

■S2 群 (ナノ・量子・バイオ) -2 編 (ナノエレクトロニクス)

6 章 超伝導ナノエレクトロニクス

(執筆者：日高睦夫) [2008 年 12 月 受領]

■概要■

超伝導は特定の物質で臨界温度 (T_c) 以下で起こる特異な現象である。超伝導の大きな特徴は、直流抵抗ゼロと内部から磁力線が排除される完全反磁性 (マイスナー効果) である。ほかにも磁束が離散値をもつ磁束の量子化や、弱く結合した超伝導体間の波動関数位相差により電圧降下なしに電流が流れるジョセフソン効果などのほかの物質では見られないユニークな特徴があり、これらの特徴を利用したエレクトロニクスデバイスの研究が進められている。一方、これらの特徴が現れるのは T_c 以下の温度であり、冷却のためのコストを補償するために、ほかの方法では得ることができない究極の性能が超伝導デバイスには求められている。

超伝導デバイスは受動デバイスと能動デバイスに大別できる。受動デバイスでは通信用フィルタと超伝導移動検出器 TES (Transition Edge Sensor) などが知られている。通信用フィルタは超伝導体の低導体損を利用したデバイスであり、従来方法に比べて極めて急峻な透過特性が得られる。冷凍機で冷却された高温超伝導フィルタが携帯電話基地局用に実用化されており、アメリカや中国で数千台が実際のネットワークに使用されている。TES は半導体検出器をはるかに超える高いエネルギー分解能が特徴であり、X 線、 γ 線、光子などの検出においてほかの追従を許さない性能が得られている。また、光子一個の検出が可能な超伝導単一光子検出器 SSPD も量子通信用検出器として注目されている。

ジョセフソン素子 (JJ) はジョセフソン効果を起こすデバイスであり、通常 1 nm 程度のトンネルバリアを介して二つの超伝導体が結合された構造をしている。JJ を用いる能動デバイスでは、デジタル回路、SQUID (Superconductive Quantum Interference Device)、高周波検出器、電圧標準、量子コンピュータなどの応用が研究されている。デジタル回路では、コンピュータやルータ用スイッチを目指した超高速かつ低消費電力の SFQ (Single Flux Quantum) 回路研究が行われており、1 万数千個の JJ を用いた SFQ 回路が数十 GHz のクロックで動作している。また、高速や高精度を特徴とするアナログ-デジタル変換器 (ADC) の開発も行われている。SQUID は高感度の磁束計であり、心磁計、脳磁計や非破壊検査、免疫検査、地質検査、SQUID 顕微鏡など様々な応用に向けた研究が進められており、一部は実用化されている。高周波検出器では数百 GHz から数 THz 領域の観察を可能にするミキサが電波天文やテラヘルツ応用などの分野で開発されている。交流ジョセフソン効果を用いた電圧標準は、極めて精度の高い周波数-電圧変換器であり、直流電圧標準は電圧の国家標準として認定されている。現在は任意波形を生成できる交流ジョセフソン電圧標準に向けた開発が行われている。従来のノイマン型コンピュータとは全く異なるアルゴリズムで計算を行う量子コンピュータ用デバイスとしても、巨視的なスケールで量子効果が現れる超伝導デバイスは有望である。

■S2 群-2 編-6 章

6-1 材料・プロセス技術

6-1-1 高温

(執筆者：安達成司) [2008年12月 受領]

本項では銅酸化物系超伝導体を対象として、ナノエレクトロニクスのデバイスに適用する際に重要となる材料特性やプロセス技術について概説する。

(1) 材料特性

高温超伝導体は二次元的に広がった CuO_2 面とそれを隔てるブロック層が交互に積み重なった結晶構造を有する層状物質である。超伝導発現の舞台を担っているのは CuO_2 面であり、ブロック層は CuO_2 面にキャリアを注入する役割を担っている。結晶構造に起因して超伝導特性に異方性が現れる。ブロック層の種類によって Hg 系、Tl 系、Bi 系など様々な物質群が発見されているが、実用的な電子デバイスを考えた場合、現在では良質な薄膜が作製できかつ異方性の小さい YBCO 系 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$: Y は希土類元素で置き換えることが可能) 超伝導体に収束している。 CuO_2 面に平行な方向 (a - b 軸) のコヒーレンス長は 2 nm 程度であり、Nb に比べて一桁短い。垂直な方向 (c 軸) では更に短く、最も長い YBCO 系でも 0.2 nm 程度しかない。YBCO は水分や CO_2 に曝されると化学的に劣化することが知られている。界面制御や微細加工を行う際の取り扱いには注意を要する。

(2) 薄膜形成技術

化学気相法、スパッタリング法、レーザ蒸着法など様々な手法による薄膜化が報告されており、目的に応じて適切な成膜手法が選ばれる。基本は Cu の価数が +2 となる強酸化条件下で、所望の超伝導体組成を基板上に堆積させることである。YBCO 系に関しては、様々な成膜手法に対して適当な成膜条件が酸素分圧と温度の関係で整理されている¹⁾。基板上で結晶方位が揃っていないと優れた超伝導特性は得られない。 c 軸配向の膜であっても、 a - b 軸の方向に揃っていないと臨界電流密度は低下することが知られている²⁾。基板上に 2 軸配向した薄膜が望まれる。図 6・1 はスパッタリング法によって成膜した YBCO 系 c 軸配向薄膜の表面の AFM 像の一例である。面内に並ぶ四角い組織は結晶粒が a - b 軸方向にも揃っていることの現れである。各結晶粒に見られるピラミッド状の縞模様はスパイラル様式の結晶成長を示している。

