

大学に現われた“Mr. SQUID”*

M. J. Burns, M. S. Colclough, R. W. Simon and

コンダクタス社

J. Clarke

カリフォルニア大学物理学科及び

ローレンス・バークレイ研究所材料科学部教授

はじめに

従来、超電導体が液体ヘリウムを必要とした時には非現実的であった状況の下でも、高温超電導現象が発見されたことによって、液体窒素の中で普通に使用することができるようになったため超電導量子干渉素子 (SQUID)¹⁾を始め、その他種々の超電導素子の使用が容易になった。特に、大学は勿論、高校においてさえも学生用の教材として SQUID を使う機会が大いに生じてきた。そこで我々は、特別にこの目的のための“Mr. SQUID”を設計した。この“Mr. SQUID”は、使いやすく、かつ壊れにくいと同時に、多くの教育機関の手のとどく程度の安い価格である。学生は、その直流 SQUID の基本的な機能である電圧—電流特性や、外部磁場によるその特性の周期的な変動を、自ら観察することができる。より高度な実験では、SQUID の抵抗転移や交流ジョセフソン効果を観察できる。さらに、学生がこの“Mr. SQUID”を自家製の磁束固定ループ (flux-locked loop) に組み込んで電圧計を作り、超電導体の磁気転移を観察することができる。然し、この“Mr. SQUID”は現時点で技術的に可能な最高の感度を目指したものではなく、また特に、超電導入力コイルや低ノイズ電子回路を装備したものではないことを強調しなければならない。このような技術的用途に不可欠な精度の向上を織り込んでしまったのでは、このシステムの価格は、大多数の教育機関では手が出ない程高いものになってしまったであろう。

“Mr. SQUID”は、密閉されて磁気遮蔽されたプローブに装着された SQUID のチップと、この SQUID の操作に必要な回路を内蔵した電池駆動の電子回路パッケージと、この二つを結ぶケーブルと、液体窒素を入れるデュワーを含む完結したシステムである (図 1)。

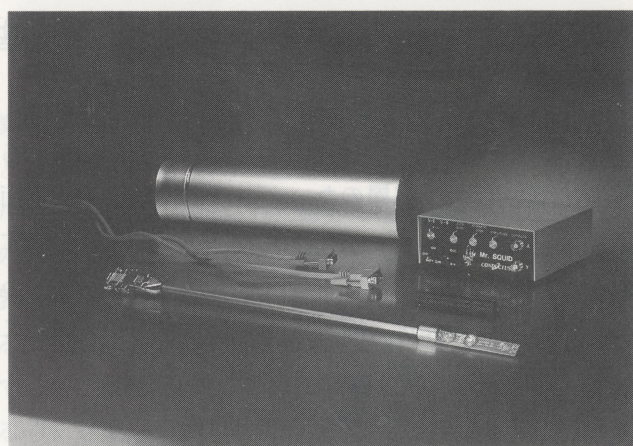


図1 プローブ、電子回路パッケージ、接続ケーブル、デュワーからなる“Mr. SQUID”。

ユーザー用引書には SQUID 関連技術についての背景説明，“Mr. SQUID”の取扱いの詳細が示され、それに一連の高度な実験について記述されている。

“Mr. SQUID”内蔵の SQUID 素子

高温超電導体の薄膜で作られた最初の能動素子²⁾は、直流 SQUID であった。二つのジョセフソン接合が、任意の方向に配向した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) の結晶粒子間の境界で作られた。短期間の内に米国、日本、欧州の多くのグループが、類似の粒界を持った SQUID の作製に成功した。この種の初期の高温超電導素子の歩どまりは大したものではなかったが、それでもいくつかの SQUID は、4 半世紀にわたって臨界温度の低い素子で観察されてきた古典的な特性を示した。その後、より再現性の高いジョセフソン接合を開発するための努力が世界中でなされ、多くの形の素子が作製された。いくつかの素子は、例えば基板の段³⁾を横切って蒸着された膜、またはバイクリスタルの基板⁴⁾の上に蒸着された膜で作られた、より制御された粒界接合を

