A microphotograph of the dc SQUID with a five turn input coil.

4. 素子特性

Fig. 4 は、電界放出法による印加電圧パルスの電圧値、及び回数を変えたときの臨界電流値調整結果とその調整過程の典型例を示したものである。電圧パルス印加前の接合抵抗は、1 MΩ 以上の高抵抗であるが、臨界電流は、電圧を数段印加することによって一定の傾向で増加、飽和するので I_0 の値を希望の値に調整することが



(a)

Fig. 4(a) A applied voltage pulse dependence of the critical current.

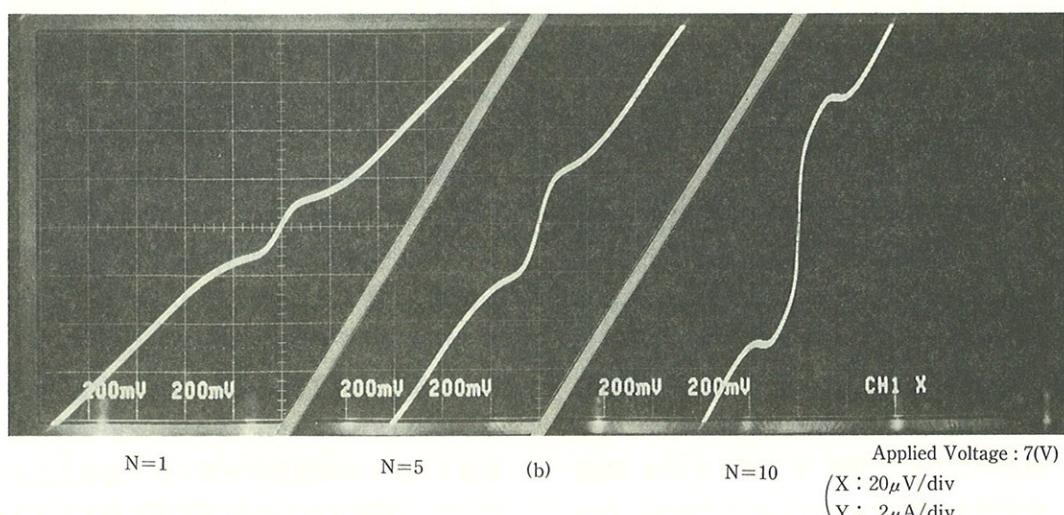


Fig. 4(b) A applied voltage pulse dependence of the critical current.

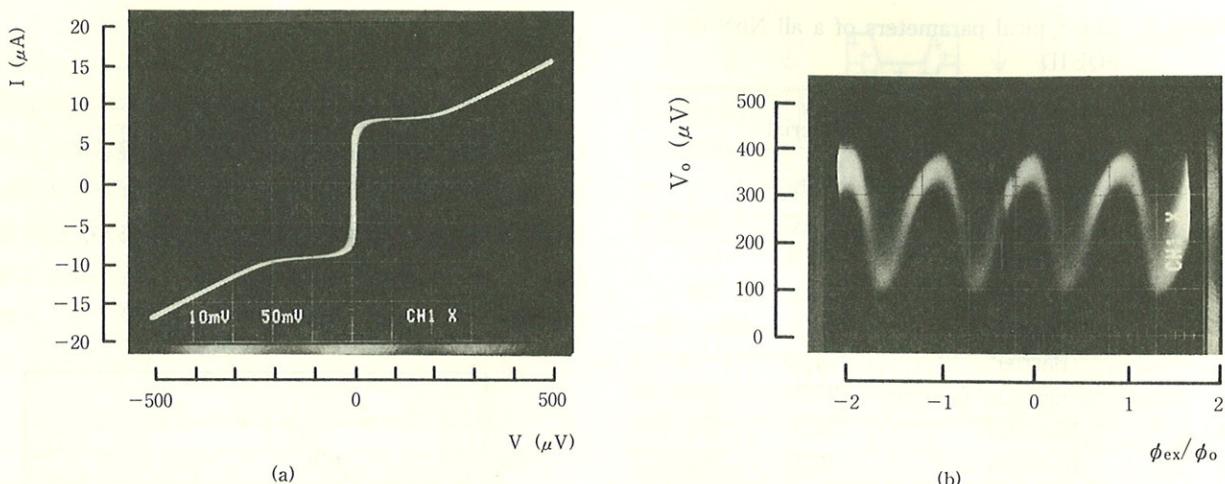


Fig. 5 The I - V characteristics and the output voltage versus the applied magnetic flux of the dc SQUIDs.

可能である。 I_0 を得るための電圧パルス値は、一般に数ボルトであるが素子によって若干異なるため、Fig. 4 に示したように臨界電流値をモニターしながら調整していく方法を取っている。

絶縁層中にどのような形でナノブリッジが形成されるかの詳細は充分には明らかではないが、接合 MgO 膜の不均質性に依存する多数のテーラーコーン (Tayler Cone)²¹⁾ の存在に伴う電界放出現象と類似のものと考えられる。すなわち、絶縁層の MgO 膜内に存在する多数のピンホール中に電極より NbN_x ($0 < x < 1$) が電界放出されることにより、導電パス（ナノブリッジ）形成される過程と、これら導電パスに発生するジュール熱によるナノブリッジ破壊の 2 つの過程が起こるものと推察される。

その結果として、臨界電流の増加、及び両過程の発生確立のバランスによる臨界電流の飽和現象が生じたものと考えられる。MgO の生成エネルギーは、NbO₂ や Nb₂O₅ の標準生成自由エネルギーに比較して十分小さいために、ナノブリッジの形成と焼損は MgO との反応ではなく印加電圧によるジュール熱で決まるものと言える。

このようにして臨界電流がある一定の値で飽和すると考えられる。この飽和現象を用いることにより dc SQUID 中の 2 つのブリッジ素子の臨界電流を容易に調整することができ、また、 I_0 はその調整電圧以下の電圧印加に対してはもはや変化しない。すなわち、調整電圧値以下のサージ電圧に対して優れた耐性をもつことがわかった。前述のごとく、NbN ナノブリッジは MgO (5–10 nm) 障壁層中に形成されていることから、 ξ_{NbN} (4.2 K)~4 nm とするとブリッジ長は、(1~2.5) ξ_{NbN} 程