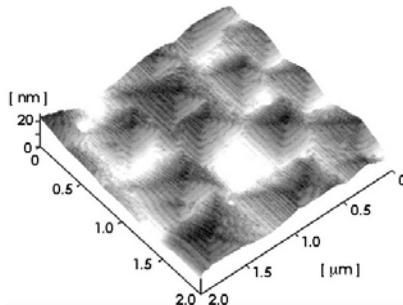
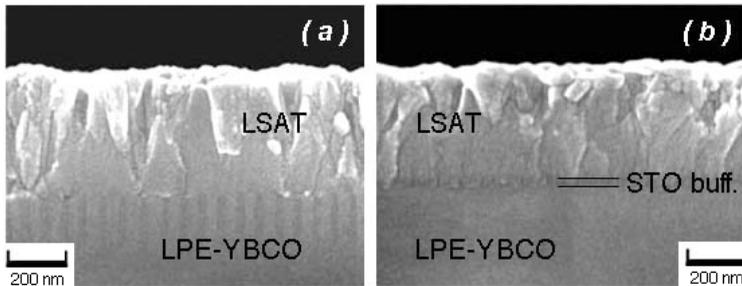


図 6・1 スパッタリング法によって成膜した YBCO 系 c 軸配向薄膜表面の AFM 像

(3) 薄膜積層技術

集積回路などの複雑な回路を作製するためには、超伝導体と絶縁体の積層構造が必要となる。これまで使用が試みられてきた材料としては SrTiO_3 、 CeO_2 、 SrSnO_3 、 MgO 、 LSAT ($(\text{LaAlO}_3)_{0.3}-(\text{SrAl}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3)_{0.7}$) などがある。材料の選択時には YBCO との反応性や格子整合性が議論されることが多い。しかし、現時点で材料選びに際し絶対的な指針があるとは言い難く、試行錯誤で目的に応じた適当な材料の組合せを見つけるしかない。格子定数が同程度であれば整合性が良いとされ、好適な組合せであると考えられがちであるが、そうではない場合もある。 LSAT は YBCO と同じ 0.386 nm の格子定数をもつペロブスカイトである。図 6・2(a) に液相エピタキシ (LPE) 法で作製した YBCO 単結晶厚膜上に堆積した LSAT スパッタ膜の断面 SEM 写真を示す。界面から柱状成長している部分が見られる。その上に YBCO 膜を積層したところ下地 LPE-YBCO との間に良好な絶縁性は得られなかった。粒界部に導電性の不純物が析出したものと考えられた。次いで SrTiO_3 バッファ層の介在を試みた。 SrTiO_3 の格子定数は 0.391 nm で、 YBCO と LSAT よりも大きい。界面近傍で始まる柱状成長は見られなくなった (図 6・2(b))³⁾。その上に積層した YBCO 膜と下地 LPE-YBCO との間には良好な絶縁性が得られた。層数の多い積層構造としては、 YBCO 系超伝導体と SrSrO_3 、 CeO_2 絶縁層を用いて酸化物 7 層の積層構造を用いてデバイスを試作した例が報告されている⁴⁾。



(a) バッファ層なし (b) SrTiO_3 バッファ層あり

図 6・2 LPE-YBCO 厚膜上に堆積した LSAT 絶縁層の断面 SEM 像

(4) 界面制御技術

薄膜の初期成長は、土台となるテンプレート形成の意味において非常に重要である。異種材料の上に堆積する場合、成膜開始直前の下地表面の状態が初期成長を決定づける。超伝導体上に超伝導体を積層する場合には、成膜開始直前の下地表面の状態によって接合界面は超伝導コンタクト、ジョセフソン接合、抵抗体のいずれにもなり得る⁵⁾。下地超伝導体の表面処理とその上の超伝導体の成膜条件を厳密に制御する必要がある。超伝導体上に金属を堆積する場合にも同様の界面制御が必要である。

(5) 回路レイアウト

ジョセフソン接合を集積化した回路を作製する際には、ランプエッジ型接合の使用が最も有望視されている。一様な回路レイアウトで構成される接合アレーにおいて回路動作に十分な小さなばらつきが達成されていても、同等数の接合を含む実際の回路動作は困難であった。

同じ幅の接合であっても下部超伝導電極の形状によって接合特性が違っていることが報告されている⁴⁾。図 6・3 は回路の上部超伝導電極を分割し、それぞれの接合を個々に評価した測定結果である。面積の小さな下部電極層に形成された接合のジョセフソン臨界電流値が大きくなっている。回路デザインに際しては回路レイアウトによる接合特性への影響も考慮する必要がある。

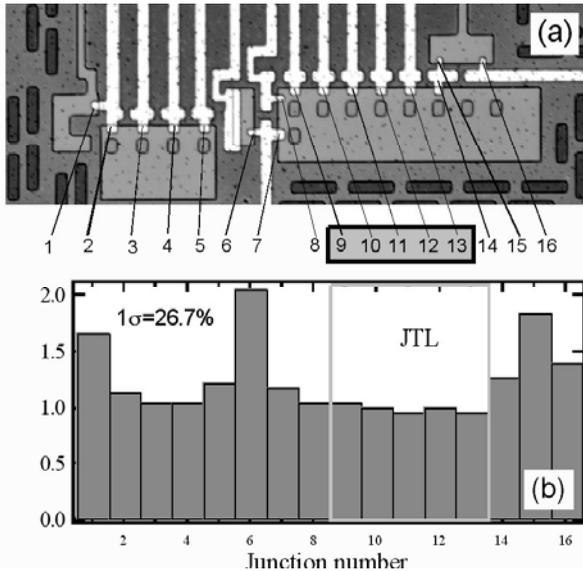


図 6・3 T-Flip Flop 回路 (a) を構成する個々のジョセフソン接合の相対臨界電流値 (b)

6-1-2 低 温

(執筆者：日高睦夫) [2008 年 12 月 受領]