* 高温超電導 YBCO 薄膜を応用した超電導量子干渉素子のニックネーム (編集部注)

持ったものであった。バイクリスタルの基板は、その基板を両半分に切断した上、YBCOの膜のエピタキシャルな成長を模した所定の配向角度で相互に溶着したものである。コンダクタス社が開発したジョセフソン接合を作るためのこのプロセスはウェーハ規模の大きさの集積度まで拡張することが本質的に可能であり、また良好な性能の特性を持った素子が作られるものである。我々は、このような接合を、この開発の可能性を示唆したバイクリスタル粒界接合になぞらえてバイエピタキシャル粒界接合と呼んでいる。

標準的なフォトリソグラフィのプロセスを用いたこのバイエピタキシャルプロセスは、多層集積回路に容易に組み込むことのできる基本的にはプレナーな構造を作り出す。その粒界接合は下敷きの“シード層”の端部に形成される。特定の一つのシード層の上でエピタキシャルに成長するYBCOの膜は、シード層のないところの膜とは異った面内結晶配向性を持つ。シード層とYBCOを適切な形にすることにより、YBCO膜がシード層の端を横切るところに、YBCO膜の粒界を、即ちジョセフソン接合を作ることになる。緩衝層の膜はシード層と基板層上において、45°の粒界で分けられた二つの異なった方向に成長する。これはシード層と基板層に対する緩衝層膜の異ったエピタキシャル関係によるものである。一番上のYBCOの膜はどこでもエピタキシャルに成長し、それによって緩衝層内に粒界を再生成する(図2)。“Mr. SQUID”のチップ内にあるようなSQUID素子はYBCO層の旧来のフォトリソグラフィを用いた形状加工によって定められる。このプロセスは既に発表され、⁵⁾ その一般構造に対しては米国の特許が与えられている。

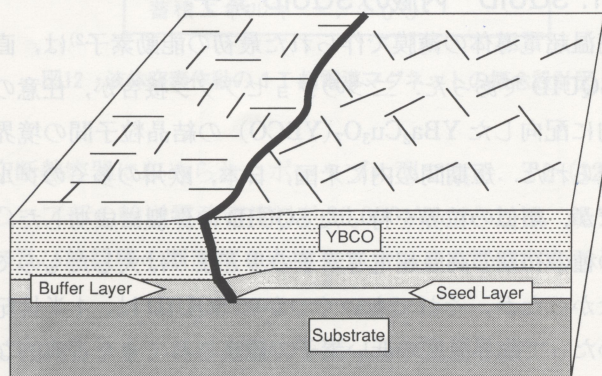


図2 バイエピタキシャル・ジョセフソン接合の断面図—粒界を構成する基板シード、および緩衝層を示す。

SQUID のチップ

直流 SQUID は、その一例がバイエピタキシャル接合で

あるような弱結合によって2カ所で切断された1個の超電導ワッシャでできている。電気的な結線は、その弱結合の反対側で行われている。“Mr. SQUID”の角形のワッシャの形状(図3)には、中央の孔からその弱結合が存在する外側へと走る一本のスリットがついている。シード層の端はこのスリットと交叉し、二つのバイエピタキシャル接合を規定している。この形状によって、超電導ワッシャの上に据えられた平らな螺旋形のコイルによって発生する磁束が、ワッシャの材料の超電導特性によってワッシャ中央の孔を通り、それによって SQUID と強く結合するようにしている。“Mr. SQUID”の場合には超電導ワッシャと電氣的に絶縁された2個の一回巻のコイルが超電導上に形成されている。このコイルは金属性の銀でできており、超電導ではない。1個のコイルは“Mr. SQUID”の制御用電子回路に結線され(変調コイル)、別の1個は使用者が外部信号用(結合コイル)に使えるようになっている。

“Mr. SQUID”の角形超電導ワッシャの大きさは $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ であり、中央に $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ の孔が設けられている。 $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ のチップには SQUID が2個入っており、テスト中に良い方の1個を選んでこれをプローブ内の配線に結ぶようになっている。