Table 2 The capacitance of various Josephson junctions

Junction Structure	Junction Capacitance (pF/ μm^2)
Pb-PbO _x -Pb	~0.04 ref (22)
Nb-NbO _x -Pb	~0.1 ref (23)
NbN- α Si-NbN	~0.02 ref (24)
NbN-Al ₂ O ₃ -NbN	~0.06 ref (25)
FE-JJ	~0.0025

度となる。

Fig. 5(a) は、試作した dc SQUID の電流-電圧特性を示す。 I_0 は $8 \mu\text{A}$ 、常伝導抵抗 R_n は 40Ω である。Fig. (b) は、5 ターンの薄膜インピットコイルから磁束 ϕ_{ex} をえたときの異なるバイアス電流における V_0 - ϕ_{ex}/ϕ_0 特性である。SQUID の最大出力電圧は、約 $100 \mu\text{V}$ と大きい値を得た。SQUID のループインダクタンスは約 200 pH 、SQUID ループとインピットコイルとの相互インダクタンスは約 200 pH であった。本素子で得た大きな SQUID 出力は、dc SQUID 磁束計の磁束分解能の改善に役立つことが期待される。

電流-電圧特性上には、SQUID のループインダクタンスと素子容量間で発生すると考えられる共振ステップが観察されることがある。この共振ステップから素子容量を計算した。この結果と比較のためのトンネル素子の接合容量を併せて Table 2 に示す²²⁾⁻²⁵⁾。NbN ナノブリッジの素子容量は、例えば a-Si を障壁材として用いた場合と比較して約 1 枠以上低い値であることがわかる。従って、(2)式で示される SQUID のエネルギー感度の向上には有効と期待される。この結果は、MgO 絶縁障

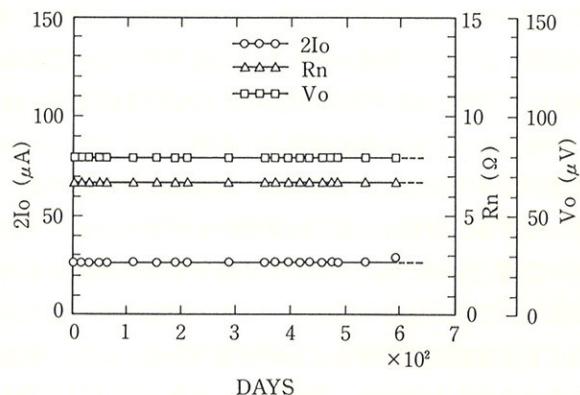


Fig. 6 The storage and recycling behaviors for a dc SQUID with all NbN nanobridges.

壁層が 5-10 nm と厚いことから妥当なものである。

Fig. 6 に dc SQUID の経時特性を示す。素子は、2 年以上室温、大気中に保管し、またその間数十回の熱サイクルを繰り返して SQUID の臨界電流 $2I_0$ 、常伝導抵抗 R_n 、出力電圧 V_0 の変化を測定した。 $2I_0$ の初期値は $28 \mu\text{A}$ 、 R_n は 6.8Ω 、 V_0 は $80 \mu\text{V}$ であったが、約 500 日、約 20 回程度の熱サイクルでの特性変化は全く見られなかった。このような優れた経時特性、熱サイクル耐性は、MgO が NbO₂ や Nb₂O₅ に較べて熱的に安定であること、およびブリッジ部が MgO により保護されていること等によると考えられる。

5. FLL 回路

SQUID は入力磁気信号に対し $1/\phi_0$ を周期とした $V_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ 特性を示すので、磁束を ϕ_0 単位で測定するこ

とができる。磁束計は、一磁束量子 ϕ_0 よりさらに小さい磁束を計測するために、Fig. 7 に示すようなプリアンプ、発振器、ロックインアンプで構成される FLL (Flux-Lock Loop) 回路が用いられる²⁶。この回路は、dc バイアスにより動作点を $V_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ 上の一点に固定し平衡を自動的に取る零点検出器の一種である。この回路により原理的に、磁束 ϕ_{ex} を $10^{-4}\phi_0$ より細かく分解することが可能である。実際には、磁束計の磁束分解能 (ϕ_{ex} の分解の限界) は FLL 回路に存在する雑音のプリアンプ入力換算値に左右されるので $\sim 10^{-3}\phi_0$ になる場合も多い。また、わずかな雑音による磁界の印加により $2I_0$ が変化し SQUID の出力電圧 V_0 が低下し SQUID の動作を不安定に、最悪の場合測定不能にさせる。これは、 I_0 が外部雑音磁束 ϕ_n によって変調され、 $I_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ 特性の他のモードに移った（トラップした）ことが原因であると考えられる。従って、安定に動作させる上でも、FLL 回路に存在する雑音を可能な限り小さくしなければならない。

FLL 回路に加わる雑音は、以下のように大別できる²⁷。

- 1) 内部雑音…… (能動、受動素子、回路等の雑音)
- 2) 外来雑音…… (人工、自然雑音)

1) の内部雑音は、FLL 回路の熱雑音 (白色雑音) であり、入力に換算され磁束分解能を決定する。この他に、発振器やロックインアンプから発せられ SQUID に干渉する高周波成分も $V_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ 特性を不安定にし、FLL 回路の白色雑音レベルを上昇させる原因になると