金属超伝導体の超伝導転移温度 (T_c) は酸化物に比べて低く、その分冷却にコストがかかるが、安定して動作するデバイスを作りやすいという利点がある。本項では金属超伝導体をエレクトロニクス回路に用いるための材料・プロセス技術について概説する。

(1) 材 料

単体金属のうち液体ヘリウム温度 (4.2 K) 以上の温度で超伝導体に転移するものは、La, Nb, Pb, Ta, Tc の 5 種類である。古くは Pb が超伝導エレクトロニクスの材料として使われていた時代もあったが、現在では最も安定で、良質のジョセフソン接合が得られる Nb ($T_c = 9.2$ K) がエレクトロニクス材料として最も多く用いられている。本項では Nb を超伝導材料として用いた超伝導回路製造プロセス技術を紹介する。

また、Nb の窒化物である NbN は Nb ほどジョセフソン接合の作製が容易ではないが、 T_c が 17.3 K と Nb より高いことが魅力であり、超伝導電圧標準などの応用に用いられている⁹⁾。

(2) ジョセフソン接合

ジョセフソン接合は二つの超伝導体を弱く結合した構造をしており、超伝導回路におけるアクティブ素子として働く。Nb を使ったジョセフソン接合では、**図 6・4** に断面模式図を示す Nb/AIO_x/Nb 接合が一般的である⁷⁾。

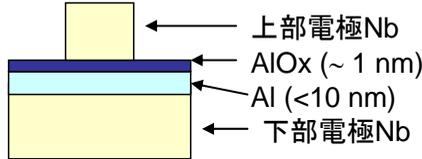


図 6・4 Nb/AIO_x/Nb 接合の断面模式図

この接合では、下部電極 Nb の上に 10 nm 以下の薄い Al を成膜し、Al 表面を熱酸化することによって 1 nm 程度の AIO_x を作製した後、上部電極の Nb を成膜する。この AIO_x は、超伝導クーパーペア及び準粒子が上下電極 Nb 間を伝導する際のトンネルバリアとなるため、極めて高い膜厚制御が要求されるが、熱酸化膜厚が飽和する現象を利用して、酸素分圧と酸化時間を制御することによって比較的容易に達成できる。ジョセフソン接合領域は、上部電極 Nb を接合領域を除いてエッチング除去することにより決められる。

(3) Nb 配線

Nb 配線は通常スパッタ法により成膜され、フォトリソグラフィを用いてパターンニング後、フッ素系ガスを用いた反応性異イオンエッチング (RIE) で加工する。一般に超伝導回路ではジョセフソン接合を含む超伝導リングが回路の基本となり、リングのインダクタンスが重要なパラメータとなる。Nb 配線は配線としてだけでなくインダクタンス要素としても使用されるため、Nb 配線の線幅制御は重要である。

(4) 層間絶縁膜

層間絶縁膜は文字どおり上下の Nb 膜を絶縁するために用いられるが、Nb 配線のインダクタンスを規定する誘電体の役割ももつため、膜厚設定にはこの点も考慮される。通常の超伝導回路では二酸化シリコン (SiO₂) が層間絶縁膜として用いられる。SiO₂ はスパッタ法で成膜され、フッ素系ガスの RIE で加工される。

(5) 抵抗体膜

超伝導回路でも回路パラメータとして抵抗は必要である。このため、Mo や Pd などの液体ヘリウム温度 (4.2 K) で常伝導体である金属が抵抗体として用いられる。これらの金属も Nb と同様にスパッタ法で成膜され、Mo はフッ素系 RIE で、Pd はイオンミリングで加工される。

(6) 集積回路プロセス

図 6・5 は超伝導集積回路の断面、上面写真の一例と、対応する回路図である。熱酸化したシリコン基板上に 3 層の Nb 配線層、1 層の Mo 抵抗体、Nb/AIO_x/Nb 接合と SiO₂ 層間絶縁層で構成されている⁸⁾。

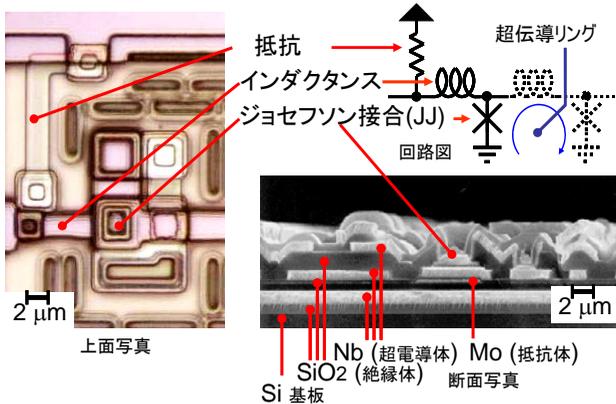


図 6・5 Nb 集積回路の上面，断面写真と対応する回路図

この回路の最小線幅は $2\mu\text{m}$ であり，半導体最新プロセスと比較すると数十倍の大きさであるが，この最小線幅のスイッチ回路が 40GHz のクロック周波数で動作することが実証されている．また，最小線幅 $1\mu\text{m}$ のシフトレジスタ回路では 120GHz クロックまでの動作が確認された⁹⁾．微細加工レベルを考慮すると，超伝導集積回路は半導体回路と比べて著しく低コストで高速デバイスを作製することが可能である．

(7) 多層プロセス

Nb 集積回路の集積度を向上するためには多層に積み上げることが有効である．また，超伝導回路は磁場に敏感であるため，配線から発生する磁場からジョセフソン接合を含むアクティブ層をシールドするために，完全反磁性体である超伝導層を両者の間に挟むことが有効である．これらの目的のために，多層プロセスが開発されている．多層プロセスでは，各 SiO_2 層を平坦化し，下部構造の段差を解消してから上層の Nb 層を成膜しており，現在までに図 6・6 に示すように Nb 10 層の多層化に成功している¹⁰⁾．