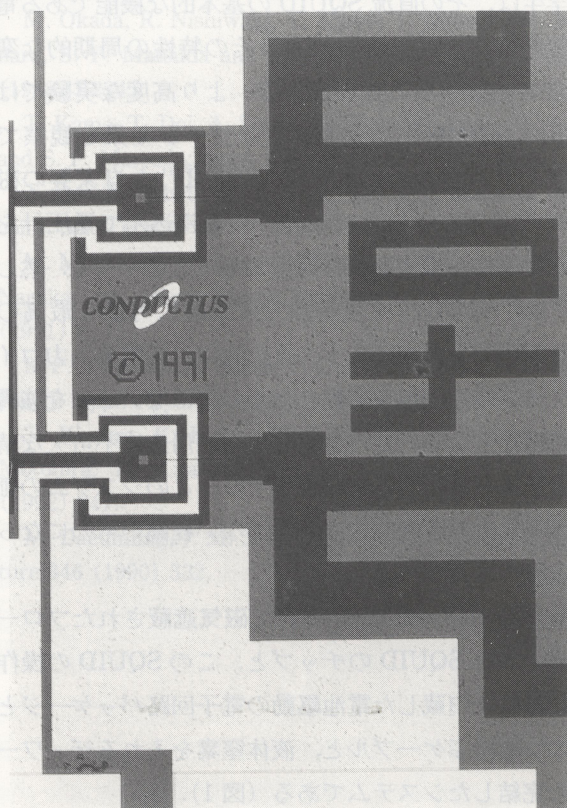


図3 “Mr. SQUID”のチップ—銀製の変調コイルと結合コイルをもつ2個のSQUIDを示す。

プローブとデューワー

超低温用プローブには、YBCO SQUID のチップと、配線と着脱式の磁気遮蔽と高周波フィルターが格納される。SQUID のチップ自体は特別あつらえのプリント回路基板に取り付けられ、結線は、リボンの結線によっている。チップと基板の周辺部は熱サイクルの繰り返し中にチップを保護し、かつ完全に見ることができるよう透明な窓で密封されている。組み立てたプローブ端の全容を図4に示す。信号は金属製のプローブ棒を介してよじられた一対の銅線を通して伝えられ、着脱式のパイ型フィルターを装着するための金属製の9本のピンがついたコネクタまで達する。フィルターと磁気遮蔽によって外部の高周波との干渉が殆ど除去される。このような遮蔽がない場合には、コードレス電話のような周辺の高周波源のために SQUID の性能は大幅に低下する。静電気の放電によるスパイクやその他の高周波源は、プローブの中の交叉するダイオードで減衰される。磁気遮蔽は、プローブの一番下の部分を取り囲んでいる着脱式のミューメタルシリンダでなされている。金属棒に包まれたガラス製のデューワーは、1リッターの液体窒素を殆ど24時間保持することができる。

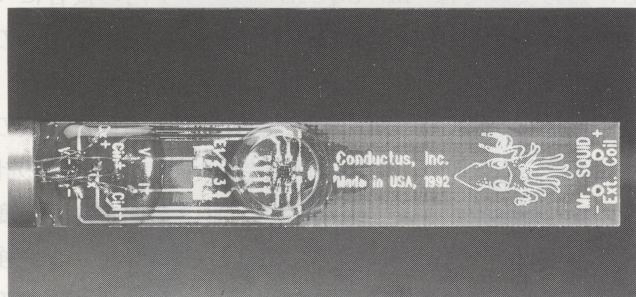


図4 “Mr. SQUID” のプローブ端回路基板に結線された密封した SQUID のチップを示す。

電子回路のパッケージ

電子制御器は使用者が SQUID の特性を観察し、また計測することが出来るようにするものであり、かつ内蔵型で、電池で駆動するものである。その出力はオシロスコープか X-Y 記録計に表示される。