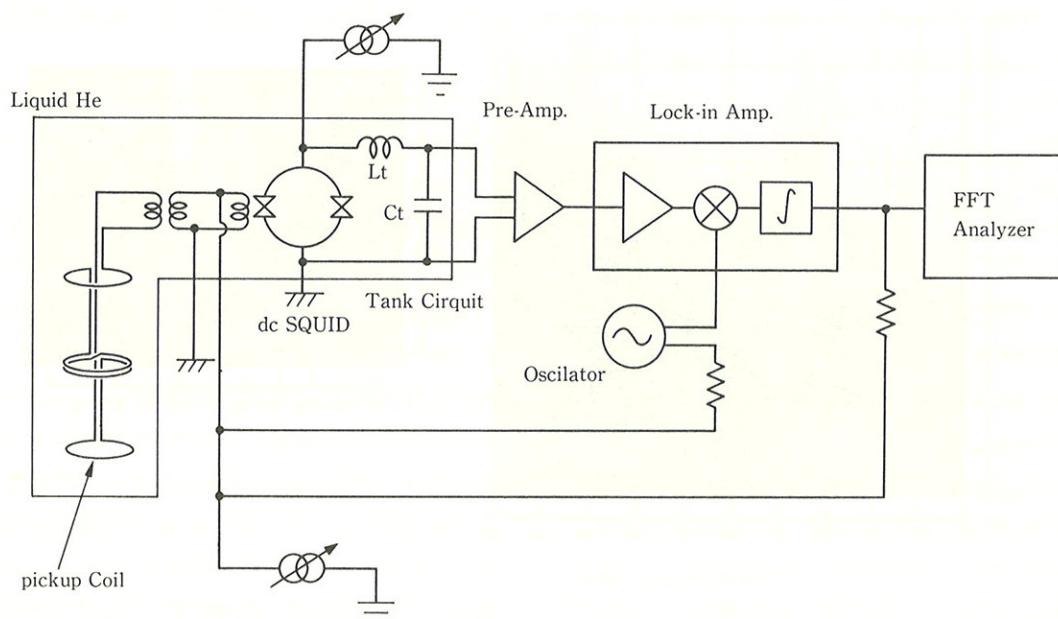


Fig. 7 The flux-lock loop dc SQUID readout scheme.

考えられる。従って、回路の白色雑音レベルを低くし、発振周波数以外の周波数成分を含まない発振器や、ロックインアンプからの変調信号の漏洩や干渉を防止する必要がある。また、低周波数領域においては $1/f$ 雜音が存在する。 $1/f$ 雜音は、周波数に逆比例して増加するので、生体信号 (dc ~ 数十kHz) を検出するときに問題になる。 $1/f$ 雜音は駆動回路、SQUID に起因するものの 2 種類に分類することができる。その原因として、前者は pn 接合中のキャリヤの拡散等によることが知られている²⁸⁾。後者は、実験的に dc バイアスのゆらぎや超伝導体内にトラップされた磁束が原因と考えられ

ているが²⁹⁾、詳細はまだ明らかではない。最近、SQUID について検討が行われつつある³⁰⁾。この問題は SQUID、駆動回路の両面から検討されなければならない問題であり今後の検討課題といえる。

2) の外来雑音は、空間雑音と伝搬雑音に分類することができる。前者は、雷、自動車のイグニッションノイズ、CRT、コンピュータ等からの輻射等が代表的なものである。これらはシールドルーム等の遮蔽を用いることによりある程度除去することが可能である。また、後者は他の機器から発生し、電源ラインを通じて FLL 回路の信号系側に伝達されるものが支配的と考えられる。具

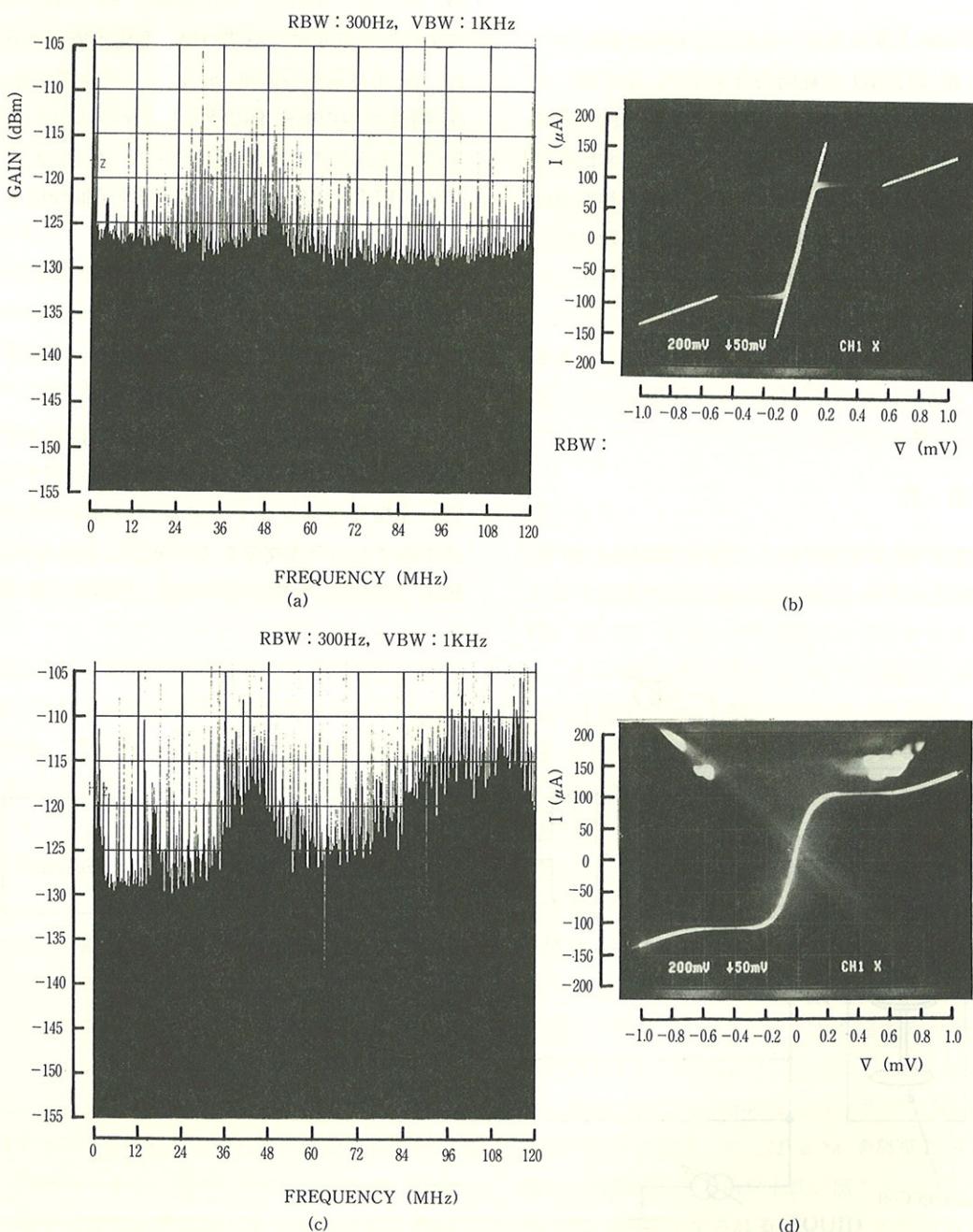


Fig. 8 The frequency spectrum of the oscillator versus I - V characteristic of the dc SQUID.