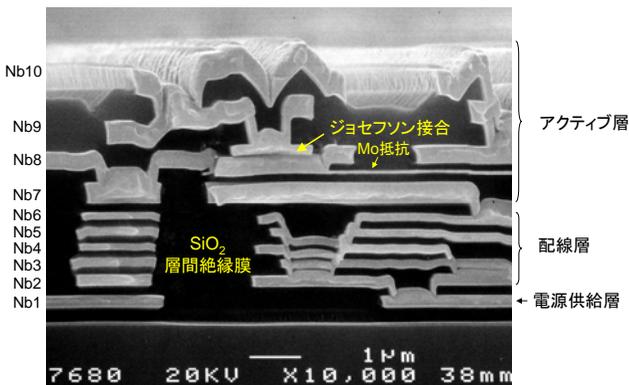


図 6・6 Nb 10 層構造の断面写真

図 6・6 では磁場の発生が大きい電源供給層を最下層に，間に配線層を挟んで，アクティブ層を最上層に配置することにより，電源供給層で発生する磁場を効果的にシールドすることに成功している。

■参考文献

- 1) R. H. Hammond and R. Bormann, Physica, C 162-164, 703, 1989.
- 2) D. Dimos et al., Phys. Rev., B41, 4038, 1990.
- 3) S. Adachi et al., IEICE Trans. Electron., E87-C, 206, 2004.
- 4) K. Tanabe et al., IEICE Trans. Electron., E91-C, 280, 2008.
- 5) B. H. Moeckly and K. Char, Appl. Phys. Lett., 71, 2526, 1997.
- 6) A. Shoji et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, 210, 2006.
- 7) M. Gurvitch, Appl. Phys. Lett., vol.42, 472, 1983.
- 8) S. Nagasawa et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.5, 2447, 1995.
- 9) H. Akaïke et al., Supercond. Sci. And Technol., vol.19, S320, 2006.
- 10) M. Hidaka et al., IEICE Trans. Electron., vol.E91-C, 318, 2008.

■S2 群-2 編-6 章

6-2 SQUID

(執筆者：田中三郎) [2008年8月 受領]

6-2-1 はじめに

超伝導現象は 1911 年のカメリン・オンネスによる水銀を用いた実験により確認されるが、SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) に用いられているジョセフソン効果が確認されたのは、その約 50 年後のことある¹⁾。そして、SQUID 磁気センサの研究開発は 1964 年にフォード自動車の研究員であった J. E. Mercereau らがジョセフソン接合を使用した回路で干渉効果を見出したことが切っ掛けとなって始まった^{2),3)}。

その後、1980 年代初頭には Nb (ニオブ) の薄膜化技術を用いた本格的な SQUID の研究が行われるようになり、マルチ (複数) チャネルシステム化などが研究されて実用化に近づいた⁴⁾。更に 1980 年代の後半には発見直後の高温超伝導体を用いた SQUID の研究が開始されるなど、様々なイノベーションがなされてきている⁵⁾⁻¹⁰⁾。

SQUID 磁気センサは超伝導量子干渉効果を用いており、地磁気の 1 億分の 1 の高感度で検出できる他に類のない超高感度磁気センサである。

6-2-2 動作原理

前述のジョセフソン効果は電子対 (2 個の超伝導電子) が単独の電子と同じような確率で薄い絶縁層をトンネルできる現象で、この効果を示す接合をジョセフソン接合と呼んでいる。このジョセフソン接合を超伝導リングの間に接続したものが SQUID 磁気センサ (日本語では超伝導量子干渉素子) であり、磁束量子単位の極めて微小な磁場を電圧に変換して検出する高感度磁気センサである。

SQUID にはジョセフソン接合が 1 個の rf SQUID と 2 個の dc SQUID があるが、rf SQUID はマルチチャンネル (複数チャンネル) 化したときチャンネル相互間での高周波の干渉が避けられないため、現在では dc SQUID が主流となっている。

SQUID は図 6・7 (a) に示すように二つのジョセフソン接合を含む超伝導リングで構成されており、バイアス電流を流すとジョセフソン接合では位相差に依存した超伝導電流が流れる。この状態でリングを貫く磁束 Φ が変化すると、遮蔽電流の影響を受けて二つの接合の臨界電流が磁束量子 Φ_0 ($= h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb) に等しい周期で振動し、それに伴い図 6・7 (b) に示すように電圧が変動する。つまり、磁束の変化を電圧の変化として取り出すことができる。実際に SQUID を磁気センサとして用いるときは一般的には図 6・8 に示す FLL 回路 (Flux Locked Loop) により磁束フィードバックをかけ、磁束をロックした状態で使用し、そのフィードバック電流の大きさを出力として取り出す。このような回路を用いることにより、量子磁束 Φ_0 の 10 万～100 万分の 1 まで感度を上げることが可能である。

動作原理は同じであるが、動作温度が 10 K 以下と低いニオブ系を LTS (低温) SQUID、高温超伝導薄膜を用いた 77 K 以上で動作する Y 系を HTS (高温) SQUID と区別する 경우가多い。低温 SQUID の動作には高価な液体ヘリウムが必要であるが、SQUID と一体でピックアップコイルを形成する積層技術も完成しており、優れた感度を有している。一方、高温 SQUID は安価な液体窒素で動作が可能であるが、積層技術が未完成で感度が 1 桁程度低いと