電子制御器には、3個の電源と1個の電圧増幅器と共に、これらの回路を相互に接続するための1個の多極モードスイッチが入っている。この電圧増幅器は、作動入力型で直流から2.8 kHz までの帯域で10,000の利得を持つ。入力のノイズは $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であり、SQUID の $1 \mu\text{V}$ の変調深さがオシロスコープ上で容易に読み取れる程度に十分に小さいものである。

制御板上のノブで選定される2個の定電流源は、SQUID へのバイアス電流と、“Mr. SQUID” の入力コイル内の電流を供給し、それによって一定の磁束をかけている。第3番目の電源は、三角波発振器によって、オシログラフ表示用には15 Hz で、また X-Y 記録計用には0.08 Hz で駆動され、その振幅は正面の盤で使用者によって調整できる。モードスイッチの設定位置によって変動電流が SQUID のバイアス端子か入力コイルのいずれかに加えられ、従って、電流—電圧特性か、電圧—磁束特性のいずれかが表示される。

基礎実験

“Mr. SQUID” を操作するには、まずプローブを液体窒素中で冷却し、次に制御箱に接続する。第一に観察することは、図5に示された電圧—電流特性曲線と、変調コイルに電流を流して得られた磁界による電圧—電流特性曲線の変調である。この両者の観察によって、二つの接合の臨界電流 $2I_c$ と、高電流での抵抗 $R_N/2$ と $I_c R_N$ の積が決まる。これ等の典型的な数値は、それぞれ $10 \mu\text{A}$, 1Ω , $5 \mu\text{V}$ である。SQUID 内に単位磁束量子 $\Phi_0 = h/2e$ を発生させるのに必要な変調コイルの電流 I_m は、コイルと SQUID の間に約75 pH の相互インダクタンス $M = \Phi_0/I_m$ を与える。コイルは強く結合されたひと巻で出来ているので、より近似として、 M は SQUID のインダクタンス L と同じである。

2番目の操作モードでは SQUID を横切って生ずる電圧と磁束との関係を表示する。これは静的なバイアス電流を調整することによって行なわれ、典型的な数値として ΔV の最大値 $1 \sim 2 \mu\text{V}$ (peak to peak) が得られる。(図6)。77K における大部分の他の高臨界温度 SQUID と共