体的な例としては、モーターの火花、コンピュータやデジタル回路のクロック信号等が挙げられる³¹⁾。これらは、発振周波数以外の周波数スペクトルと同様、 $V_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ 特性を不安定にする。

いざれの場合も FLL 回路に存在する信号周波数帯域やレベルと $I-V$, $V_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ 特性との関係を知ることは雑音を低減し磁束分解能を向上するために不可欠である。そこで、著者らは FLL を構成するそれぞれの回路においてこれらの関係を検討し、磁束計を試作すると共に磁束分解能を測定した。以下、その結果について述べる。

6. 実験結果

FLL 回路において、前述したように白色雑音は、入力に換算される雑音であり、これはプリアンプの入力換算雑音電圧でほぼ決定される。そこでプリアンプには、入力換算雑音電圧値の低い LI-75A (1.2 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, NF 回路設計ブロック社製) を用いた。また、信号周波数以外の周波数スペクトルの発生源は、以下に示すものを挙げることができる。

- 1) 変調信号用発振器及びロックインアンプ内部発振器
 - 2) ロックインアンプ参照信号回路
 - 3) 商用電源波形の歪及び重畠雑音
- 発振器は SQUID に直接接続されるので、1) が磁束分解能に与える影響は最も大きいことが予想される。2) は、参照信号用回路中の発振器やコンパレータ、及びロックインアンプ最終段 LPF を通して漏洩する僅かな参照信号が信号線を通して SQUID に加わることが考えられる。

また、3) は電源部で平滑できなかったものが信号系側に漏洩する場合である。これらの点についてそれぞれ検討した。

Fig. 8 に発振スペクトルの高周波成分と $I-V$ 特性の関係を示す。(a), (c)は、正弦波、1 kHz, 40 mV_{p-p} の出力を、スペクトラムアナライザ (ADVANTECH: TR4171) を用いて解析した結果である。また、(b), (d) は、それぞれ(a), (c)の発振器で測定した $I-V$ 特性である。(c)の発振器は、(a)に較べて 1 MHz 以上のスペクトルが多く含まれていることがわかる。また、(b)に示す $I-V$ 特性は(a)に較べて I_0 のラウンディングが大きいことがわかる。これは、発振器以外の測定条件は同一であることから発振器の差、すなわち、出力信号に含まれる高周波成分が原因と考えられる。この結果から、発振器

の出力信号スペクトルは、発振周波数スペクトル以外のスペクトルを含まず、バックグラウンドも低くなければならぬことがわかる。そこで、試作した発振器は相互の干渉を防ぐために、各ブロック毎にプリント基板を独立し、それぞれに電磁シールドを施した。試作した発振器のブロック図を Fig. 9 に、また、正弦波 1 kHz, 40 mV_{p-p} の周波数スペクトル解析結果を Fig. 10 に示す。100 Hz~120 MHz の周波数帯域において、発振周波数以外のスペクトルのない発振器を得ることができた。

Fig. 11 は、電源の周波数スペクトルと $I-V$ 特性との関係を示したものである。(b), (d)の $I-V$ 特性は、それぞれ電源に(a)雑音対策としてノイズカットトランジスタ安定化電源を、(e)未対策の AC 100 V を用いて測定した結果である。周波数スペクトル解析には、HP 3561A を用いた。(a)は、50 Hz の周波数スペクトル以外観測されず、 $I-V$ 特性における I_0 のラウンディングも見られない。(c)の場合は、20 kHz 以下の周波数領域において伝搬雑音によると考えられるスペクトルが存在し、 I_0 が大きくラウンディングしていることがわかる。以上の結果から、3) の商用電源波形歪及び重畠雑音は、安定化電源と、ノイズカットトランジスタの使用が有効であることがわかった。実際の測定においては、電源ラインから混入する雑音が大きい時、(a)の対策でも充分に除去できず I_0 が変調をうけ、最悪の場合測定不能になる場合が生じる (Fig. 12)。そこで、試作した FLL 回路は、ロックインアンプに 1), 2) が比較的少ない NF 回路設計ブロック製 LI-574 を選択し、安定に動作させることを目的として、プリアンプ、ロックインアンプ、発振器を直流電源駆動に改造した。Fig. 13 に試作した直流駆動装置で測定したときの $I-V$ 特性、 $V_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ 特性を示す。図に示すように、 I_0 のラウンディングや $V_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ 特性の変動はほとんど見られない。この装置を用いることにより特性を安定に測定することが可能になった。

Fig. 14 に作製した磁束計(a)とセンサ部(b)の概観図を示す。Fig. 15 に、シールドルーム中で測定した磁束分解能の結果を示す。dc SQUID は、プリアンプの入力インピーダンスとの整合を考え LC 共振回路を用いて結合されている。dc SQUID のダイナミック抵抗 R_d は、 10Ω より、 $L_t = 154 \mu\text{H}$, $C_t = 16.3 \text{nF}$, $Q \sim 10$ とした。変調周波数は 20 kHz、時定数は 10 msec、フィードバック抵抗は 5 k Ω の時、100 Hz から 1 kHz の周波数範囲において、磁束分解能 $3 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ を得ることができた。この結果は、現在報告されている種々の dc SQUID の磁束分解能³²⁾と比較しても同程度以上の値