いう欠点がある。

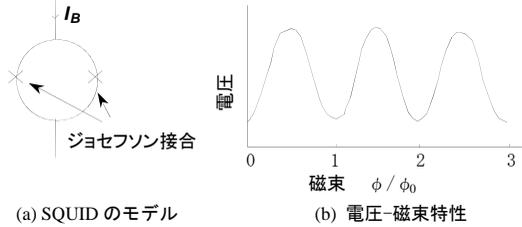


図 6・7 SQUID 動作原理

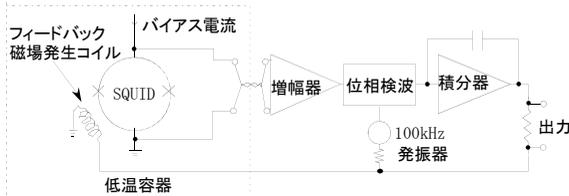


図 6・8 SQUID 駆動回路 (FLL 方式)

6-2-3 応用分野

SQUID 磁気センサ (SQUID 磁束計とも呼ばれる) は極低温下でないとう動作しないというのが欠点であるが、図 6・9 に示すように、今のところ地磁気の 1 億分の 1 から 10 億分の 1 の小さな磁界を計測することができる地球上にある唯一の超高感度磁気センサである。

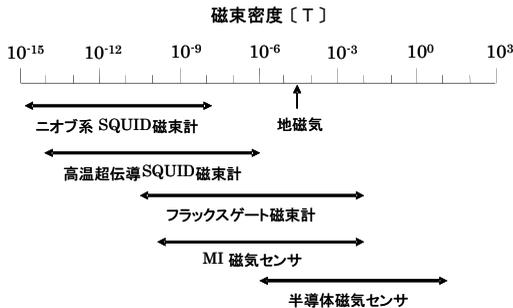


図 6・9 各種センサの磁気感度

従来から SQUID 磁気センサは生体工学において利用されてきており、MEG (脳磁場) や MCG (心臓磁場) 計測などで知られている。特に MEG 分野では SQUID を用いた臨床用の装置が製品化されており、てんかん治療や脳の高次機能の解析などに利用されている^{13), 14)}。これらの分野では一部を除いて主に、液体ヘリウム温度 (4.2 K) で動作するニオブ系の低温 SQUID 磁気センサが用いられている。

しかしながら近年では高温超伝導薄膜を用いた液体窒素温度 (77 K) で動作する高温

SQUID 磁気センサの性能が向上し、**図 6・10** に示すように、従来の分野に加えて、医療では免疫診断¹⁵⁾、リンパ節位置検出¹⁶⁾、非破壊検査では、食品内異物検査¹⁷⁾、銅管傷検査など、新しい応用が考えられてきている。

<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>生体磁気</u> ・ 脳磁場 (MEG) ・ 心臓磁場 (MCG) ・ <u>バイオ・医療</u> ・ 免疫診断 ・ DNAチップ ・ リンパ節位置検出 	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>金属鉱床探査</u> ・ 電磁探査法 ・ <u>非破壊検査</u> ・ 食品内異物 ・ 航空機 ・ 炭素繊維強化複合材料 ・ 半導体ウエハ
---	--

図 6・10 SQUID の応用分野

6-2-4 まとめ

最も高感度な低温 SQUID は技術的に確立されており、脳磁計や心磁計として臨床診断機器として使われている。今後は、磁気シールドなどの周辺を含めたシステムの低価格化が課題であると考えられる。また、高温 SQUID は生体磁気計測応用には、まだ感度が十分ではないものの、その冷却の容易性から従来の磁気センサを用いた計測システムの検出部を置き換えていくものと考えられる。

■参考文献

- 1) R. C. Jaklevic, J. Lambe, A. H. Silver, and J. E. Mercereau, Phys. Rev. Lett., vol.12, pp.159, 1964.
- 2) J. E. Zimmerman, J. A. Beall, M. W. Cromar, and R. H. Ono, Appl. Phys. Lett., vol.51, pp.617, 1987.
- 3) J. Clarke, W. M. Goubau, and M. B. Ketchen, J. Low Temp. Phys., vol.25, pp.99, 1976.
- 4) M. B. Ketchen and J. M. Jaycox, Appl. Phys. Lett., vol.40, pp.736, 1982.
- 5) J. G. Bednorz and K. A. Mueller, Z. Phys., vol.B64, pp.189-193, 1986.
- 6) J. Clarke, Nature, vol.333, pp.29-35, 1988.
- 7) S. Tanaka and H. Itozaki, Jpn. J. Appl. Phys., vol.27, pp.L622, 1988.
- 8) K. Enpuku, Y. Shimomura, and T. Kisu, J. Appl. Phys., vol.73, pp. 7929, 1993.
- 9) L. P. Lee, J. Longo, V. Vinetskiy, and R. Cantor, Appl. Phys. Lett., vol.66, pp.1539, 1995.
- 10) S. Tanaka, H. Itozaki, H. Toyoda, N. Harada, A. Adachi, K. Okajima, H. Kado, T. Nagaishi, and H. Kado, Appl. Phys. Lett., vol.64, pp.514, 1994.
- 11) K. Yokosawa, D. Suzuki, K. Tsukada, S. Ugai, T. Suzuki, and Y. Shimizu, Supercond. Sci. Technol., vol.13, pp.1286, 2000.
- 12) K. Tsukada, S. Yamasaki, N. Mizutani, G. Uehara, H. Kado, H. Akimoto, and T. Ogashiwa, IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol.3, pp.2965, 1993.
- 13) 松田瑞史, 栗城真也, 応用物理, vol.71, pp.1534, 2002.
- 14) 神鳥明彦, 応用物理, vol.74, pp.580, 2005.
- 15) K. Enpuku, K. Inoue, K. Soejima, K. Yoshinaga, H. Kuma, and N. Hamasaki, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.15, pp.660, 2005.
- 16) S. Tanaka, A. Hirata, Y. Saito, T. Mizoguchi, Y. Tamaki, I. Sakita, and M. Monden, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.11, pp.665-668, 2001.
- 17) S. Tanaka, H. Fujita, Y. Hatsukade, T. Nagaishi, K. Nishi, H. Ota, T. Otani, and S. Suzuki, Supercond. Sci. Technol., vol.19, pp.S280-S283, 2006.