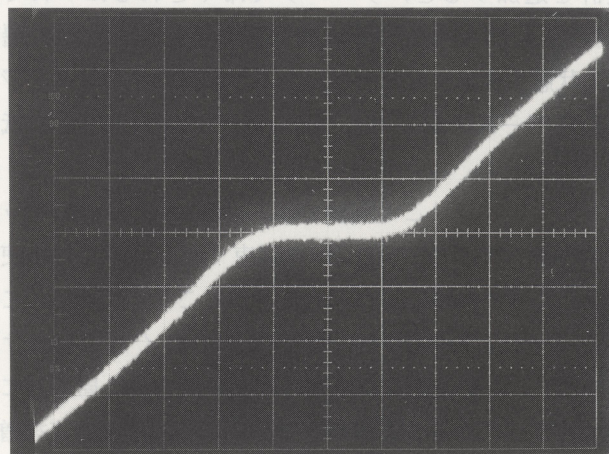


図5 “Mr. SQUID” の電子回路パッケージから出力された電圧—電流特性曲線

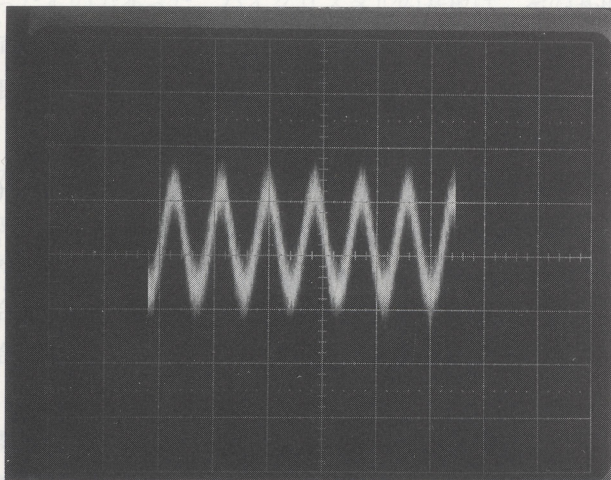


図6 “Mr. SQUID”の電子回路パッケージから出力された電圧—磁束特性曲線，典型的な変調深さは1 μV より大きい。

通なことであるが、 ΔV は理論的に予測される数値より若干低目である。これは恐らくジョセフソン接合の電流一位相関係の非正弦曲線の性質によるものである。

応 用 実 験

ユーザー用ハンドブックには、“Mr. SQUID”を使って出来るより高度な実験について詳細に述べられている。このような実験は種々の超電導現象を実証し、また SQUID がどのように実用化されるかを示すものである。応用実験は、別の色々な機器を必要とし、またしばしば簡単な電子回路を組立てる必要がある。この種の実験をこなすために必要な試みと実験に関する機能は十分に大学の上級学生実験課程に含めて良いものである。これ等の実験について以下に簡単に記述する。

抵抗と温度 “Mr. SQUID”のプロープにダイオードの温度計を追加すると、プロープで冷やされるにつれて、SQUID チップ内の YBCO 超電導体が超電導状態に遷移する状態を観察することが出来る。制御回路パッケージからの電圧—電流特性曲線の出力が YBCO 超電導体の抵抗の変化を示す。

磁束固定ループ この実験では、“Mr. SQUID”のチップ上の外部コイルで、SQUID を磁束で固定するために使えるようにする簡単な一つの回路を作ることができる。このモードでは、SQUID に一定の電流でバイアスをかけ、SQUID に生ずる電圧が加えられた磁束と共に周期的に変化するようにすることができる。次にこの電圧応答を増幅し、その結果の信号を用いて、外部コイルに電流を流すことができる。このシステムは、コイルを流れる電流が、計

測されるべき未知の磁束と反対の極性を持った磁束を発生させるように組み立てられる。若しこのシステムを正しく組み立てれば、SQUID はゼロ磁束の状態に固定されるであろう。磁束が固定された状態では未知の磁束の測定は、フィードバックされる電流を計測するだけで行なわれる。この“磁束固定ループ”と呼ばれる手段が SQUID を操作するために通常何時も使われている。ユーザー用ハンドブックに概略説明されているこの簡単な回路によって、約 $0.01 \Phi_0 / \sqrt{\text{Hz}}$ の感度を得ることができる。

電 圧 計 磁束が固定された SQUID は、SQUID ピコ電圧計に絶対必要な要素である。“Mr. SQUID”の銀製の外部コイルの抵抗が電圧分析能力の限界値を決めているが、これによってマイクロボルト (10^{-6}) からナノボルト (10^{-9}) の範囲の信号の計測が可能である。この計測のための原理は、最も高感度の計器で用いられている原理そのものである。

交流ジョセフソン効果 一定の電圧 V がジョセフソン接合にあると、そこを流れる電流は V/Φ_0 の周期で変動する。この現象は外部の高周波振動する電界中に電流バイアスをかけた接合を置くことによって観察することができる。この実験では“Mr. SQUID”のチップ内の接合にマイクロ波を放射して、電圧—電流特性曲線における特性の段階的变化を観察することができる。

超電導体の誘導転移 SQUID は世界で最も敏感な磁束の検知器であるが故に、材料の磁気特性を測定するための計器に広く使われている。この実験では、温度が臨界温度 T_c 以下に下がるにつれて、印加された磁場をますます強くしたときの YBCO の膜の磁気遮蔽する強さを測定することができる。

高臨界温度 SQUID 技術の将来性

“Mr. SQUID”は高 T_c SQUID 技術を取り込んだ最初の商品化されたシステムである。簡単に使用出来、また教育市場では受け入れられる程度の価格にするために、このシステムの性能はすでに確立された SQUID 関連技術ととても競争し得る程のものにはなっていない。コンダクタス社を始め、その他メーカーの今後の高 T_c SQUID 製品は、外部との便利な連結法やもっとはるかに低ノイズの複雑な電子技術のような重要な改良点を取り入れたものになるであろう。