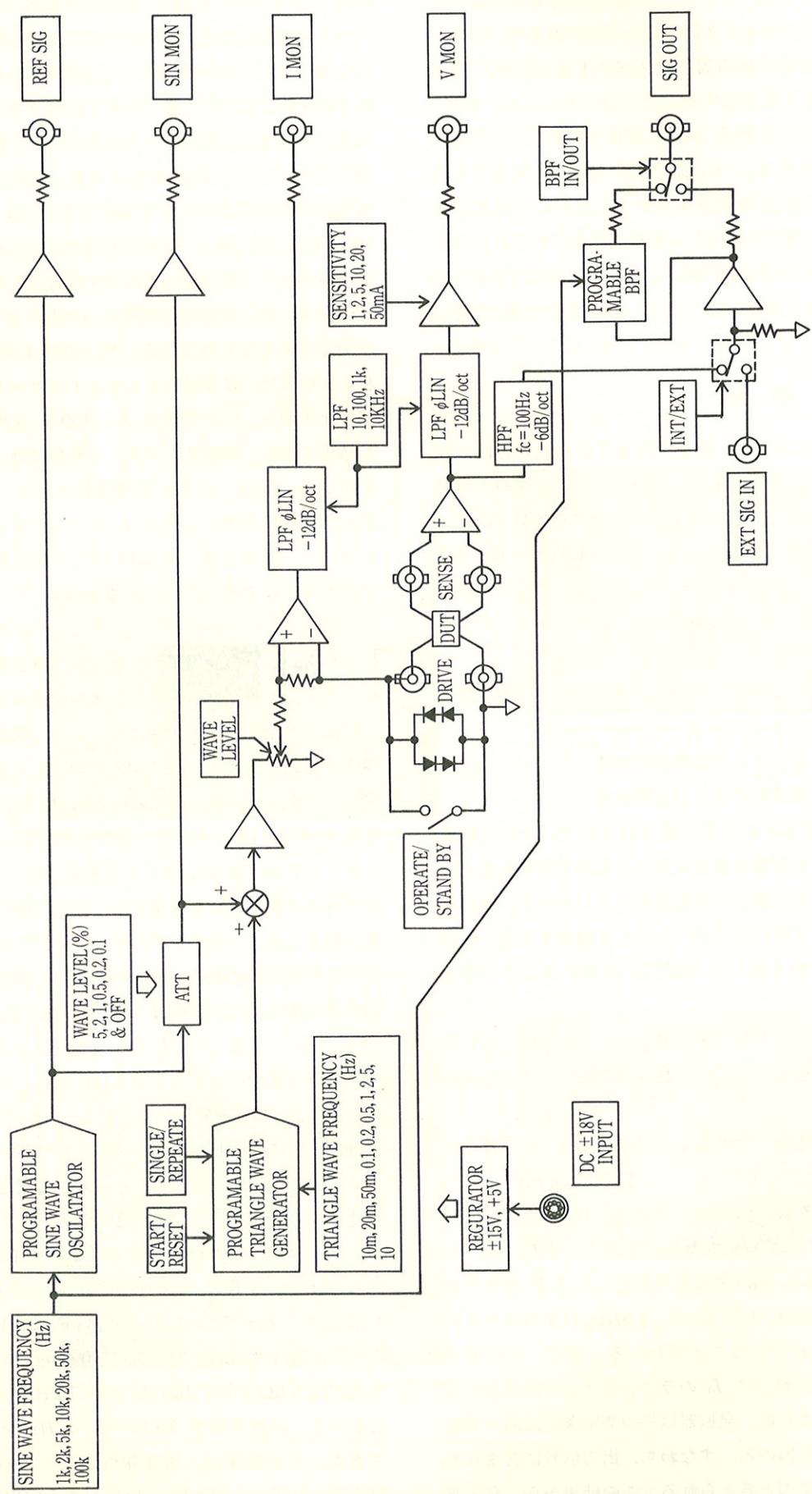


Fig. 9 The block diagram of measurement system.