■S2 群-2 編-6 章

6-3 超伝導検出器

(執筆著者：神代 暁) [2008年12月 受領]

6-3-1 直接検出器 (Direct Detector)

常伝導への転移点近傍で急峻な抵抗-温度特性をもつ超伝導体の特質を活かし、ミリ波帯から近赤外 (周波数: 0.1~150 THz) 領域で動作する冷却半導体ボロメータに比べ、高感度性または高速応答性に優れた熱型検出器を、超伝導転移端 (Transition Edge Sensor, 以後 TES と呼ぶ) ボロメータと呼ぶ。熱検出部である超伝導薄膜ストリップと熱浴との間の熱伝導率と電磁波吸収体熱容量の設定値により、入射電磁エネルギーによる熱を溜め込む高感度型と、熱の迅速な散逸により感度を犠牲にした高速応答型とがある。等価雑音電力と応答速度は、前者では $10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ と 10 Hz, 後者では $10^{-14} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ と 100 MHz のオーダーである。後者は Hot Electron Bolometer (以後 HEB と略す) とも呼ばれ、その動作原理は、後述するミキサや光子検出器としても利用される。また、波長が $30 \mu\text{m}$ 以上 (周波数が 10 THz 以下) となる遠赤外 (テラヘルツ) 領域では、吸収体ではなくアンテナにより入力信号波 (光) と結合する場合もある。動作温度は超伝導材料に依存し、Ti で $\sim 0.4 \text{ K}$, Nb で $\sim 4 \text{ K}$ が用いられている。

量子型検出器は、後述する超伝導トンネル型ミキサと同様の動作原理に基づく。電子のトンネルに伴うショット雑音が感度を決めるので、暗電流抑制が重要となり、そのため、低い暗電流の接合素子作製技術が確立された Nb を電極材料とし、動作温度を 1 K 以下に設定している。原理的に超伝導ギャップ周波数 (Nb では 700 GHz) の 2 倍の周波数までしか応答せず、TES に比べ狭帯域であるが、低等価雑音電力と高速応答性の両立が可能なので、動作温度揺らぎに鈍感という利点がある。

6-3-2 ヘテロダインミキサ (Heterodyne Mixer)

局部発振器からの供給波を周波数基準とし、被測定信号を高精度な周波数解析機器の入手しやすいマイクロ波帯の電気信号にダウンコンバートするヘテロダイン受信器の雑音温度は、低雑音増幅器のない $\sim 0.2 \text{ THz}$ 以上では、ミキサの雑音温度と変換効率に支配される。超伝導ミキサは、半導体ミキサに比べ低電圧・低温動作に起因する低雑音性と、電流-電圧 (I - V) 特性上の強い非線形性に起因する高変換効率の点で優れている。

超伝導トンネル型 (Superconductor-Insulator-Superconductor, 以後 SIS と略す) ミキサは、バイアス電圧によるエネルギーと入射電磁波のエネルギーの和が、トンネル接合素子電極における超伝導ギャップエネルギーに達したときに生じる Photon-Assisted Tunneling 現象をその動作原理として利用する。小さな暗電流・ I - V 特性上の強い非線形性・入出力におけるインピーダンス整合を満たすトンネル接合素子と周辺回路により、0.1~1 THz 帯の現存ミキサのなかで最も低雑音性に優れた、量子雑音限界の 2~20 倍の受信器雑音温度を実現している。また、最適動作に要する局部発振電力が半導体ミキサより 3 桁小さい $1 \mu\text{W}$ 程度で済む。量子型直接検出器同様、超伝導ギャップ周波数の 2 倍が原理的な上限周波数であり、周辺回路の電極損失が実用上の上限値を決める場合が多い。主な応用は電波天文観測と大気中の微量分子濃度計測である。

超伝導 HEB ミキサは、超伝導極薄膜微小ブリッジの両端を、熱浴とアンテナの機能を兼ね備える金属電極に接触させた構造をとる。電磁波の入射エネルギーを受け取った超伝導ブリッジ中の電子が、フォノンによる格子振動もしくは金属電極への拡散により冷却され、その過程で生じる $I-V$ 特性の変化を讀出す。入力帯域には SIS ミキサのような超伝導ギャップによる制限が存在せず、4 THz 程度以下において量子雑音限界の 10 倍程度の受信器雑音温度が報告されている。ミキサ出力信号帯域は、上記冷却時間の逆数で抑えられ、半導体 HEB ミキサに比べ 2~3 桁広い。最適動作に要する局部発振電力は、超伝導ブリッジ体積に依存し $0.1 \mu\text{W}$ のオーダーである。SIS ミキサに比べ、トンネル接合が不要、トンネル接合に起因するキャパシタが存在せず周辺回路が単純という利点がある反面、動作安定性・信頼性は劣る。

6-3-3 光子検出器 (Photon Counter)

(1) 高分解能エネルギー分光型 (STJ, TES)

超伝導光子検出器は、波長分散分光のような分光結晶や角度走査機構を用いず、赤外線から γ 線までの広い領域の光に対して単一光子のエネルギー分光が可能である。また、6 keV の中性子線に対するエネルギー分解能は、半導体検出器の 120 eV をはるかに凌ぐ $1\sim 10$ eV オーダを実現している。このうち、量子型を超伝導トンネル接合 (STJ) 検出器、熱型を超伝導転移端 (TES) カロリメータと呼ぶ。