高 T_c SQUID に関する一つの問題は、超電導体の高温処理に伴い、超電導電気接続をとることの困難さにある。この困難を回避する一つの方法は、外部回路を磁氣的に接

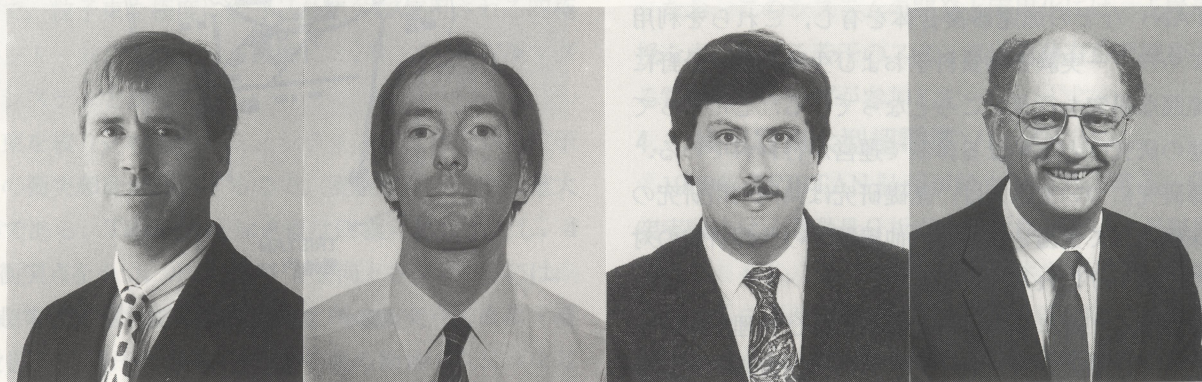
続することである。この方法では、外部回路内のコイルを SQUID の超電導ワッシャに対して設置するか、または別の一つのコイルに対して設置してそのコイルを SQUID に連結する。外部コイルの電流によって発生する磁束は、“Mr. SQUID” の入力コイルが、SQUID の超電導ワッシャに強く連結されているのと同じ方法で、適切な形をとった超電導体によって、高効率で SQUID と結合するように駆動される。

“Mr. SQUID” のユニットは高感度の測定用途を目的としたものではないが、“Mr. SQUID” の基礎になっている高 T_c SQUID 技術は、高性能の磁気センサを可能にするものである。コンダクタス社が最終的に開発しつつあるシステムは、磁界の計測用に適した大きいピックアップ・コイル、あるいは特別設計のより大きなコイルに磁氣的に結合させるのに適した大きいピックアップ・コイルを備えた高 T_c SQUID を用いたものになるであろう。このシステムは、“Mr. SQUID” の電子回路よりもはるかに低いノイ

ズしか発生しない磁束固定ループの電子制御器を持ったものになるであろう。このような素子の用途には、非破壊式評価法や心磁図計や地球物理用のセンサがある。“Mr. SQUID” は高 T_c SQUID 技術が可能とする一連の多くの製品の最初のプロトタイプと言える。

参 考 文 献

- 1) R. H. Koch, C. P. Umbach, G. J. Clark, P. Chaudhari and R. B. Laibowitz: Appl. Phys. Lett. **51** (1987) 200.
- 2) For a general review of SQUIDS, for example, J. Clarke: Proc. IEEE **77** (1989) 1208.
- 3) R. W. Simon, J. B. Bulman, J. F. Burch, S. B. Coons, K. P. Daly, W. D. Dozier, R. Hu. A. E. Lee, J. A. Luine, C. E. Platt, S. M. Schwarzbek, M. S. Wire and M. J. Zani: IEEE Trans. Magn. MAG-27 (1991) 3209.
- 4) D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart and F. K. LeGoues: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 219.
- 5) K. Char, M. S. Colclough, S. M. Garrison, N. Newman and G. Zaharchuk: Appl. Phys. Lett. (1991) 733.



左から筆者の M. J. Burns, M. S. Colclough, R. W. Simon and J. Clarke