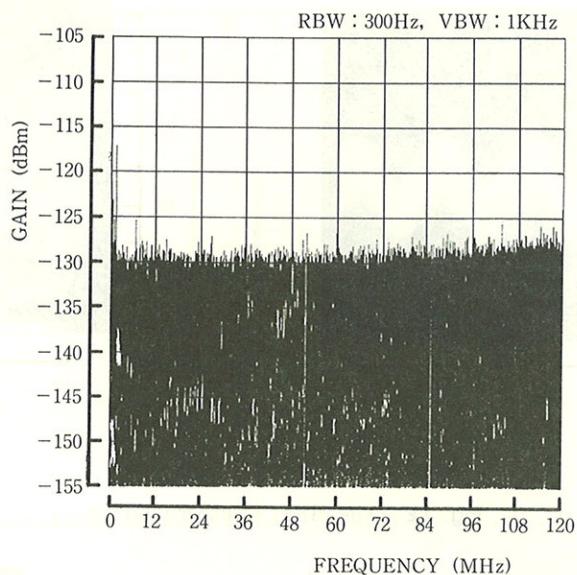
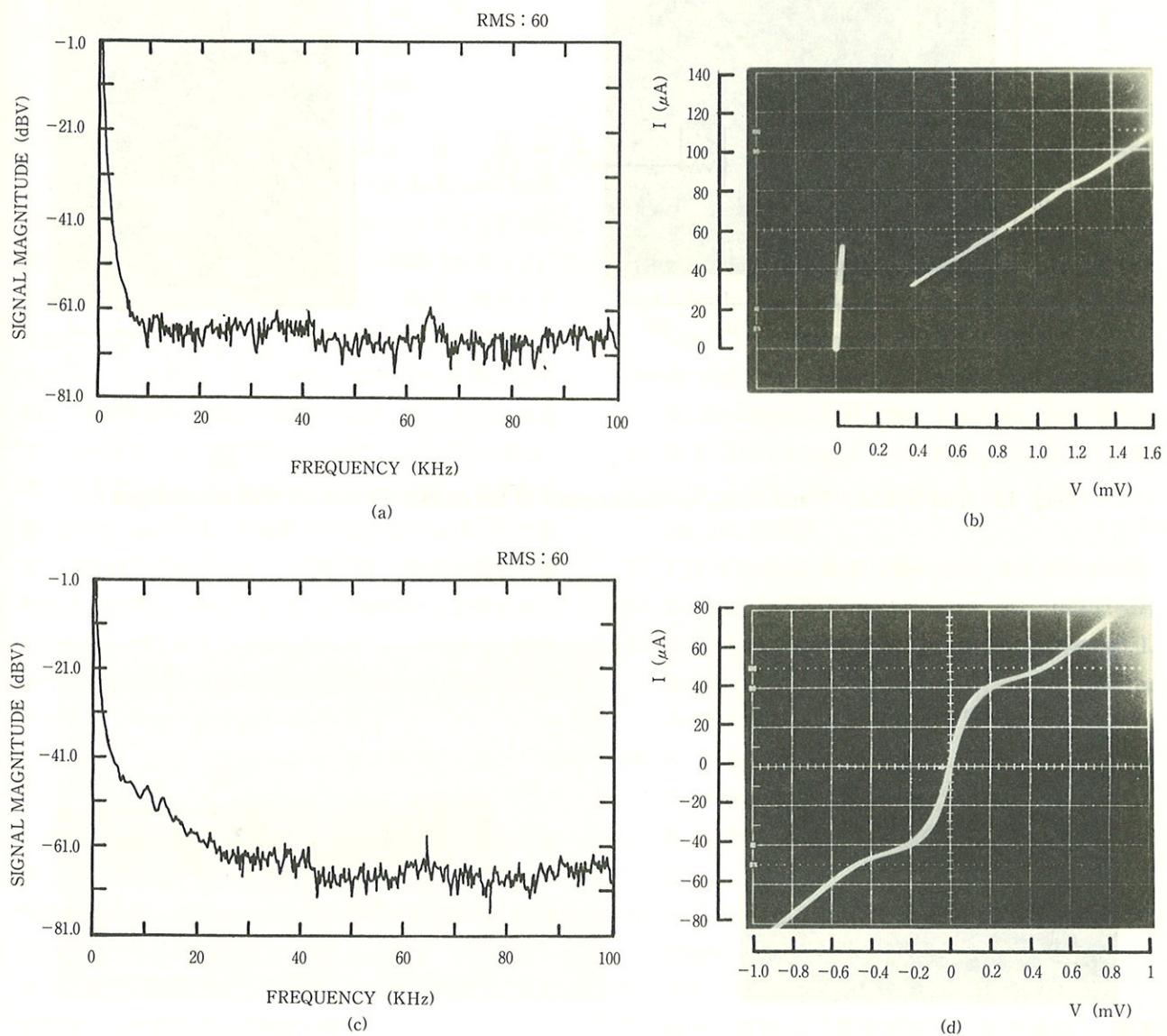


Fig. 10 The results of the frequency spectrum analysis.

Fig. 11 The frequency spectrum analysis of AC 100 V, 50 Hz versus the I - V characteristic of the dc SQUID.