STJ では、 ε の準粒子生成エネルギーに比べ非常に大きなエネルギー E の光子入射によって N 個励起された非平衡準粒子 (超伝導電子が破壊され生じる常伝導電子) をトンネル電流として読み出す。ただし、 $N = E/\varepsilon$ の関係がある。また、検出器の性能指数として最も重要なエネルギー分解能 ΔE は、 $\Delta E = 2.355 (F\varepsilon E)^{1/2}$ と表される。ただし、 F はフォノン因子 ($0 < F < 1$) である。すなわち、半導体 ($\varepsilon \sim 1$ eV) に対し STJ ($\varepsilon \sim 1$ meV) は高エネルギー分解能の点で優れており、STJ のなかでも ε の小さい超伝導材料ほど有利である。また、熱雑音ならびに暗電流によるショット雑音を低減するために、動作温度を極力下げる (~ 0.1 K) ことが望まれる。更に、励起された非平衡準粒子の超伝導電子への復帰や電極への拡散が生じる前に、準粒子トンネル電流に寄与させる素子構造が重要である。

TES では、 ΔE は吸収体のフォノンの揺らぎに起因し、 $\Delta E = 2.355\xi (k_B C)^{1/2} T$ で表される。ここで、 ξ は温度計の感度に関係した因子、 k_B はボルツマン定数、 C は吸収体の熱容量、 T は吸収体の温度である。この式より、温度計の高感度化、及び C と T の低減により ΔE を低減できる。TES では、急峻な温度変化を特徴とする超伝導転移を温度計、熱伝導率が高く高速応答に有利な常伝導金属を吸収体として利用する。この組合せは、 ΔE を下げるとともに、超伝導/常伝導金属界面の近接効果による超伝導転移温度の制御も可能とする。また、温度バイアス点を常に急峻な超伝導転移点に置くための電気熱負帰還が用いられ、直線性・ダイナミックレンジ拡大・応答速度向上に寄与している。

(2) 高速応答型 (Nanowire)

電流バイアスされた細い超伝導薄膜に、常伝導体への転移に必要な量以上のエネルギーをもつ光子が入射すると、入射箇所の薄膜が電圧転移する。すると、この部分に電気抵抗が生じ、バイアス電流が減り、転移箇所は元の超伝導状態に復帰する。すなわち、光子入射に起因するパルス出力が得られる。パルスの時間幅は、本質的には超伝導電子から格子へ熱を渡

す時間で決まり、超伝導材料を選べば、 10^{-11} sec オーダとなる。現状では、薄い超伝導電極に起因する大きなインダクタンスが足かせになり、1 GHz 程度のスイッチ周波数の実現にとどまっている。

1.3 μm や 1.55 μm 帯の波長の光による量子暗号通信用の検出器候補である Ge や InGaAs のアバランシェフォトダイオードは、雑音の影響低減とフォトン入射によるなだれ電流抑制のため、光子入射とタイミングを合わせた交流バイアス印加の必要性がある。交流バイアスの周波数が 10 MHz 程度以上になると、正孔・電子の再結合により、光子入射なしに出力パルスが観測され（暗計数）、素子の本質的な高速性を活かさない。

これに対し、標記原理に基づく超伝導光子検出器は、低雑音ゆえ直流バイアスで動作し、素子のもつ本質的な高速性を活かせる。また、タイミングジッタが 1 桁近く小さい利点ももつ。入射光子数に対する生成電子数（出力パルス数）の比で定義される量子効率をアバランシェフォトダイオード並み（約 20%）に向上させるため、入射光スポットに占める超伝導電極の面積率の向上や、レンズによる集光などの工夫が行われている。

この超伝導光子検出器は、量子暗号通信用だけでなく、その高速応答性を活かした飛行時間型分析機における検出器、例えば、高分子・生体分子の質量（分子量）分析や、中性子のエネルギー分光への応用を目指した研究開発が進められている。また、半導体検出器で困難な低エネルギーイオン検出の可能性も有する。

■S2 群-2 編-6 章

6-4 単一磁束量子回路

(執筆者：吉川信行) [2009年3月 受領]

超伝導体リング中の磁束は $\Phi_0 = 2.0679 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ を単位として量子化される。最小量子化磁束である単一磁束量子 (Single flux quantum : SFQ) を情報担体とする回路は単一磁束量子 (SFQ) 回路と呼ばれ¹⁾、極めて高速かつ低消費電力で動作する論理回路を構成できる。

SFQ 回路の基本回路要素であるジョセフソン伝送線路 (Josephson Transmission Line : JTL) の構造を図 6・11 (a) に示す^{1), 2)}。JTL は、超伝導配線で並列に接続された多数のジョセフソン接合から成る。それぞれの接合には上部からバイアス電流が供給される。図において、JTL の左端に微小電圧パルスを印加し、左端の接合電流がジョセフソン臨界電流値を超えると接合は電圧状態に遷移し、図に示すように SFQ が左端の超伝導ループ内に侵入する。これに伴い、超伝導ループには環状電流が流れるが、ループの左側の接合は電流が減少するためゼロ電圧状態に戻る。一方、ループの右側の接合は、バイアス電流と環状電流が加算されるため臨界電流値を超え、電圧状態に遷移する。その結果、SFQ は更に右側の超伝導ループに移動する。このようなプロセスが連続的に起こることにより、JTL 上を SFQ は高速に伝搬する。

JTL の等価回路を図 6・11 (b) に示す。図において臨界電流 I_c のジョセフソン接合は \times 印、超伝導ループのインダクタンスは L で示されている。一般にバイアス電流 I_b は I_c の 70~80% に設定される。SFQ 回路では、ジョセフソン接合が電圧状態にスイッチした後、すみやかにゼロ電圧状態に戻るために、接合には通常シャント抵抗が並列に接続される。また、JTL では、SFQ を線路中で自発的に伝搬させるために、回路パラメータを $LI_c = \Phi_0/2$ と設定する。