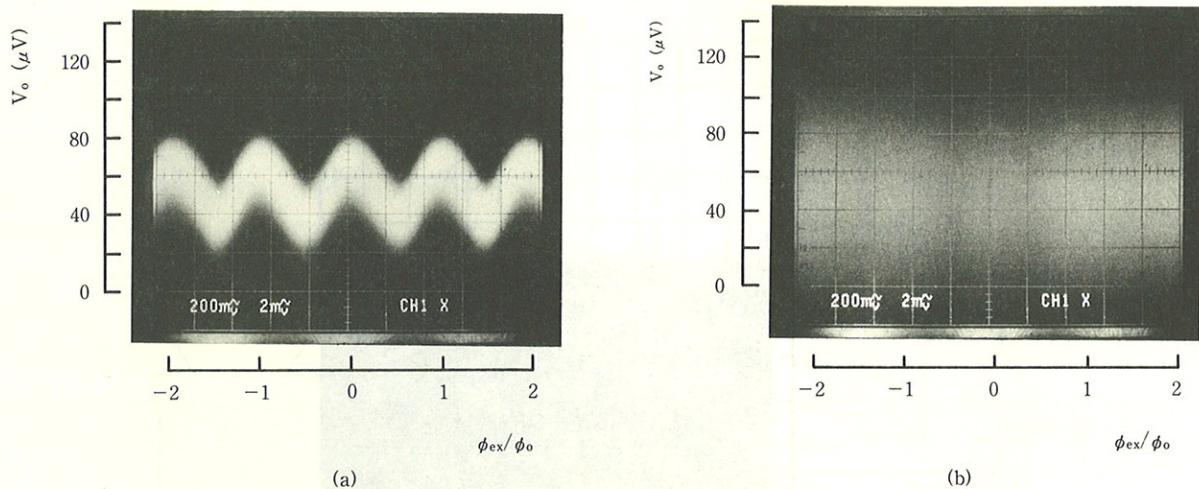


Fig. 12 The effect of external noise

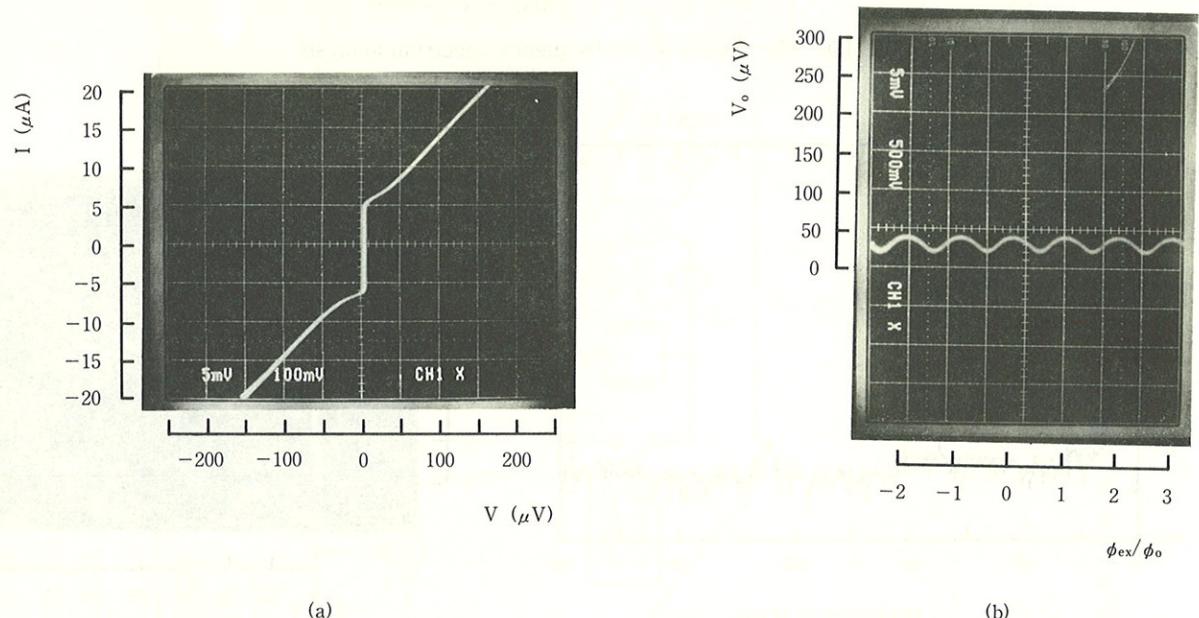
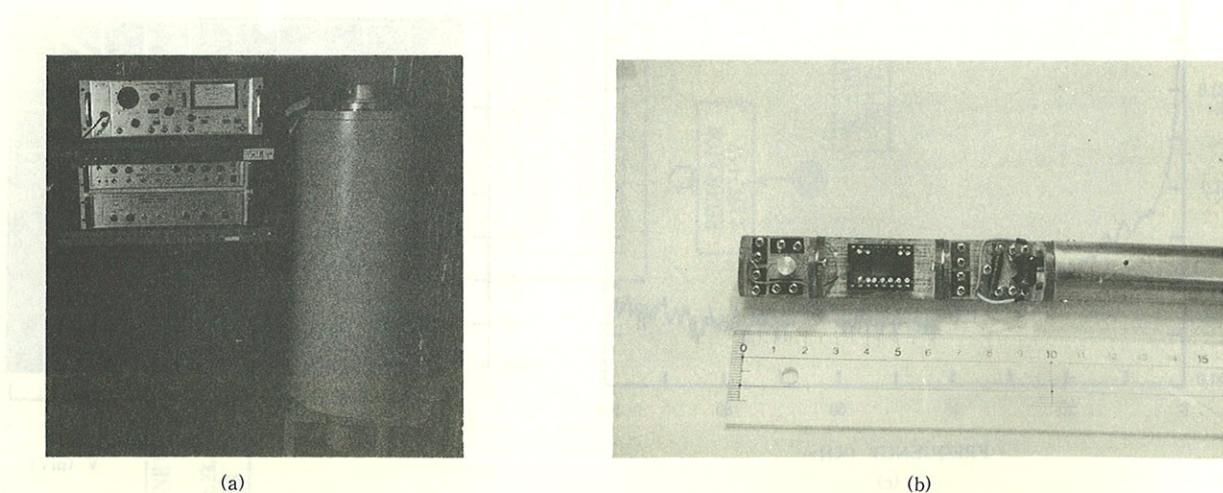
Fig. 13 The typical I - V and $V_0 - \phi_{ex}/\phi_0$ characteristic of the dc SQUID with all NbN nanobridges.

Fig. 14 The schematic of the magnetometer with all NbN nanobridges.

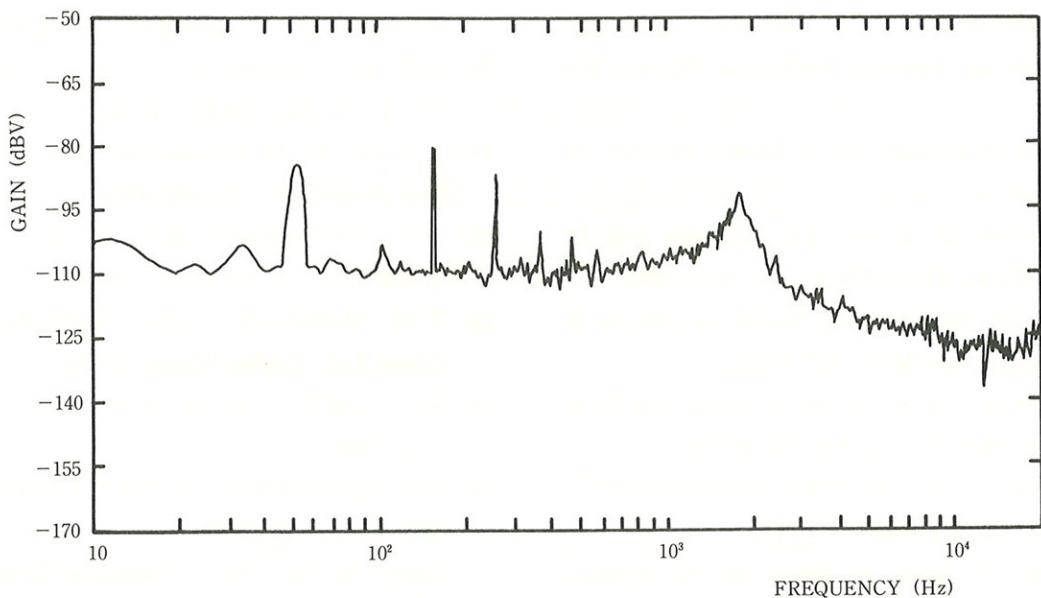


Fig. 15 All NbN dc SQUID of the flux noise spectrum.

であり、rf SQUID と比較した場合約 1 桁向上していることがわかる³³⁾。

7. 結 論

電界放出法により NbN/MgO/NbN 接合中の MgO 薄膜に、液体 He 温度で in-situ 的にナノブリッジを形成した。本方法は 1) 作製プロセスが簡略であること、2) 大きな SQUID 出力を持ち、3) 経時、熱サイクル耐性に優れていること、4) 良好的なサージ電圧耐性を有することがわかった。また、磁束計の基礎となる FLL 回路を試作し磁束分解能を測定した。1) 低雑音アンプの使用、2) 発振周波数以外のスペクトルの除去、3) 直流電源化などの低雑音化を施した結果、磁束分解能 $3 \times 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{Hz}$ を達成することができた。この値は、現在報告されている dc SQUID の磁束分解能と比較すると同等以上の値であり、rf SQUID と比較すると約 1 桁高い値であることがわかった。この試作した磁束計の低雑音化対策は磁束分解能を高めかつ、安定な動作のために有効な方法であるといえる。

8. 謝 辞

本研究を進めるにあたり、素子作製や測定方法の御指導を頂いた長岡技術科学大学電気系・山下 努教授、濱崎勝義助教授、並びに金沢工業大学電子工学科・小俣虎之助教授（前長岡技術科学大学電気系教授）に感謝致します。また、実験に協力して頂いた長岡技術科学大学大學生・入江晃亘君に感謝致します。

文 献

- 1) 例えば *Physics Today*, march 36, (1986)
- 2) M. Gurvitch and J. Kwo; *Adv. Cryog. Eng. Materials*, 30, 509 (1984)
- 3) F. Shinoki, A. Shoji, S. Kosaka S. Takada and H. Hayakawa: *Appl. Phys. Lett.*, 38, 285 (1981)
- 4) Yamashita, K. Hamasaki and T. Komata; *Adv. Cryog. Eng. Materials*, 32, 617 (1986)
A. Shoji, M. Aoyagi, S. Kosaka, F. Shinoki and H. Hayakawa; *Appl. Phys. Lett.*, 46, 1098 (1985)
- 5) D. E. McCumber; *J. Appl. Phys.*, 39, 3113 (1968)
- 6) C. D. Tesche and J. Clarke; *J. Low Temp. Phys.*, 29, 301 (1977)
- 7) J. H. Claassen; *Appl. Phys. Lett.*, 40, 839 (1982)
- 8) H. Ohta; *IEEE Trans. on Magn.*, 23, 1072 (1987)
- 9) R. B. Laibowitz, A. N. Broers, R. F. Voss, S. I. Raider and J. M. Viggiano: "SQUID '80", Walter de Gruyter & Co., Berlin. New York, 353 (1980)
- 10) G. Uehara, T. Takahashi and S. Naito; *Extended Abstracts of ISEC '87*, S6-4, 273 (1987)
K. Gamo, T. Harada, K. Arimot and S. Namba; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 19, L441 (1980)
- 11) M. S. Dilorio and M. R. Beasley; *IEEE. Trans. Magn.*, 21, 532 (1985)
- 12) 太田 浩; “応用物理”, 51, 1112 (1982)
- 13) 故川, 菅野; “電子通信学会研究報告”, SCE 87-26, 1 (1987)

- 14) A. N. Broers and R. B. Laibowitz; *AIP Conf. Proc.*, No. 44, American Institute of Physics, 289 (1978)
- 15) D. Duret, P. Bernard and D. Zenatti; *Pev. Sci. Instrum.*, 46, 474 (1975)
- 16) Y. Monfort, D. Bloyet, J. C. Villegier and D. Duret; *IEEE Trans. Magn.*, 21, 866 (1985)
- 17) D. Pascal; "SQUID '80", Walter de Gruyter & Co., Berlin. New York, 417 (1980)
- 18) T. P. Orlando, E. J. McNiff, S. Foner and M. R. Beasley; *Phys. Rev. B*, 19, 545 (1979)
- 19) 長岡, 濱崎, 山下, 小俣; "電子通信学会研究報告", SCE 86-12, 1 (1986)
- 20) S. Kubo, M. Asahi, M. Hikita and M. Igarashi; *Appl. Phys. Lett.*, 44, 258 (1984)
- 21) 桜井利夫; "応用物理", 51, 1020 (1982)
- 22) M. B. Ketchen and R. F. Voss; *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, 35, 815 (1979)
- 23) J. H. Greiner, S. Basavaiah and I. Ames; *J. Vac. Sci. Technol.*, 11, 81 (1974)
- 24) A. Shoji, F. Shinoki, S. Kosaka and H. Hayakawa; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 20, L587 (1981)
- 25) 諸橋, 篠木, 東梅林, 青柳, 早川; "電子通信学会研究報告", SCE 84-13, (1984)
- 26) J. Clarke, W. M. Goubau and M. B. Ketchen; *J. Low Temp. Phys.*, 25, 99 (1976)
- 27) "ノイズ対策最新技術"編集委員会編; "ノイズ対策最新技術", 総合技術出版 (1986)
- 28) T. H. Wilmhurst; "Signal Recovery", Adam Hilger Ltd., Techno House. (1985)
- 29) 原 宏編著; "超伝導エレクトロニクス", オーム社 (1985)
- 30) 又地, 松田, 栗城; "電子通信学会研究報告", SCE 87-47, 13 (1987)
- 31) Henry. W. Ott; "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", Bell Telephone Laboratories Incorporated (1976)
- 32) 松田, 又地, 栗城; "電子通信学会研究報告", SCE 87-43, 19 (1987)
- 33) 電気学会クライオエレクトロニクス常置専門委員会編; "ジョセフソン効果〈基礎と応用〉", 電気学会 (1978)



著　　者
氏名　長岡 史郎
Shiro NAGAOKA
入社　昭和58年4月4日
所属　研究本部新材料研究所
第四研究室
副主任研究員



著　　者
氏名　向後 雅則
Masanori KHOGO
入社　昭和61年4月1日
所属　研究本部新材料研究所
第四研究室



著　　者
氏名　近藤 昭夫
Akio KONDO
入社　昭和51年4月16日
所属　研究本部新材料研究所
第四研究室
第四研究室長