図 6・11 (c) には、SFQ が JTL を伝搬する際、接合に発生する電圧パルスの波形を示す。大きさ数百 μV 、幅が数 ps の電圧パルスが JTL 上を伝搬する様子が分かる。

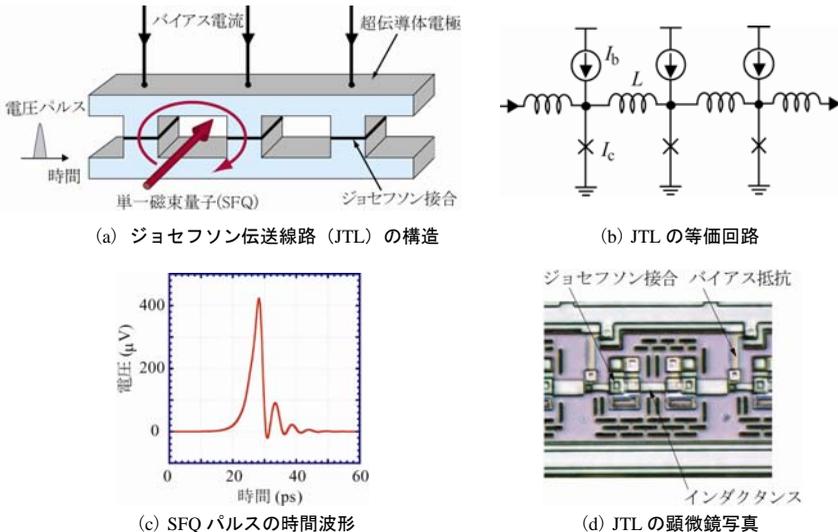


図 6・11 単一磁束量子 (SFQ) 回路

図 6・11 (d)には, Nb 集積回路プロセス技術を用いて製作した JTL の顕微鏡写真を示す.

回路パラメータや構造の工夫により, SFQ の伝搬を多様に制御することができる. 図 6・12 (a)~(c)には, 分岐回路, 合流回路, ならびに D フリップフロップを示す. 分岐回路では, A から入力された SFQ パルスは二つのパルスに増幅され B と C から一つずつ出力される. 合流回路では, A あるいは B から入力された SFQ パルスは C のみへ伝搬する.

D フリップフロップでは, インダクタンス L_s の値は通常より大きく設定され, B から入力された SFQ は, L_s で構成されるループにトラップされる. この状態で, A から SFQ パルスが入力されると I_{c2} は電圧状態にスイッチし, C から SFQ パルスが出力される. ループに SFQ がトラップされていないときに A から SFQ パルスが入力されると, I_{c3} が先に電圧状態にスイッチし, C から SFQ パルスは出力されない. B をデータ入力, A をクロック入力に対応させると, 本回路は D フリップフロップとして機能する.

SFQ 回路のスイッチ時間は以下のように与えられる. まず, ループ磁束 Φ と接合電圧 V には $V = d\Phi/dt$ なる関係がある. したがって, ループに SFQ が入るのに要する時間は, $\tau = \Phi_0/V = \Phi_0/I_c R_n$ 程度である. ここで, R_n は接合の常伝導抵抗であり, $I_c R_n$ 積は接合に発生する電圧である. 標準的な Nb プロセスでは, $I_c R_n = 0.37 \text{ mV}$ であり, 接合のスイッチ時間は約 5 ps となる. $I_c R_n$ 積の増大により回路のスイッチ時間は小さくなるが, これは限界電流密度 j_c を上げ, 接合面積を小さくすることで実現できる. j_c 対してスイッチ時間は, ほぼ $\tau \propto (j_c)^{-1/2}$ の関係がある³⁾. 回路の限界スピードは, 超伝導材料のエネルギーギャップにより決まり, Nb では 0.7 ps が限界となる. 一方, 接合に電圧パルスが発生すると $I_c \Phi_0$ なるエネルギーが消費される. 4.2 K 動作時の熱雑音を考慮すると, I_c の下限は $100 \mu\text{A}$ 程度であり, 接合で消費されるエネルギーは 10^{-19} J のオーダーとなる. この値は, CMOS に対して 3~4 桁小さい.

これまでに SFQ 回路を用いたマイクロプロセッサやネットワークスイッチなどが試作され, いずれも 20~40 GHz での高速動作が実証されている^{3),4)}.

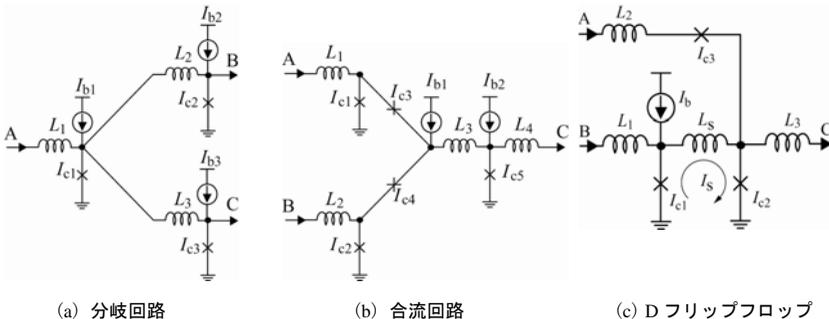


図 6・12 SFQ 回路の要素回路

■参考文献

- 1) K. K. Likharev and V. K. Semenov, "RSFQ/logic/memory family," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.1, no.1, pp.3-28, 1991.
- 2) T. Van Duzer and C. W. Turner, "Principle of superconducting devices and circuits," Prentice Hall, 1999.
- 3) 吉川信行, "単一磁束量子回路を用いた超高速マイクロプロセッサの開発とその展望," 通学論(C),

vol.J91-C, no.3, pp.183-193, 2008.

- 4) H. Hayakawa, et. al., "Superconducting digital electronics," Proc. IEEE, vol.92, pp.1549-1563, 2004.